

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

SÉFORA BERTOLDI

**SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO DE LAGOS GLACIAIS NA SUB-BACIA
CHAJOLPAYA, NORTE DA CORDILHEIRA REAL, BOLÍVIA**

Porto Alegre

2023

SÉFORA BERTOLDI

**SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO DE LAGOS GLACIAIS NA SUB-BACIA
CHAJOLPAYA, NORTE DA CORDILHEIRA REAL, BOLÍVIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Universidade Federal do Rio Grande do Sul
como requisito para a obtenção do título de
Bacharela em Geografia.

Orientadora: Prof^a. Dra. Kátia Kellem da Rosa

Porto Alegre

2023

CIP - Catalogação na Publicação

Bertoldi, Séfora
SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO DE LAGOS GLACIAIS NA
SUB-BACIA CHAJOLPAYA, NORTE DA CORDILHEIRA REAL,
BOLÍVIA / Séfora Bertoldi. -- 2023.
79 f.
Orientadora: Kátia Kellem da Rosa.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Geociências, Bacharelado em Geografia, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Lagos glaciais. 2. GLOF. 3. Retração glacial. 4.
Riscos criosféricos. 5. Sensoriamento remoto. I. da
Rosa, Kátia Kellem, orient. II. Título.

O mundo não está nos seus livros e
mapas. O mundo está lá fora!

O Hobbit

Para Waldemar, Janete, Rodrigo, Douglas, Davi,
Diego, Magali e Mateus (em memória).

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Waldemar e Janete, os meus maiores exemplos, que trabalharam MUITO duro na agricultura familiar para que meus irmãos e eu pudéssemos estudar!

Agradeço aos meus irmãos, Rodrigo e Douglas, pelo apoio e carinho de sempre!

Agradeço ao meu sobrinho e afilhado Davi e minha afilhada Elisa, por chegarem trazendo tanto amor e alegria!

Agradeço ao meu companheiro Diego, pelo apoio, amizade e compreensão!

Agradeço à UFRGS, por todos os conhecimentos, aprendizados, experiências e encantamentos que já me proporcionou!

Agradeço à Universidade do Porto, pelo intercâmbio incrível que eu pude viver e as pessoas incríveis que eu pude conhecer. Ficará para sempre na minha memória!

Agradeço à Professora Kátia, pela oportunidade que me concedeu de participar da iniciação científica no Centro Polar e Climático da UFRGS, pela extraordinária orientação do TCC e seu tempo dedicado, e por não desistir de mim, lembrarei sempre com muito carinho!

Agradeço aos professores da Geografia UFRGS, por todo conhecimento transmitido e por tornarem este curso tão maravilhoso!

Agradeço aos amigos(as) e colegas da Geografia, por compartilharem momentos felizes e de muito aprendizado comigo, especialmente à Édna Siqueira, Elen Lima, Bruna Barreto, Leonardo Ribeiro, Davis Schroetter, Janaína Noronha, Roger Machado, Michele Gomes, Renan Vallejo, Natália Martins e Tamiris Alves!

Agradeço às minhas amigas, que estão sempre presentes na minha vida, pela amizade e parceria, especialmente à Paula Fusiger, Kerlin Conzatti, Maira da Costa, Adriana Conzatti, Elisa Stevens, Amanda de Souza e Natália Marini!

Agradeço a mim mesma, por persistir!

RESUMO

Aproximadamente 75% da água doce disponível na Terra está congelada e localiza-se em regiões como o Ártico, Antártica e em calotas de gelo e geleiras em ambiente de montanha. O aumento gradual da temperatura global em função do aumento das emissões de gases de efeito estufa antrópicos intensificou as mudanças climáticas. Grande parte das geleiras em todo o planeta vem sofrendo retração nas últimas décadas como resposta às mudanças climáticas globais. As geleiras de montanha e as calotas polares são extremamente sensíveis à mudança de temperatura. A perda de área das geleiras em todas as regiões do mundo, incluindo as localizadas em ambiente de montanha, ao longo dos séculos XX e XXI, resultou em aumento do número de lagos glaciais. O presente estudo teve como objetivo investigar a suscetibilidade de inundação associada aos lagos glaciais alimentados por geleiras tropicais, localizadas em uma área de estudo piloto da sub-bacia Chajolpaya, na porção norte da Cordilheira Real, na Bolívia, utilizando a metodologia AHP - Análise Hierárquica Ponderada, com auxílio de ferramentas do sensoriamento remoto e geoprocessamento. Foram utilizadas imagens de satélite, referentes aos anos de 1999, 2011, 2015 e 2022, a partir das quais foram selecionados 16 lagos glaciais na área de estudo, mediante critérios estabelecidos, para serem analisados e monitorados. Os resultados encontrados, utilizando a metodologia AHP, indicaram que dois lagos possuem muito alta suscetibilidade à inundação (GLOF - Glacial Lake Outburst Flood), quatro lagos possuem alta suscetibilidade a GLOF, seis lagos possuem média suscetibilidade, nenhum lago possui baixa suscetibilidade e quatro possuem muito baixa suscetibilidade a GLOF. Tais resultados indicam a existência de riscos criosféricos associados aos lagos de muito alto e alto risco, e que podem impactar as comunidades a jusante.

Palavras-chave: lagos glaciais, GLOF, retração glacial, riscos criosféricos, sensoriamento remoto.

ABSTRACT

Approximately 75% of the fresh water available on Earth is frozen and is located in regions such as the Arctic, Antarctica and in ice caps and glaciers in mountain environments. The gradual increase in global temperature due to the increase in anthropogenic greenhouse gas emissions has intensified climate change. Most of the glaciers across the planet have been retreating in recent decades as a response to global climate change. Mountain glaciers and polar ice caps are extremely sensitive to temperature changes. The loss of glacier area in all regions of the world, including those located in mountain environments, over the 20th and 21st centuries has resulted in an increase in the number of glacial lakes. The present study aimed to investigate the flood susceptibility associated with glacial lakes fed by tropical glaciers, located in a pilot study area of the Chajolpaya sub-basin, in the northern portion of the Cordillera Real, in Bolivia, using the AHP methodology - Analytical Hierarchy Process, with the aid of remote sensing and geoprocessing tools. Satellite images were used, referring to the years 1999, 2011, 2015 and 2022, from which 16 glacial lakes in the study area were selected, according to established criteria, to be analyzed and monitored. The results found, using the AHP methodology, indicated that two lakes have very high susceptibility to flooding (GLOF - Glacial Lake Outburst Flood), four lakes have high susceptibility to GLOF, six lakes have medium susceptibility, no lake has low susceptibility and four have very low susceptibility to GLOF. These results indicate the existence of cryospheric risks associated with very high and high risk lakes, which can impact downstream communities.

Keywords: glacial lakes, GLOF, glacial retreat, cryospheric hazards, remote sensing.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP - *Analytical Hierarchy Process* / Análise Hierárquica Ponderada

FAHP - *Fuzzy Analytical Hierarchy Process*

GLIMS - *Global Land Ice Measurements from Space*

GLOF - *Glacial Lake Outburst Flood*

LANDSAT - *Land Satellites*

MDE - Modelo Digital de Elevação

NDWI - *Normalized Difference Water Index*

SENAMHI - Serviço Nacional de Meteorologia e Hidrologia da Bolívia

USGS - *United States Geological Services*

UTM - Universal Transversa de Mercator

WGS 84 - *World Geodetic System 1984*

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Zonas de acumulação e ablação de uma geleira	20
Figura 2: GLOF - Inundação causada por desprendimento de parte da geleira	22
Figura 3: Evolução do lago Palcacocha de 1941 a 2018	23
Figura 4: Distrito de Nueva Florida, em Huaraz, no Peru, ano de 2016	28
Figura 5: Propriedades radiométricas da neve e gelo.....	31
Figura 6: Comportamento espectral da água em diferentes estados físicos	32
Figura 7: Sub-bacia de estudo e lagos glaciais analisados.....	35
Figura 8: Climograma da estação Hichucota no período 1992-2021	38
Figura 9: <i>Buffer</i> de 250 m realizado nos lagos glaciais do ano de 2022	42
Figura 10: Classificação dos parâmetros na tabela de atributos	46
Figura 11: Fluxo realizado para aplicação do método AHP	46
Figura 12: Gráfico da variação de área dos lagos glaciais entre 1999 e 2022.....	51
Figura 13: Mapa de variação da área dos lagos entre 1999 e 2022	52
Figura 14: Mapa da cobertura glacial na área de estudo	56
Figura 15: Mapa de declividade da área de estudo.....	59
Figura 16: Mapa de elevação da área de estudo	60
Figura 17: Lago com barramento rochoso	61
Figura 18: Lago com barramento de moraina	62
Figura 19: Lago sem barramento	62
Figura 20: Mapa de localização da comunidade mais próxima à área de estudo	63
Figura 21: Mapa de suscetibilidade a GLOF	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados e respectivas fontes utilizadas na pesquisa	37
Tabela 2: Especificações das imagens de satélite utilizadas	38
Tabela 3: Classificação de risco referente à área dos lagos	40
Tabela 4: Classificação de risco referente à área de cobertura glacial	41
Tabela 5: Classificação de risco referente à distância entre lagos e geleira adjacente	42
Tabela 6: Classificação de risco referente à elevação dos lagos	43
Tabela 7: Classificação de risco referente ao tipo de barramento dos lagos	44
Tabela 8: Classificação de risco referente à distância entre os lagos e o rio	45
Tabela 9: Parâmetros e suas respectivas classes e pesos	47
Tabela 10: Área dos lagos glaciais em km ² para cada ano analisado.....	50
Tabela 11: Suscetibilidade a GLOF dos lagos estudados	64

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO GERAL	15
1.1.1 Objetivos Específicos	15
1.2 JUSTIFICATIVA	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 GELEIRAS TROPICAIS NO AMBIENTE DE MONTANHA	17
2.2 LAGOS GLACIAIS E GLOF	20
2.3 RISCOS CRIOSFÉRICOS E VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL	26
2.4 SENSORIAMENTO REMOTO PARA IDENTIFICAR CORPOS D'ÁGUA	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	35
3.2 CLIMA DA ÁREA DE ESTUDO.....	35
3.3 SELEÇÃO DOS DADOS	36
3.4 DELIMITAÇÃO DA SUB-BACIA	39
3.5 PARÂMETROS PARA ANÁLISE DE RISCO	39
3.5.1 Parâmetro Área dos Lagos Glaciais	39
3.5.2 Parâmetro Área da Cobertura Glacial	40
3.5.3 Parâmetro Distância dos Lagos Glaciais até a Geleira Adjacente	41
3.5.4 Parâmetro Declividade entre os Lagos Glaciais e a Geleira Adjacente	42
3.5.5 Parâmetro Elevação dos Lagos Glaciais	43
3.5.6 Parâmetro Tipos de Barragens dos Lagos Glaciais	44
3.5.7 Parâmetro Distância da Sub-bacia até a Comunidade Mais Próxima	44
3.5.8 Parâmetro Distância dos Lagos Glaciais até o Rio	45
3.6 APLICAÇÃO DA ANÁLISE HIERÁRQUICA PONDERADA	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1 VARIAÇÃO DA ÁREA DOS LAGOS GLACIAIS.....	49
4.2 CARACTERÍSTICAS DOS LAGOS GLACIAIS E DO SISTEMA PARAGLACIAL	54
4.2.1 Área dos Lagos Glaciais em 2022	54
4.2.2 Cobertura Glacial da Sub-bacia	55
4.2.3 Distância dos Lagos Glaciais até a Geleira Adjacente	56
4.2.4 Declividade entre os Lagos Glaciais e a Geleira Adjacente	58

4.2.5 Elevação dos Lagos Glaciais	59
4.2.6 Tipo de Barragem dos Lagos Glaciais	61
4.2.7 Distância da Sub-bacia até a Comunidade Mais Próxima	63
4.2.8 Distância dos Lagos Glaciais até o Rio.....	64
4.3 SUSCETIBILIDADE DE INUNDAÇÃO ASSOCIADA AOS LAGOS GLACIAIS ..	64
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

1. INTRODUÇÃO

Aproximadamente 75% da água doce disponível na Terra está congelada e localiza-se em regiões como o Ártico, Antártica e em calotas de gelo e geleiras em ambiente de montanha. Essa água doce congelada faz parte da Criosfera terrestre, termo que caracteriza os ambientes de neve e gelo do planeta, inclusive a água salgada do gelo marinho e o solo congelado (CHRISTOPHERSON; BIRKELAND, 2017). Pode-se dizer, portanto, que as porções da hidrosfera e da litosfera que se encontram permanentemente congeladas são chamadas de Criosfera (CHRISTOPHERSON; BIRKELAND, 2017).

Conforme Simões (2004), o termo “geleira” é derivado de “gelo” – do latim *gēlu*, que significa gelo, geada, frio intenso - mais o sufixo “eira”, que denota acúmulo. Ainda de acordo com Simões (2004), uma geleira ou um glaciar “é uma massa de neve e gelo que se movimenta por fluência (“*creep*”), e muitas vezes por deslizamento basal, de um ponto mais alto para outro mais baixo”. Onde a acumulação de neve anual for maior do que a ablação haverá a formação de uma geleira, a qual poderá ocorrer de diferentes formas, como mantos de gelo, plataformas de gelo, calotas de gelo, geleiras de *piemonte*, além de vários tipos de geleira de montanha, como geleiras de vale e geleiras de anfiteatro (SIMÕES, 2004).

O aumento gradual da temperatura global em função do aumento das emissões de gases de efeito estufa antrópicos levou às recentes mudanças climáticas globais. A maioria das geleiras em todo o planeta vem sofrendo retração nas últimas décadas como um dos impactos das mudanças climáticas globais (CHRISTOPHERSON; BIRKELAND, 2017). As geleiras das montanhas são extremamente sensíveis à mudança de temperatura (KUMAR; RANJAN; VERMA, 2021). A tendência global de perda de área das geleiras, incluindo as localizadas em ambiente de montanha, ao longo dos séculos XX e XXI, resultou em aumento do número de lagos glaciais (BAJRACHARYA; MOOL, 2009; WILSON *et al.*, 2018).

Os lagos glaciais se formam atrás de barragens de morainas ou atrás de barragens de gelo e o rompimento dessas barragens pode resultar em uma inundação, evento conhecido como GLOF - *Glacial Lake Outburst Flood* (BENN; EVANS, 2010; ITURRIZAGA, 2011). Nesses eventos, a água derretida acumulada no lago glacial é liberada repentinamente (BENN; EVANS, 2010; ITURRIZAGA, 2011), podendo gerar inundações a jusante, com impactos socioeconômicos e

geomórficos (RICHARDSON; REYNOLDS, 2000; CAREY, 2005). Os lagos que apresentam risco de rompimento são geralmente associados aos mais próximos à geleira, lagos em setor de alta declividade, lagos em locais em que a geleira está retraindo e lagos represados por morainas com pequena dimensão (HU *et al.*, 2022; GAIKWAD *et al.*, 2022). Diversas comunidades em ambiente de montanha estão em área de risco a GLOF (WORNI *et al.*, 2012; ANACONA; MACKINTOSH; NORTON, 2015; ZHANG *et al.*, 2023).

As geleiras de ambiente de montanha possuem um papel de grande relevância no sistema hidrológico e socioeconômico de diversos países, sendo fundamentais para as comunidades locais, pois fornecem água para o consumo doméstico, produção de energia em pequenas centrais hidroelétricas, suprimento de água para agricultura, além do seu grande valor paisagístico. Na capital da Bolívia, La Paz, cerca de 70% da água utilizada pela população provém das geleiras (RAMIREZ; BERGER; RAMALLO, 2006). As geleiras tropicais possuem ligação com lagos glaciais e rios, os quais são considerados relevantes para diversas comunidades bolivianas. Importantes rios bolivianos fazem parte da bacia do rio Madeira, compondo a região hidrográfica do Amazonas (RIBEIRO, 2014), e transportam sedimentos originados dos Andes (AYES RIVERA *et al.*, 2019).

1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo geral investigar a suscetibilidade de inundação associada aos lagos glaciais influenciados por geleiras tropicais em uma área localizada na sub-bacia hidrográfica Chajolpaya, localizada na porção norte da Cordilheira Real, na Bolívia, utilizando dados de sensores remotos orbitais.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Investigar as variações de área dos lagos no período 1999-2022;
- b) Investigar as características dos lagos (dimensões, proximidade da margem glacial, presença de morainas e o contexto de declividade e elevação) por sensoriamento remoto e geoprocessamento;

- c) Analisar a suscetibilidade de inundação associada ao rompimento dos lagos glaciais na área de estudo, utilizando o método AHP.

1.2 JUSTIFICATIVA

As geleiras tropicais de montanha são bons indicadores das mudanças climáticas e o seu monitoramento é importante para compreender a relação entre a Criosfera e as alterações climáticas. Os estudos de geleiras de montanha, lagos glaciais e GLOF são importantes também para as comunidades que vivem na região da Cordilheira Real, em termos de disponibilidade de água e dos riscos criosféricos relacionados, podendo a presente pesquisa contribuir para o entendimento dos riscos criosféricos associados aos lagos glaciais, a partir da aplicação e discussão do método AHP na área de estudo. Conforme Costa (2022), as mudanças ambientais podem afetar o modo de vida e a saúde das comunidades. Ao mesmo tempo, muitas pessoas que não vivem nessas áreas podem ser afetadas por mudanças na Criosfera, a exemplo do aumento do nível do mar.

Além disso, a compreensão da evolução temporal da área dos lagos em resposta à retração glacial na Cordilheira Real, com dados de sensores remotos, pode contribuir para comparar com outros estudos realizados sobre GLOF na região. A geração de uma base de dados sobre as características dos lagos pode colaborar para o aprimoramento das discussões sobre os parâmetros que são relevantes em uma análise de risco por geoprocessamento.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 GELEIRAS TROPICAIS NO AMBIENTE DE MONTANHA

Os ecossistemas de montanha têm uma longa tradição de pesquisa. No ano de 1802, Alexander von Humboldt já conduzia seu trabalho de campo em Chimborazo, no vale do vulcão do Equador. Ao longo das últimas décadas, as regiões montanhosas vêm sendo reconhecidas por seus importantes registros de variabilidade climática, abrangendo diferentes escalas temporais e espaciais (MESSERLI, 2001). Mais de 99% das geleiras tropicais estão localizadas nos Andes (KASER, 1999), e dos 2.500 km² de cobertura glacial existente na América do Sul, 70% encontram-se no Peru, 20% na Bolívia e 4% no Equador e Colômbia. Durante as estações secas, com baixa ou nenhuma ocorrência de chuvas, os países andinos são muito dependentes da água doce das bacias glaciais, que é utilizada para uso doméstico, agrícola ou industrial (RIBEIRO, 2014).

Essas geleiras fazem parte da Criosfera. O termo “Criosfera” é utilizado para denominar a parte da hidrosfera que se encontra congelada, ou seja, é a porção congelada das águas da Terra, o que inclui feições glaciais como mantos de gelo, calotas e campos de gelo, geleiras, plataformas de gelo, gelo marinho, gelo de solo subsuperficial e solo congelado, sendo este último também chamado de *permafrost* (CHRISTOPHERSON; BIRKELAND, 2017). Pode-se dizer, ainda, que a Criosfera é todo o gelo e neve existentes na superfície terrestre, sendo o gelo de água doce, o gelo marinho, a cobertura de neve, as geleiras de montanha, os mantos de gelo, e o gelo no subsolo, os principais componentes desta (SIMÕES, 2004).

O conceito de geleira, de acordo com Simões (2004, p. 132), pode ser descrito da seguinte forma:

Uma massa de neve e gelo que se move continuamente por fluência (“*creep*”), e muitas vezes por deslizamento basal, de um ponto mais alto para outro mais baixo. Se flutuante, espalha-se continuamente em direção à água aberta. Forma-se onde a acumulação anual de neve é maior que a ablação. As principais formas de geleiras são: mantos de gelo, plataformas de gelo, calota de gelo, geleiras de *piemonte*, e vários tipos de geleiras de montanha (e.g., geleira de vale, geleira de anfiteatro).

De acordo com Paterson (1994), as geleiras são resultado do clima e da topografia. Sua formação se dá pela precipitação de neve, gelo, chuva e até mesmo

avalanche de rocha. Para que haja acúmulo desse material ao longo do tempo e, conseqüentemente, formação da geleira, é preciso que a precipitação nos meses úmidos seja maior do que a fusão/evaporação durante os meses secos. Simões (2004) define geleira de montanha como “qualquer geleira que flui entre as paredes de um vale de montanha, refletindo as principais feições da topografia subglacial”. As geleiras localizadas em ambiente de montanha podem caracterizar-se por diferentes morfologias e incluir geleiras de circo, montanha e de vale, entre outras (BAJRACHARYA; MAHARJAN; SHRESTHA, 2019).

A retração das geleiras e a redução da cobertura de neve ao longo dos anos tem grande influência no clima, visto a capacidade reflexiva do gelo e neve ser um importante regulador da temperatura atmosférica (SCHOOLMEESTER, 2018). As superfícies de neve e gelo, que possuem um alto albedo, ou seja, possuem alta capacidade de refletir a radiação solar, refletem a maior parte da energia solar de volta ao espaço (SCHOOLMEESTER, 2018). Com o desaparecimento dessas superfícies de neve e gelo, a radiação acaba atingindo áreas mais escuras, as quais absorvem mais a radiação, contribuindo para um aumento de temperatura naquela área que antes era mais fria (SCHOOLMEESTER, 2018). E esse aquecimento contribuirá ainda mais para o desaparecimento da neve e gelo, provocando um processo chamado de *feedback* positivo (SCHOOLMEESTER, 2018).

Conforme Cuffey e Paterson (2010), a análise de geleiras é um indicador das mudanças ocorridas no passado e um indicador natural da variabilidade climática regional, fornecendo subsídios relevantes para análises de mudanças no clima. Da mesma forma, Vuille *et al.* (2008) considera que as geleiras são sensíveis às mudanças climáticas, visto que estão constantemente perto de condições de degelo. O rápido tempo de resposta das geleiras, com relação ao seu avanço e retração, em relação às variações climáticas, demonstra que podem ser consideradas excelentes indicadores das mudanças climáticas.

Flohn *et al.* (1990) *apud* Thompson, Mosley-Thompson e Henderson (2000) explica que o recuo das geleiras tropicais de alta altitude ocorre ao mesmo tempo em que ocorre o aumento do vapor de água na troposfera média. De acordo com Thompson, Mosley-Thompson e Henderson (2000), as massas de gelo de elevada altitude, localizadas nos trópicos, encontram-se muito próximas ao seu ponto de fusão, respondendo rapidamente a qualquer variação de temperatura. Enquanto as geleiras localizadas em áreas temperadas avançam durante o inverno austral, nas

áreas tropicais a recarga das geleiras ocorre durante os meses mais quentes do verão austral, fazendo com que os processos de ablação e acumulação ocorram ao mesmo tempo, diferentemente das geleiras de altas latitudes. Esse fato torna o estudo de geleiras tropicais um excelente indicador de mudanças climáticas.

