

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

**RAFAELA MATTOS COSTA**

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E A RETRAÇÃO DE GELEIRAS DA  
CORDILHEIRA VILCANOTA (VERTENTE DO ATLÂNTICO),  
PERU, ENTRE 1985 E 2021**

**PORTO ALEGRE**

**2024**

RAFAELA MATTOS COSTA

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E A RETRAÇÃO DE GELEIRAS DA  
CORDILHEIRA VILCANOTA (VERTENTE DO ATLÂNTICO),  
PERU, ENTRE 1985 E 2021**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado ao Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Geografia.

**Orientadora:**

Profa. Dra. Kátia Kellem da Rosa.

**Banca examinadora:**

Dra. Cleiva Perondi (UFRGS)

Profa. Dra. Rosemary Vieira (UFF)

PORTO ALEGRE

2024

## RESUMO

O aquecimento global representa uma ameaça urgente e potencialmente irreversível para as sociedades humanas e para o planeta. Nesse contexto de mudanças climáticas, as geleiras do Peru apresentaram perda significativa de área nos últimos anos. Esta monografia objetivou investigar a retração glacial em diferentes faixas de altitude e relacionar às características e mudanças climáticas da Cordilheira Vilcanota (CV) – (vertente do Atlântico), entre 1985 e 2021. Estruturou-se a pesquisa em três momentos. Primeiramente, foi realizada a elaboração cartográfica, a fim de identificar a retração das geleiras e a distribuição hipsométrica glacial (1985-2021). Para tal, a frente glacial foi mapeada e foi realizada a identificação da elevação mínima das geleiras para os anos de 1985, 1991, 2011 e 2021. Posteriormente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica, a fim de obter e analisar características sobre as mudanças climáticas da área de estudo. As frentes das geleiras da CV apresentaram aumento da elevação mínima entre 1985 e 2021. A área de estudo perdeu 39% (37,4 km<sup>2</sup>) da superfície glacial entre 1985 e 2021 (36 anos). A maior retração ocorreu entre 2002 e 2011, especialmente na primeira metade desse período (2002 a 2006). A hipsometria glacial indicou variação negativa (retração das geleiras) em todos os intervalos de elevação, exceto nas altitudes mais elevadas – a partir de 5600 m até a elevação máxima (6034 m) – que não apresentaram variação, ou a única vez em que foi positiva, entre 2002 e 2011 no intervalo 5901-6000 m. As perdas mais significativas de área glacial ocorreram entre as elevações 5101 e 5500 m, concentrando-se, principalmente, nas duas últimas décadas. Entre essas, destaca-se como expressivas mudanças entre 5201 e 5400 m de altitude no período de 2002 a 2011. Resultados da pesquisa bibliográfica indicaram mudanças no clima da região da CV recentes, como aumento da temperatura média anual do ar por década, correlação moderada entre a temperatura média anual do ar e a taxa de mudança da área de gelo, redução da precipitação no verão e, conseqüentemente, a menor presença de nuvens (cenário que favorece a retração), e correlação entre o número de dias de geada no ano e a perda de área de gelo. As atividades econômicas e culturais da área de estudo estão intrinsecamente associadas à qualidade e quantidade de recursos naturais, especialmente água e solo que, por sua vez, estão relacionados às geleiras. Dessa forma, a retração glacial impacta negativamente a Sociocriosfera da CV. Nesse sentido, salienta-se a necessidade de investimento em políticas públicas focadas em estratégias de adaptação às mudanças climáticas e, em vista da escassez dos recursos hídricos e suas conseqüências para as populações da cordilheira, é relevante o monitoramento de geleiras, rios, lagos e demais componentes hidrológicos, sendo as pesquisas científicas uma fonte de contribuição em potencial para o diagnóstico de impactos ambientais e climáticos.

**Palavras-chave:** Cordilheira Vilcanota. Mudanças climáticas. Retração de geleiras. Hipsometria glacial.

## ABSTRACT

Global warming represents an urgent and potentially irreversible threat to human societies and the planet. In this climate change context, Peru's glaciers have shown a significant area loss in recent years. This monograph aimed to investigate glacial loss in different altitude ranges and relate it to the characteristics and climate changes of the *Cordillera Vilcanota* (CV) – Atlantic sector, between 1985 and 2021. The research was structured in three moments. Firstly, cartographic elaboration was carried out to identify the retreat of glaciers and the glacial hypsometric distribution (1985-2021). To this end, the glacial front was mapped, and the minimum elevation of the glaciers was identified for the years 1985, 1991, 2011 and 2021. Subsequently, bibliographical research was carried out to obtain and analyze characteristics of the climate of the area of study. Furthermore, an increase in the minimum elevation of the CV glacial front was found between 1985 and 2021. The study area lost 39% (37.4 km<sup>2</sup>) of the glacial surface between 1985 and 2021 (36 years). The most significant drop occurred between 2002 and 2011, especially in the first half of that period (2002 to 2006). Glacial hypsometry indicated negative variation (glacial retreat) in all elevation ranges, except at the highest altitudes – from 5,600 m to the maximum elevation (6,034 m) – which showed no variation or at the single moment where it was positive, between 2002 and 2011 in the interval 5901-6000 m. The most significant losses of the glacial area occurred between altitudes 5,101 and 5,500 m, mainly concentrated in the last two decades. Among these, the most significant are the negative variations between 5,201 and 5,400 m altitude from 2002 to 2011, the decade in which the most significant glacial retreat of the analyzed period was recorded. The results of the bibliographic research indicated changes in the climate of the CV region, such as an increase in the average annual air temperature per decade, moderate correlation between temperature annual air average and the rate of variation of the ice area, reduction in precipitation in summer and, consequently, less presence of clouds, and correlation between the number of frost days in the year and the loss of ice area. The economic and cultural activities of the study area are intrinsically related to the quality and quantity of natural resources, especially water and soil, which, in turn, are associated with glaciers. In this way, glacial retreat negatively impacts the Sociocryosphere of the CV. In this sense, the need for investment in public policies focused on adaptation strategies to climate change stands out and taking into account the scarcity of water resources and its consequences for mountain populations, it is essential to monitor glaciers, rivers, lakes and other hydrological components, with scientific research being a source of potential contribution to the diagnosis of environmental and climate impacts.

**Key-words:** Vilcanota Mountain Range. Climate changes. Glacier retreat. Glacial hypsometry.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
1.1 CONTEXTO SOCIOAMBIENTAL DA CORDILHEIRA VILCANOTA.....	8
1.2 OBJETIVOS.....	11
1.3 JUSTIFICATIVA.....	11
<b>CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO.....</b>	<b>13</b>
2.1 BALANÇO DE MASSA E DISTRIBUIÇÃO ÁREA-ALTITUDE DAS GELEIRAS...	13
2.2 MAPEAMENTO DO USO E COBERTURA DO SOLO DO PERU E OS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO.....	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>17</b>
3.1 ELABORAÇÃO CARTOGRÁFICA.....	17
3.2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA PARA LEVANTAMENTO DE DADOS CLIMÁTICOS.....	18
<b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>20</b>
4.1 VARIAÇÃO DE ÁREA NAS GELEIRAS DA BACIA.....	20
4.2 VARIAÇÃO DE ÁREA GLACIAL POR PERÍODO.....	27
4.3 RELAÇÃO ENTRE A HIPSOMETRIA GLACIAL E A PERDA DE ÁREA.....	29
<b>CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>33</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>35</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Área de estudo.....	9
<b>Figura 2</b> – Comunidade Campesina de Phinaya... ..	12
<b>Figura 3</b> – Perda glacial das geleiras tropicais andinas (1990-2020) em diferentes faixas de altitude.....	14
<b>Figura 4</b> – Metodologia do projeto MapBiomias Peru.....	15
<b>Figura 5</b> – Fluxograma metodológico.....	17
<b>Figura 6</b> – Mapa de variação das linhas de frente da CV (1985, 1991, 2001, 2011 e 2021).....	20
<b>Figura 6-A</b> – Mapa de variação das linhas de frente de um setor da CV (1985, 1991, 2001, 2011 e 2021).....	21
<b>Figura 6-B</b> – Mapa de variação das linhas de frente de um setor da CV (1985, 1991, 2001, 2011 e 2021).....	22
<b>Figura 6-C</b> – Mapa de variação das linhas de frente de um setor da CV (1985, 1991, 2001, 2011 e 2021).....	23
<b>Figura 6-D</b> – Mapa de variação das linhas de frente de um setor da CV (1985, 1991, 2001, 2011 e 2021).....	24
<b>Figura 7</b> – Gráfico da área glacial (km <sup>2</sup> ) da CV – vertente do Atlântico (1985, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011, 2016 e 2021).....	25
<b>Figura 8</b> – Gráfico de perda de área glacial (km <sup>2</sup> ) por década (1991a 2001, 2001 a 2011 e 2011 a 2021).....	27
<b>Figura 9</b> – Gráfico de perda de área glacial (km <sup>2</sup> ) por quinquênio (1997 a 2001, 2001 a 2006, 2006 a 2011, 2011 a 2016 e 2016 a 2021).....	28
<b>Figura 10</b> – Gráfico de variação da área glacial (km <sup>2</sup> ) por elevação (m) (1985, 1991, 2001, 2011 e 2021).....	30
<b>Figura 11</b> – Gráfico de elevação da frente glacial (m) da CV – vertente do Atlântico (1985, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011, 2016 e 2021).....	32

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

<b>Quadro 1</b> – Conceitos relacionados aos processos das geleiras.....	9
<b>Quadro 2</b> – Dados espaciais utilizados no trabalho.....	18
<b>Quadro 3</b> – Características das fontes bibliográficas consultadas.....	19
<b>Tabela 1</b> – Variação de área glacial (km <sup>2</sup> ) por década em intervalos de elevação (m).....	31

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Estima-se que as atividades humanas tenham provocado um aquecimento global<sup>1</sup> de cerca de 1,0°C acima dos níveis pré-industriais e, se continuar a progredir no ritmo atual, é previsto que esse aquecimento atinja 1,5°C entre 2030 e 2052 (IPCC, 2019). Nas elevadas altitudes dos Andes Tropicais, as temperaturas superficiais aumentaram aproximadamente 0,1°C a cada década nos últimos 50 anos (VUILLE *et al.*, 2015).

As geleiras de montanha (ou “de altitude”) estão entre os principais componentes da Criosfera<sup>2</sup>. Nas regiões tropicais, encontram-se na América do Sul, na África e na Oceania, sendo que a Cordilheira dos Andes (América do Sul), concentra aproximadamente 99% das massas de gelo tropicais (KASER; OSMASTON, 2002). Essas geleiras são sensíveis às mudanças do clima e suas respostas ao aquecimento global são indicadoras do destino da hidrologia, dos ecossistemas e da biodiversidade das montanhas e a jusante, em regiões onde reside 40% da população da Terra (HUSS; HOCK, 2018; CAUVY-FRAUNIÉ; DANGLES, 2019; STIBAL *et al.*, 2020).

### 1.1 CONTEXTO SOCIOAMBIENTAL DA CORDILHEIRA VILCANOTA

A Cordilheira Vilcanota (CV) (Figura 1) possui a segunda maior área glacial do Peru e está na cordilheira oriental e do sul<sup>3</sup>, entre os departamentos de Cusco e Puno (INAIGEM, 2018). Apresenta 374 geleiras (255,4 km<sup>2</sup>) e sua maior altitude (6.364 m) é encontrada no nevado Ausangate (UGRH, 2014). Está em seu âmbito o campo de gelo Quelccaya, maior massa de água peruana e o único campo de gelo tropical (KRONENBERG *et al.*, 2016; HASTENRATH, 1998). O divisor de águas da CV origina as vertentes do oceano Atlântico e do lago Titicaca, sendo que a primeira, área de estudo do presente trabalho, é uma das nascentes da Bacia Amazônica (INAIGEM, 2018).

---

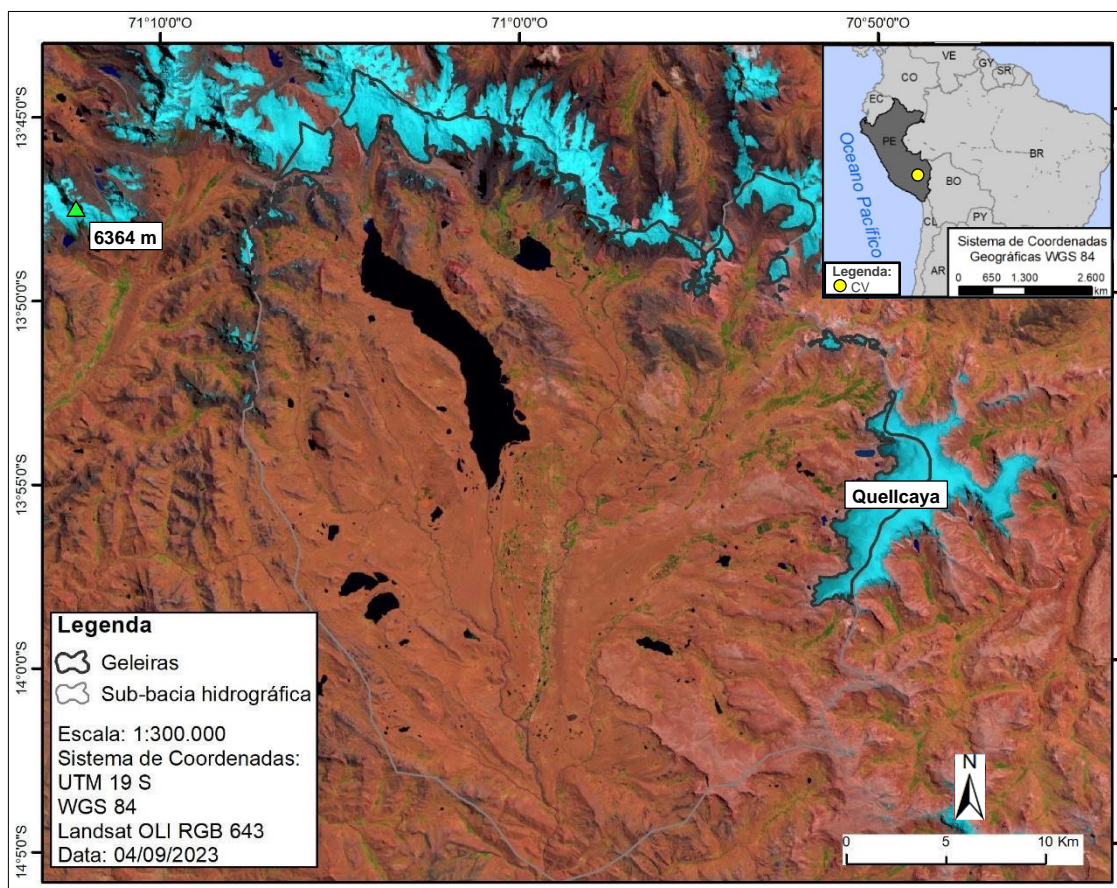
<sup>1</sup> Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC, 2019), o aquecimento global é o aumento estimado na temperatura média da superfície da Terra ao longo de um período de 30 anos, ou do período de 30 anos centrado em um determinado ano ou década, geralmente expresso em relação aos níveis pré-industriais.

<sup>2</sup> Subsistema que compreende “todo o gelo e neve existente na superfície terrestre” (SIMÕES, 2004, p. 128).

<sup>3</sup> As cordilheiras glacializadas do Peru estão divididas latitudinalmente entre os Andes do Norte, Central e do Sul (zonas) e longitudinalmente entre Ocidental, Central e Oriental (ramais) (INAIGEM, 2018).



**Figura 1 – Área de estudo.**



Fonte: elaborado pela autora.

A CV está no extremo sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), o que a coloca entre os padrões climáticos tropicais e subtropicais (SALZMANN *et al.*, 2013). A principal fonte de umidade para essa área provém, em sua maioria, da bacia Amazônica (PERRY; SEIMON; KELLY, 2014). Nas regiões montanhosas, a precipitação média anual é de cerca de 700 mm (PERRY; SEIMON; KELLY, 2014; INAIGEM, 2018).

Segundo a classificação climática de Thornthwaite (SENAMHI, 1988), prevalece o tipo climático B(o,i)D'H3. Portanto, levando em conta a precipitação efetiva, a região é categorizada como úmida (B), embora a distribuição anual de chuvas revele que os períodos de outono e inverno são mais secos (o,i). Quanto à umidade atmosférica, a região é caracterizada como úmida (H3). Em relação à temperatura média anual, ela é considerada semifrígida (D'), variando de 10°C a 12°C nas altitudes entre 3000 m e 3500 m. A temperatura média anual diminui à medida que a altitude aumenta, chegando a 6°C

a uma altitude de 4000 m (LAVADO *et al.*, 2016). Ademais, a região é impactada por fenômenos climáticos, em especial o El Niño-Oscilação Sul (ENOS)<sup>4</sup>.

As geleiras são componentes relevantes da Sociocriosfera<sup>5</sup>, sendo a CV o principal recurso hidrológico para o desenvolvimento socioeconômico das populações locais, especialmente durante o período mais seco (outono e inverno) (INAIGEM, 2018), quando grande parte da descarga da água nos principais rios tem origem no derretimento das geleiras (EDWIN *et al.*, 2015). Logo, com a retração e o desaparecimento glacial, deixaria de existir o armazenamento de água, e a descarga seria muito escassa durante a estação seca, afetando todo o ecossistema da região.

No âmbito das cordilheiras peruanas habitam aproximadamente três milhões de pessoas (10% da população do país) e, especificamente a zona de influência da CV, a população total é de 124.553 habitantes (INAIGEM, 2018). Segundo os dados do último Censo Nacional Agropecuário (CENAGRO, 2012 apud INAIGEM, 2018), aproximadamente 21% da superfície da CV se encontra em uso direto da terra, sendo que a porção dedicada aos pastos naturais não manejados ocupa a maior porcentagem (73%), seguida de superfícies dedicadas a outros usos (7,7%) e superfícies com cultivos (7,3%). As atividades econômicas da CV são, dessa forma, dependentes da qualidade e quantidade de recursos naturais, especialmente água e solo, significativamente associados às geleiras.

---

<sup>4</sup> Segundo o IPCC (2022), esse fenômeno oceânico ocorre no Oceano Pacífico tropical a leste da linha de data e está associado a uma flutuação do padrão de pressão de superfície tropical e subtropical em escala global, chamado de Oscilação Sul e, acoplado atmosfera-oceano, com escalas de tempo, em geral, de 2 e de 7 anos, é conhecido como El Niño-Oscilação Sul (ENOS). As fases quente e fria do ENOS são chamadas de El Niño e La Niña, respectivamente. Este fenômeno tem um grande impacto no vento, temperatura da superfície do mar e padrões de precipitação no Pacífico tropical, gerando efeitos climáticos em toda essa região e em muitas outras partes do mundo através de teleconexões globais.

<sup>5</sup> Segundo Figueiredo (2021, p. 137), “A sociocriosfera cultural andina denota uma longa e continuada ocupação humana em uma região glacial e periglacial nas grandes altitudes montanhosas. Desenvolveu-se, assim, uma cultura e uma cognição típicas para essa região”.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é investigar a perda glacial em diferentes faixas de altitude e relacionar com as características e mudanças climáticas da CV (vertente do Atlântico), entre 1985 e 2021. Para tal, foram estruturados os seguintes objetivos específicos: a) identificar e analisar a variação de área glacial; b) reconhecer e avaliar a distribuição hipsométrica da área glacial; c) compreender as características e mudanças do clima.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

O processo acelerado de retração glacial resulta em variações significativas no fornecimento de água, impactando a vida na Sociocriofera. Além disso, nas regiões montanhosas, a diminuição das geleiras pode provocar mudanças substanciais na biodiversidade de elevada altitude, com implicações sociais, uma vez que áreas como as úmidas (*bofedales*) e *charnecas* (alto planalto/*páramos*) desempenham um papel crucial no armazenamento de água e na regulação do clima local (KAEZING, 2015).

As principais atividades econômicas da CV apresentam significativa dependência da quantidade e qualidade de recursos naturais (geleiras, solo, água, flora, etc.) (CENAGRO, 2012 apud INAIGEM, 2018). Além disso, a relevância desses recursos andinos pode ser evidenciada para além da perspectiva econômica, pois existem aspectos ligados ao modo de vida, aos costumes e às práticas culturais dos diferentes grupos sociais da região (FIGUEIREDO, 2017).