As geleiras tropicais, em função de sua baixa latitude e alta altitude, recebem mais radiação solar do que as geleiras de latitude média. Além disso, as geleiras tropicais andinas sofrem ablação ao longo do ano todo, diferentemente das geleiras de latitudes médias, que sofrem acúmulo no inverno e ablação no verão, (VUILLE *et al.*, 2008; RABATEL *et al.*, 2013). As geleiras tropicais acumulam massa durante a estação chuvosa do verão (novembro a abril) e passam por maior ablação durante a estação seca do inverno (maio a outubro) e períodos entre as estações, quando a radiação solar é mais intensa (JORDAN *et al.*, 1980). Em relação aos fatores que mais contribuem para o aumento da linha de neve, na zona extratropical, o que prevalece é o déficit de precipitação, enquanto na zona intertropical, o aumento da temperatura desempenha um papel mais dominante (FAVIER; WAGNON; RIBSTEIN, 2004; SCHAUWECKER *et al.*, 2017).

É na zona de acumulação que as geleiras recebem neve e ocorre ganho de massa glacial. Avalanches nas encostas de montanhas também podem acrescentar neve à zona de acumulação. Já na zona abaixo da linha de equilíbrio ocorrem diversos processos de perda, conhecidos como ablação. As variações entre os ganhos (acumulação) e as perdas (ablação) de massa glacial são o que determinam o avanço ou retrocesso anual da geleira, de acordo com o balanço de massa anual (CHRISTOPHERSON; BIRKELAND, 2017). Quando o balanço de massa é positivo, a geleira aumenta em espessura e velocidade, tendo como consequência a sua expansão, ao passo que com o balanço negativo, a geleira diminui em espessura e velocidade, e retrai (RIBEIRO, 2013). Conforme Cuffey e Paterson (2010), as geleiras são dinâmicas e vários elementos contribuem para a sua formação e expansão. A variação líquida da massa glacial entre a mesma data em anos sucessivos define o balanço de massa anual. A Figura 1 exemplifica as zonas de acumulação e ablação das geleiras de montanha.

Figura 1 - Zonas de acumulação e ablação de uma geleira



Fonte: Ribeiro, 2013.

O processo de avanço ou retração de uma geleira está relacionado ao conceito de equilíbrio. Pode-se dizer que uma geleira está em equilíbrio quando as entradas de neve são semelhantes às perdas. Portanto, a geleira está em desequilíbrio quando as entradas de neve são maiores ou menores do que as perdas por derretimento, deflação por vento, sublimação e desprendimento. Assim, a partir do balanço de massa de uma geleira, é possível constatar se a mesma está em equilíbrio ou não (CHRISTOPHERSON; BIRKELAND, 2017).

Dessa forma, a retração da geleira de montanha em direção à cabeceira do vale pode ser causada por fatores que influenciam no balanço de massa glacial, como o aumento da temperatura ou decréscimo de neve ou, ainda, a combinação dos dois ao longo do tempo (BAJRACHARYA; MAHARJAN; SHRESTHA, 2019). As geleiras das montanhas são um recurso hídrico crítico para quase dois bilhões de pessoas e estão ameaçadas pelo aquecimento global (ROUNCE *et al.*, 2023).

2.2 LAGOS GLACIAIS E GLOF

Os lagos glaciais podem ser: lago de erosão glacial, lago represado por moraina, lago represado por gelo, lago supraglacial, lago subglacial, até mesmo lagos represados por materiais gerados por deslizamento de terra, avalanche, fluxo de detritos, ente outros (DING *et al.*, 2021). Os lagos se originam, principalmente, de

duas formas: a montante de barragens de morainas ou a montante de barragens de geleiras (BENDLE, 2020). Os lagos represados por morainas geralmente se desenvolvem atrás de morainas terminais formadas na Pequena Idade do Gelo (BENN *et al.*, 2012; WESTOBY *et al.*, 2014). Há lagos que surgem quando alguma drenagem de água de degelo acaba sendo bloqueada em função do avanço da frente de outra geleira ou quando essa se torna mais espessa. Portanto, pode-se dizer que o crescimento de lagos represados por geleiras está relacionado com o equilíbrio do balanço de massa das geleiras e o clima (BENDLE, 2020).

Conforme Carrivick e Russell (2013), os lagos proglaciais podem ocorrer na frente e nas laterais das geleiras de montanha e são mais frequentemente represados por gelo, rocha, detritos de morainas ou detritos de movimentos de massa. Os canais proglaciais apresentam padrão de fluxo tipicamente sazonal e preferencialmente diurno, além de fluxos moderados até *Jökulhlaup* (SLAYMAKER, 2011), termo utilizado pela comunidade glaciológica para denominar a liberação repentina de água em grande volume (SIMÕES, 2004). O que define um ambiente ser proglacial é a sua localização às margens de uma geleira ou manto de gelo. Isso significa dizer que o ambiente proglacial acompanha a movimentação da margem da geleira, ou seja, quando a geleira recua, a zona de deposição proglacial também recua e os materiais que estavam abaixo da geleira são expostos ao retrabalhamento erosivo. Por sua vez, quando a geleira avança, provoca uma renovação da área de deposição glacial (EMBLENTON-HAMANN, 2004).

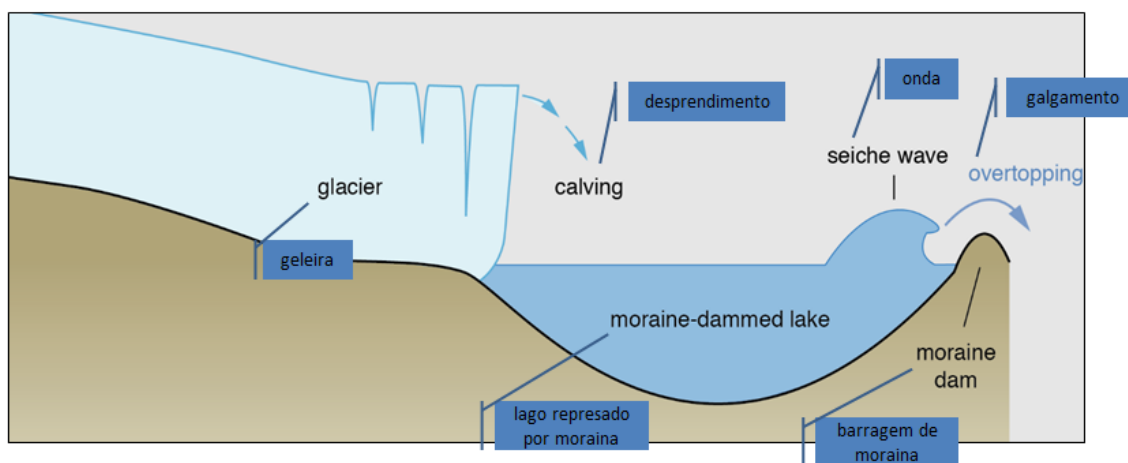
A integração entre os elementos geleira, água de degelo e sedimentos ocorre no sistema paraglacial. O termo paraglacial é formado pelo prefixo grego *para*, que significa ao lado de, mais o termo latim *glacies*, que significa geleira, compondo a expressão “lado da geleira” (MACHADO *et al.*, 2019). Ballantyne (2002) define paraglacial como “processos superficiais não glaciais, sedimentos, sistemas e paisagens que são diretamente condicionados pela glaciação e deglaciação”. Portanto, se refere à instabilidade e alta atividade geomorfológica associada a uma paisagem que é submetida recentemente ao recuo de uma geleira. Slaymaker (2009) define o termo paraglacial como processos não glaciais que são condicionados pela glaciação, afirmando ainda que todas as formas de relevo e paisagem paraglaciais podem ser consideradas transitórias. Em outras palavras, Slaymaker (2011) afirma que o ambiente paraglacial é definido pela trajetória de reajustes da paisagem, em função dos distúrbios da glaciação. Para Perondi *et al.*

(2020), a retração de uma geleira pode ser percebida pela evolução do ambiente proglacial por processos paraglaciais, e o monitoramento dos elementos do sistema paraglaciais é relevante para compreendermos as mudanças futuras.

A dinâmica das geleiras e o ambiente no qual elas estão inseridas tem grande influência na formação, evolução e persistência de lagos proglaciais. Há uma relação entre esses fatores e as mudanças nas condições climáticas, mas fatores independentes do clima também podem influenciar o comportamento do lago proglacial, a exemplo do tipo de barragem, que tem implicações na evolução e drenagem do lago, já que o seu rompimento ou transbordamento pode causar inundações (CARRIVICK; TWEED, 2013).

Glacial Lake Outburst Floods - GLOF - é o termo utilizado para denominar uma inundação brusca e repentina causada pela liberação da água de um lago glacial, em função do rompimento da barragem que represava esse lago (BENDLE, 2020). A Figura 2 apresenta um exemplo de ocorrência de GLOF em função do desprendimento de parte da geleira:

Figura 2: GLOF - Inundação causada por desprendimento de parte da geleira



Fonte: BENDLE, 2020.

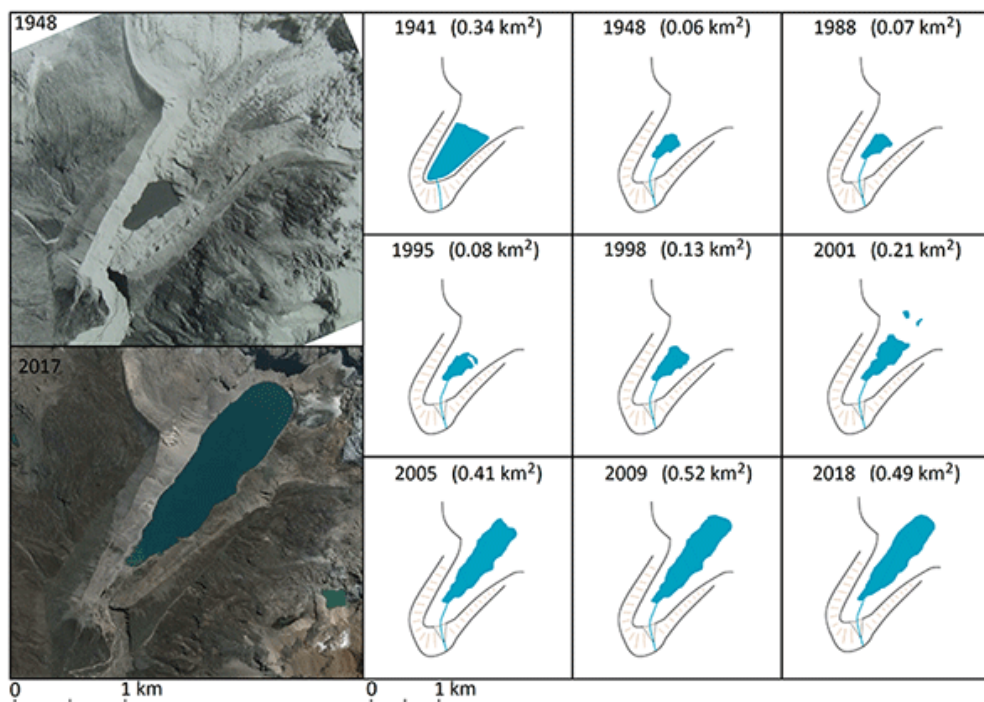
A entrada abrupta de materiais diversos em um lago pode ocorrer em função de avalanches, quedas de rochas ou desprendimento de uma geleira que termina em um lago (Figura 2). Esse processo provoca o deslocamento da água, gerando uma onda e o conseqüente galgamento da barragem de moraina, resultando em inundação das áreas a jusante (BENDLE, 2020). Da mesma forma, inundações por GLOF podem ocorrer devido a eventos como chuvas fortes ou o rápido derretimento

de neve a montante, elevando o nível do lago, assim como terremotos podem causar o rompimento da barragem de moraina (CARRIVICK; TWEED, 2013).

Os GLOFs causam liberações repentinas (muitas vezes cíclicas) de água, com duração de horas ou dias, e provocam elevada descarga fluvial a jusante. Atualmente, os GLOFs representam um risco para as comunidades e infraestrutura que se localizam a jusante de lagos glaciais, pois podem causar inundações catastróficas (BENDLE, 2020), a exemplo da inundação causada pela falha do lago Palcacocha, nos Andes peruanos, no ano de 1941 (STUART-SMITH; ROE; ALLEN 2021).

De acordo com o estudo de Stuart-Smith, Roe e Allen (2021), no ano de 2016, o lago Palcacocha estava 34 vezes maior em volume do que no pós GLOF de 1941, e a possibilidade de uma nova inundação existe. Este mesmo estudo concluiu, com mais de 99% de probabilidade, que o derretimento da geleira às margens do lago Palcacocha, chamada de Palcaraju, não pode ser explicado apenas por fatores naturais, ou seja, as geometrias atuais da geleira e do lago são decorrentes de mudanças climáticas antropogênicas. A Figura 3 a seguir apresenta a evolução do lago glacial Palcacocha (em km²) após o GLOF de 1941:

Figura 3: Evolução do lago Palcacocha de 1941 a 2018



Fonte: Huggel *et al.*, 2020.

Observando a Figura 3 é possível visualizar o aumento expressivo do tamanho do lago entre os anos 1948 e 2017, conforme ilustrado nas duas imagens à esquerda. Da mesma forma, as representações da evolução do lago (à direita) demonstram que, no ano de 2018, o já lago estava maior do que no ano de 1941, ano em que ocorreu o GLOF, o que indica a real possibilidade de que um novo GLOF venha a ocorrer a qualquer momento.

Nos últimos 40 anos, em função do recuo das geleiras, houve um aumento em quantidade e tamanho de lagos glaciais no mundo todo. Tal fato pode resultar no aumento das ocorrências de inundação, tornando o entendimento da dinâmica dos GLOFs necessário para redução de danos (ANACONA; MACKINTOSH; NORTON, 2015). A análise de GLOFs passados auxilia na compreensão da dinâmica do fluxo de eventos futuros (ANACONA; MACKINTOSH; NORTON, 2015), assim como o estudo de implicações socioeconômicas causadas pelos GLOF podem ajudar a entender questões que afetam a gestão de riscos a GLOF (CAREY *et al.*, 2012).

Anaconda, Mackintosh e Norton (2015) utilizaram o modelo de análise hidrodinâmica HEC-RAS 5.0 Beta para reconstrução de um GLOF ocorrido no Vale Engaño, na Patagônia chilena, no ano de 1977. O HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) é um *software* gratuito, que permite simular o escoamento em superfície livre para regimes permanentes ou não permanentes (SANTOS, 2015). O estudo realizado em Anaconda, Mackintosh e Norton (2015) simulou a dinâmica do GLOF utilizando Modelos Digitais de Elevação (MDE) de resolução média, concluindo que o HEC-RAS pode ser empregado em avaliações de risco a GLOF em contextos geográficos semelhantes. Os recursos HEC-RAS 2D permitiram verificar a profundidade e intensidade da inundação nas diferentes seções do vale, além de fornecer dados referentes ao fluxo, como profundidade, velocidade, intensidade e tempo de chegada. É importante mencionar ainda que, além da modelagem numérica, o GLOF foi reconstruído com auxílio de fontes como reportagens, relatos de testemunhas oculares, fotografias aéreas e imagens de satélite, não tendo sido coletadas evidências em campo.

Worni *et al.* (2012) também analisaram um GLOF, ocorrido no ano de 2009, nos Andes Patagônicos da Argentina, causado pelo rompimento da moraina terminal do lago glacial da geleira Ventisquero Negro. A reconstrução do GLOF foi realizada com base em evidências de campo, tendo sido coletados dados sobre o lago residual, a moraina rompida e o vale inundado, e com aplicação do modelo dinâmico

de ruptura de barragem baseado em erosão BASEMENT (WORNI *et al.*, 2012). O BASEMENT (*Basic Simulation Environment for Computation of Environmental Flow and Natural Hazard Simulation*) é um *software* gratuito que tem por objetivo analisar processos de rompimento de estruturas de barragens de terra não coesivas e fluxos de água e sedimento (VOLZ *et al.*, 2010). Registros meteorológicos de estações próximas ao Ventisquero Negro e relatos de guardas florestais apontaram fortes chuvas na região, além de altas temperaturas no dia da inundação. Portanto, o aumento do nível do lago e o escoamento do lago, em função das fortes chuvas, foram a provável causa do rompimento da moraina, já que não foram encontrados vestígios de eventos de perda de massa atingindo o lago. A partir da reconstrução da brecha da moraina, utilizando o modelo BASEMENT, os resultados indicaram que o alto escoamento do lago gerou elevado transporte da carga de fundo, o que teria dado início à erosão da barragem. Por fim, o estudo sugeriu que modelos dinâmicos, a exemplo do BASEMENT, possam ser implementados de forma sistemática no futuro, para definição de cenários (WORNI *et al.*, 2012).

Em Zhang *et al.* (2023) foi realizado um estudo de suscetibilidade a GLOF na Bacia Nidu Zangbo em Nagqu, no Planalto Tibetano, utilizando o *Analytical Hierarchy Process* (AHP) para avaliar os graus de risco potencial de lagos glaciais, em conjunto com dados de um modelo digital de elevação (MDE), geleiras, imagens de sensoriamento remoto e pesquisas de campo. O modelo AHP utilizado neste estudo elencou três fatores para avaliar a suscetibilidade de GLOF: as características dos lagos glaciais, das geleiras adjacentes e do ambiente circundante (não cobertos por geleira). A cada um desses fatores foram atribuídos alguns indicadores, e a cada indicador foi atribuído um critério. Por exemplo, com relação ao fator “características dos lagos glaciais”, utilizaram-se indicadores como o crescimento do lago, a sua área, o armazenamento de água, entre outros. Cada um desses indicadores (de um total de 15) possui um critério numérico, por exemplo, área do lago $> 0,2 \text{ km}^2$, ou seja, os lagos com área acima de $0,2 \text{ km}^2$, para este estudo, foram considerados relativamente grandes em tamanho e com elevado potencial destrutivo.

Diferentemente dos métodos exemplificados em Worni *et al.* (2012) e Anaconda, Mackintosh e Norton (2015), em Zhang *et al.* (2023) a abordagem de avaliação apresenta um método semiquantitativo, o qual avaliou a suscetibilidade de GLOF e indicou a existência de seis lagos glaciais com potencial altamente perigoso

na Bacia de Nidu Zangbo, em 2016. É importante mencionar que o resultado obtido acabou sendo validado, já que o lago glacial Jinwucuo, que obteve a maior pontuação de avaliação de risco no estudo, foi o mesmo que sofreu um evento de GLOF em 2020. Apesar de não ser possível prever o momento exato em que um GLOF pode vir a ocorrer, o estudo demonstrou que é possível avaliar de modo dinâmico o lago glacial na bacia alvo, beneficiando a segurança regional (ZHANG *et al.*, 2023).

Khadka *et al.* (2021) consideraram se o lago aumentou ou não no tempo em sua análise dos lagos suscetíveis a GLOF. O estudo de Hu *et al.* (2022) também avaliou a suscetibilidade a GLOF e mudanças espaço-temporais em lagos.

Gaikwad *et al.* (2022) utilizaram o método AHP, semelhante ao utilizado em Zhang *et al.* (2023), para avaliar a suscetibilidade a GLOF dos lagos glaciais localizados no Sikkim, Himalaia. Foram selecionados e analisados oito parâmetros considerados críticos: o volume do lago glacial, a área da geleira adjacente, a distância entre o lago e a geleira adjacente, a declividade entre o lago e a geleira, a elevação do lago, o tipo de barragem que represa o lago, a distância do lago à comunidade mais próxima e a proximidade do lago com a bacia hidrográfica. A cada um desses parâmetros foi atribuído um peso determinado por meio do *Analytical Hierarchy Process* (AHP) e do *Fuzzy Analytical Hierarchy Process* (FAHP). A partir disso, foi possível identificar os lagos glaciais com maior e menor risco a GLOF na bacia estudada, tendo a avaliação de risco identificado 3 lagos (pelo método AHP) e 4 lagos (pelo método FAHP) como altamente perigosos, dos 34 lagos glaciais suscetíveis a GLOF.

2.3 RISCOS CRIOSFÉRICOS E VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL

Em função das condições climáticas e do ciclo da água, o gelo e a neve, que são constituintes da Criosfera, afetam a vida das pessoas no mundo todo, mesmo que indiretamente (SWIFT *et al.*, 2021). O gelo, nas suas mais diversas formas de manifestação, pode ser um material perigoso e originar eventos catastróficos (WHITEMAN, 2011). Processos grandes e rápidos ocorridos em altas montanhas comumente estão ligados a cadeias de causalidade, que levam a perigos, riscos e desastres a nível regional (EVANS; DELANEY, 2015).

Perigo é o termo utilizado para denominar uma característica ou um evento que possa vir a impactar negativamente a vida, saúde, propriedade e o meio ambiente, como por exemplo, uma avalanche. As mudanças climáticas afetarão as condições de gelo e neve no planeta, aumentando os impactos dos perigos existentes. Por outro lado, alguns locais perigosos e perigos poderão deixar de existir na medida em que o gelo for desaparecendo desses locais (HAEBERLI; WHITEMAN, 2021). Os perigos criosféricos em ambiente de montanha podem afetar negativamente as pessoas, gerando desastres como inundações de lagos glaciais, deslizamentos de rochas de gelo, instabilidade de *icebergs*, bem como riscos relacionados à variabilidade do escoamento das geleiras (CAREY *et al.*, 2021).

Risco é a probabilidade de ocorrência de um evento perigoso, envolvendo também a perda ou custo esperado e o grau de mitigação (HAEBERLI; WHITEMAN, 2021). Assim, pode-se compreender que o risco criosférico é a probabilidade de ocorrer um evento relacionado aos componentes da Criosfera, como por exemplo, um GLOF, e todos os custos e perdas que esse evento pode provocar. De acordo com Ding *et al.* (2021) os riscos criosféricos são todos os eventos relacionados aos processos da Criosfera e que geram algum tipo de perigo, ameaçando vidas humanas e seu bem-estar.

O risco não tem existência real, o risco é potencial, portanto, está relacionado a algo (um perigo) que ainda não aconteceu. O desastre é a materialização do risco (CARDONA, 2004). A vulnerabilidade, de acordo com UNISDR (2009), pode ser definida como “as características e circunstâncias de uma comunidade, sistema ou ativo que o tornam suscetível aos efeitos danosos de um perigo”. Ainda, de acordo com o IPCC (2022), vulnerabilidade é “*the propensity or predisposition to be adversely affected. Vulnerability encompasses a variety of concepts and elements, including sensitivity or susceptibility to harm and lack of capacity to cope and adapt*”. Em outras palavras, vulnerabilidade é a propensão ou predisposição a ser afetado adversamente por algum perigo e a falta de capacidade de enfrentá-lo. Há também o conceito de vulnerabilidade socioambiental, que associa a avaliação da vulnerabilidade ambiental a fatores sociais e econômicos (COSTA, 2022). Por exemplo, as pessoas que estão à margem da sociedade, seja econômica, social, política ou institucionalmente, são especialmente vulneráveis aos perigos relacionados às mudanças climáticas (IPCC, 2014).

Nas últimas décadas, houve um aumento da exposição de pessoas e infraestrutura aos perigos criosféricos nas regiões de alta montanha, e a tendência é que este aumento continue (HOCK *et al.*, 2019). Os perigos potenciais sempre estão presentes na natureza, mas nem sempre representarão uma ameaça iminente. Quanto mais informações a respeito do funcionamento dos perigos, mais fácil será prever eventos perigosos. O monitoramento, mapeamento e interpretação são etapas essenciais para avaliar o nível de risco associado a um perigo específico (WHITEMAN, 2011).

O estudo de Huggel *et al.* (2020) traz o caso do lago Palcacocha, já mencionado anteriormente, localizado na Cordilheira Branca do Peru, e aborda o tema da responsabilização em nível local e global pelos riscos de inundação, impulsionados por processos físicos e socioeconômicos. A Figura 4 apresenta uma imagem de 2016 e a área que está contornada na cor de laranja representa a extensão da inundação causada pelo GLOF de 1941, em Huaraz. Como é possível observar, atualmente, trata-se de uma área urbanizada e altamente exposta aos perigos de uma nova inundação.

Figura 4: Distrito de Nueva Florida, em Huaraz, no Peru, ano de 2016.



Fonte: Huggel *et al.*, 2020.

A pesquisa etnográfica realizada pelo referido estudo no distrito de Nueva Florida, indicado na Figura 4, forneceu subsídios para compreender o aumento das

construções no local. Agricultores de terras acima de Huaraz, historicamente marginalizados, começaram a comprar propriedades baratas em Nueva Florida após a década de 1970, levando em conta os benefícios econômicos proporcionados pela proximidade com melhores empregos, serviços públicos e melhor qualidade de vida. Após o surgimento de novas preocupações com o risco de GLOF em 2009, as autoridades locais proibiram novas construções no distrito, contudo, residentes afirmaram que edifícios pequenos foram construídos. Além disso, muitos moradores se mostraram pouco preocupados com o risco de inundações por GLOF, embora soubessem de sua existência. Tal fato levou à conclusão de que os benefícios econômicos superaram o risco de inundação (HUGGEL *et al.*, 2020).

Contudo, responsabilizar as pessoas pela sua decisão de habitar uma área com potencial caminho do GLOF é difícil, tendo em consideração que alguns segmentos da população peruana foram marginalizados ao longo dos anos e estão em busca de melhores oportunidades. Assim, a análise de riscos, exposição e vulnerabilidade GLOF deve levar em conta como as políticas de prevenção de desastres afetam o *status* socioeconômico. Os níveis de risco de GLOF também são afetados por instituições, políticas e governança. A instabilidade do governo regional e federal peruano impediu a realização de medidas eficazes para redução de risco GLOF no lago Palcacocha (CAREY, 2010; HUGGEL *et al.*, 2020). Huggel *et al.* (2020) sugerem também uma perspectiva diferenciada de responsabilização, em que os emissores globais apoiem e fortaleçam as áreas afetadas, e as instituições e população local se comprometam com medidas e políticas de redução de risco, como construção de barragens de proteção, drenagem de lagos, sistema de alerta precoce, planejamento rigoroso do uso da terra, entre outros.

Em uma análise global dos impactos sociais causados por inundações de geleiras, a qual abrangeu dados de 20 países ao longo de 10 séculos, Carrivick e Tweed (2016) identificaram a ocorrência de 1.348 inundações causadas por lagos glaciais, com origem em 332 locais diferentes, sendo que 70% desses lagos eram represados por geleiras. Os autores identificaram também que 36% dessas inundações tiveram registros de algum tipo de impacto social, o qual foi avaliado com base em mortes registradas, evacuações, destruição, interrupção de propriedades e infraestruturas. Foram registradas 7 mortes na Islândia, 393 nos Alpes europeus, 5.745 na América do Sul e 6.300 na Ásia Central, tendo 88% dessas mortes ocorrido em apenas dois eventos: o GLOF de 1941, no Peru, e em

2013, na Índia. Desde a década de 1990, o número de registros de inundações por geleiras diminuiu, contudo, ainda sem uma explicação concisa.

2.4 SENSORIAMENTO REMOTO PARA IDENTIFICAR CORPOS D'ÁGUA

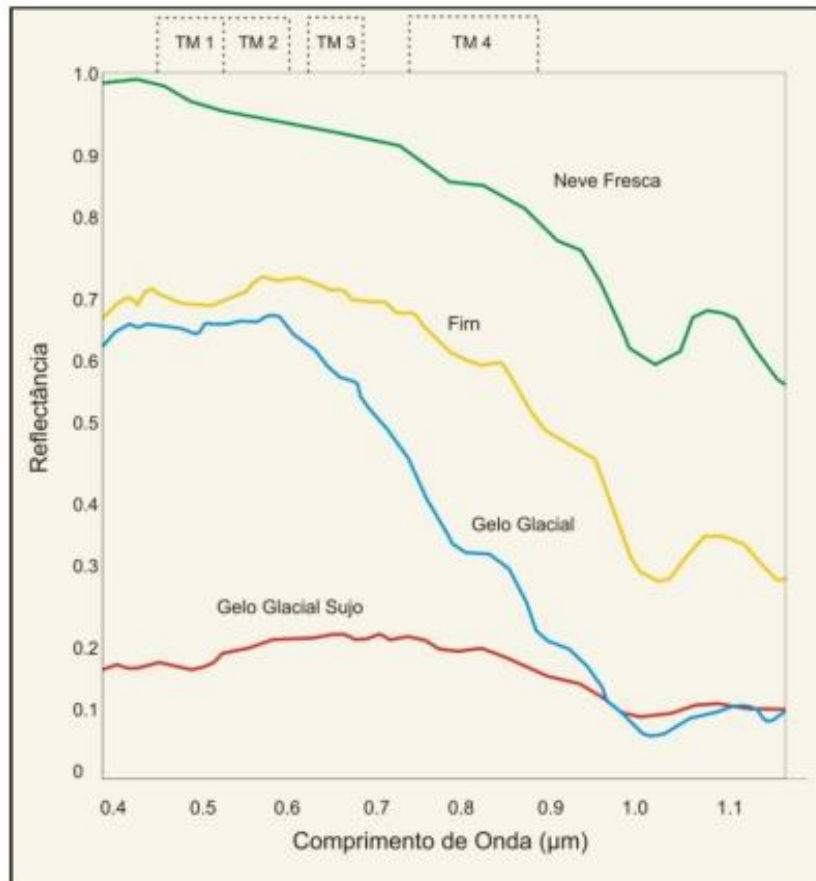
O interesse pelo monitoramento das mudanças nos lagos glaciais assim como a suscetibilidade a GLOF vem aumentando no meio acadêmico e governamental. Contudo, as investigações de campo são de difícil acesso, tendo em vista as condições topográficas. Com isso, o sensoriamento remoto se tornou um excelente meio para condução de estudos sobre monitoramento dos lagos glaciais e possíveis inundações (NIE *et al.*, 2017), e a amostragem de campo, embora imprescindível, torna-se uma forma de complementar o monitoramento de ambientes glaciais (BREMER, 1998). De acordo com Moraes (2002), o sensoriamento remoto é um conjunto de atividades que possibilitam a obtenção de informações a respeito de objetos na superfície terrestre, sem que haja contato direto com os mesmos. Assim, considerando que a área de estudo do presente trabalho é de difícil acesso, o sensoriamento remoto é uma alternativa relevante e que permitirá a obtenção e análise de dados de lagos glaciais e geleiras.

A utilização do sensoriamento remoto permite obter informações a respeito do comportamento espectral de alvos. Cada alvo possui uma assinatura espectral (BREMER, 1998), ou seja, uma curva que mostra como varia a reflectância de um alvo/objeto para cada comprimento de onda no espectro eletromagnético (STEFFEN, 2016). Com auxílio das curvas de reflectância, é possível prever a aparência (tonalidade, cor, textura) dos alvos que são obtidos por meio dos produtos do sensoriamento remoto (NOVO; PONZONI, 2001).

A resposta espectral da neve está relacionada ao teor de água livre entre os poros, ao formato e tamanho do grão, impurezas, rugosidade superficial e profundidade das camadas. A idade da neve também influencia, já que uma neve recém-depositada tem uma reflectância muito alta no espectro do visível, enquanto o derretimento e compactação da neve acabam diminuindo sua refletividade. Já o gelo possui reflectância baixa, contudo, esta poderá variar de acordo com a ocorrência de outros fatores, como o teor de impurezas, o tipo de cobertura sobre o gelo e o derretimento superficial (BREMER, 1998). Identificar a reflectância dos tipos de superfície da geleira é essencial para o mapeamento de zonas da geleira por meio

do sensoriamento remoto (REES, 2006). A Figura 5 apresenta a reflectância de cada tipo de neve, considerando que a parte do espectro eletromagnético compreendida entre $0,4\mu$ e $0,7\mu$ é o visível e entre $0,7\mu$ e $1,5\mu$ é o infravermelho próximo, e o TM 1-4 indica as bandas do sensor TM do Landsat.

Figura 5: Propriedades radiométricas da neve e gelo



Fonte: Petsch, 2014.

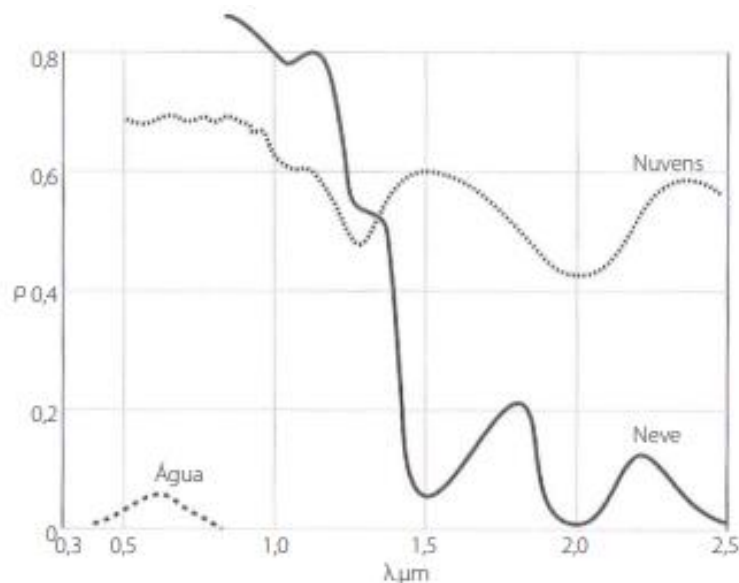
A reflectância da neve fresca é a maior em relação ao *firm*, gelo glacial e gelo glacial sujo, tanto no espectro do visível quanto no infravermelho próximo (Figura 5). Portanto, será possível diferenciar se uma superfície é gelo ou neve fresca, por meio do sensoriamento remoto, comparando a sua reflectância.

Já os corpos d'água possuem características particulares em relação aos demais alvos espectrais, que é a sua reflectância média na região do espectro visível, ou seja, em uma imagem de composição colorida, a água irá aparecer com tonalidade escura, indicando que há pouca energia refletida (NOVO; PONZONI, 2001). Para identificação de corpos d'água, é indicada a utilização da faixa espectral

de $0,76\mu$ até $0,90\mu$ do espectro eletromagnético, ou seja, o infravermelho próximo (INPE, 2006). Além disso, cabe destacar que a assinatura espectral das nuvens apresenta alta reflectância no visível e no infravermelho próximo (JENSEN, 2009). Para diferenciar a neve das nuvens é possível utilizar a faixa do infravermelho médio do espectro eletromagnético, já que as nuvens refletem quantidade significativa de energia nesta faixa ao passo que a neve possui reflectância próxima de zero (HALL; MARTINEC, 1985 *apud* PETSCH, 2014).

Pode-se observar, então, que a água possui respostas espectrais diferentes conforme o seu estado físico. A neve apresenta alta reflectância na faixa do visível, enquanto os corpos d'água, como os lagos glaciais, apresentam maior reflectância na faixa do infravermelho próximo. A Figura 6 abaixo apresenta um comparativo entre a resposta espectral dos alvos água, neve e nuvens:

Figura 6: Comportamento espectral da água em diferentes estados físicos



Fonte: NOVO, 2008.

Na Figura 6 pode-se observar a baixa reflectância da água na faixa do visível (entre $0,4\mu$ e $0,7\mu$), enquanto as nuvens e a neve possuem alta reflectância. Já no espectro do infravermelho de ondas curtas (entre $1,5\mu$ e 3μ), as nuvens possuem maior reflectância do que a neve, sendo uma faixa adequada para diferenciá-las, pois a diferença de reflectância entre ambas é maior do que no visível e no infravermelho próximo.

O comportamento espectral do solo irá depender de diversos fatores como a cor do solo, teor de matéria orgânica, teor de ferro, tipo de solo, composição mineralógica, teor de umidade, textura, entre outros. Por exemplo, o teor de umidade irá afetar a reflectância do solo em todos os comprimentos de onda, sendo que, quanto maior o teor de umidade, menor será a reflectância (NOVO; PONZONI, 2001). O monitoramento das áreas livres de gelo, como as feições deposicionais marginais ao gelo, é importante para identificar o surgimento de lagos nas regiões frontais das geleiras, demonstrando a instabilidade das geleiras perante o aquecimento daquela região (OLIVEIRA, 2020).

O estudo de Shukla, Garg e Srivastava (2018) analisou o comportamento de lagos de alta latitude no Himalaia entre 1975 e 2017. Para isso, os autores usaram imagens TM, ETM+ e OLI, das datas de 1991, 2000, e 2017. A quantidade de lagos aumentou de 425 em 1975 para 466 em 2017 (9% de aumento), e a área também expandiu de $25,17 \pm 1,90$ para $31,24 \pm 2,36$ km² (24% de aumento). Os resultados deste estudo ressaltam que o clima regional está acelerando o degelo da Criosfera e, se essa tendência se mantiver, é provável que ocorra um maior derretimento de geleiras, levando à formação de novos lagos e expansão dos lagos já existentes na área de estudo, resultando em um aumento do potencial de inundações por GLOF. Por este motivo, os autores recomendam que os lagos glaciais da região sejam monitorados constantemente para uma avaliação sustentável dos impactos das mudanças climáticas.

O estudo de Gaikwad *et al.* (2022) realizou um inventário temporal de lagos no Sikkim - Himalaia, para os anos 1990, 2000, 2010 e 2020, usando dados de satélite Landsat OLI/ETM/TM. Foi identificada a presença abundante de lagos glaciais na parte oriental do Himalaia, indicando uma taxa mais rápida de recuo das geleiras comparativamente a outras áreas. A grande área dos lagos representam uma ameaça potencial de GLOF para as comunidades a jusante. Os resultados revelaram que o número de lagos glaciais aumentou de 267 para 427, e a área total passou de 21,64 km² para 29,18 km², um aumento geral de 34,8% em 30 anos.

Apesar de todas as vantagens que o sensoriamento remoto óptico proporciona, o mapeamento temporal de lagos com utilização de imagens de satélite apresenta dificuldades, como disponibilidade de imagens sem cobertura de nuvens e diferentes resoluções espaciais dos sensores (OLIVEIRA, 2020). Conforme visto anteriormente, a assinatura espectral das nuvens e da neve é semelhante, o que

dificulta a interpretação das imagens e até mesmo a visualização da área de estudo (HALL; MARTINEC, 1985 *apud* PETSCH, 2014). Com relação à resolução espacial, as imagens provenientes do satélite Landsat, por exemplo, comparativamente a outros satélites, possuem condições limitadas para identificação de lagos com menor área, em função de sua baixa resolução espacial (30 m). Outra dificuldade encontrada é que a assinatura espectral de áreas sombreadas e áreas de corpos d'água, como os lagos glaciais, é similar, impedindo a identificação do que é lago e o que não é somente com utilização de imagens (OLIVEIRA, 2020). Para isso, é preciso utilizar ferramentas auxiliares, como dados de hipsometria e declividade. A aplicação do NDWI - *Normalized Difference Water Index* - também é importante para auxiliar na validação dos dados (OLIVEIRA, 2020), ferramenta esta que delinea características da água e elimina características do solo e vegetação (BORGES *et al.*, 2015).

O NDWI, que é o Índice de Água Normalizada (McFEETERS, 1996), pode ser aplicado utilizando as bandas do verde e do infravermelho próximo. Esse índice traz valores de 1 a -1, sendo que valores mais próximos de 1 indicam a maior possibilidade de ser uma superfície aquosa. A fórmula do NDWI pode ser expressa da seguinte forma (EOS, 2023):

$$NDWI = \frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)}$$

Em que,

Green = banda do verde visível

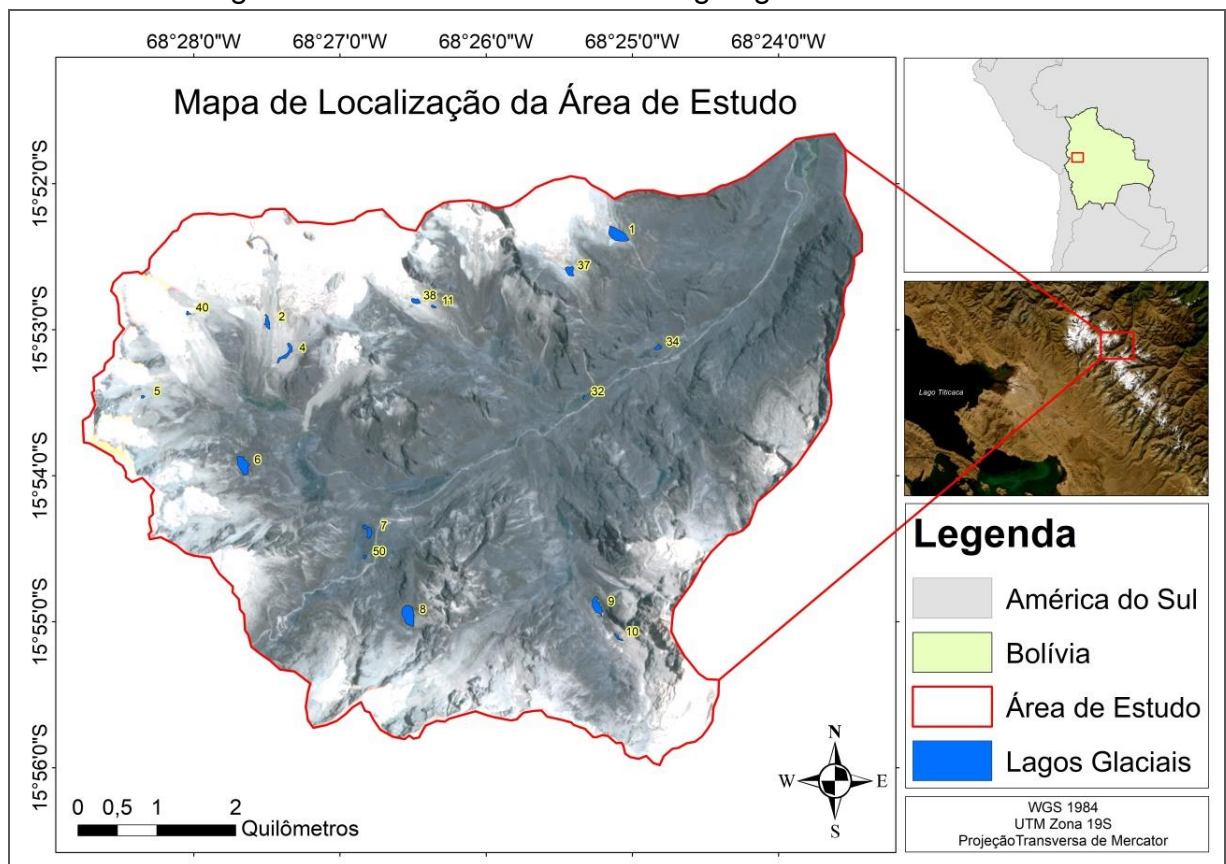
NIR = banda do infravermelho próximo

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Na Figura 7 está identificada a área de estudo deste trabalho, a sub-bacia hidrográfica Chajolpaya, localizada na Cordilheira Real, que é uma vasta cadeia de montanhas situada ao norte da capital da Bolívia.

Figura 7: Sub-bacia de estudo e lagos glaciais analisados



Fonte: elaboração da autora, 2023.

3.2 CLIMA DA ÁREA DE ESTUDO

Em relação ao clima nos Andes tropicais bolivianos, este possui duas estações bem definidas no ano, sendo os meses de verão (de dezembro a março) a estação úmida, representando entre 70 e 80% da precipitação anual. Essa elevada precipitação se deve ao fato de a ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) estar mais ao sul, permitindo a chegada de massas de ar mais úmidas nos Andes,

advindas da Amazônia e do oceano Atlântico (RONCHAIL *et al.*, 2002). A própria cordilheira influencia na precipitação, pois, conforme Ribeiro (2007), os setores que estão voltados para a direção de origem das massas de ar apresentam maior precipitação, fenômeno que é conhecido como “chuva de sombra”.

O transporte de umidade da Bacia Amazônica para a Cordilheira Oriental boliviana, que ocorre durante os meses de outubro a abril, é relevante para as taxas mensais de precipitação na região (GARREAUD *et al.*, 2009; VEETTIL *et al.*, 2016). De acordo com Ray *et al.* (2006), o desflorestamento na Amazônia provoca redução da umidade atmosférica, diminuindo a quantidade de precipitação nas nascentes montanhosas nos Andes.

Na região dos trópicos, as massas de gelo estão no seu ponto de fusão ao longo do ano todo, portanto, ocorre ablação da frente da geleira durante o ano todo, ao contrário das regiões temperadas, em que as geleiras permanecem abaixo do ponto de congelamento durante o inverno, portanto, sem ocorrência de ablação nessa época (KASER, 1995). Assim, o avanço ou retrocesso das geleiras tropicais é altamente influenciado pelo balanço de massa nos meses de verão (RIBEIRO, 2007). O balanço de massa negativo, na Bolívia, ocorre normalmente entre dezembro e janeiro, que é a estação úmida (FRANCOU *et al.*, 2000).

A grande maioria das geleiras tropicais do mundo (99,64%) está situada nos Andes (VUILLE *et al.*, 2018). Observações a respeito de extensão e área de geleiras no Peru, Equador e Bolívia elucidam a rápida recessão das geleiras andinas tropicais desde a Pequena Idade do Gelo. A temperatura do ar nos Andes aumentou cerca de 0,1 °C por década, na segunda metade do século XX (VUILLE *et al.*, 2008).