Estudos prévios em uma comunidade campesina que se encontra no âmbito dessa cordilheira (Figura 2), entrevistados relataram que observaram mudanças ambientais e climáticas nas últimas décadas, como aumento da frequência e intensidade dos eventos e condições climáticas extremas, retração das geleiras, escassez de água, degradação e perda da pastagem, aumento das enfermidades e da mortalidade de animais (COSTA, 2022). As estratégias de adaptação citadas pelos entrevistados – *cosecha* (“colheita”) de água, recuperação das pastagens, uso de medicamentos e melhoramento genético dos

animais, construção de *cobertizos*<sup>6</sup> e investimento na atividade turística – dependem do emprego de políticas públicas para serem ampliadas e/ou concretizadas (COSTA, 2022).

**Figura 2** – Comunidade Campesina de Phinaya.



Fonte: Costa (2022).

O aumento do investimento em infraestrutura física e social é apontado como uma condição fundamental para melhorar a resiliência e as capacidades adaptativas das sociedades (IPCC, 2019). Nesse sentido, salienta-se a necessidade de investimento em políticas públicas focadas em estratégias de adaptação às mudanças do clima na região andina. Além disso, em vista da escassez dos recursos hídricos e suas consequências para as populações da CV, é relevante o monitoramento de geleiras, rios, lagos e demais componentes hidrológicos. Nesse sentido, estudos científicos podem contribuir para o diagnóstico de impactos ambientais e climáticos, a fim de corroborar com a elaboração de estratégias de adaptação e com gestão das comunidades.

---

<sup>6</sup> Infraestrutura semelhante a um galpão, utilizada para facilitar a tosa e manejo dos animais, além de protegê-los contra fenômenos climáticos adversos (como ondas de frio, granizo, chuva e geada) (AGRORURAL, 2020).

## CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO

O presente capítulo objetiva apresentar o embasamento teórico-metodológico aplicado à pesquisa. Para tanto, foram apresentados conceitos relacionados aos processos das geleiras (ablação, acumulação e balanço de massa) e as fontes utilizadas para a obtenção de dados espaciais: projeto MapBiomas Peru e o Modelo Digital de Elevação (MDE) *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM).

### 2.1 BALANÇO DE MASSA E DISTRIBUIÇÃO ÁREA-ALTITUDE DAS GELEIRAS

A distribuição e a relação área-altitude são relevantes para compreender os processos de perda de massa glacial na área de estudo. Simões (2004) desenvolveu um glossário em língua portuguesa de neve, gelo e termos correlatos. Considerou-se pertinente utilizar como embasamento teórico as definições apresentadas no referido glossário, apresentadas no Quadro 1.

**Quadro 1** – Conceitos relacionados aos processos das geleiras.

<b>ABLAÇÃO</b>
Processos pelos quais uma geleira perde massa. A área de ablação corresponde à porção menos elevada de uma geleira, onde ocorre anualmente a perda de massa.
<b>ACUMULAÇÃO</b>
Processos pelos quais uma geleira ganha massa. A área de acumulação corresponde à parte mais elevada de uma geleira, onde ocorre o ganho de massa anualmente.
<b>BALANÇO DE MASSA</b>
Diferença entre a acumulação e a ablação durante um determinado período; geralmente expressa em termos de volume equivalente de água por unidade de área.

Fonte: adaptado de Simões (2004). Quadro elaborado pela autora.

As geleiras no Peru estão sujeitas a um padrão anual que inclui um período chuvoso e um período seco, os quais afetam a acumulação e a ablação glaciais. Durante a estação úmida (verão e primavera), ocorre a acumulação, enquanto a ablação ocorre ao longo do ano, intensificando-se durante a estação mais chuvosa devido ao aumento da umidade e temperatura; por outro lado, durante a estação seca (outono e inverno), quando há uma maior demanda por água proveniente do derretimento das geleiras, a ablação é menor (KASER; OSMASTON, 2002).

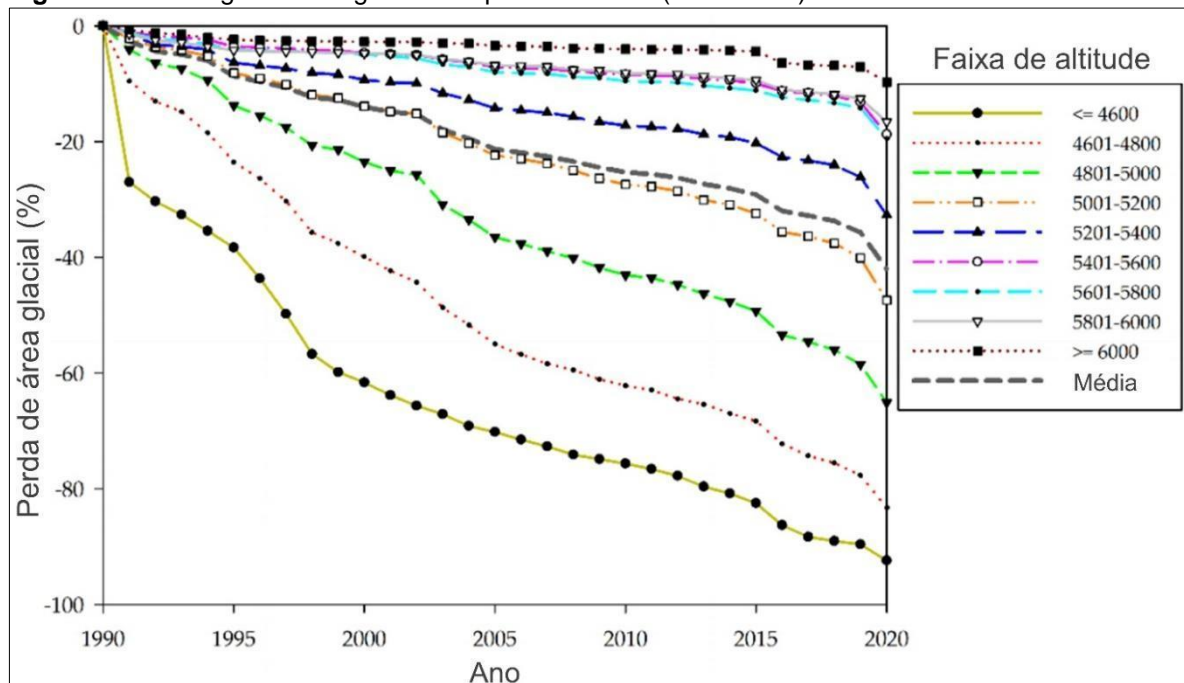
Além disso, é relevante considerar o tempo de resposta de uma geleira: tempo necessário para o ajuste de sua geometria a um novo estado estacionário após uma



alteração no equilíbrio da massa do glacial, causada por uma mudança no clima (DAVIES, 2020). Esse tempo é, em grande parte, função da espessura média, da taxa de ablação, e de sua hipsometria e gradiente do balanço de massa glacial.

Segundo Davies (2020), gradientes de balanço de massa expressivos indicam alto fluxo através da altitude da linha de equilíbrio (*equilibrium line altitude* – ELA)<sup>7</sup>. Turpo Cayo *et al.* (2022) realizaram uma pesquisa que estima as extensões anuais das geleiras tropicais andinas<sup>8</sup> (1990 a 2020), entre as quais se encontram as geleiras peruanas. Segundo os autores, essas geleiras são influenciadas pela altitude, latitude, longitude, inclinação e aspecto. A Figura 3 expõe a perda glacial anual em diferentes faixas de altitude, de acordo com Turpo Cayo *et al.* (2020).

**Figura 3** – Perda glacial das geleiras tropicais andinas (1990-2020) em diferentes faixas de altitude.



Fonte: adaptado de Turpo Cayo *et al.* (2022).

<sup>7</sup> Demarca onde, ao longo de um ano, a quantidade de gelo perdida pela ablação é igual à quantidade de gelo ganha pela acumulação, sendo estabelecida no final do período de ablação (SIMÕES, 2004).

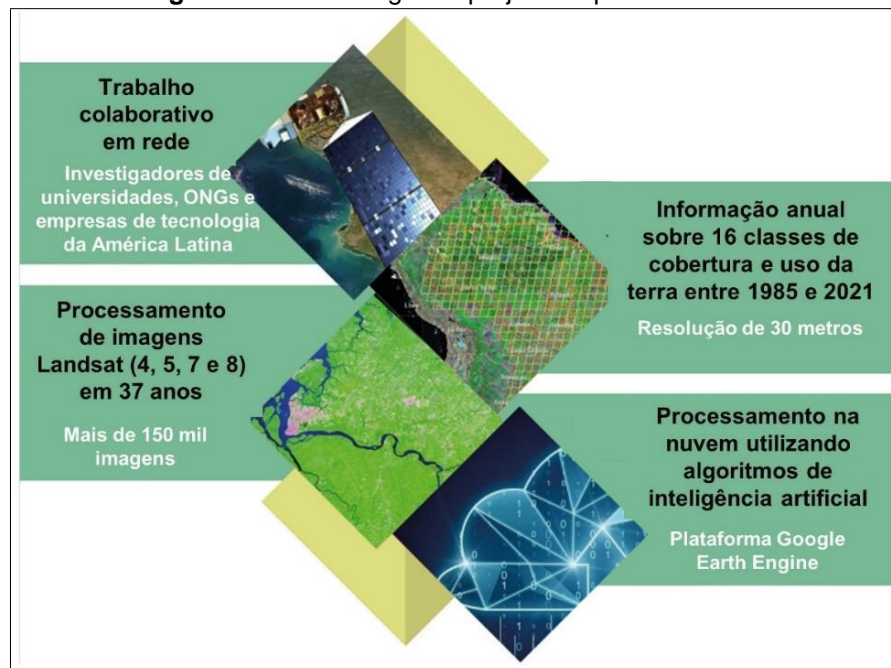
<sup>8</sup> Localizadas entre o Trópico de Câncer e o Trópico de Capricórnio (entre as latitudes 23° 26' 13.300 N e 23° 26' 13.300 S) dentro da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Em relação à altitude, em 2020, a maior parte das geleiras está distribuída entre 4.801 e 5.600 m, representando 82,63% do total dessas geleiras, enquanto aproximadamente apenas 1,72% em altitudes menores ou iguais a 4.800 m, e 15,64% são encontrados acima de 5.600 m (TURPO CAYO *et al.*, 2022).