O estudo de COOK *et al.* (2016) revelou que, no período entre 1986 e 2014, houve uma retração das geleiras de $228,1 \pm 22,8$ km² (43,1%) na Cordilheira Oriental boliviana, nos Andes centrais, sendo que a retração foi maior na região de Tres Cruces (47,3%), seguida pela Cordilheira Apolobamba (43,1%) e pela Cordilheira Real (41,9%), sendo esta última a área de estudo do presente trabalho.

3.3 SELEÇÃO DOS DADOS

Inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico, no intuito de obter informações sobre geleiras tropicais de montanha, lagos glaciais e GLOF, balanço de massa de geleiras e suas dinâmicas, sensoriamento remoto aplicado às geleiras

de montanha e aos lagos glaciais. Dando sequência ao estudo, foram coletados os dados necessários para posterior processamento e análise dos mesmos. A Tabela 1 apresenta os dados utilizados para a realização do presente estudo.

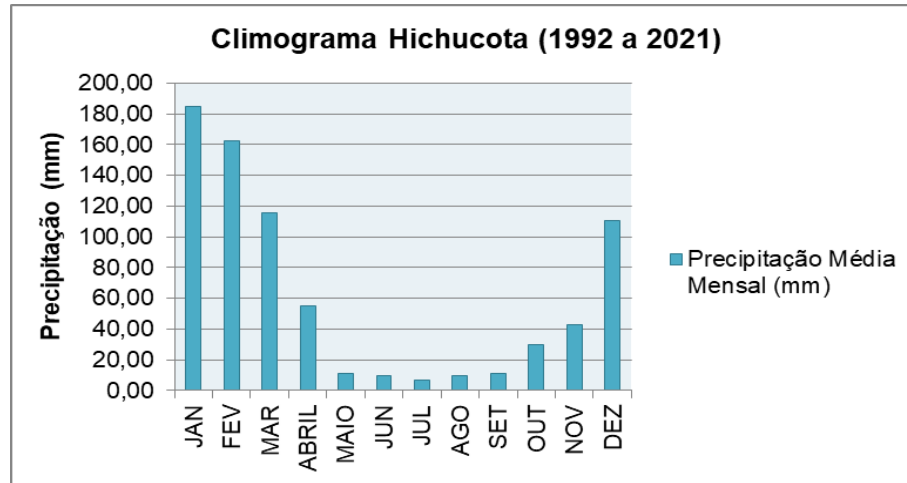
Tabela 1: Dados e respectivas fontes utilizadas na pesquisa

Dados	Fonte
Dados de precipitação	http://senamhi.gob.bo/index.php/inicio
<i>Global Land Ice Measurements from Space - GLIMS</i>	https://www.glims.org/
<i>Shapefiles</i> de rios e canais da região de estudo	http://geo.gob.bo/portal/
MDE (Alos Palsar)	https://search.asf.alaska.edu/#/
Imagem <i>Planet Scope</i>	https://www.planet.com/explorer/
Imagem <i>WorldView-2</i>	-
Imagens Landsat 5	https://earthexplorer.usgs.gov/

Fonte: elaboração da autora, 2023.

Os dados de precipitação, coletados na estação Hichucota (latitude -16.1767, longitude -68.3811, altitude 4.460 m), que é próxima à Cordilheira Real, foram utilizados para geração de um gráfico de precipitação (climograma), referente ao período de 1992 a 2021. Utilizou-se o climograma para identificar o comportamento da precipitação ao longo do ano na região próxima à área de estudo, com o objetivo de auxiliar na seleção das imagens de satélite em épocas menos chuvosas, ou seja, com menor quantidade de nuvens. Constatou-se que o período de maio a outubro é o menos chuvoso. A Figura 8 a seguir apresenta o climograma que foi gerado, o qual indica os meses de maio a outubro como os menos chuvosos naquela região.

Figura 8: Climograma da estação Hichucota no período 1992-2021



Fonte: elaborado pela autora e orientadora com dados do SENAMHI, 2023.

A Tabela 2 detalha as especificidades das imagens de satélites selecionadas para realização desta pesquisa. Todas as imagens foram corrigidas e o erro médio quadrado (RMSE - *Root Mean Squared Error*) obtido foi entre 0,34 e 5,97 m:

Tabela 2: Especificações das imagens de satélite utilizadas

Plataforma e Sensor	Data da Imagem	ID da Imagem	Resolução Espacial	RMSE (m)
Planet Scope	11/10/2022	20221011_142643_49_2485_3B_AnalyticMS_SR_harmonized_clip	3 m	<0,34
WorldView	26/07/2015	CHAJOLPAYA_15JUL26_BLUE CHAJOLPAYA_15JUL26_GREEN CHAJOLPAYA_15JUL26_RED CHAJOLPAYA_15JUL26_NEAR INFRARED	50 cm	0,00
Landsat 5 - TM	05/09/2011	LT05_L1TP_001071_20110905_202008_20_02_T1_B2 LT05_L1TP_001071_20110905_202008_20_02_T1_B3 LT05_L1TP_001071_20110905_202008_20_02_T1_B4	30 m	<5,97
Landsat 5 - TM	15/05/1999	LT05_L1TP_001071_19990515_202009_08_02_T1_B1 LT05_L1TP_001071_19990515_202009_08_02_T1_B2 LT05_L1TP_001071_19990515_202009_08_02_T1_B3 LT05_L1TP_001071_19990515_202009_08_02_T1_B4 LT05_L1TP_001071_19990515_202009_08_02_T1_B5	30 m	<5,97

Fonte: elaboração da autora, 2023.

3.4 DELIMITAÇÃO DA SUB-BACIA

Para delimitação da sub-bacia referente à área de estudo foi utilizada a imagem do satélite Planet Scope, do ano de 2022, na composição colorida. A imagem foi importada para o programa ArcGis, tendo sido utilizada a ferramenta “Image Analysis” para melhorar a sua visualização, por meio de ajustes como brilho, contraste e desvio padrão. O primeiro passo foi vetorizar a sub-bacia hidrográfica da área de estudo, utilizando a ferramenta “Editor” do ArcGis, tendo como base os polígonos das sub-bacias de drenagens glaciais mapeados e disponibilizados pelo GLIMS - Global Land Ice Measurements from Space, além de utilizar *shapefiles* de canais e rios da área da região. Ainda nessa etapa, foi baixado o Modelo Digital de Elevação (MDE) do satélite ALOS com sensor PALSAR, que traz informações de altimetria, e que auxiliou a realizar a vetorização da sub-bacia. Após a delimitação da sub-bacia de estudo, foi utilizada a ferramenta “Calculate Geometry”, na tabela de atributos, para calcular a área da sub-bacia, sendo encontrado o valor de 49,63 km².

3.5 PARÂMETROS PARA ANÁLISE DE RISCO

Em relação aos parâmetros e pesos utilizados para aplicação da metodologia AHP, adaptou-se a metodologia de Gaikwad *et al.* (2022). No presente estudo foram utilizados os seguintes parâmetros: área dos lagos glaciais (AL), área da geleira adjacente (AG), distância dos lagos até a geleira adjacente (DG), declividade (D), elevação dos lagos (EL), tipo de barragem dos lagos (TB), distância entre os lagos e comunidade mais próxima (DC) e distância entre lagos e o rio (DR). Já as classes e notas foram elaboradas de acordo com as características específicas do presente estudo. O detalhamento para obtenção de cada parâmetro está descrito nos subitens a seguir.

3.5.1 Parâmetro Área dos Lagos Glaciais

As áreas dos lagos foram obtidas por meio da vetorização manual com a ferramenta “Editor” do ArcGis. A textura, tonalidade e forma foram consideradas para identificar os lagos nas composições de bandas espectrais envolvendo as faixas do infravermelho próximo, vermelho e verde. Cada lago identificado na área de estudo

foi vetorizado em imagens de 1999, 2011, 2015, 2022, o que permitiu a realização do cálculo de suas áreas na tabela de atributos. Para validar os lagos encontrados de forma visual, após correção atmosférica, aplicou-se a fórmula do índice NDWI sobre as imagens, por meio da ferramenta “Raster Calculator”, localizada no seguinte caminho dentro do ArcGis: Arc ToolBox → Spatial Analyst Tools → Map Algebra. O produto gerado pelo NDWI possibilitou verificar que alguns dos polígonos considerados lagos quando da identificação visual, eram na verdade sombras, então, esses foram excluídos. Conforme Borges *et al.* (2015), o índice NDWI destaca as feições presentes no ambiente aquático, sendo que, tudo que for maior que zero na imagem raster é considerado água.

Na etapa seguinte, os lagos identificados na imagem de 2022 cuja área era inferior a 0,001 km² foram removidos da análise, adaptando a proposta de Kougkoulos (2019), que removeu os lagos menores que 0,01 km². Do total de 32 lagos identificados na área de estudo, em 2022, restaram 16 para análise, aos quais foi aplicada a classificação de risco, conforme especificado na Tabela 3.

Tabela 3: Classificação de risco referente à área dos lagos

Risco	Classe	Área dos Lagos (AL)	ID dos Lagos
Baixo	1	Até 0,00025 km ²	-
Médio	2	Entre 0,00025 e 0,01 km ²	2, 5, 7, 10, 11, 32, 34, 37, 38, 40, 50
Alto	3	Acima de 0,01 km ²	1, 4, 6, 8, 9

Fonte: elaboração da autora, 2023.

Após identificação das classes de cada lago, conforme apresentado na coluna “ID dos Lagos” na Tabela 3, estes dados foram incluídos na tabela de atributos referente ao *shapefile* (vetor) dos lagos de 2022. No estudo de Kougkoulos (2019), ao analisar a suscetibilidade a GLOF em uma área localizada próxima a do presente estudo, o autor encontrou baixo a médio risco nessa cordilheira.

3.5.2 Parâmetro Área da Cobertura Glacial

Os setores Norte, Sul e Oeste da sub-bacia possuem cobertura glacial e foram mapeados na composição de bandas espectrais envolvendo o visível e o

infravermelho próximo (RGB cor natural) em cada data. A cobertura glacial possui uma tonalidade mais clara na imagem e se distingue das áreas livres de gelo do entorno. Os três setores com cobertura glacial (geleiras) foram vetorizados na imagem de 2022, utilizando a ferramenta “Editor” do ArcGis, para obtenção de suas áreas, por meio da ferramenta “Calculate Geometry” na tabela de atributos. Verificou-se que a porção Norte possui uma área de 5,28 km², a porção Oeste 1,61 km², e a porção Sul 1,19 km², resultando em uma área total de cobertura glacial de 8,08 km², para 2022. Mediante as informações identificadas, adotou-se a seguinte classificação:

Tabela 4: Classificação de risco referente à área de cobertura glacial

Risco	Classe	Área das Geleiras (AG)	ID dos Lagos
Baixo	1	Até 1,18 km ²	-
Médio	2	Entre 1,18 e 5,27 km ²	6, 7, 8, 9, 10, 50
Alto	3	Acima de 5,27 km ²	1, 2, 4, 5, 11, 32, 34, 37, 38, 40

Fonte: elaboração da autora, 2023.

Portanto, considerando que o setor com maior área de cobertura glacial é o Norte, os lagos que recebem aporte de água da porção Norte foram classificados como risco 3, enquanto os lagos que recebem aporte dos setores Oeste e Sul foram classificados como de risco 2. Além disso, é importante destacar que os lagos ao longo do curso do rio, por receberem aporte de mais de um setor, foram classificados como risco 3. Após identificação das classes de cada lago, conforme apresentado na coluna “ID dos Lagos” na Tabela 4, estes dados foram incluídos na tabela de atributos referente ao *shapefile* dos lagos de 2022.

3.5.3 Parâmetro Distância dos Lagos Glaciais até a Geleira Adjacente

No primeiro momento, utilizou-se o MDE para identificar a geleira que alimenta o lago. Na sequência, foi utilizada a ferramenta “Régua” no ArcGis para obter a distância dos lagos existentes em 2022 com relação à sua geleira adjacente. A partir das distâncias encontradas (em quilômetros), foram estabelecidas as seguintes classes para o parâmetro de distância da geleira adjacente:

Tabela 5: Classificação de risco referente à distância entre lagos e geleira adjacente

<i>Risco</i>	<i>Classe</i>	<i>Distância da Geleira (DG)</i>	<i>ID dos Lagos</i>
Baixo	1	Maior que 2 km	32
Médio	2	Entre 0,5 e 2 km	6, 7, 8, 9, 10, 34, 50
Alto	3	Menor que 0,5 km	1, 2, 4, 5, 11, 37, 38, 40

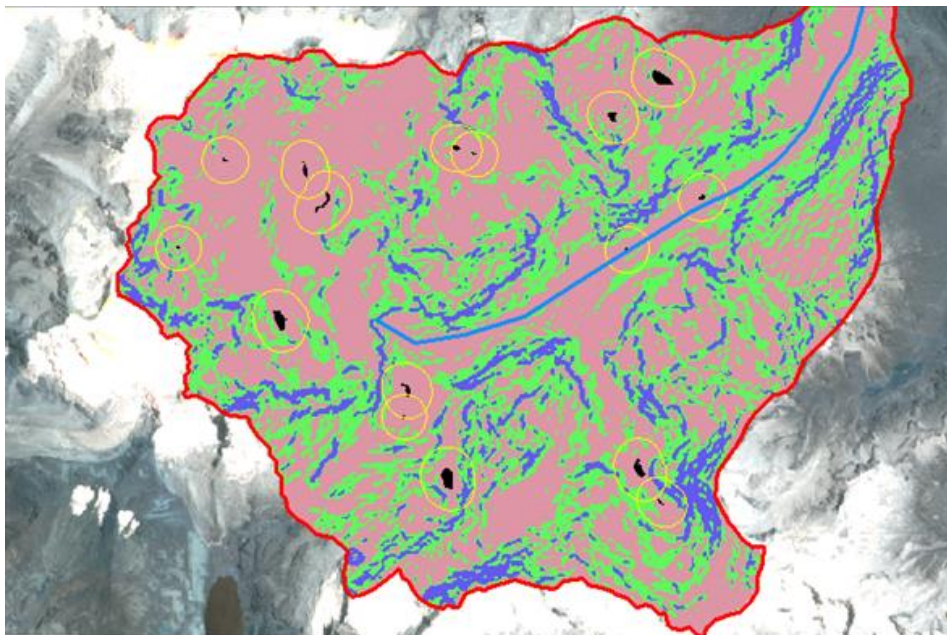
Fonte: elaboração da autora, 2023.

As classes encontradas para cada lago, conforme apresentado na coluna “ID dos Lagos” na Tabela 5, foram registradas na tabela de atributos referente ao *shapefile* dos lagos de 2022.

3.5.4 Parâmetro Declividade entre os Lagos Glaciais e a Geleira Adjacente

A partir do MDE recortado da sub-bacia foi gerado o mapa de declividade, por meio da ferramenta “Slope”, localizada no 3D Analyst Tools do ArcGis. A declividade máxima encontrada foi 77,63° e a mínima 0°, resultando em uma declividade média de 27,24°. O próximo passo foi realizar um *Buffer* de 250 m no *shapefile* dos lagos de 2022, ou seja, ao redor de cada lago criou-se um círculo com distância de 250 m, conforme demonstrado na Figura 9.

Figura 9: *Buffer* de 250 m realizado nos lagos glaciais do ano de 2022



Fonte: elaboração da autora e orientadora, 2023.

A partir disso, foi feito um transecto desde o lago até 250 m de distância (a montante) e considerado o valor de declividade mais alto encontrado no vale. Com esses dados da maior declividade encontrada entre cada lago e a geleira adjacente foi feita a classificação dos lagos em relação à declividade, a qual foi inserida na tabela de atributos referente ao *shapefile* dos lagos de 2022.

3.5.5 Parâmetro Elevação dos Lagos Glaciais

O primeiro passo para verificar a elevação dos lagos foi reclassificar o MDE da sub-bacia em classes de 100 em 100 metros, o que totalizou 19 classes, com auxílio da ferramenta “Reclassify” do Arc Toolbox. Os dados estatísticos apresentados pela referida ferramenta mostraram que a elevação máxima da sub-bacia de estudo é de 5.902 m e a elevação mínima 4.116 m, resultando em uma elevação média de 5.042 m.

O passo a seguir para verificação da elevação foi utilizar a ferramenta “3D Analyst”, selecionando a camada (*layer*) do MDE recortado da sub-bacia. Com o “Interpolate Line” traçou-se o perfil de cada lago e o “Profile Graph” foi acionado para visualizar o gráfico desse perfil, o que permitiu identificar a elevação média de cada lago. Identificou-se que o lago mais elevado está a uma altitude de 5.447 m, enquanto o menos elevado está a 4.390 m. A classificação dos lagos quanto à elevação foi inserida na tabela de atributos do *shapefile* dos lagos de 2022 e pode ser verificada também na Tabela 6.

Tabela 6: Classificação de risco referente à elevação dos lagos

Risco	Classe	Elevação dos Lagos (EL)	ID dos Lagos
Baixo	1	Menor que 4.390 m	-
Médio	2	Entre 4.390 e 5.075 m	1, 7, 8, 9, 10, 32, 34, 50
Alto	3	Acima de 5.075 m	2, 4, 5, 6, 11, 37, 38, 40

Fonte: elaboração da autora, 2023.

3.5.6 Parâmetro Tipos de Barragens dos Lagos Glaciais

Para identificação do tipo de barragem de cada lago foi feita uma análise visual das imagens de satélite, além de observações no Google Earth Pro em três dimensões (3D). Foi aplicada a classe 3 para os lagos com barragem de moraina, pois há um amplo consenso sobre estes tipos de lagos serem entendidos como potencialmente mais perigosos a desencadear GLOF (AHMED *et al.*, 2023). A presença de morainas frontais foi interpretada pela forma (com crista contínua e levemente arqueada em direção à geleira, com o formato da margem da geleira), contexto da forma no ambiente deposicional e a textura rugosa. Para os lagos com barragem rochosa foi aplicada a classe 2, tendo em vista ser um represamento menos sujeito à rompimento. E os lagos sem represamento foram considerados classe 1, pois, apesar de poderem extravasar, não haverá um rompimento brusco como ocorre em um GLOF. A Tabela 7 apresenta a classificação dos lagos quanto ao tipo de barragem, a qual também foi inserida na tabela de atributos do *shapefile* dos lagos de 2022.

Tabela 7: Classificação de risco referente ao tipo de barramento dos lagos

Risco	Classe	Tipo de Barragem (TB)	ID dos Lagos
Baixo	1	Sem barragem	7, 32, 50
Médio	2	Com barragem rochosa	1, 6, 8, 37
Alto	3	Com barragem de moraina	2, 4, 5, 9, 10, 11, 34, 38, 40

Fonte: elaboração da autora, 2023.

3.5.7 Parâmetro Distância da Sub-bacia até a Comunidade Mais Próxima

Para localizar a comunidade mais próxima à sub-bacia utilizou-se o Google Earth. Foi criado um ponto no local onde a comunidade está situada, o qual foi salvo no formato KML, importado para o ArcGis e transformado em *shapefile*. No caso deste parâmetro, a classificação será a mesma para todos os lagos, pois foi considerada a distância em linha reta da comunidade em relação à sub-bacia e não a cada lago individualmente. A medição foi realizada com a ferramenta “Régua” no ArcGis, estando a comunidade mais próxima localizada a 30,71 km da sub-bacia,

sendo atribuída a classe 2 para todos os lagos analisados. A classificação foi inserida na tabela de atributos do *shapefile* dos lagos de 2022.

3.5.8 Parâmetro Distância dos Lagos Glaciais até o Rio

Para a medição da distância dos lagos até o curso d'água principal da sub-bacia foi utilizado um *shapefile* de rios e canais da região no ArcGis. Com auxílio da ferramenta "Clip", o referido *shapefile* foi recortado com base no *shapefile* da sub-bacia estudada. O passo seguinte foi criar um *Buffer* de 1.200 m a partir da linha do rio, e depois um *Buffer* de 2.400 m. Foram utilizadas as ferramentas "Select by Attributes" e "Select by Location" para selecionar os lagos contidos dentro do *Buffer* de 1.200 m e aqueles contidos entre 1.200 e 2.400 m, ou seja, foram identificados os lagos localizados a uma distância de até 1.200 m do curso d'água e os lagos localizados entre 1.200 e 2.400 m do curso d'água. Aqueles lagos localizados a uma distância acima de 2.400 m do rio foram visualmente contabilizados. As classes referentes à distância do rio foram inseridas na tabela de atributos do *shapefile* dos lagos de 2022 e estão apresentadas a seguir:

Tabela 8: Classificação de risco referente à distância entre os lagos e o rio

Risco	Classe	Distância do Rio (DR)	ID dos Lagos
Baixo	1	Maior que 2.400 m	5, 10, 40
Médio	2	Entre 1.200 e 2.400 m	1, 2, 4, 8, 9, 11, 37, 38
Alto	3	Menor que 1.200 m	6, 7, 32, 34, 50

Fonte: elaboração da autora, 2023.

3.6 APLICAÇÃO DA ANÁLISE HIERÁRQUICA PONDERADA

Após obtenção e processamento dos oito parâmetros acima descritos e inclusão das suas respectivas classes/notas na tabela de atributos do *shapefile* dos lagos em 2022, conforme demonstrado na Figura 10, realizou-se a conversão desses polígonos para raster (resolução espacial de 3 m), utilizando a ferramenta "Polygon to Raster", que fica localizada na opção "Conversion Tools" do Arc ToolBox, no ArcGis.

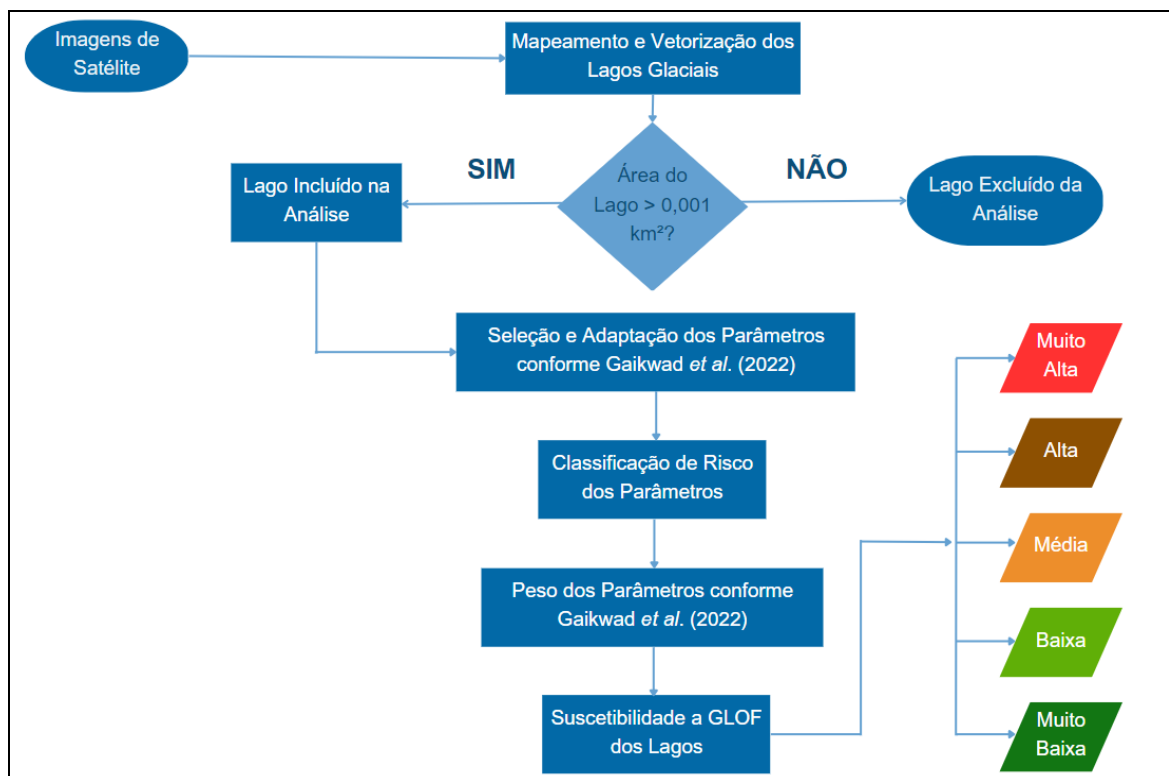
Figura 10: Classificação dos parâmetros na tabela de atributos

Id	classeAL	classeAG	classeDG	classeEL	classeD	classeDR	classeTB	classeDC
1	3	3	3	2	3	2	2	2
2	2	3	3	3	2	2	3	2
4	3	3	3	3	3	2	3	2
5	2	3	3	3	3	1	3	2
6	3	2	2	3	3	3	2	2
7	2	2	2	2	2	3	1	2
8	3	2	2	2	3	2	2	2
9	3	2	2	2	3	2	3	2
10	2	2	2	2	3	1	3	2
11	2	3	3	3	3	2	3	2
32	2	3	1	2	3	3	1	2
34	2	3	2	2	3	3	3	2
37	2	3	3	3	3	2	2	2
38	2	3	3	3	3	2	3	2
40	2	3	3	3	2	1	3	2
50	2	2	2	2	2	3	1	2

Fonte: elaboração da autora e orientadora, 2023.

Após ter sido concluído este passo, foi possível aplicar a análise hierárquica ponderada (AHP) no presente estudo, adaptando a metodologia de Gaikwad *et al.* (2022), conforme ilustra a Figura 11. Segundo Ferreira e Silva (2020), a AHP é uma ferramenta eficiente para a tomada de decisão, principalmente em relação ao planejamento e gestão territorial.

Figura 11: Fluxo realizado para aplicação do método AHP



Fonte: elaboração da autora e orientadora, 2023.

Foram aplicados oito parâmetros com distintas classes e pesos (Tabela 9). Em relação às classes de cada parâmetro, cabe mencionar que a classe 1 significa risco baixo, a classe 2 risco médio e a classe 3 risco alto. Em relação aos pesos de cada parâmetro, foram utilizados os mesmos aplicados em Gaikwad *et al.* (2022).

Tabela 9: Parâmetros e suas respectivas classes e pesos

Parâmetro	Classes do Parâmetro	Peso do Parâmetro (AHP)
Área do Lago (AL)	1 - até 0,00025 km ²	0,294
	2 - entre 0,00025 e 0,01 km ²	
	3 - acima de 0,01 km ²	
Área da Geleira Adjacente (AG) ou Cobertura Glacial	1 - até 1,18 km ²	0,247
	2 - entre 1,18 e 5,27 km ²	
	3 - acima de 5,27 km ²	
Distância do Lago até a Geleira Adjacente (DG)	1 - maior que 2 km	0,161
	2 - entre 0,5 e 2 km	
	3 - menor que 0,5 km	
Declividade entre Geleira e Lago (D)	1 - menor que 30°	0,098
	2 - entre 30 e 45°	
	3 - maior que 45°	
Elevação do Lago (EL)	1 - menor que 4.390 m	0,094
	2 - entre 4.390 e 5.075 m	
	3 - acima de 5.075 m	
Tipo de Barragem do Lago (TB)	1 - sem barragem	0,049
	2 - com barragem rochosa	
	3 - com barragem de moraina	
Distância da Sub-bacia até a Comunidade (DC)	1 - maior que 50 km	0,036
	2 - entre 30 e 50 km	
	3 - menor que 30 km	
Distância do Lago até o Rio (DR)	1 - maior que 2.400 m	0,020
	2 - entre 1.200 e 2.400 m	
	3 - menor que 1.200 m	

Fonte: elaboração da autora e orientadora, 2023 - parâmetros e pesos adaptados de Gaikwad *et al.* (2022).

Para finalizar a metodologia da análise hierárquica ponderada, foi realizado o cálculo de suscetibilidade a GLOF, utilizando os arquivos raster gerados para cada parâmetro (os quais contêm as classes de cada lago) e os seus respectivos pesos. Foi utilizada a ferramenta “Raster Calculator” do ArcGis para realização do cálculo, aplicando a seguinte fórmula:

$$\text{Suscetibilidade a GLOF} = ((AL*0,294) + (AG*0,247) + (DG*0,161) + (D*0,098) + (EL*0,094) + (TB*0,049) + (DC*0,036) + (DR*0,020))$$

Em que,

AL = Raster da Área dos Lagos

AG = Raster da Área das Geleiras Adjacentes (cobertura glacial)

DG = Raster da Distância dos Lagos até a Geleira Adjacente

D = Raster da Declividade entre os Lagos e a Geleira Adjacente

EL = Raster da Elevação dos Lagos

TB = Raster do Tipo de Barragem dos Lagos

DC = Raster da Distância dos Lagos até a Comunidade Mais Próxima

DR = Raster da Distância dos Lagos até o Rio

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da identificação da variação dos lagos glaciais localizados em uma sub-bacia do setor Norte da Cordilheira Real e da análise de suscetibilidade à inundação associada a esses lagos.

4.1 VARIAÇÃO DA ÁREA DOS LAGOS GLACIAIS

A sub-bacia possui trinta e dois lagos, representando uma área total de 0,1558 km² no ano de 2022. Para o presente estudo, foram considerados apenas os lagos com área superior a 0,001 km² no ano de 2022, adaptando a proposta de Kougkoulos (2019). Ou seja, do total de trinta e dois lagos em 2022, restaram dezesseis para análise, os quais representam uma área de 0,1483 km². A Tabela 10 apresenta as áreas dos lagos glaciais encontrados na sub-bacia, em cada ano, e detalha alguns ajustes realizados.

Os lagos variaram em número e área no período. Em 1999 foram identificados três lagos glaciais na área de estudo, representando uma área total de 0,046 km² (Tabela 10). Os três lagos identificados em 1999 continuaram a existir em 2022. Considerando os dezesseis lagos em 2022, a área total de cobertura lacustre aumentou 222,31% em relação a 1999. Os resultados vão ao encontro do proposto por Anaconda, Mackintosh e Norton (2015), que afirmaram haver um aumento em quantidade e tamanho de lagos glaciais no mundo todo nos últimos 40 anos, em função do recuo das geleiras.

As áreas obtidas para os lagos em cada data, provavelmente, estão em contexto de um período do ano em que há menor volume de água, tendo em vista que as imagens coletadas são referentes aos meses de maio e outubro, que são meses menos chuvosos naquela região. Além de mais seca, essa é a estação de inverno na região, portanto, o aporte de água de degelo pelas geleiras é menor do que no período úmido e quente, o que também pode influenciar para uma área menor dos lagos nas datas analisadas e, conseqüentemente, para o risco a GLOF.

Tabela 10: Área dos lagos glaciais em km² para cada ano analisado

<i>ID do Lago</i>	<i>Ano 1999</i>	<i>Ano 2011</i>	<i>Ano 2015***</i>	<i>Ano 2022</i>
1	-	0,003*	0,0277	0,0281
2	-	0,0012	0,003	0,0071
3	-	0,0006	0,0019	0,0009
4	-	0,0036*	0,0038	0,0106
5	-	0,0006	0,0006**	0,0012
6	0,0136	0,0157	0,0157**	0,0228
7	-	0,0006	0,0006**	0,0082
8	0,0175	0,0203	0,0203**	0,0286
9	0,0149	0,0189	0,0189**	0,0165
10	-	0,0012*	0,0012**	0,0029
11	-	-	0,0021	0,0014
17	-	-	0,0008	0,0008
25	-	-	0,00006	0,0002
30	-	-	0,0003	0,0001
31	-	-	0,0002	0,0002
32	-	-	0,0011	0,0011
33	-	-	0,0005	0,0005
34	-	-	0,0033	0,0031
37	-	-	-	0,0089
38	-	-	-	0,0051
39	-	-	-	0,0008
40	-	-	-	0,0014
41	-	-	-	0,0007
42	-	-	-	0,0005
43	-	-	-	0,0005
44	-	-	-	0,0004
45	-	-	-	0,0009
46	-	-	-	0,0002
47	-	-	-	0,0005
48	-	-	-	0,0003
49	-	-	-	0,0001
50	-	-	-	0,0012
Área Total (km²)	0,046	0,0657	0,1021	0,1558

Fonte: elaboração da autora, 2023.

* Valor referente à soma da área de dois lagos, pois em 2011 ainda eram dois lagos, mas em 2022 já haviam se unificado, tornando-se um único lago.

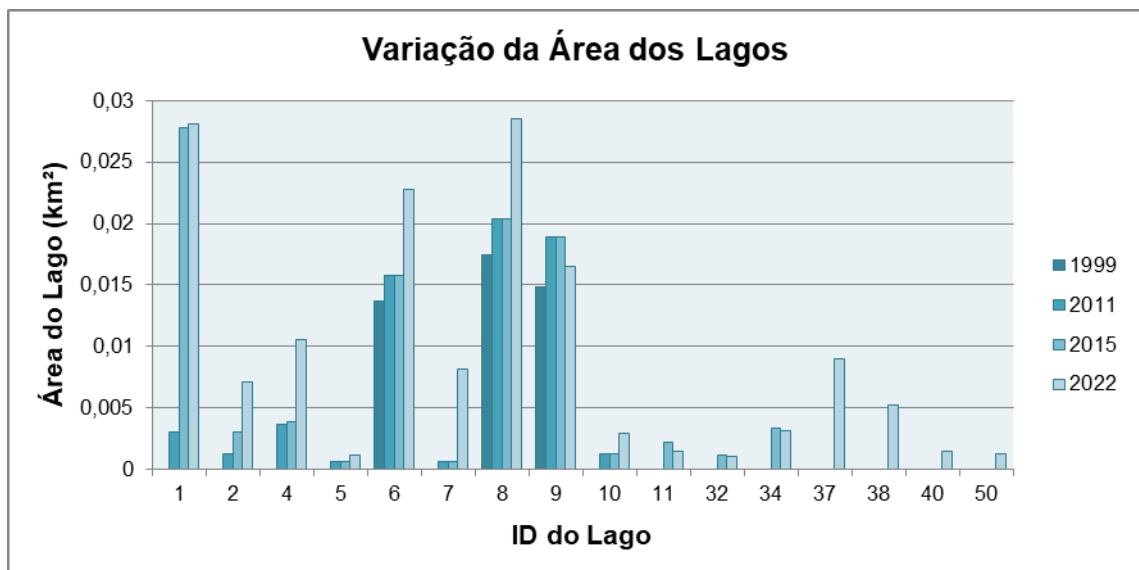
** Valores copiados de 2011, pois a imagem de 2015 abrange parcialmente a área de estudo, o que impossibilitou a coleta desses dados.

*** Para o ano 2015 foram desconsiderados os lagos com área menor do que 0,006 km², desde que esses lagos não eram observados em 2022. Portanto, os lagos com os seguintes IDs, referentes ao ano 2015, não aparecem na Tabela 10: 12, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 35 e 36.

A partir da Figura 12 é possível observar que no período 1999-2022:

- Apenas os lagos 6, 8 e 9 já existiam em 1999;
- Todos os lagos tiveram aumento de área, exceto os lagos 11, 32 e 34;
- Os lagos 11, 32 e 34 surgem somente a partir da imagem de 2015 e sofrem uma redução de área entre 2015 e 2022 (valores baixos quando comparados ao de aumento da maioria dos lagos);
- O lago 9 teve um aumento de sua área entre 1999 e 2015, e uma redução entre 2015 e 2022, contudo, a área em 2022 ainda se manteve maior do que em 1999;
- Os lagos 37, 38, 40 e 50 são “novos”, pois surgem somente na imagem de 2022;
- O lago com maior variação de área é o ID 6, que variou 67,35%.

Figura 12: Gráfico da variação de área dos lagos glaciais entre 1999 e 2022



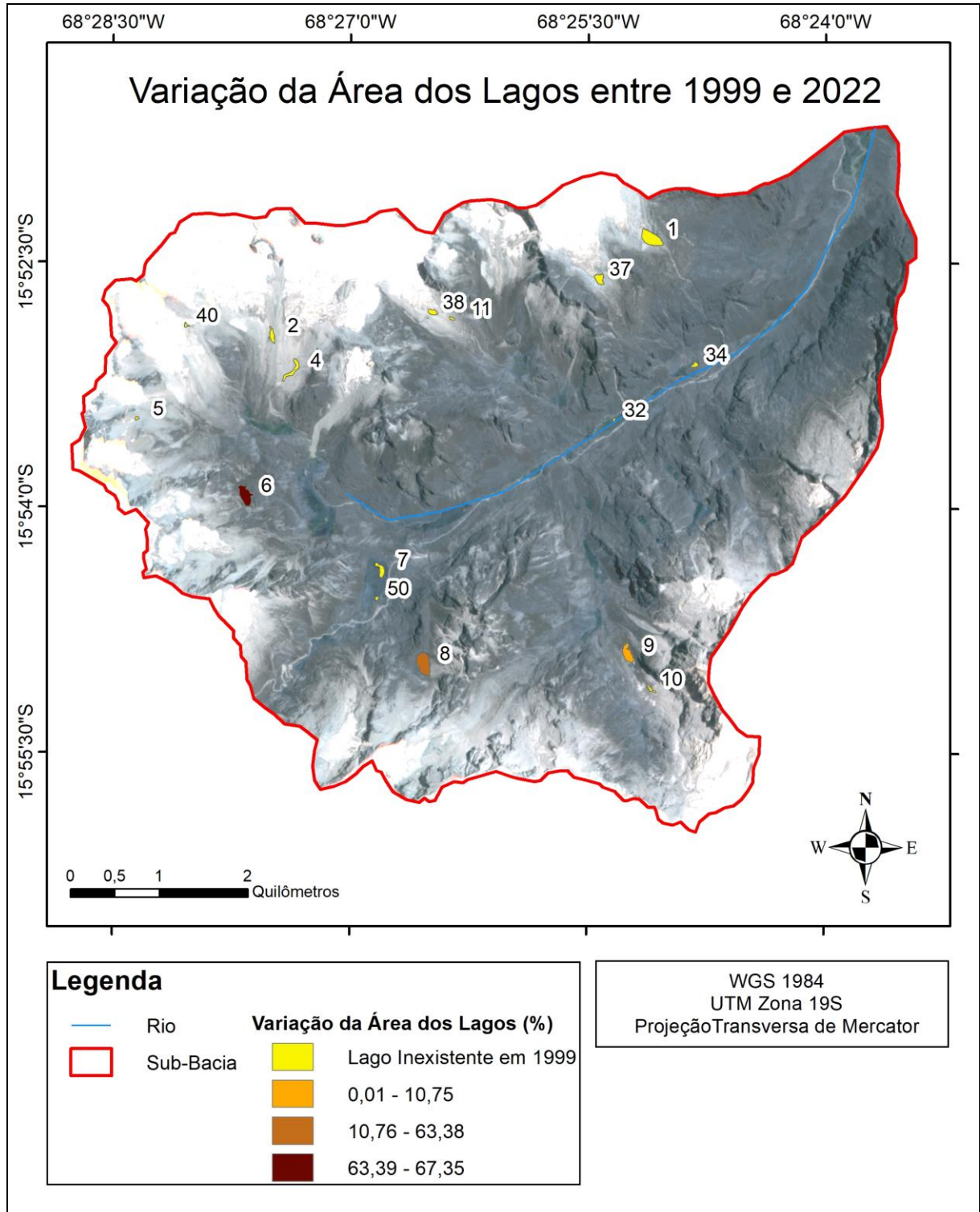
Fonte: elaboração da autora, 2023.

A Figura 13 apresenta o mapa de variação da área dos lagos, considerando apenas os dados obtidos nos anos de 1999 e 2022. Portanto, considerando que em 1999 existiam apenas 3 lagos, para estes, foi realizado o cálculo abaixo, referente à variação percentual de área, em relação a 2022:

$$\text{Variação da Área} = \frac{(\text{Área 2022} - \text{Área 1999}) \times 100}{\text{Área 1999}}$$

Para os demais lagos, apenas considerou-se que não existiam em 1999, assim, não há apresentação da sua variação, conforme demonstrado na Figura 13.

Figura 13: Mapa de variação da área dos lagos entre 1999 e 2022



Fonte: elaboração da autora, 2023.

Resultados de aumento em quantidade e tamanho de lagos também são encontrados em outras áreas (SHUKLA; GARG; SRIVASTAVA, 2018; ANACONA; MACKINTOSH; NORTON, 2015; CARRIVICK; TWEED, 2013), inclusive na Bolívia (COOK *et al.*, 2016). O estudo de Cook *et al.* (2016) demonstrou que houve um aumento em número e tamanho (área) de lagos proglaciais na Cordilheira Oriental boliviana, no período de 1986 a 2014. O número total de lagos localizados a menos de 500 m das margens da geleira aumentou de 145 para 225 lagos (55%), enquanto a área dos lagos aumentou de $6,33 \pm 0,63$ para $8,73 \pm 0,87$ km² (38%). Da mesma forma, o comportamento dos lagos no presente estudo indica que as mudanças climáticas podem estar provocando um aumento no degelo das áreas com cobertura glacial nas últimas décadas, levando à expansão dos lagos já existentes, além da formação de novos lagos, cenário que indica um aumento potencial de inundações por GLOF.

Para um período de 32 anos (1986-2018), na Cordilheira Real, Kougkoulos (2019) demonstrou que as geleiras situadas abaixo de 5.000 m de altitude retraíram de 28 km² para 5 km², as geleiras entre 5.000 e 5.500 m de altitude retraíram de 208 km² para 106 km² (49%), e as geleiras acima de 5.500 m de altitude retraíram de 79 km² para 59 km² (25%).

Alguns lagos podem ter um comportamento de redução de suas áreas e desaparecimento ao longo dos próximos anos, pois as geleiras contribuem para o fluxo dos rios durante a estação seca, nas regiões em que há forte sazonalidade na precipitação (MARK; MCKENZIE, 2007; SORUCO *et al.*, 2015). Esse fluxo tenderá a se intensificar quando a perda de massa das geleiras acelerar (LAFRENIERE; MARK, 2014), contudo, esse é um efeito temporário, que irá diminuir conforme a geleira diminuir de tamanho (POUYAUD *et al.*, 2005).

Futuramente, o desaparecimento completo das geleiras da Cordilheira Real levará a uma redução no escoamento de 12% ao ano, e de 24% durante a estação seca (SORUCO *et al.*, 2015). Fazendo um paralelo com a variação das áreas dos lagos, pode-se compreender que os lagos glaciais tenderão a aumentar rapidamente em tamanho e quantidade nos próximos anos, em função do recuo das geleiras. Tal fato poderá proporcionar um maior abastecimento temporário de água para a população, tendo em vista que os países andinos são muito dependentes da água doce das bacias glaciais, que são utilizadas para uso doméstico, agrícola ou industrial (RIBEIRO, 2014), e, ao mesmo tempo, poderá deixá-la mais exposta a

eventos de GLOF. Por outro lado, na medida em que o gelo for desaparecendo desses locais, esses eventos não irão mais acontecer (HAEBERLI; WHITEMAN, 2021).

Também é possível relacionar a diminuição de alguns lagos com a tendência de redução de chuvas nos Andes influenciada pela mudança no clima amazônico. De acordo com Ray *et al.* (2006), o desflorestamento na Amazônia provoca redução da umidade atmosférica, diminuindo a quantidade de precipitação nas nascentes montanhosas nos Andes. A combinação entre redução da precipitação e aumento da temperatura global tem influência direta no comportamento das geleiras (WERTH; AVISSAR, 2002).

A análise de GLOFs que ocorreram no passado auxilia na compreensão desses eventos no futuro (ANACONA; MACKINTOSH; NORTON, 2015). O comportamento de diminuição de um lago ao longo dos anos também pode estar relacionado ao rompimento de barragens, a exemplo do que ocorreu no lago Palcacocha (Figura 4).

Compreender a variação espaço-temporal, padrão de formação e taxa de aumento de lagos glaciais é necessário para avaliar a probabilidade de ocorrência de GLOFs. Um inventário de lagos atualizado, detecção de mudança de área, classificação e avaliação de suscetibilidade de GLOF de lagos glaciais são fatores críticos que representam grandes obstáculos para as estratégias de mitigação e melhor preparação contra perigos glaciais (GAIKWAD *et al.*, 2022; GAIKWAD; GUHA; TIWARI, 2022).

4.2 CARACTERÍSTICAS DOS LAGOS GLACIAIS E DO SISTEMA PARAGLACIAL

4.2.1 Área dos Lagos Glaciais em 2022

Em relação à área dos lagos, para o ano de 2022, constatou-se que nenhum possui área abaixo de 0,00025 km², 11 lagos possuem área entre 0,00025 e 0,01 km², e 5 lagos possuem área acima de 0,01 km². Conforme Wang, Qin, e Xiao (2015), nos últimos 20 desastres GLOF que possuem algum registro, 95% das áreas de lagos excederam 0,02 km². No presente estudo foram identificados 3 lagos glaciais com área acima de 0,02 km², que são os IDs 1, 6 e 8. Kougkoulos (2019), que realizou sua pesquisa na Cordilheira Real, removeu de sua análise os lagos

menores que 0,01 km², pois obteve baixo risco para lagos nesse contexto. Adaptando a metodologia de Kougkoulos (2019), foram removidos do presente estudo, os lagos com área inferior a 0,001 km².

Para trabalhos futuros, sugere-se a utilização do volume dos lagos como parâmetro de análise, conforme fizeram os autores Qi *et al.* (2022), e não apenas a área dos lagos.