A análise de séries temporais mostrou perdas mais significativas em altitudes abaixo de 5.000 m – 80% de sua área inicial desde 1990 (TURPO CAYO *et al.*, 2022). Essas geleiras de menor altitude recuaram mais rápido do que as mais altas, o que pode ser explicado pelo alto impacto negativo da radiação líquida de ondas curtas ligada à cobertura de nuvens e à superfície; assim, o feedback do albedo é sugerido como a principal causa do recuo acelerado dessas geleiras (TURPO CAYO *et al.*, 2022).

## 2.2 MAPEAMENTO DO USO E COBERTURA DO SOLO DO PERU E OS MODELOS DIGITAIS DE ELEVACÃO

O projeto MapBiomias Peru (Coleção 1.0) é uma iniciativa recente do *Instituto del Bien Común* (IBC) com a cocriação multi-institucional da *Red Amazónica de Información Socioambiental* (RAISG), responsável por gerar mapas anuais de cobertura e uso do solo no país. Até o momento, foram disponibilizados dados de 1985 a 2021 (PROYECTO MAPBIOMAS PERÚ, 2023). A Figura 4 apresenta a metodologia utilizada pelo projeto.

**Figura 4** – Metodologia do projeto MapBiomias Peru.



Fonte: adaptado de Proyecto MapBiomias Perú (2023).

Os dados, disponíveis online, são públicos e gratuitos. Entre as 16 classes de cobertura e uso da terra, utilizou-se as camadas vetoriais referentes à classe “Glaciar”, definida como “massa de gelo permanente, localizada nas montanhas andinas, produto da acumulação, compactação e recristalização da neve” (PROYECTO MAPBIOMAS PERÚ, 2021, p. 10).

A topografia digital, representada por meio de um Modelo Digital de Elevação (MDE), foi adotada por diversas disciplinas e comunidades, proporcionando uma maneira conveniente e eficaz de armazenar e analisar dados de elevação digitalizados, em oposição a armazená-los como listas de vetores ou coordenadas (GUTH *et al.*, 2021). Nos estudos sobre a criosfera, análises multitemporais utilizando MDEs de diferentes épocas podem ser usadas para rastrear mudanças geométricas das massas de gelo e fornecer estimativas relevantes do estado das mesmas (PODGÓRSKI *et al.*, 2019).

Atualmente, existem vários conjuntos de dados globais de MDEs, sendo adotado para o presente trabalho o *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM)<sup>9</sup>. Os dados referentes à América do Sul foram disponibilizados na resolução espacial de 3 arcos de segundo (~ 90 m) e 1 arco de segundo (~ 30 m) no sistema de coordenadas Lat/Long e Datum WGS 84 (LANDAU; GUIMARÃES, 2011). Os dados foram obtidos com a Banda C em 2000 e são apresentados com uma acurácia vertical de 10 m e RMSE (*Root Mean Square Error*) ~ 6m (ALGANCI; BESOL; SERTEL, 2018).

---

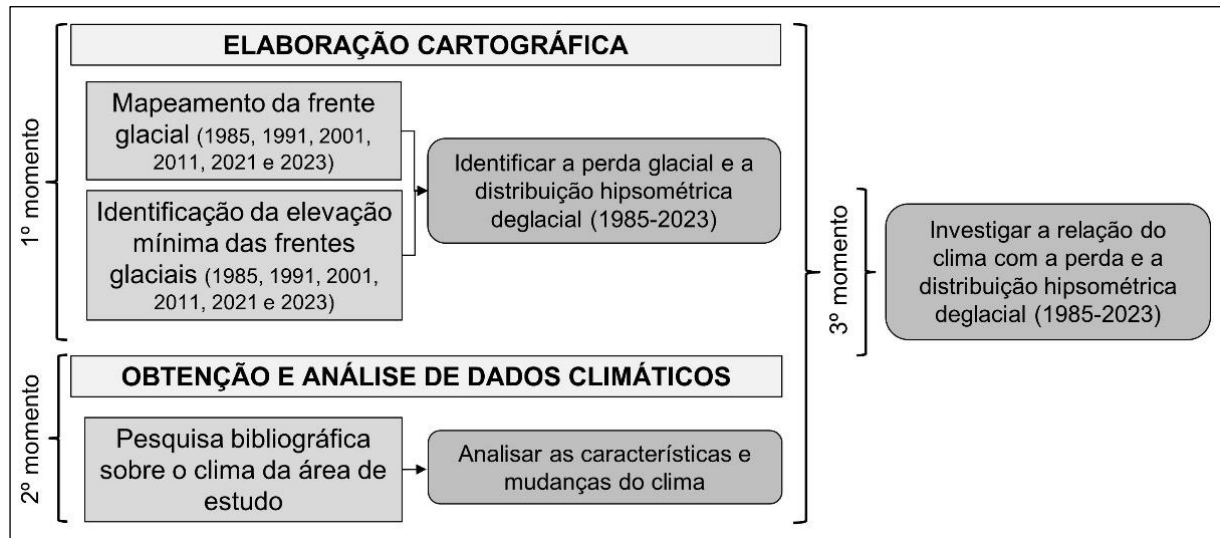
<sup>9</sup> Em 2000, a Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço dos Estados Unidos (*National Imagery and Mapping Agency* – NASA), a Agência Nacional de Informação Geoespacial do mesmo país (*National Imagery and Mapping Agency* – NIMA), o Centro Aeroespacial Alemão (*Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt* – DLR) e a Agência Espacial Italiana (*Agenzia Spaziale Italiana* – ASI) realizaram uma missão denominada de *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), responsável por gerar um MDE de 80% da Terra, englobando a área entre as latitudes 54°S e 60°N. A missão se utilizou de interferometria, por sensoriamento remoto operante na faixa de micro-ondas (LANDAU, GUIMARÃES, 2011).



## CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi estruturado em três momentos de pesquisa, conforme fluxograma metodológico abaixo (Figura 5).

Figura 5 – Fluxograma metodológico.



Fonte: elaborado pela autora.

### 3.1 ELABORAÇÃO CARTOGRÁFICA

A elaboração cartográfica foi realizada no software ArcGis, versão 10.3.1 (ESRI®). Utilizou-se a imagem de satélite Landsat 8, sensor OLI (*Operational Land Imager*), com composição de bandas 643 (falsa cor), pois possibilita uma melhor identificação dos alvos ao destacar a vegetação e rochas expostas na cor vermelha, distinguindo-se neve e gelo dos demais alvos.

Ademais, foi utilizada a versão 6.0 do *Randolph Glacier Inventory* (RGI), do ano de 2010. O RGI é um inventário global dos contornos das geleiras (excluindo as camadas de gelo na Groenlândia e na Antártida) e um subconjunto do banco de dados compilado pela iniciativa *Global Land Ice Measurements from Space* (GLIMS) (RGI, 2017). O Quadro 2 apresenta as características dos dados espaciais utilizados.

**Quadro 2** – Dados espaciais utilizados no trabalho.

Dados	Resolução espacial	Data	Fonte
MDE (SRTM)	3 arcos de segundo (~ 90 m) e 1 arco de segundo (~ 30 m)	2000	<i>National Imagery and Mapping Agency</i> (NASA) ( <a href="http://www.earthdata.nasa.gov/sensors/srtm">www.earthdata.nasa.gov/sensors/srtm</a> )
Imagem de satélite (Landsat 8 – OLI)	30 m	04/09/2023	<i>United States Geological Survey</i> (USGS) ( <a href="http://earthexplorer.usgs.gov">earthexplorer.usgs.gov</a> )
Dado vetorial: área glacial ( <i>Proyecto MapBiomias Perú</i> )	Não se aplica	1985, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011, 2016, 2021	<i>Proyecto MapBiomias Perú</i> ( <a href="http://peru.mapbiomas.org/">peru.mapbiomas.org/</a> )
Dado vetorial: divisores de drenagem (RGI 6.0)	Não se aplica	1950-2010 (cobertura temporal)	<i>National Snow and Ice Data Center</i> (NSIDC) ( <a href="http://nsidc.org/data/nsidc-0770/versions/6">nsidc.org/data/nsidc-0770/versions/6</a> )

Fonte: elaborado pela autora.

### 3.2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA PARA LEVANTAMENTO DE DADOS CLIMÁTICOS

Compreender as características e as mudanças do clima na área de estudo é um dos objetivos deste trabalho. Para tal, foi realizada uma pesquisa bibliográfica online, nos bancos de dados *Science Direct*, Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Google Acadêmico. Utilizou-se os termos “clima; Cordilheira Vilcanota” e “climatologia; Cordilheira Vilcanota” em inglês, espanhol e português. A busca foi encerrada em janeiro de 2023 e se limitou à região da CV e à última década como data de publicação.

Entre os objetivos dos trabalhos consultados estão: correlacionar dados climáticos e área glacial (1984- 2018) (TAYLOR *et al.*, 2022); investigar consequências de cenários futuros para o balanço de energia e de massa das geleiras (KRONENBERG *et al.*, 2016); examinar características meteorológicas associadas à forte nevasca (POREMBA *et al.*, 2015); e fornecer banco de dados de tendências climáticas e glaciais (SALZMANN *et al.*, 2013). O Quadro 3 apresenta as características das pesquisas que atuaram como fontes de dados, bem como os resultados obtidos pelos autores que, por sua vez, serão discutidos no próximo capítulo (Resultados e discussões).