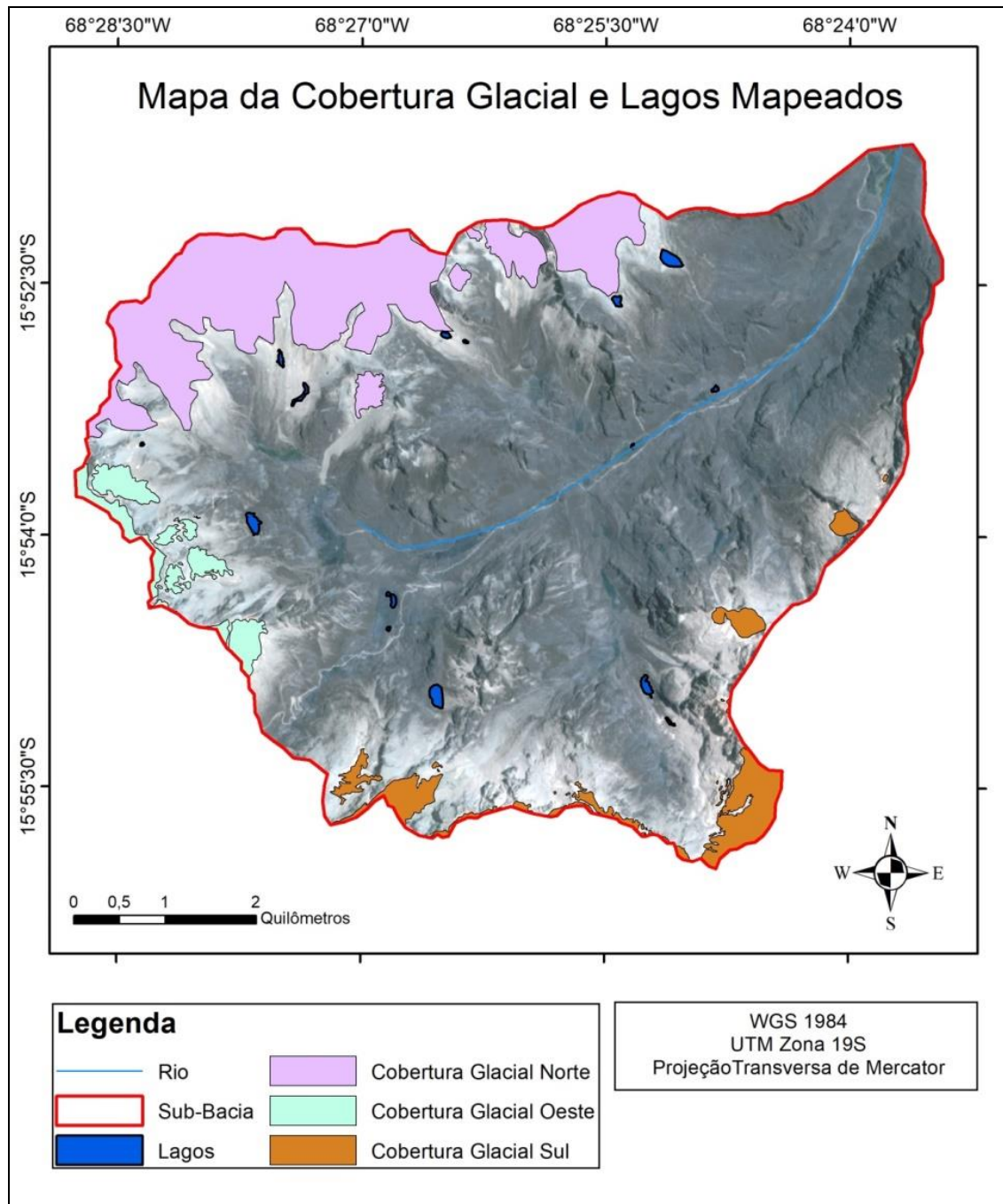
Um lago glacial estável é aquele que existe continuamente na série temporal da pesquisa, ao passo que um lago glacial instável se refere àqueles lagos novos e aos que estão desaparecendo (ZHANG *et al.*, 2023). No presente trabalho foi possível identificar apenas 3 lagos estáveis, ou seja, que aparecem ao longo de todo o período de estudo. Os demais lagos podem ser considerados instáveis, com 4 deles sendo identificados apenas na imagem de 2022. O monitoramento desses lagos é importante, pois, conforme Wang, Qin, e Xiao (2015), as mudanças rápidas na área de lagos podem perturbar o equilíbrio hídrico, resultando em GLOFs de lagos represados por morainas.

4.2.2 Cobertura Glacial da Sub-bacia

A porção Norte da sub-bacia possui uma área total de cobertura glacial de 5,28 km², a porção Oeste possui 1,61 km², e a porção Sul 1,19 km², resultando em uma área de 8,08 km² de cobertura glacial na sub-bacia, no ano de 2022. Portanto, considerando que o setor com maior área de cobertura glacial é o Norte, os lagos que recebem aporte de água desse setor foram classificados como risco 3, enquanto os lagos que recebem aporte dos setores Oeste e Sul foram classificados como de risco 2. Além disso, é importante destacar que os lagos ao longo do curso do rio, por receberem aporte de mais de um setor, foram classificados como de risco 3. A Figura 14 apresenta a cobertura glacial da sub-bacia estudada e os lagos analisados.

Para discussões futuras, sugere-se que seja feita a vetorização individual por geleira adjacente, tendo em vista que este parâmetro possui um peso elevado na metodologia AHP, aplicada no presente estudo.

Figura 14: Mapa da cobertura glacial na área de estudo



Fonte: elaboração da autora e orientadora, 2023.

4.2.3 Distância dos Lagos Glaciais até a Geleira Adjacente

A distância de cada lago até a geleira adjacente variou de 0 a 2 km. Observou-se que um lago está a uma distância maior do que 2 km da sua geleira adjacente, sete lagos estão a uma distância entre 0,5 e 2 km, e oito lagos estão a uma distância menor do que 0,5 km.

A ocorrência de GLOFs é provável quando os lagos proglaciais estão a 500 m de uma geleira (WANG *et al.*, 2011; WANG; QIN; XIAO, 2015; COOK *et al.*, 2016), pois os lagos em contato com o gelo ou a uma distância menor de 500 m da geleira podem ser atingidos por movimentos de massa, gerando ondas consideráveis. Isso foi o que ocorreu no GLOF de 1941, no lago Palcacocha, quando um grande pedaço de geleira caiu no lago e causou uma inundação que destruiu a cidade de Huaraz e causou cerca de 6.000 mortes (CAREY *et al.*, 2012).

O estudo de Kougkoulos (2019) considerou as seguintes classes de risco para o parâmetro da distância entre o lago glacial e a geleira adjacente: 500 a 250 m (baixo risco), 250 a 10 m (médio risco), 10 m até contato com a geleira (alto risco). O autor enfatizou que a seleção desses valores foi um tanto subjetiva. De forma semelhante, no presente estudo, foi preciso adaptar as classes e considerar de alto risco aqueles lagos localizados a menos de 500 m (0,5 km) da geleira, isso porque a distância média entre os lagos e sua geleira adjacente é maior do que 500 m. Por exemplo, o lago 32 está localizado a 2,28 km da sua geleira adjacente.

A informação sobre a retração glacial ao longo dos anos na sub-bacia é relevante, pois a resposta dos lagos à variação no balanço de massa das geleiras no tempo pode auxiliar no planejamento e na gestão ambiental das áreas envolvidas.

A distância entre o lago e a geleira também representa uma possível variação no suprimento de água aos lagos. Os lagos mais distantes das geleiras recebem água de afluentes de diferentes ordenamentos, mas podem ter um menor aporte de água provindo das geleiras quando há lagos localizados a montante represando água.

Muitos lagos podem deixar de ser alimentados diretamente pelas geleiras com a continuidade da retração glacial para a região. O lago 11 evidenciou um comportamento de diminuição de área relacionado com a retração da geleira, conforme foi verificado ao observar as imagens de satélite utilizadas para identificar os lagos.

Neste sentido, o estudo de Rounce *et al.* (2023) projetou que o aumento da temperatura global entre 1,5° a 4°C resultará em perdas de um quarto a quase metade da massa das geleiras do mundo, até o ano de 2100, tendo em vista que a perda de massa está diretamente relacionada ao aumento da temperatura. As discussões trazidas na Conferência das Partes de 2021 (COP26) indicaram que a temperatura média global deverá aumentar em 2,7°C neste século. A perda de

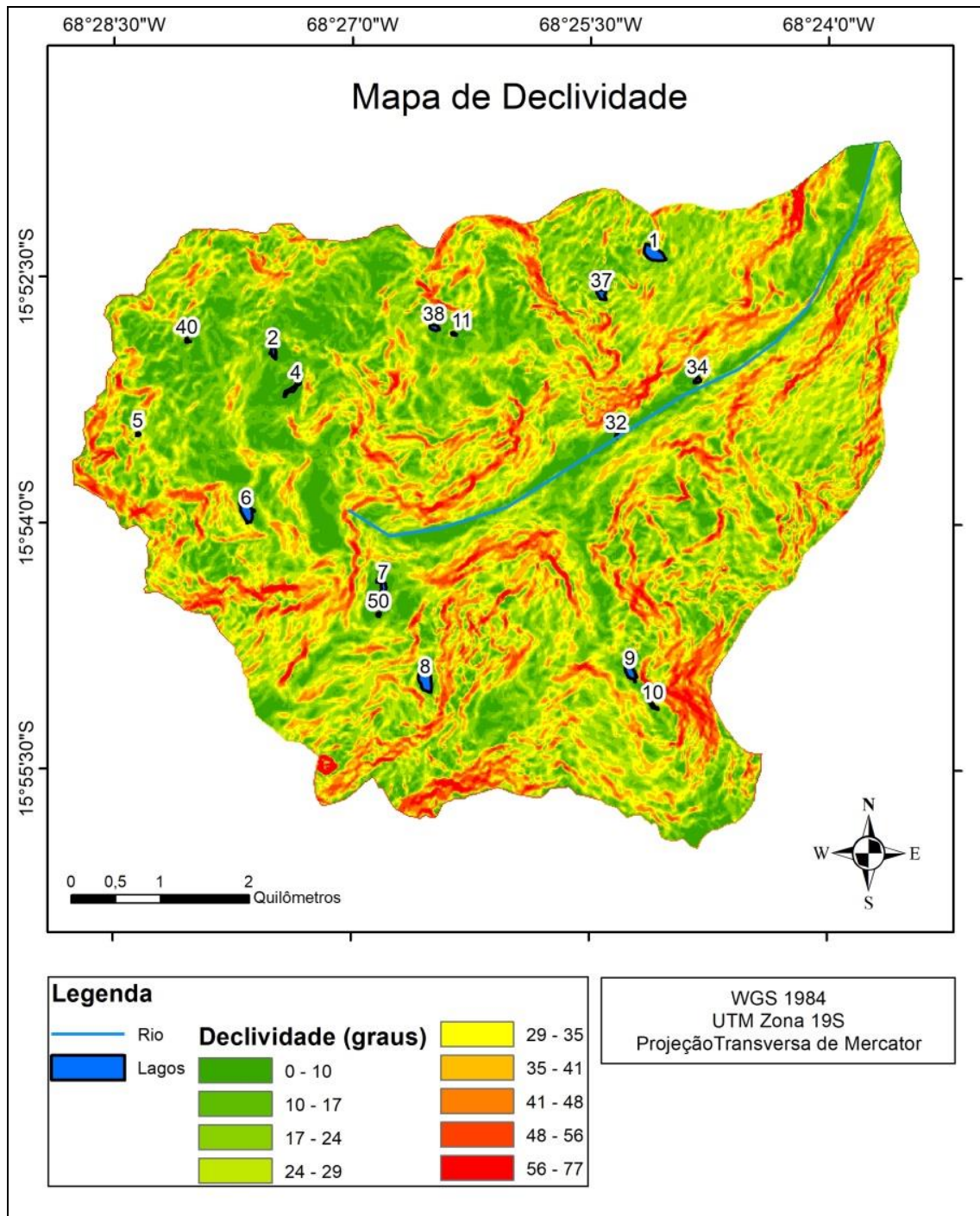
massa glacial afeta o aumento do nível do mar, os recursos hídricos e os riscos naturais. Conforme Fischer *et al.* (2016), a aceleração do degelo em geleiras de montanha sinaliza fortemente a mudança climática global e afeta os processos geomorfológicos e hidrológicos locais.

4.2.4 Declividade entre os Lagos Glaciais e a Geleira Adjacente

A declividade máxima encontrada na sub-bacia de estudo foi de $77,63^\circ$ e a mínima de 0° , resultando em uma declividade média de $27,24^\circ$. Em relação à declividade entre os lagos e as suas respectivas geleiras, foram identificados 4 lagos com declividade entre 30° e 45° e 12 lagos com declividade acima de 45° . Nenhum dos lagos apresentou declividade inferior à 30° em relação a sua geleira adjacente, o que indica que todos os lagos estão classificados como médio ou alto risco com relação ao parâmetro da declividade. Conforme Wang *et al.* (2011), a distância do lago até a geleira adjacente, assim como a declividade entre eles, são fatores que influenciam significativamente na possibilidade de que o gelo atinja o lago glacial após o seu desprendimento.

A Figura 15 apresenta a declividade em toda a sub-bacia estudada, sendo que as áreas mais próximas ao vermelho indicam maior declividade, enquanto as áreas de cor próxima ao verde indicam menor declividade. Apenas o lago com ID 2 está em uma área de menor declividade, apesar disso, este ainda ficou na classe 2 de risco, pois, áreas com declive entre 30° e 45° estão a menos de 250 m de proximidade desse lago. Ou seja, as encostas íngremes estão mais afastadas deste lago do que dos outros, mas, ainda assim, estão a menos de 250 m. Conforme Carrivick e Tweed (2013), aumentos no ângulo e no relevo do talude, juntamente com a perda de atrito interno e coesão dos materiais do talude, preparam os taludes para a falha. Essas condições propiciam uma maior suscetibilidade a movimentos de massa.

Figura 15: Mapa de declividade da área de estudo



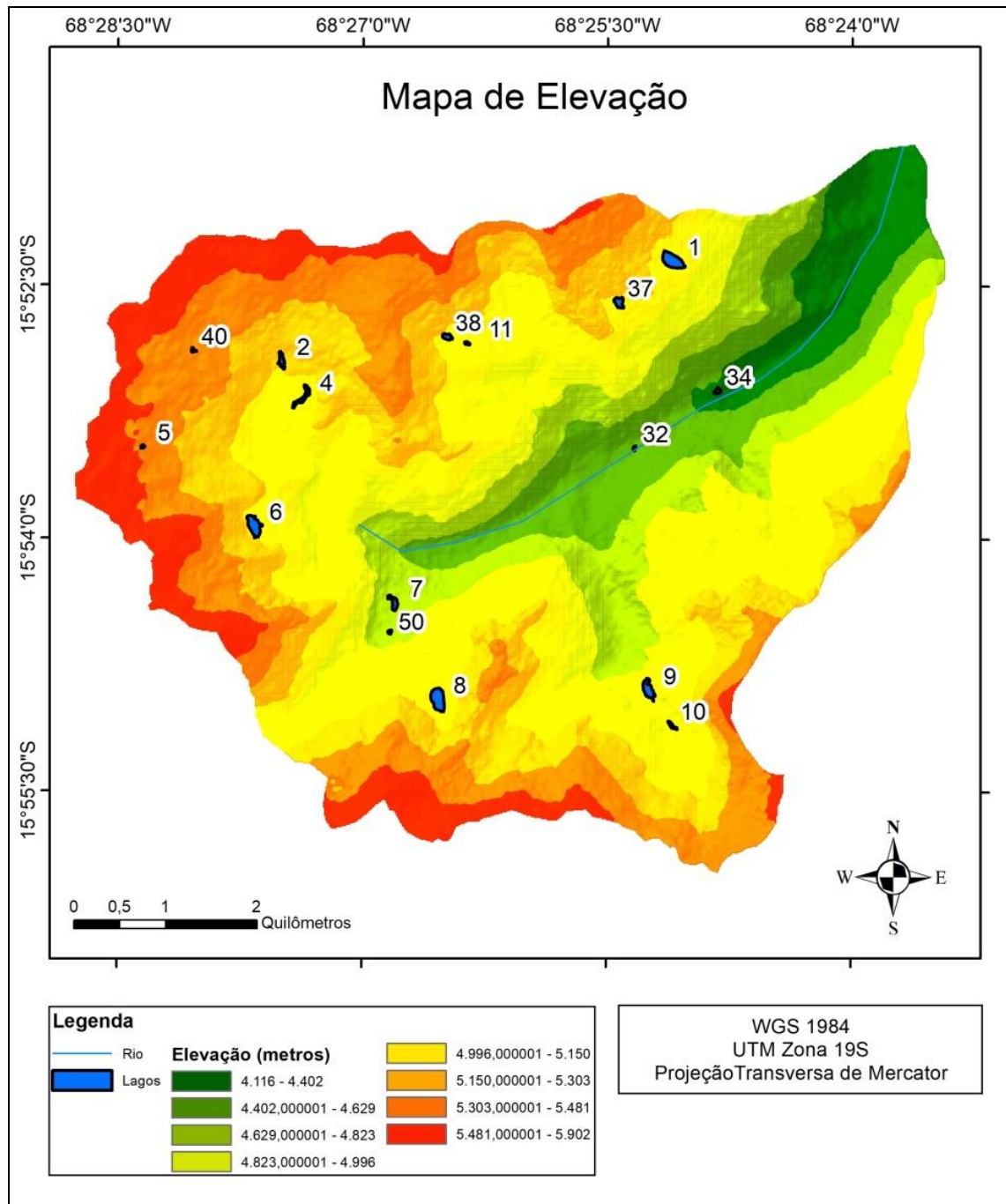
Fonte: elaboração da autora e orientadora, 2023.

4.2.5 Elevação dos Lagos Glaciais

O contexto de elevação máxima da sub-bacia de estudo é de 5.902 m e a elevação mínima é de 4.116 m, resultando em uma elevação média de 5.042 m. O lago mais elevado (ID 5) está a uma altitude de 5.447 m, enquanto o menos elevado

(ID 34) está a 4.390 m. É interessante destacar que o setor Norte da sub-bacia possui maior elevação, o que pode explicar também a maior presença de cobertura glacial nessa região. A inexistência de lagos abastecidos pelo setor Norte em 1999 evidencia a elevação da frente glacial no período.

Figura 16: Mapa de elevação da área de estudo



Fonte: elaboração da autora e orientadora, 2023.

A Figura 16 apresenta a elevação em toda a sub-bacia estudada, sendo que as áreas mais próximas ao vermelho indicam maior elevação, enquanto as áreas de cor próximas ao verde indicam menor elevação.

4.2.6 Tipo de Barragem dos Lagos Glaciais

Em quatro lagos foi possível identificar o tipo de barramento rochoso, sendo que dois deles (IDs 1 e 37) estão situados em um vale de circo. Para esses foi atribuída a classificação de risco 2, pois, de certa forma, não se tratam de lagos “represados”, mas lagos que ocupam depressões, também chamados de lagos confinados (MERGILI; SCHNEIDER, 2011; KOUKOULOS, 2019). Portanto, são considerados lagos relativamente estáveis, tendo em vista o tipo de barragem (HUGGEL *et al.*, 2004). A Figura 17 apresenta o lago 6, exemplificando o tipo de barragem rochosa.

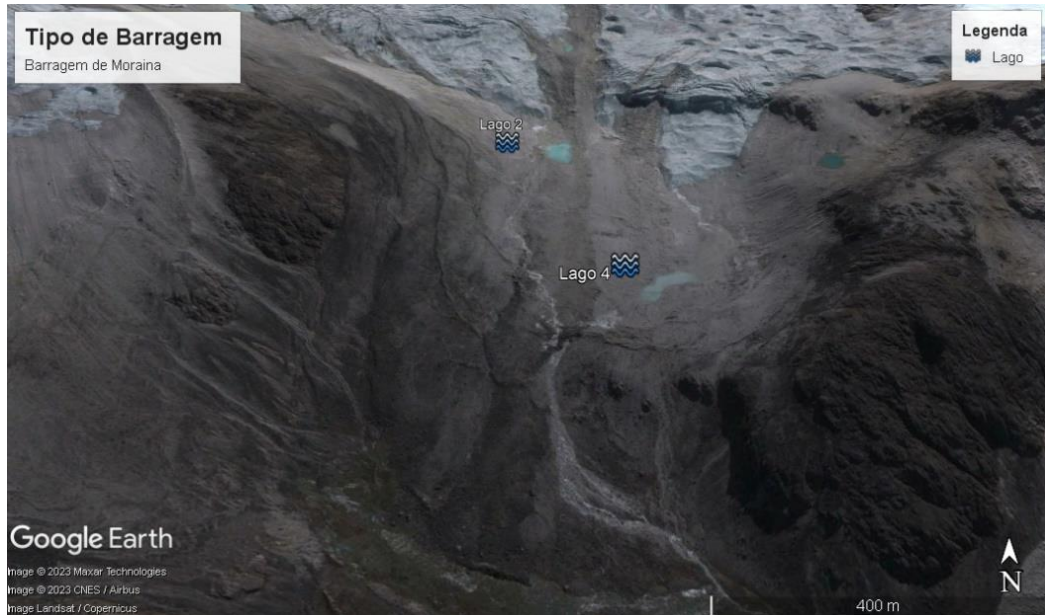
Figura 17: Lago com barramento rochoso



Fonte: elaborado no Google Earth pela autora, 2023.

Foram identificados nove lagos cujo barramento é formado por morainas, aos quais foi atribuído o risco 3, esse tipo de lago é considerado mais perigoso, pois, um evento inicial pode formar uma brecha na moraina, drenando o lago (WESTOBY *et al.*, 2015). A Figura 18 apresenta os lagos 2 e 4, exemplificando o tipo de barramento por morainas.

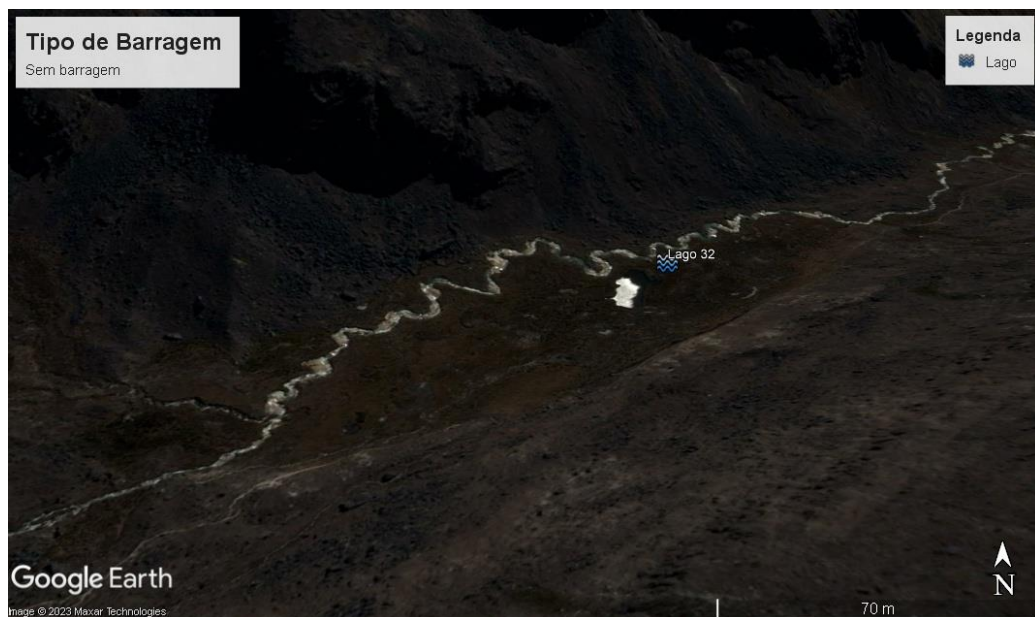
Figura 18: Lago com barramento de moraina



Fonte: elaborado no Google Earth pela autora, 2023.