**Quadro 3 – Características das fontes bibliográficas consultadas.**

	Dados analisados	Resultados
Taylor <i>et al.</i> (2022)	Dados criados usando o modelo <i>Weather Research and Forecasting</i> (WRF) (1980-2018); dias de geada: temperatura mínima diária abaixo de 0 °C.	Aumento de 0,2°C por década (1980-2020); temperatura média anual e mudança glacial: correlação moderada; temperatura máxima anual e perda glacial: correlação moderada; sem correlação significativa entre a perda glacial e precipitação, mas há correlação entre o número de dias de geada no ano e perda glacial.
Kronenberg <i>et al.</i> (2016)	Dados de estações meteorológicas (2011-2013).	Redução da precipitação: diminuição do albedo e aumento de energia disponível para ablação; aumento da radiação de ondas curtas durante o verão: menor presença de nuvens, como consequência das condições mais secas; redução de 33% das precipitações no verão: radiação incidente de onda longa aumentará em valores acima das condições atuais.
Poremba <i>et al.</i> (2015)	Dados de estações meteorológicas; observações manuais diárias de precipitação.	Eventos de queda de neve: leves, mas frequentes; neve foi a principal precipitação, mas o <i>graupel</i> <sup>10</sup> também ocorreu um tempo significativo e, em alguns meses, foi responsável por metade da precipitação; maioria das horas de precipitação (55%): durante o dia, provavelmente associada à atividade convectiva; eventos de maior duração de neve intensa ocorreram durante a noite, em associação com a precipitação estratiforme.
Salzmann <i>et al.</i> (2013)	Dados de estações meteorológicas (1965-2006) e de reanálise NCEP/NCAR <sup>11</sup> (1958 a 2009).	Condições mais secas nos Andes Centrais (Peru e Bolívia); temperatura mínima diária aumenta mais do que a máxima diária; aumento de 0,16 °C por década (1966-2009).

Fonte: quadro elaborado pela autora.

<sup>10</sup> Termo em espanhol para “neve pedrisca”, que são pequenas (2-5 mm) bolas de neve de forma irregular (SIMÕES, 2004).

<sup>11</sup> Foi utilizada a Reanálise 1 do NCEP/NCAR, com cobertura global, resolução horizontal de T62 (cerca de 210 km), 28 camadas verticais e registro iniciado em 1948 (KALNAY *et al.*, 1996; SALZMANN *et al.*, 2013).

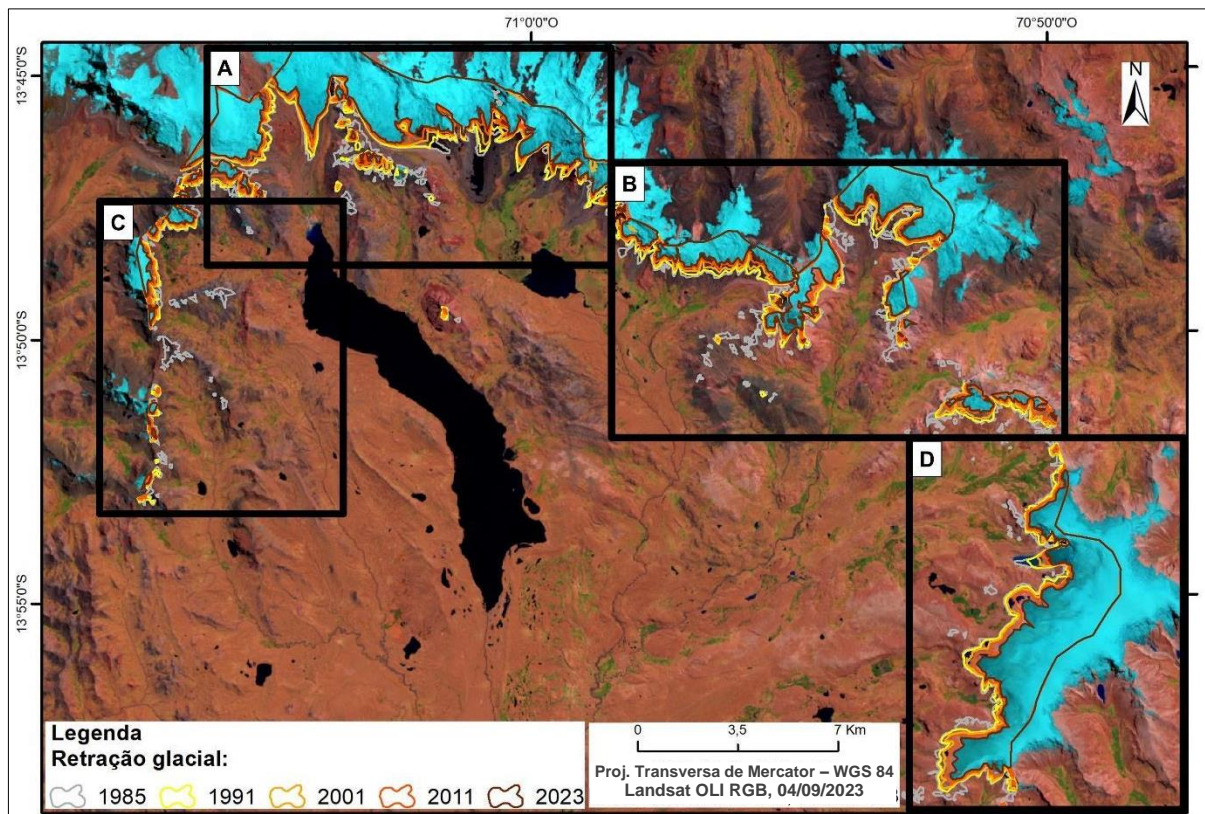
## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item serão apresentados os resultados de variação de área das geleiras, sua análise por período e a relação entre a área glacial e a elevação.

### 4.1 VARIAÇÃO DE ÁREA NAS GELEIRAS DA BACIA

O mapeamento das frentes das geleiras em 1985, 1991, 2001, 2011 e 2021 (Figura 5) evidenciou a variação da superfície glacial da área de estudo, apresentando o predomínio da variação negativa, ou seja, da retração das geleiras. Os quadrados pretos da Figura 6 representam os setores denominados A, B, C e D, apresentados nas Figuras 6-A, 6-B, 6-C e 6-D, a fim de destacar a variação nos mesmos.

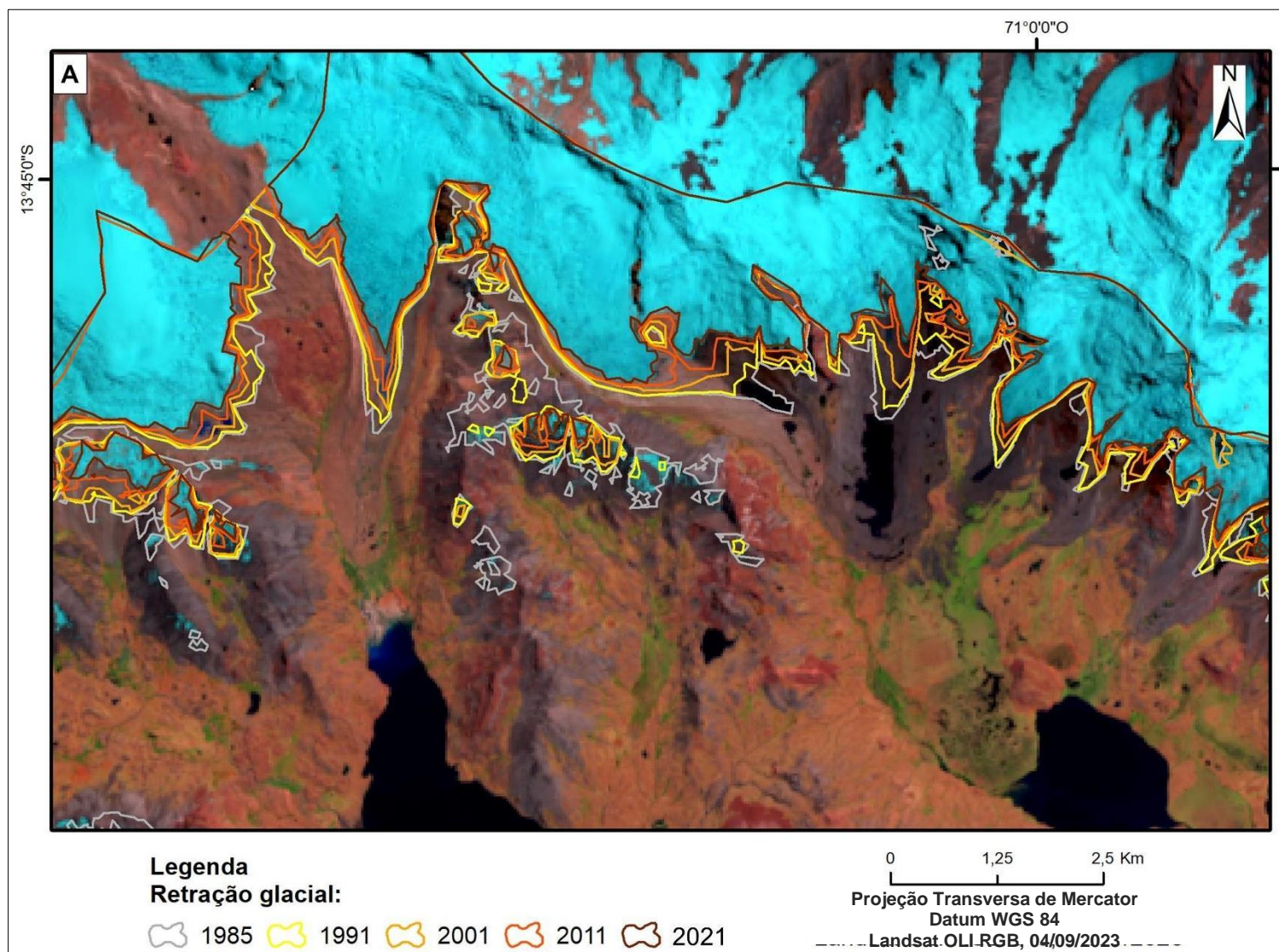
**Figura 6 –** Mapa de variação das linhas de frente da CV (1985, 1991, 2001, 2011 e 2021).



Fonte: elaborado pela autora.



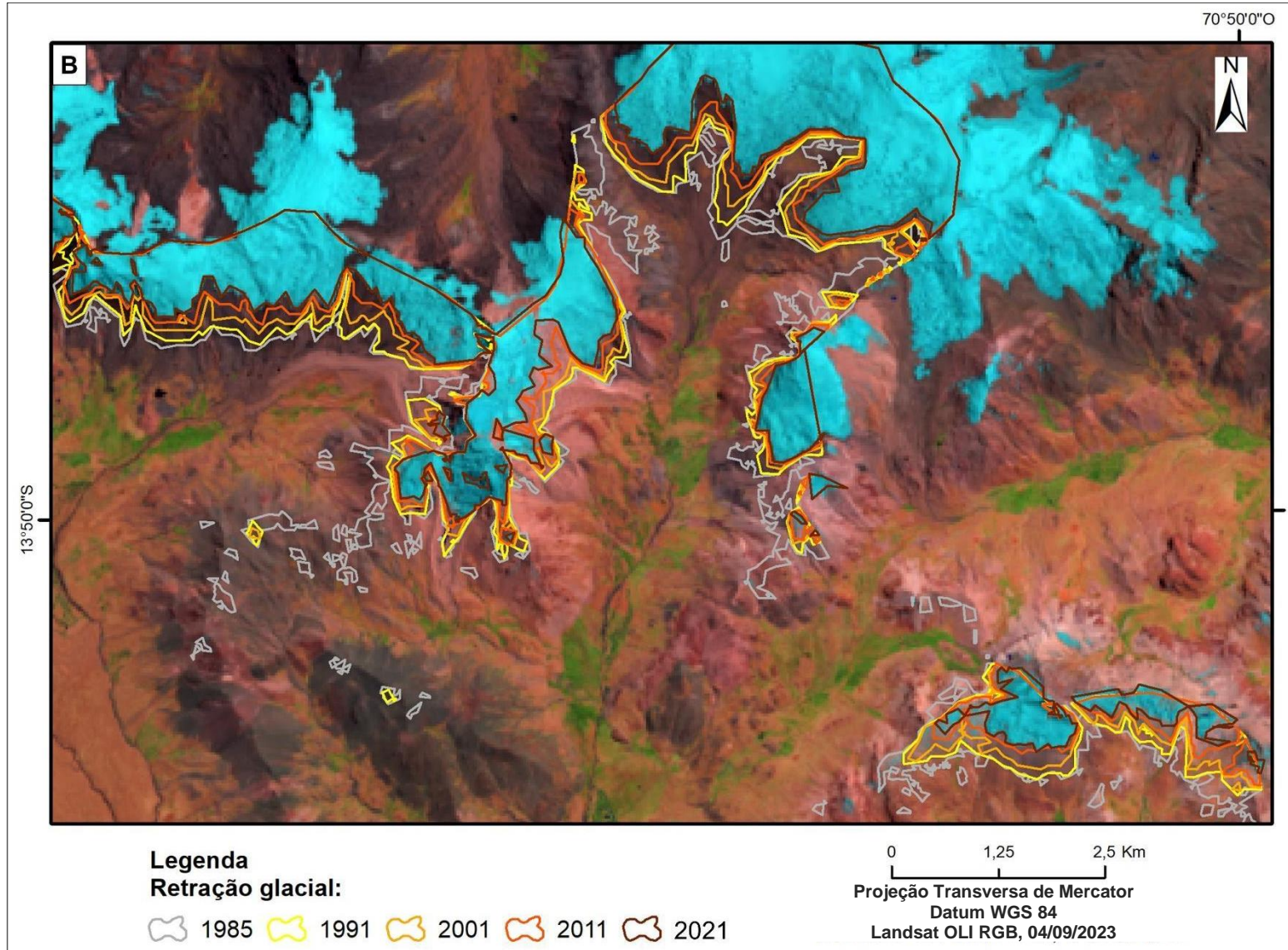
**Figura 6-A** – Mapa de variação das linhas de frente de um setor da CV (1985, 1991, 2001, 2011 e 2021).



Fonte: elaborado pela autora.

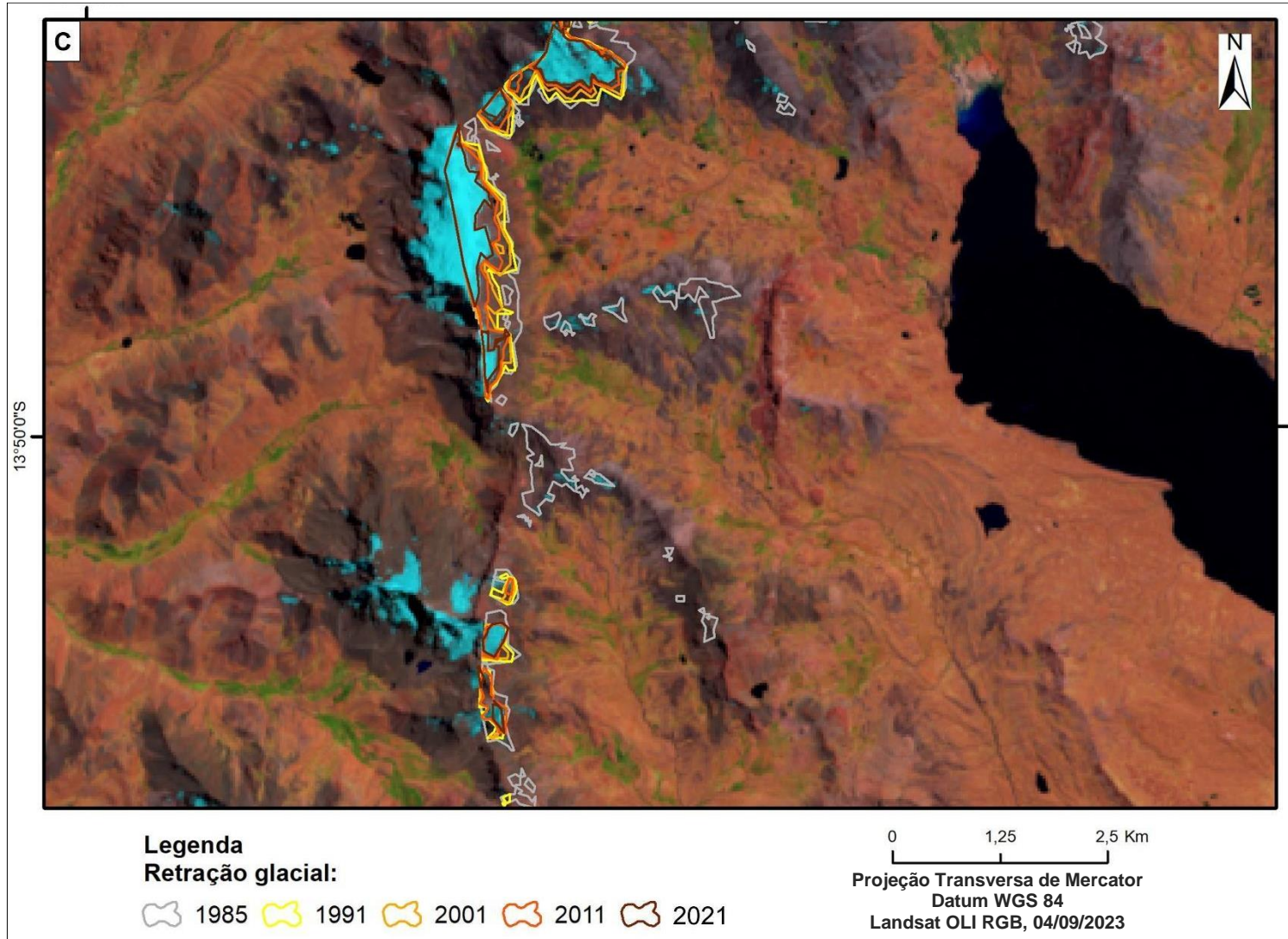


Figura 6-B – Mapa de variação das linhas de frente de um setor da CV (1985, 1991, 2001, 2011 e 2021).



Fonte: elaborado pela autora.

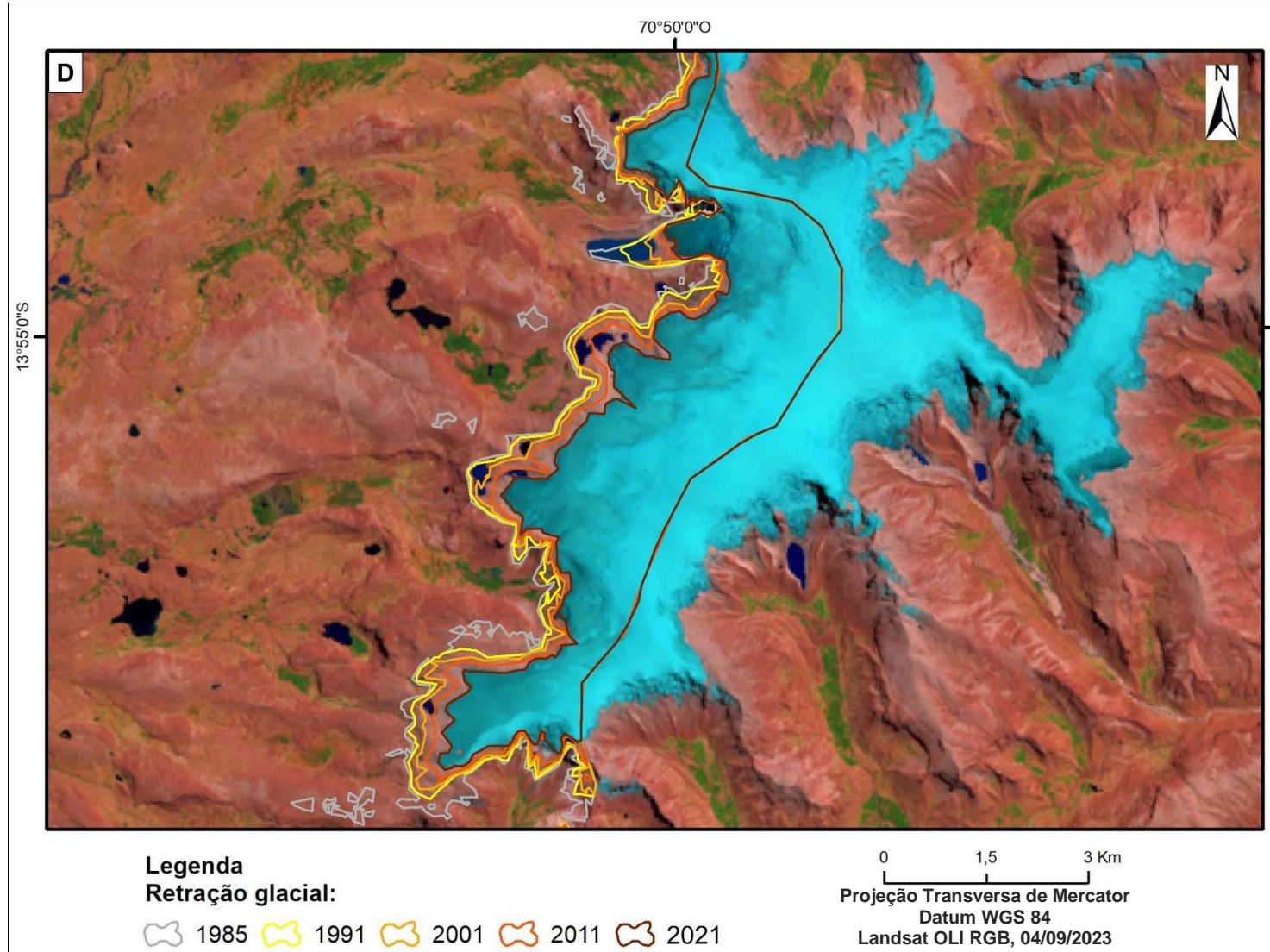
Figura 6-C – Mapa de variação das linhas de frente de um setor da CV (1985, 1991, 2001, 2011 e 2021).