Ainda, foram identificados três lagos sem nenhum tipo de barramento, aos quais foi atribuído risco 1, tendo em vista que não há risco de rompimento brusco. A Figura 19 apresenta o lago 32, que está exemplificando um lago sem nenhum barramento.

Figura 19: Lago sem barramento

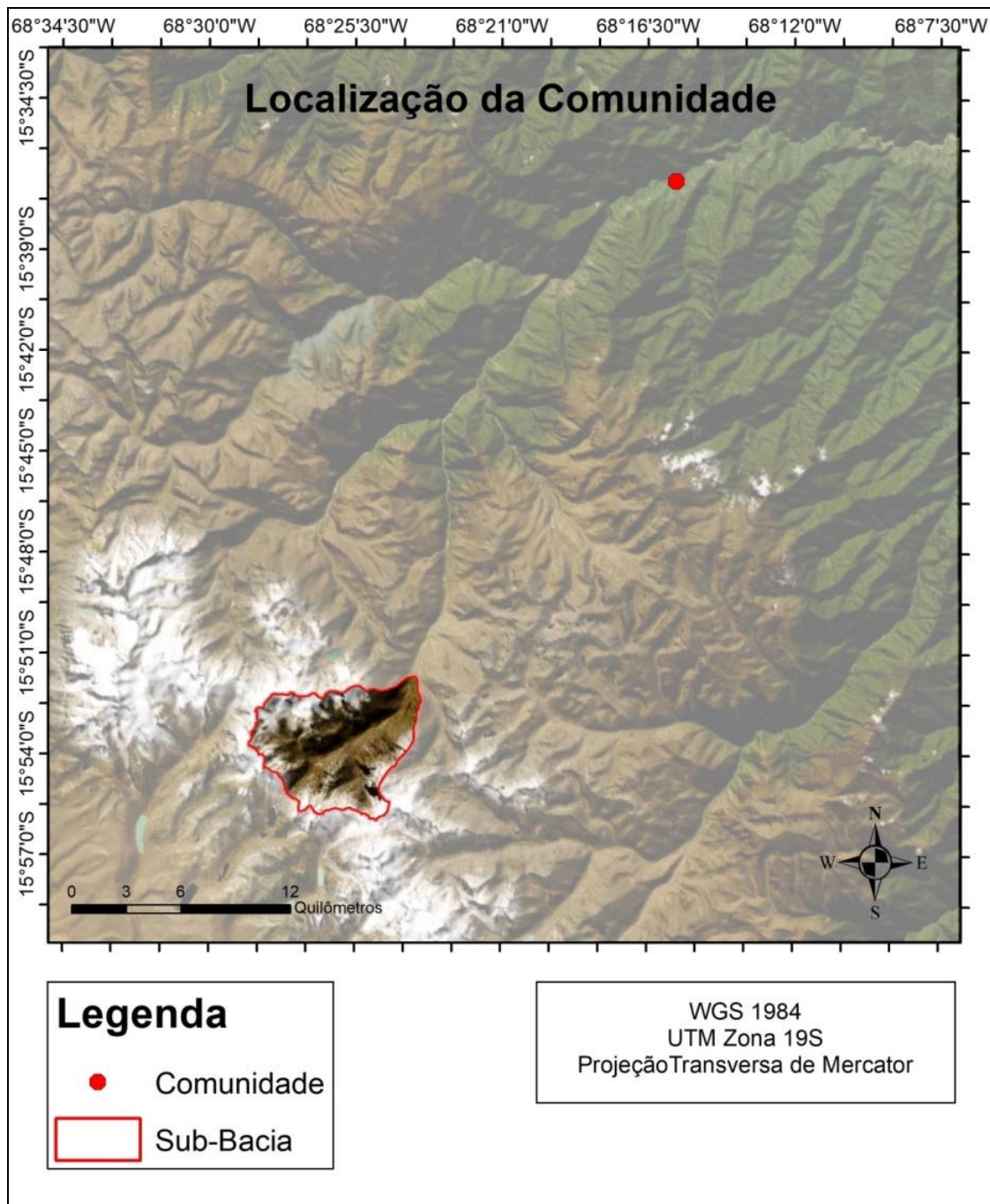


Fonte: elaborado no Google Earth pela autora, 2023.

4.2.7 Distância da Sub-bacia até a Comunidade Mais Próxima

Em relação às comunidades a jusante da área de estudo, a mais próxima está a uma distância de 30,71 km, em linha reta. Esta distância foi considerada como risco médio no presente estudo. A Figura 20 apresenta a localização da comunidade mais próxima em relação à sub-bacia estudada.

Figura 20: Mapa de localização da comunidade mais próxima à área de estudo



Fonte: elaboração da autora e orientadora, 2023.

Worni, Huggel e Stoffel (2013) também consideraram de risco médio os lagos Spong Togpo e Gopang Gath, ambos localizados no Himalaia indiano, e situados a uma distância de 19 km e 10 km, respectivamente, das comunidades mais próximas, em função do número baixo de habitantes a jusante e às longas distâncias necessárias para o impacto das cheias nas comunidades.

4.2.8 Distância dos Lagos Glaciais até o Rio

Para a identificação da distância dos lagos até o curso principal da sub-bacia foi utilizada a ferramenta “*Buffer*” do Arcgis. Foram encontrados os seguintes resultados: cinco lagos estão localizados a 1.200 m do rio ou menos, sendo esses classificados como de alto risco; oito lagos estão localizados a uma distância entre 1.200 e 2.400 m do rio, sendo classificados como de médio risco; e três lagos estão a uma distância maior de 2.400 m, aos quais foi atribuído baixo risco.

A proximidade dos lagos glaciais com o curso do rio pode ter grande impacto quando da ocorrência de um GLOF, pois, conforme Benn e Evans (2010), esses eventos podem ocasionar fluxos fluviais intensos, com magnitude maior que as descargas máximas de eventos de precipitação intensa, acarretando grandes implicações para a mudança da paisagem, infraestrutura e vida humana.

4.3 SUSCETIBILIDADE DE INUNDAÇÃO ASSOCIADA AOS LAGOS GLACIAIS

Após a aplicação de toda a metodologia, foi possível obter a suscetibilidade a GLOF de cada um dos lagos glaciais estudados, a qual está resumida na Tabela 11.

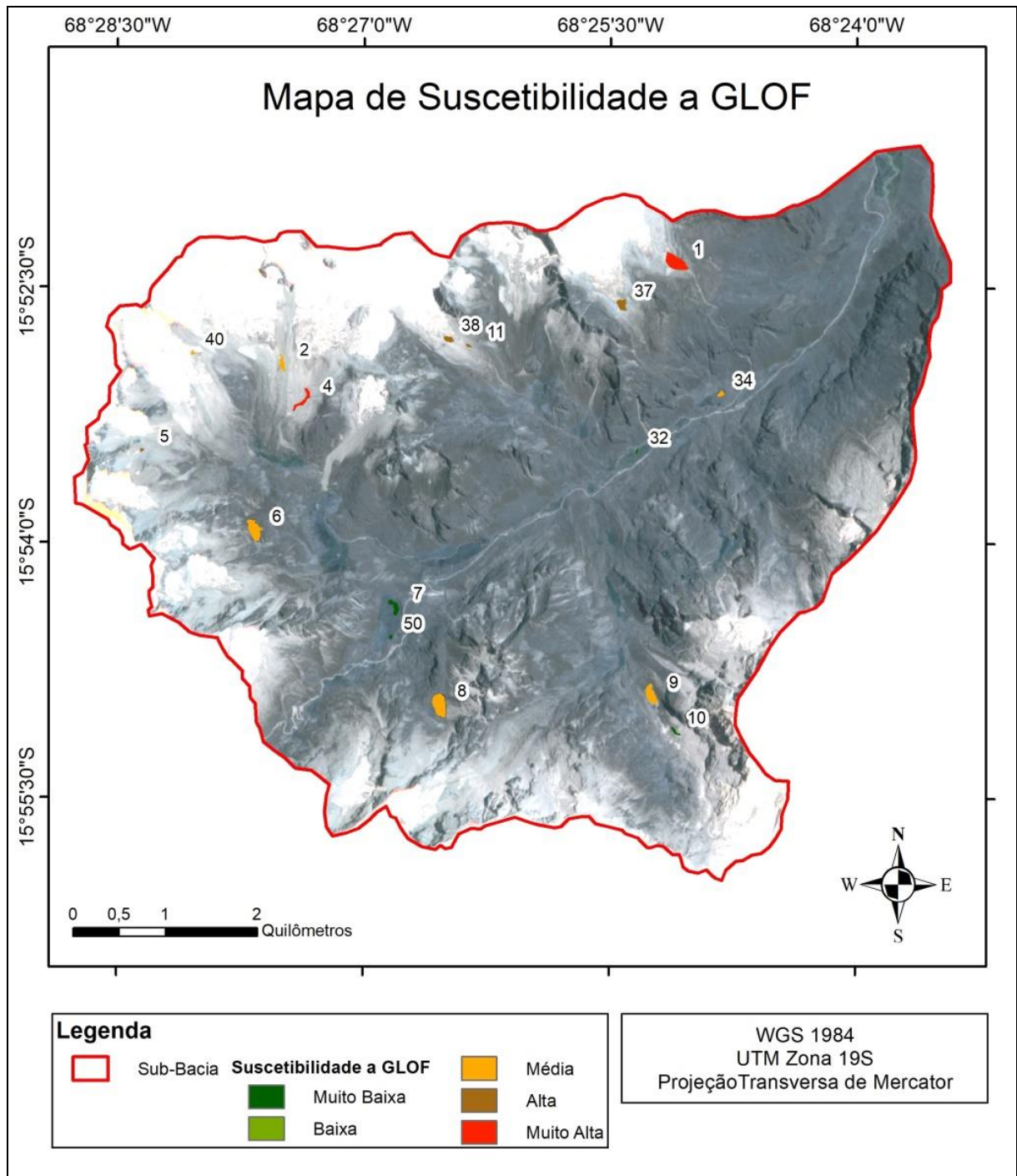
Tabela 11: Suscetibilidade a GLOF dos lagos estudados

<i>Suscetibilidade a GLOF</i>	<i>ID do Lago</i>
<i>Muito Alta</i>	1 e 4
<i>Alta</i>	5, 11, 37 e 38
<i>Média</i>	2, 6, 8, 9, 34 e 40
<i>Baixa</i>	-
<i>Muito Baixa</i>	7, 10, 32 e 50

Fonte: elaboração da autora, 2023.

Conforme pode ser observado na Figura 21, dois lagos possuem suscetibilidade muito alta a GLOF, quatro lagos possuem suscetibilidade alta, seis lagos possuem suscetibilidade média, nenhum lago possui suscetibilidade baixa, e quatro lagos possuem suscetibilidade muito baixa.

Figura 21: Mapa de suscetibilidade a GLOF



Fonte: elaboração da autora e orientadora, 2023.

Os lagos 1 e 4, identificados como lagos de suscetibilidade muito alta a GLOF, estão localizados na porção Norte da sub-bacia, setor que possui a maior área de cobertura glacial. Esses lagos também foram classificados como de alto risco em relação aos seguintes parâmetros: área do lago, distância até a geleira adjacente e declividade. Esses são os quatro parâmetros de maior peso na metodologia AHP (Tabela 9), o que influenciou nos resultados para os lagos 1 e 4 (muito alta suscetibilidade).

Em relação aos lagos 5, 11, 37 e 38, que foram considerados de alta suscetibilidade a GLOF, foi possível verificar que esses também obtiveram nota 3, ou seja, risco alto, em relação aos parâmetros área de cobertura glacial, distância à geleira, e declividade. Já no parâmetro área dos lagos, todos obtiveram nota 2, portanto, médio risco, o que foi o diferencial para que esses fossem considerados lagos de alta suscetibilidade a GLOF ao invés de muito alta suscetibilidade.

Já os lagos 2, 6, 8, 9, 34 e 40, classificados como de média suscetibilidade a GLOF, tiveram notas mais variadas em cada parâmetro. O lago 2, por exemplo, obteve nota 3 nas seguintes classes: área da cobertura glacial, distância até a geleira, elevação e tipo de barragem. Os parâmetros elevação e tipo de barragem possuem pesos menores na metodologia AHP, fator que pode ter contribuído para que esse lago fosse classificado como média suscetibilidade. Situações semelhantes acontecem com os demais lagos de média suscetibilidade a GLOF.

Nenhum dos lagos foi classificado como de baixa suscetibilidade a GLOF, porém, os lagos 7, 10, 32 e 50 foram classificados com suscetibilidade a GLOF muito baixa, isso porque poucos parâmetros desses lagos foram classificados com classe/nota 3 (alto risco). O lago 32, por exemplo, apesar de ter nota 3 para os parâmetros área da cobertura glacial, declividade e distância até o rio, possui nota 1 para a distância até a geleira e tipo de barragem. O lago 10 possui nota 3 para declividade e tipo de barragem, e os lagos 7 e 50 possuem nota 3 apenas para o parâmetro distância até o rio.

É importante observar que, em 1999, os lagos 1 e 4 não foram identificados nas imagens, sugerindo que estes ainda não existiam. Já no ano de 2011, o lago 1 apareceu e, na verdade, ele se tratava de dois lagos menores, que acabaram se unindo, conforme pôde ser observado já na imagem de 2015. Em relação ao período de 2011 a 2022, o lago 1 teve um incremento de área de 0,0251 km², o que representa um aumento de 836,67%. Da mesma forma, o lago 4 apareceu nas

imagens apenas em 2011 e no ano de 2015 já estava unificado (em 2011 também eram 2 lagos). Em relação ao período de 2011 a 2022, o lago 4 teve um aumento de área de 0,0070 km², representando um crescimento de 194,44%. O comportamento dos lagos 1 e 4 no período estudado pode ser uma resposta à perda de massa das geleiras conforme observado por outros autores (COOK *et al.*, 2016; KOUKOULOS, 2019) e indica que o presente cenário de suscetibilidade a GLOF pode vir a se tornar ainda mais preocupante.

Pode-se dizer que o monitoramento dos lagos e geleiras da sub-bacia estudada, principalmente dos lagos 1 e 4, seria uma das principais medidas a serem adotadas no sentido de mitigar os riscos criosféricos associados a eles, como os riscos de inundações. De acordo com Whiteman (2011), o monitoramento, mapeamento e interpretação são etapas essenciais para avaliar o nível de risco associado a um perigo específico.

Ao mesmo tempo, os lagos glaciais são fonte de água para a população a jusante e para diversas atividades econômicas. O gerenciamento e monitoramento de lagos glaciais pode gerar cobenefícios com relação à diminuição de riscos de desastres, gestão de recursos hídricos e produção de energia, mas as restrições legais, sociais, culturais e políticas para sua implementação permanecem (HAEBERLI *et al.*, 2016; VUILLE *et al.*, 2018).

Variação da área dos lagos, distância do lago até a geleira, existência de comunidades a jusante, são alguns dos parâmetros constantemente utilizados por pesquisadores para determinar se um lago é perigoso ao rompimento. A área do lago afeta o volume de água e o volume máximo de enchente que poderá ser causado pelo GLOF. A distância entre o lago e o término da geleira determina a quantidade de neve/gelo/rocha que poderão atingir o lago, provocando deslocamento da água e gerando inundações (AWAL *et al.*, 2010; SCHAUB *et al.*, 2013). Comunidades a jusante podem ser impactadas negativamente, a exemplo do GLOF de 1941 em Palcacocha, no Peru. Ou seja, a deglaciação das geleiras e os lagos proglaciais são um desafio para o monitoramento futuro. É preciso que mais áreas sejam monitoradas para obtenção de dados confiáveis e desenvolvimento de medidas de adaptação local e modelos de processo para outras regiões do mundo (FISCHER *et al.*, 2016).

A recente perda de área das geleiras nos Andes bolivianos (COOK *et al.*, 2016; KOUKOULOS, 2019) demonstra que os processos paraglaciais devem ser

examinados com cautela, a fim de informar a gestão da bacia hidrográfica quanto à mudança na entrada de sedimentos, mudanças no ecossistema boliviano de alta montanha e nas atividades humanas, como hidrelétricas e turismo. Encostas íngremes recentemente descobertas são mais suscetíveis a deslizamentos de terra, o que pode propiciar a ocorrência de GLOFs (KOUKOULOS, 2019).

O estudo de Koukoulos (2019) abrangeu 3 lagos de grandes dimensões na Bolívia, os lagos Pelechuco, Laguna Glaciar e Laguna Arkhata. Ao analisar os cenários potenciais de inundação nas comunidades a jusante, verificou que 1.140 pessoas seriam afetadas, se considerado um cenário otimista; 1.260 pessoas seriam afetadas, se considerado um cenário intermediário; e 2.202 pessoas seriam afetadas, quando considerado um cenário pessimista. O estudo concluiu que os lagos Pelechuco e Laguna Arkhata representam maior risco de GLOF, em função do grande número de pessoas que habitam as vias de fluxo potencial e, por este motivo, devem ser considerados prioridade para realização de ações de mitigação de risco. O autor destaca, ainda, que os lagos devem ser monitorados diante da retração das geleiras, a fim de avaliar as consequências para o seu volume. Essa mesma consideração pode ser aplicada para os lagos alimentados por geleiras na sub-bacia Chajolpaya.

Para uma melhor adaptação aos riscos relativos às geleiras é preciso que haja planejamento e implementação de medidas preventivas, como identificação dos perigos, códigos de construção, zoneamento e planejamento do uso da terra, estabelecimento de rotas de evacuação, alertas e sistemas de alarme, protocolos de emergência, educação e programas de extensão, entre outras medidas (HUGGEL *et al.*, 2012; SCHNEIDER *et al.*, 2014; MUÑOZ *et al.*, 2016). Os Andes tropicais já enfrentam muitos desafios relacionados ao abastecimento e uso sustentável de água doce, além dos perigos de alta montanha, em função das mudanças climáticas e socioambientais. Esse enfrentamento precisará estar baseado em estratégias abrangentes, que promovam integração entre ciência, cultura, política e prática, além de envolver as populações locais (PAYNE; SHEPARDON, 2015).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou os riscos criosféricos associados a lagos glaciais localizados na porção Norte da Cordilheira Real, na Bolívia. Foram investigadas as características dos lagos como variação da sua área, dimensões, proximidade da margem glacial, presença de morainas, declividade, elevação, além de ser realizada uma análise de suscetibilidade à inundação por GLOF. Para obtenção desses resultados foram utilizadas ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento.

A partir das imagens de satélite, referentes aos anos de 1999, 2011, 2015 e 2022, foi possível realizar a vetorização dos lagos glaciais em cada ano, na ferramenta ArcGis, o que permitiu identificar um aumento no número e tamanho dos lagos ao longo do período estudado. O maior detalhamento temporal da análise com imagens de alta resolução espacial é relevante para compreender a variação dos lagos ao longo das últimas décadas. Os lagos podem ter uma variação interanual influenciada pela precipitação e o derretimento da cobertura de neve e gelo na sub-bacia e o comportamento dessas variáveis podem ser consideradas na avaliação dos resultados sobre a área dos lagos.

Dentre os lagos glaciais encontrados no ano de 2022 (um total de 32), foram selecionados 16 para serem analisados e monitorados neste estudo, a partir de critérios estabelecidos. Utilizando a metodologia de análise hierárquica ponderada (AHP), foram identificados 2 lagos com muito alta suscetibilidade a GLOF, e 4 lagos com alta suscetibilidade, indicando a existência de riscos criosféricos associados a estes lagos. O método AHP se apresenta como uma alternativa plausível para o monitoramento de regiões de difícil acesso, podendo ser adaptado conforme as características específicas da área de estudo. Se aplicado conjuntamente com pesquisa de campo, o resultado poderá ser ainda mais preciso. O estudo de Zhang *et al.* (2023) também utilizou o método AHP e o resultado obtido acabou sendo validado, pois o lago que obteve a maior pontuação de avaliação de risco sofreu um evento de GLOF em 2020.

Assim, é possível afirmar que o presente trabalho de conclusão de curso contribuiu para o monitoramento da área de estudo, por meio da análise de suscetibilidade a GLOF, informação que é relevante para as comunidades que vivem a jusante da sub-bacia e para as autoridades locais, que podem planejar políticas de

monitoramento para aquela região com maior clareza. Além disso, o trabalho desenvolvido possibilitará a geração de um banco de dados para avaliar riscos criosféricos na sub-bacia Chajolpaya.

Para discussões futuras, sugere-se que seja realizada uma caracterização mais detalhada da área de estudo. Em relação aos parâmetros abordados no estudo, sugere-se que seja utilizado o volume do lago, ao invés da área, e que seja feita uma vetorização individual por geleira adjacente, ao invés de vetorização por setor, tendo em vista que ambos os parâmetros possuem um peso elevado na metodologia AHP, aplicada no presente estudo. Além disso, recomenda-se a realização de uma pesquisa das populações a jusante, para obtenção de informações como o número de habitantes e quantidade de construções e edificações, no intuito de entender os impactos dos riscos associados a GLOFs.