Fonte: elaborado pela autora.



**Figura 6-D** – Mapa de variação das linhas de frente de um setor da CV (1985, 1991, 2001, 2011 e 2021).

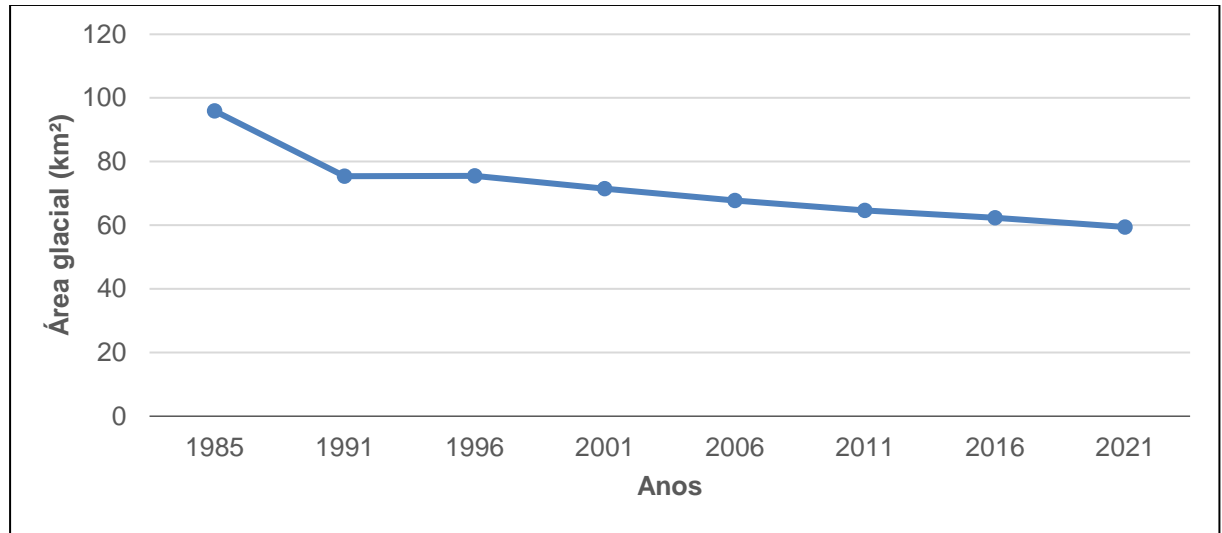


Fonte: elaborado pela autora.



Constatou-se que, predominantemente, ocorreu retração da área glacial da CV ao longo do tempo analisado, conforme demonstra a Figura 7.

**Figura 7** – Gráfico da área glacial (km<sup>2</sup>) da CV – vertente do Atlântico (1985, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011, 2016 e 2021).



Fonte: elaborado pela autora.

A área de estudo perdeu 39% (37,4 km<sup>2</sup>) da superfície glacial entre 1985 e 2021 (36 anos)<sup>12</sup>. Os resultados vão ao encontro do que foi constado por Taylor *et al.* (2022). Segundo os autores, a cordilheira perdeu 54,3% (293,8 km<sup>2</sup>) área de superfície glacial entre 1975 e 2020 (45 anos), sendo que 82 das 257 geleiras presentes em 1975 desapareceram. Embora a CV seja composta por duas vertentes – do Atlântico e do Lago Titicaca, e a pesquisa de Taylor *et al.* (2022) abranja ambas, é possível inferir que a vertente do Atlântico exerça papel significativo na retração.

Segundo INAIGEM (2018), a cordilheira perdeu 48,4% (239,6 km<sup>2</sup>) de sua superfície glacial entre 1962 e 2016 (54 anos). Para Salzmann *et al.* (2013), a perda de área glacial foi de 30% (143 km<sup>2</sup>) entre 1962 e 2006 (44 anos). INAIGEM (2018) e Salzmann *et al.* (2013) salientam que as reduções foram mais significativas a partir de 1985. Para Hanshaw e Bookhagen (2014), a perda foi de 30% (107,6 km<sup>2</sup>) entre 1988 e

<sup>12</sup> Salienta-se que a estimativa de acurácia da medida por Turpo Cayo *et al.* (2022) indicaram um erro de omissão de 11,46% devido a presença de sombras nas imagens e em pequenas geleiras, assim como um erro de comissão de 2,44% nas bordas de geleiras na estimativa de área glacial das geleiras tropicais andinas.

2010 (22 anos), contribuindo para a informação de que as reduções foram maiores a partir de 1980, pois a perda glacial calculada foi similar àquela encontrada por Salzmann *et al.* (2013), mesmo que a análise tenha sido realizada para a metade do tempo.

A fim de relacionar a perda glacial às características e mudanças do clima, serão discutidos os resultados da pesquisa bibliográfica sobre a temática (Quadro 3). Taylor *et al.* (2022) registraram um aumento de 0,2 °C na temperatura média anual do ar por década, entre 1980 e 2020 (40 anos). Salzmann *et al.* (2013) registraram um aumento semelhante, de 0,16 °C por década, entre 1966 e 2009 (43 anos). Taylor *et al.* (2022) observaram uma correlação moderada entre a temperatura média anual do ar e a taxa de mudança da área de gelo.

Poremba *et al.* (2015) apresentaram características da precipitação na área de estudo, como a ocorrência quase diária de neve (principal precipitação) durante a estação chuvosa e de neve pedrisca (*graupele*) por tempo significativo. Durante o dia, ocorreu a maior parte da precipitação e os eventos de maior duração de neve intensa ocorreram durante a noite (POREMBBA *et al.*, 2015). Condições mais secas nos Andes Centrais (Peru e Bolívia) foram constatadas por Salzmann *et al.* (2013). Estrada e Moscoso (2014) também identificaram que os extremos de precipitação têm se modificado nos últimos anos, ocorrendo mais dias com precipitação contínua e torrencial.

A análise e discussão da relação entre a precipitação e a área glacial foi feita por Kronenberg *et al.* (2016) e Taylor *et al.* (2022). Segundo Kronenberg *et al.* (2016), a redução da precipitação no verão e, conseqüentemente, a menor presença de nuvens, causa cenários que favorecem a retração: diminuição do albedo e aumento de energia disponível para ablação; aumento da radiação de ondas curtas; e aumento da radiação incidente de onda longa. Taylor *et al.* (2022) não identificaram correlação significativa entre a perda glacial e precipitação, porém, afirmaram que há correlação entre o número de dias de geada no ano e a perda de área de gelo.

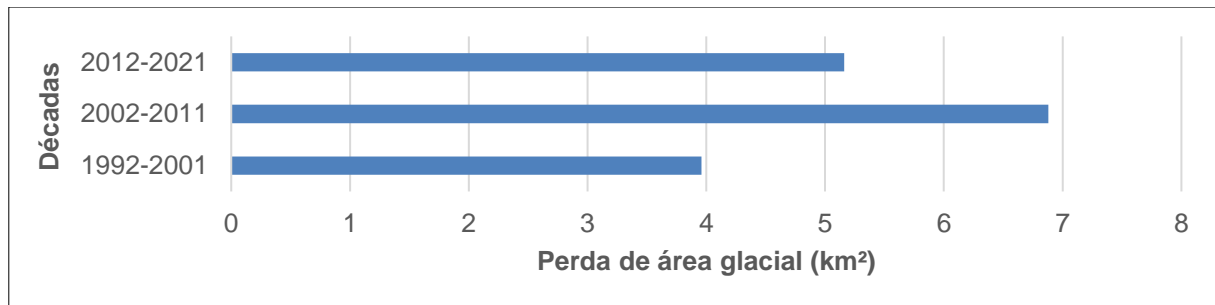
A tendência estimada da redução da superfície glacial da CV mostra uma taxa de retração de 4,47 km<sup>2</sup>/ano desde 1940 e, a esse ritmo, considerando as condições climáticas atuais, as geleiras desapareceriam em 2075 (INAIGEM, 2018). Ademais,

Flores *et al.* (2011) constataram que, em uma das comunidades campesinas que estão no âmbito da CV, a amplitude térmica diária tem aumentado nos últimos anos, sendo que essas mudanças bruscas de temperatura do ar ao longo do dia afetam os pastos, tornando-os mais secos e reduzindo suas áreas.

#### 4.2 VARIAÇÃO DE ÁREA GLACIAL POR PERÍODO

Em uma pesquisa de percepção ambiental, campesinos de uma comunidade da CV afirmaram que as maiores mudanças na área glacial ocorreram na última década (2010 a 2020) (COSTA, 2022). A fim de comparar os resultados qualitativos apresentados por Costa (2022) com os quantitativos da presente pesquisa, apresenta-se os dados de perda glacial por década (Figura 8)<sup>13</sup>.