Os Andes tropicais já enfrentam muitos desafios relacionados ao abastecimento e uso sustentável de água doce, além dos perigos de alta montanha, em função das mudanças climáticas e socioambientais. Esse enfrentamento precisará estar baseado em estratégias abrangentes, que promovam integração entre ciência, cultura, política e prática, além de envolver as populações locais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, R. *et al.* Expansion of Moraine-Dammed Glacial Lakes and Historical GLOF Events in Cordillera Blanca Region of Peruvian Andes. **Earth Syst Environ** 7, 131–150, 2023. <https://doi.org/10.1007/s41748-022-00330-0>
- ANACONA, P. I.; MACKINTOSH, A.; NORTON, K. Reconstruction of a glacial lake outburst flood (GLOF) in the Engaño Valley, Chilean Patagonia: Lessons for GLOF risk management. **Science of the Total Environment**, p. 1–11, 2015.
- AWAL, R.; NAKAGAWA, H.; FUJITA, M.; KAIWAKE, K.; BABA, Y.; ZHANG, H. Experimental study on glacial lake outburst floods due to waves overtopping and erosion of moraine dam. **Ann. Disaster Prev. Res. Inst.**, v.53, n.B, p.583–594, 2010.
- AYES RIVERA, I.; ARMIJOS CARDENAS, E.; ESPINOZA-VILLAR, R.; ESPINOZA, J.; MOLINA-CARPIO, J.; AYALA, J.; GUTIERREZ-CORI, O.; MARTINEZ, J.-M.; FILIZOLA, N. Decline of Fine Suspended Sediments in the Madeira River Basin. **Water**, v.11, n.3, p. 514, 2003–2017, doi:10.3390/w11030514, 2019.
- BAJRACHARYA, S.R.; MOOL, P. Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. **Annals of Glaciology**, v.50, p.81–86, 2009.
- BAJRACHARYA, S.R.; MAHARJAN, S. B.; SHRESTHA, F. Glaciers in the Indus Basin. In: KHAN, Sadiq I.; ADAMS, Thomas E.. Indus River Basin, **Elsevier**, p. 123–144, 2019.
- BALLANTYNE, C.K. A general model of paraglacial landscape response. **The Holocene**, v. 12, n.3, 371–376, 2002.
- BENDLE, Jacob. **Glacial Lake Outburst Floods**. 2020. Disponível em: <https://www.antarcticglaciers.org/glacier-processes/glacial-lakes/glacial-lake-outburst-floods/>. Acesso em 08 set. 2022.
- BENN, D. I.; BOLCH, T.; HANDS, K.; GULLEY, J.; LUCKMAN, A.; NICHOLSON, L. I.; *et al.* Response of debris-covered glaciers in the Mount Everest region to recent warming, and implications for outburst flood hazards. **Earth Sci. Rev.** v.114, p.156–174, 2012. doi: 10.1016/j.earscirev.2012.03.008.
- BENN, D.I.; EVANS, D.J.A. Glaciers and Glaciation. **Routledge**. p. 86–96, 2010.
- BORGES, R. O. *et al.* Aplicação do índice da diferença normalizada da água (NDWI) na delimitação de fluxos de sedimentos em suspensão no Rio Araguaia: avaliação das imagens Landsat 8 para o monitoramento hidroviário. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR (INPE). **Anais**. João Pessoa-PB, Brasil, 2015.

BREMER, Ulisses Franz. **Morfologia e bacias de drenagem da cobertura de gelo da Ilha Rei George, Antártica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998.

CARDONA, O.D. The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: a necessary review and criticism for effective risk management. In: Mapping vulnerability: disasters, development and people, p. 35-51. **Earthscan**. Londres, 2004.

CAREY, M. *et al.* A socio-cryospheric systems approach to glacier hazards, glacier runoff variability, and climate change. **Hazards and Disasters Series, Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters**, p. 215-257. 2.ed., 2021.

CAREY, M. *et al.* An integrated socioenvironmental framework for glacial hazard management and climate change adaptation: lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. **Clim. Chang.** v.112, p.733–767, 2012.

CAREY, M. Living and dying with glaciers: people's historical vulnerability to avalanches and outburst floods in Peru. **Global and Planetary Change**, v.47, p.122–134, 2005.

CAREY, M. P.: In the shadow of melting glaciers: climate change and Andean Society, **Oxford University Press**, New York, USA, 2010.

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

CARRIVICK, J. L.; TWEED, F. S. A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods, **Global and Planetary Change**, v. 144, p. 1-16, 2016.

CARRIVICK, J.L.; RUSSELL, A.J.,. Glaciofluvial landforms of deposition. In: ELIAS, S.A. (Ed.). **The Encyclopedia of Quaternary Science**, v. 2. Amsterdam: Elsevier, 2013.

CHRISTOPHERSON, R. W.; BIRKELAND, G. H. **Geossistemas: uma introdução a Geografia Física**. 9.ed., 2017.

COOK, S. J.; KOUKOULOS, I.; EDWARDS, L. A.; DORTCH, J.; HOFFMANN, D. Glacier change and glacial lake outburst flood risk in the Bolivian Andes. **The Cryosphere**, v.10, n.5, pp. 2399–2413, 2016.

COSTA, Rafaela Mattos. **Migrações na Comunidade Campesina de Phinaya, Cordilheira Vilcanota, Peru**: Contexto das Mudanças Climáticas e Socioambientais. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

CUFFEY, K.M; PATERSON, W.S.B. **The Physics of Glaciers**. 4.ed. Academic Press, 2010.

DING, Y. *et al.* Increasing cryospheric hazards in a warming climate. **Earth-Science Reviews**, v. 213, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103500>. Acesso em 07 out. 2012.

EMBLENTON-HAMANN, C. (2004). Proglacial landforms. In: GOUDIE, A. S. (Ed.) **Encyclopedia of geomorphology**. London: Routledge, v. 2, p. 810-813.

EOS - Earth Observing System. **Índice de Água de Diferença Normalizada**. 2023. Disponível em: <https://eos.com/pt/make-an-analysis/ndwi/>. Acesso em: 09 fev. 2023.

EVANS, S. G.; DELANEY, K. B. Capítulo 16 - Catastrophic Mass Flows in the Mountain Glacial Environment. **Hazards and Disasters Series, Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters**, p. 563-606. 2.ed. 2015.

FAVIER, V.; WAGNON, P.; RIBSTEIN, P. Glaciers of the outer and inner tropics: A different behaviour but a common response to climatic forcing. **Geophysical Research Letters**, v.31, n.16, pp. 1–5, 2004.

FERREIRA, P. S.; SILVA, C. A. O método AHP e a Álgebra de Mapas para determinar a fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Brilhante (Mato Grosso do Sul / Brasil), proposições para a gestão do território. **Revista Confins**, n. 46. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4000/confins.30897>.

FISCHER, A.; HELFRICHT, K.; WIESENEGGER, H.; HARTL, L.; SEISER, B.; STOCKER WALDHUBER, M. Chapter 9 - What Future for Mountain Glaciers? Insights and Implications From Long-Term Monitoring in the Austrian Alps. In: GREENWOOD, Gregory B.; SHRODER, J.F. **Developments in Earth Surface Processes**, v. 21, p.325-382, 2016.

FLOHN, H.; KAPALA, A.; KNOCHE H.R.; MACHEL, H. Recent changes of the tropical water energy budget and of mid-latitude circulations. **Climate Dynamics**, v.4, p. 237–252, 1990.

FRANCOU, B.; RAMIREZ, E.; CÁCERES, B.; MENDOZA, J. Glacier evolution in the tropical Andes during the last decades of the 20th century: Chacaltaya, Bolivia, and Antizana, Ecuador, **Ambio**, v.29, n.7, p. 416-422, 2000.

GAIKWAD, D.; GUHA, S.; TIWARI, R. K. Monitoring Spatiotemporal Patterns of Glacial Lakes in the Eastern Himalayas Using Satellite Data and Nonparametric Statistical Testing Techniques. In: **Handbook of Himalayan Ecosystems and Sustainability**, v. 2, nov. 2022.

GAIKWAD, D.; KUMAR, M.; TIWARI, R. K.; GUHA, S. Glacial Lake Dynamics and Outburst Flood Hazard Assessment of Glacial Lakes in Sikkim Himalaya using AHP and FAHP Multi-Criteria Decision-Making Methods. **Conference**, 2022. Disponível em: <https://www.cryosphere2022.is/2022>.

GARREAUD, R. D.; VUILLE, M.; COMPAGNUCCI, R.; MARENGO, J. Present-day South American climate. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.281, n.3-4, pp. 180–195, 2009.

HAEBERLI, W.; LINSBAUER, A.; COCHACHIN, A.; SALAZAR, C.; FISCHER, U. H. On the morphological characteristics of overdeepenings in high-mountain glacier beds. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.41, n.13, pp. 1980–1990, 2016.

HAEBERLI, Wilfried; WHITEMAN, Colin. Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters: A General Framework. In: **Hazards and Disasters Series, Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters**, 2.ed. p. 165-198, 2021.

HALL, D.K; MARTINEC, J. **Remote Sensing of Ice and Snow**. Londres: Champman, p. 189, 1985.

HOCK, R., G. *et al.* **IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. In press, 2019.

HU, J.; YAO, X.; DUAN, H.; ZHANG, Y.; WANG, Y.; WU, T. Temporal and Spatial Changes and GLOF Susceptibility Assessment of Glacial Lakes in Nepal from 2000 to 2020. **Remote Sensing**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs14195034>.

HUGGEL, C.; CAREY, M.; EMMER, A.; FREY, H.; Walker-Crawford, N.; WALLIMANN-HELMER, I. Anthropogenic climate change and glacier lake outburst flood risk: local and global drivers and responsibilities for the case of lake Palcacocha, Peru, **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v.20, p.2175–2193, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2175-2020>.

HUGGEL, C.; HAEBERLI, W.; KÄÄB, A.; BIERI, D.; RICHARDSON, S. (2004) An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. **Canadian Geotechnical Journal**, v.41, p. 1068–1083.

HUGGEL, C.; ROHRER, M.; CALANCA, P.; SALZMANN, N.; VERGARA, W.; QUISPE, N.; CEBALLOS, J.L. Early warning systems: The “last mile” of adaptation. **Eos**, 93 (22) (2012), pp. 209-210.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. SPRING: Tutorial de Geoprocessamento, 2006. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_sen.html. Acesso em 13/02/2023.

IPCC – INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University, 2014.

IPCC. **Annex II: Glossary**. In: **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University, Cambridge, p. 2897–2930, 2022. DOI:10.1017/9781009325844.029.

ITURRIZAGA, L. Glacier Lake Outburst Floods. In: SINGH, V.P.; SINGH, P.; HARITASHYA, U.K. **Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers**. Springer. p 381–399, 2011.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente**: uma perspectiva em Recursos Terrestres. São José dos Campos, SP: Parênteses, 2009.

JORDAN, E.; BROCKMAN, C.; FERNANDEZ, A.; ALVAREZ, R.; JACOBSEN, K. The glacier inventory of Bolivia. **World glacier inventory**, v.126, n.126, p. 25–32, 1980.

KASER, G. A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. **Global and Planetary Change**, v.22, p.93–103, 1999.

KASER, G. Some notes on the behavior of tropical glaciers. **Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines**, v.24, p.671-681, 1995.

KHADKA, N.; CHEN, X.; NIE, Y.; THAKURI, S.; ZHENG, G.; ZHANG, G. (2021) Evaluation of Glacial Lake Outburst Flood Susceptibility Using Multi-Criteria Assessment Framework in Mahalangur Himalaya. *Front. Earth Sci.* 8:601288. doi: 10.3389/feart.2020.601288.

KOUGKOULOS, I. Glacial lake outburst flood risk in the Bolivian Andes. **Manchester Metropolitan University**, 2019.

KUMAR, V; RANJAN, D.; VERMA, K. Global climate change: the loop between cause and impact. **Global Climate Change**. p. 187-211, 2021. ISBN 978-0-12-822928-6.

LAFRENIERE, J.; MARK, B.G. A review of methods for estimating the contribution of glacial meltwater to total watershed discharge *Prog. Phys. Geogr.*, v.38, n.2, p. 173-200, 2014.

MACHADO, M. R. *et al.* Paisagens polares não glaciais (proglacial, paraglacial e periglacial): revisão de conceitos e contribuições da pesquisa pedogeomorfológica brasileira. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 3, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i3.1639>. Acesso em 06/12/2022.

MARK, B.G.; MCKENZIE, J.M. Tracing increasing tropical Andean glacier melt with stable isotopes in water *Environ. Sci. Technol.*, v.41, pp. 6955-6960, 2007.

McFEETERS, S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v.1, n.7, p. 1425-1432. 1996. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.

MERGILI, M.; SCHNEIDER, J. F. Regional-scale analysis of lake outburst hazards in the southwestern Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and GIS. **Natural Hazards and Earth System Science**, v.11, n.5, p. 1447–1462, 2011.

MESSERLI, B. **The International Year of Mountains (IYM), the Mountain Research Initiative (MRI) and PAGES**. v.9, n.3, 2001.

MORAES, E. C. Fundamentos do Sensoriamento Remoto. **INPE**, 2002.

MUÑOZ, R. *et al.* (2016). Managing Glacier Related Risks Disaster in the Chucchún Catchment, Cordillera Blanca, Peru. In: Salzmann, N., Huggel, C., Nussbaumer, S., Ziervogel, G. (eds) **Climate Change Adaptation Strategies – An Upstream-downstream Perspective**. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40773-9_4.

NIE, Y. *et al.* A regional-scale assessment of Himalayan glacial lake changes using satellite observations from 1990 to 2015. **Remote Sens. Environ.** v.189, p.1–13, 2017.

NOVO, Evlyn Márcia Leão de Moraes. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 3.ed. São Paulo: Edgard Blucher. 2008.

NOVO, Evlyn Márcia Leão de Moraes; PONZONI, Flávio Jorge. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos, 2001. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/Miguel/AlunosPG/Jarvis/SR_DPI7.pdf. Acesso em: 05 fev. 2023.

OLIVEIRA, Manoela Araujo Gonçalves de. **Evolução de lagos marginais ao gelo em resposta à retração de geleiras nas ilhas Nelson e Rei George, Antártica Marítima**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, BR-RS, 2020.

PATERSON, W.S.B. **The Physics of Glaciers**. Pergamon/Elsevier Science, Oxford, 1994.

PAYNE, L.B.; SHEPARDON, D.P. Practitioners' views on useful knowledge for climate change adaptation projects **Sustain. Dev.**, v.23, pp. 355-368, 2015.

PERONDI, C. *et al.* Recentes alterações nas geleiras e nos sistemas paraglaciais, Antártica Marítima. **Revista de Geociências do Nordeste**, Caicó, v.6, n.2, (Jul-Dez), p.292-301. 2020.

PETSCH, C. **Sensoriamento remoto da calota de gelo da Ilha Renaud - Antártica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Geociências, 2014.

POUYAUD, B.; ZAPATA, M.; YERREN, J.; GOMEZ, J.; ROSAS, G.; SUAREZ, W.; RIBSTEIN, P. On the future of the water resources from glacier melting in the Cordillera Blanca, Peru. **Hydrol. Sci. J.**, v.50, p. 999-1022, 2005.

QI, M. M. *et al.* Improving the accuracy of glacial lake volume estimation: A case study in the Poiqu basin, central Himalayas. **Journal of Hydrology**, 2022. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127973.

RABATEL, A. *et al.* Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. **Cryosphere**, v.7, n.1, p. 81–102, 2013.

RAMIREZ, E.; BERGER, T.; RAMALLO, C. Impacto f climatic change on the water resource availability in the Bolivian Cordillera, a case study: The Zongo and Tuni catchments. In: **Cambio Climatico** - Organizando la Ciencia para la Cordillera Americana. Concord, Mendoza, 2006.

RAY, D.K.; NAIR, U.S.; LAWTON, R.O.; WELCH, R.M.; PIELKE, R.A. Impact of land use on Costa Rican tropical montane cloud forests: Sensitivity of orographic cloud formation to deforestation in the plains. **Journal of Geophysical Research**, v.111, 2006. doi:10.1029/2005JD006096.

REES, G. W. **Remote Sensing od Snow and Ice**. Londres: Taylor and Francis, 285 p., 2006.

RIBEIRO, Rafael da Rocha *et al.* Algoritmo para o mapeamento de geleiras a partir de dados de sensores remotos. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.65, n.5, p. 985-995, 2013.

RIBEIRO, Rafael da Rocha. **Determinação das variações das geleiras da Cordilheira Tres Cruces (Bolívia) entre 1975-2004 pela análise de imagens digitais e dados cartográficos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2007.

RIBEIRO, Rafael da Rocha. **Geleiras tropicais na América do Sul e as variações climáticas da Bacia Amazônica Ocidental**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2014.

RICHARDSON, S.D.; REYNOLDS, J.M. An overview of glacial hazards in the Himalayas. **Quaternary International**, v.65, p.31–47, 2000.

RONCHAIL, J. *et al.* Rainfall variability in the Amazon Basin and SSTs in tropical Pacific and Atlantic oceans. **International Journal of Climatology**, v.22, p. 1663-1686, 2002.

ROUNCE, D. R. *et al.* Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters. **Science**, 2023, v. 379, p. 78-83. DOI: 10.1126/science.abo1324.

SANTOS, Kamila Almeida. **Utilização de Modelo Hidrodinâmico para Mapeamento de Áreas Inundáveis**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente - PPGEMA), Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás - UFG, Goiânia, 2015.

SCHAUB, Y.; HAEBERLI, W.; HUGGEL, C.; KÜNZLER, M.; BRÜNDL, M. Landslides and new lakes in deglaciating areas: a risk management framework. In: MARGOTTINI, C; CANUTI, P; SASSA, K (eds). **Landslide science and practice: Social and economic impact and policies**. Springer, Berlin, v. 7, p.31–38, 2013.

SCHAUWECKER, S. *et al.* The freezing level in the tropical Andes, Peru: an indicator for present and future glacier extents. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.122, p. 5172–5189, 2017.

SCHNEIDER, D.; HUGGEL, C.; COCHACHIN, A.; GUILLEN, S.; GARCIA, J. Mapping hazards from glacier lake outburst floods based on modeling of process cascades at Lake 513, Carhuaz, Peru. **Advances in Geosciences**, 35 (2014), pp. 145-155.

SCHOOLMEESTER, T. *et al.* Atlas de Glaciares y Aguas Andinos. El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos. **UNESCO y GRID-Arendal**, 2018.

SHUKLA A.; GARG P.K.; SRIVASTAVA, S. Evolution of Glacial and High-Altitude Lakes in the Sikkim, Eastern Himalaya Over the Past Four Decades (1975-2017). **Front. Environ. Sci.** v.6, p.81, 2018. Disponível em: doi: 10.3389/fenvs.2018.00081.

SIMÕES, Jefferson C. Glossário da língua portuguesa da neve, do gelo e termos correlatos. **Pesquisa Antártica Brasileira**. v.4, p. 119-154, 2004.

SLAYMAKER, O. Criteria to distinguish between periglacial, proglacial and paraglacial environments. **Quaestiones Geographicae**, v. 30, n. 1, p. 85-94, 2011.

SLAYMAKER, O. Proglacial, Periglacial or Paraglacial? **The Geological Society**, v. 320, 71–84, 2009.

SORUCO, A.; VINCENT, C.; RABATEL, A.; FRANCOU, B.; THIBERT, E.; SICART, J.E.; CONDOM, T. Contribution of glacier runoff to water resources of La Paz city, Bolivia (16°S). **Ann. Glaciol.**, v.56, n.70, p. 147-154, 2015.

STEFFEN, C. A. Introdução ao Sensoriamento Remoto. **INPE**, 2016. Disponível em: <http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>. Acesso em 02/02/2023.

STUART-SMITH, R.F.; ROE, G.H.; ALLEN, M.R. Increased outburst flood hazard from Lake Palcacocha due to human-induced glacier retreat. **Nat. Clim. Chang.**, v.14, 2021, p. 85-90.

SWIFT, D.A.; COOK, S.; HECKMANN, T.; GÄRTNER-ROER, I.; KORUP, O.; MOORE, J. Capítulo 6 - Ice and snow as land-forming agents. In: **Hazards and Disasters Series, Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters**, 2.ed. p. 165-198, 2021.

THOMPSON, L. G.; MOSLEY-THOMPSON E.; HENDERSON, K. A. Ice-core palaeoclimate records in tropical South America since the Last Glacial Maximum. **J. Quaternary Sci.**, v. 15, p. 377-394. ISSN 0267-8179. Ano 2000.

UNISDR. **Terminology on Disaster Risk Reduction**, 2009. Disponível em: <https://www.undrr.org/publication/2009-unisdr-terminology-disaster-risk-reduction>. Acesso em: 30/09/2022.

VEETIL, B. K.; BREMER, U. F.; DE SOUZA, S. F.; MAIER, É. L. B.; SIMÕES, J. C. Influence of ENSO and PDO on mountain glaciers in the outer tropics: case studies in Bolivia. **Theoretical and Applied Climatology**, v.125, n.3-4, p. 757–768, 2016.

VOLZ, C., *et al.* Numerical modeling of dam breaching processes due to overtopping flow. In: PROC. 8TH ICOLD EUROPEAN CLUB SYMPOSIUM, **Anais...** Innsbruck, pp. 691–696, 2010.

VUILLE, Mathias *et al.* Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. **Earth-Science Reviews**, 2008.

VUILLE, Mathias *et al.* Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes - Impacts, uncertainties and challenges ahead. **Earth-Science Reviews**, v.176, p. 195–213, 2018.

WANG, S.; QIN, D.; XIAO, C. Moraine-dammed lake distribution and outburst flood risk in the Chinese Himalaya. **Journal of Glaciology**, v.61, n.225, p. 115–126, 2015.

WANG, W.; YAO, T.; GAO, Y.; YANG, X.; KATTEL, D. B. A First-order Method to Identify Potentially Dangerous Glacial Lakes in a Region of the Southeastern Tibetan Plateau. **Mountain Research and Development**, v.31, n.2, p. 122–130, 2011.

WERTH, D.; AVISSAR, R. The local and global effects of Amazon deforestation. **Journal of Geophysical Research**, v. 107. out. 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2001JD000717>.

WESTOBY, M. J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N. F.; HAMBREY, M. J.; REYNOLDS, J. M.; HASSAN, M. A. A. M.; LOWE, A. Numerical modelling of glacial lake outburst floods using physically based dam-breach models, **Earth Surf. Dynam.**, v.3, p.171–199, doi:10.5194/esurf-3-171-2015, 2015.

WESTOBY, M. J.; GLASSER, N. F.; BRASINGTON, J.; HAMBREY, M. J.; QUINCEY, D. J.; REYNOLDS, J. M. Modelling outburst floods from moraine-dammed glacial lakes. **Earth Sci. Rev.** v.134, p.137–159, 2014. Disponível em: doi: 10.1016/j.earscirev. 2014.03.009.

WHITEMAN, C.A. Cold Region Hazards and Risks. **Wiley-Blackwell**, p. 366, 2011.

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.

WORNI, R. *et al.* Analysis and dynamic modeling of a moraine failure and glacier lake outburst flood at Ventisquero Negro, Patagonian Andes (Argentina). **Journal of Hydrology**, p. 134-145, 2012.

WORNI, R.; HUGGEL, C.; STOFFEL, M. Glacial lakes in the Indian Himalayas--from an area-wide glacial lake inventory to on-site and modeling based risk assessment of critical glacial lakes. **The Science of the total environment**, p. S71–84, 2013.

ZHANG, D. *et al.* A robust glacial lake outburst susceptibility assessment approach validated by GLOF event in 2020 in the Nidu Zangbo Basin, Tibetan Plateau. **Catena** v. 220, Parte B, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106734>.