**Figura 8** – Gráfico de perda de área glacial (km<sup>2</sup>) por década (1991a 2001, 2001 a 2011 e 2011 a 2021).

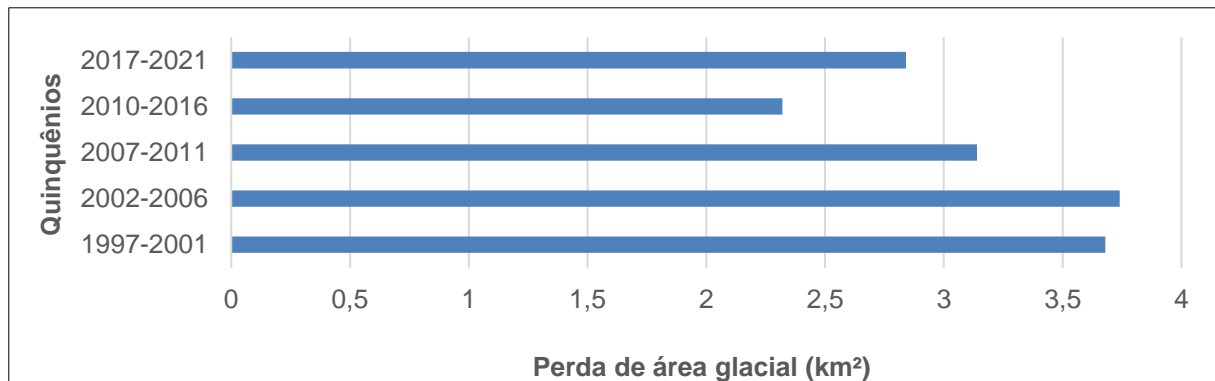


Fonte: elaborado pela autora.

A última década realmente apresentou uma retração significativa da área glacial. Contudo, os dados espaciais, diferentemente da percepção dos campesinos, indicaram que a maior retração glacial ocorreu na década anterior, entre 2002 e 2011, especialmente na primeira metade desse período (2002 a 2006), conforme a Figura 9:

<sup>13</sup> Foram consideradas apenas as estimativas a partir de 1992, a fim de comparar 10 anos na série e porque Turpo Cayo *et al.* (2022) encontraram maiores valores de erros nos primeiros anos da série, devido a menor disponibilidade de imagens e possibilidade da aplicação de filtros.

**Figura 9** – Gráfico de perda de área glacial (km<sup>2</sup>) por quinquênio (1997 a 2001, 2001 a 2006, 2006 a 2011, 2011 a 2016 e 2016 a 2021).



Fonte: elaborado pela autora.

Salienta-se a relevância de analisar as respostas das geleiras ao ENOS, por ser um evento climático extremo que impacta a área de estudo. Para tal, foram consultados os dados do Índice El Niño Oceânico (*Oceanic Niño Index – ONI*)<sup>14</sup> da Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (*National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA*) dos Estados Unidos, a fim de relacioná-los com os dados de área glacial obtidos nesta pesquisa.

O quinquênio no qual ocorreu a maior perda de área glacial (3,74 km<sup>2</sup>) – 2002 a 2006 – estava principalmente sobre efeito do El Niño. O intervalo com a segunda maior perda de área glacial (3,68 km<sup>2</sup>) – 1997 a 2001 – foi registrada a La Niña mais longa da série analisada (1997-2021). O intervalo com menor perda de área glacial (2,32 km<sup>2</sup>) – 2012 a 2016 – teve um comportamento semelhante ao de maior perda: maior tempo de El Niño na série. Já o intervalo com a segunda menor perda de área glacial (2,84 km<sup>2</sup>) – 2017 a 2021 – esteve sobre efeitos de El Niño e de La Niña por tempo semelhante, mas preeminando a segunda.

<sup>14</sup> O ONI é baseado nas anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) na região Niño 3.4 (5° N–5° S, 120°–170°W), para a análise de séries temporais da ocorrência e mudanças de fase de ENSO. Os episódios quentes (El Niño) e frios (La Niña) foram definidos quando um limiar de  $\pm 0,5$  °C é atingido durante pelo menos cinco estações consecutivas sobrepostas. Os dados estão disponíveis gratuitamente em (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>).

Fyffe *et al.* (2021), ao correlacionarem dados do ONI com dados climáticos da CV, evidenciaram que temperaturas mais quentes na estação chuvosa, características de um El Niño, foram associadas à diminuição do albedo, maior radiação líquida de ondas curtas, um fluxo de calor sensível mais positivo e aumento das taxas de fusão das geleiras. Para Rabatel *et al.* (2013), a retração das geleiras nos Andes também é mais evidente durante os anos do El Niño, o qual induz temperaturas do ar mais altas do que o normal. Imfeld *et al.* (2020) corroboram ao afirmar que as tendências positivas para a temperatura máxima foram potencialmente amplificadas em todas as estações pelos eventos mais recentes do El Niño (2009/10, 2014/15 e 2015/16).

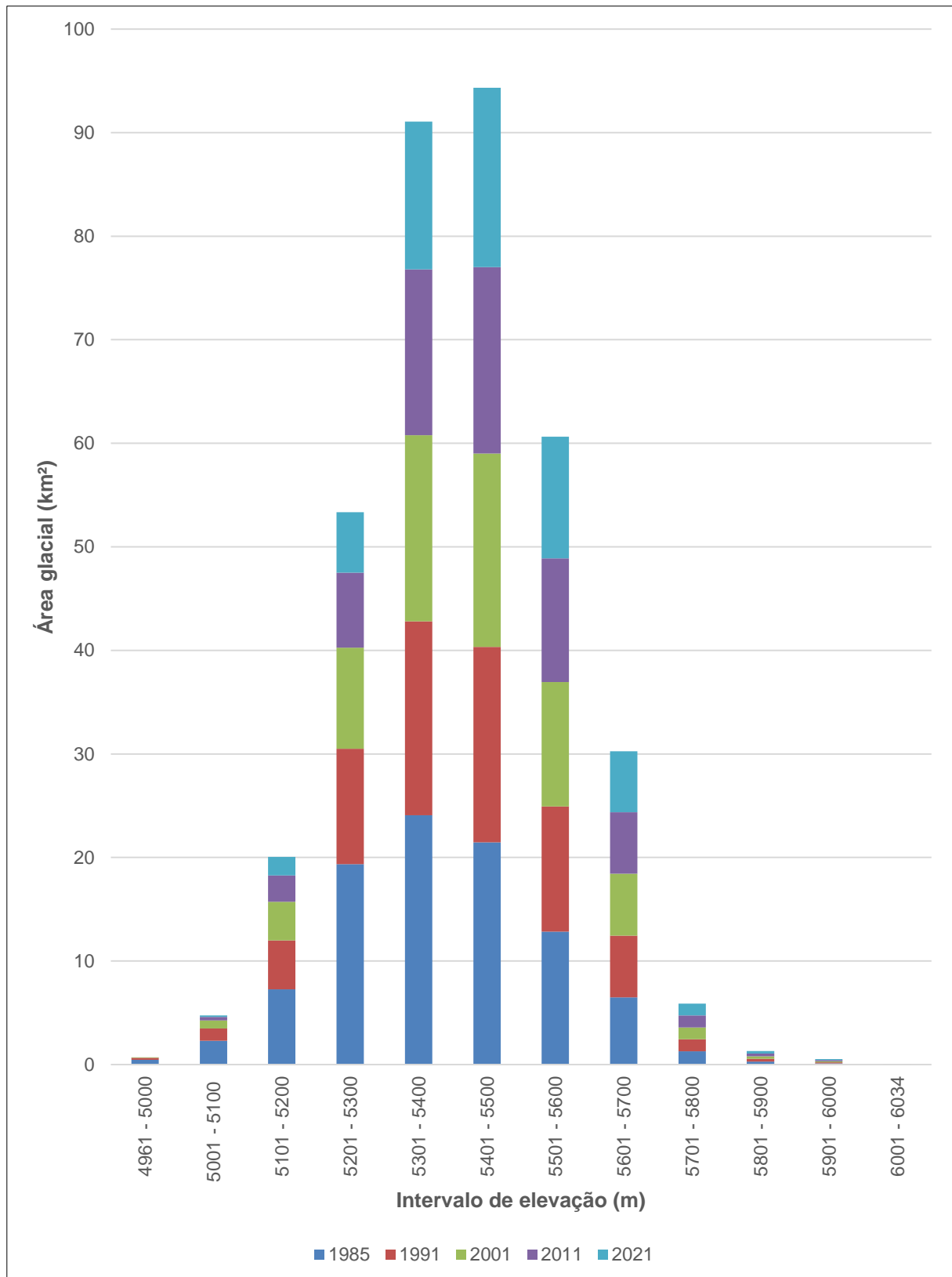
O episódio mais recente de La Niña (2020 a 2023) provocou, em novembro de 2020 e em fevereiro de 2021, os meses mais secos dos últimos 56 anos na região de estudo, e temperaturas mínimas abaixo da normal climatológica na área de estudo (SENAMHI, 2021). As mudanças observadas também estão relacionadas à precipitação provinda do Atlântico (RIBEIRO; SIMÕES; RAMIREZ, 2017).

As mudanças climáticas desempenham um papel crucial na dinâmica dos eventos ENOS, influenciando tanto sua frequência quanto sua intensidade (CAI *et al.*, 2014). Estudos realizados no Peru indicam um aumento na frequência desses eventos nos últimos 50 anos, e há projeções que sugerem a ocorrência de eventos ENOS extremos nos anos e décadas futuras (TAKAHASHI *et al.*, 2011; MARJANI; ALIZADEH-CHOOBARI; IRANNEJAD, 2019).

#### 4.3 RELAÇÃO ENTRE A HIPSOMETRIA GLACIAL E A PERDA DE ÁREA

Identificar e analisar a distribuição hipsométrica da área glacial ao final de cada década (1980 a 2020) é um dos objetivos específicos do trabalho, cujo resultado será apresentado neste tópico. A hipsometria da área glacial indicou variação negativa (retração das geleiras) em todos os intervalos de elevação, exceto quando não houve variação (valor 0,00) ou a única vez em que foi positiva, entre 2002 e 2011 no intervalo 5901-6000 m, conforme ilustram a Figura 10 e a Tabela 1.

**Figura 10** – Gráfico de variação da área glacial (km<sup>2</sup>) por elevação (m) (1985, 1991, 2001, 2011 e 2021).



Fonte: elaborado pela autora.

**Tabela 1** – Variação de área glacial (km<sup>2</sup>) por década em intervalos de elevação (m)

Elevação (m)	Variação de área glacial (km <sup>2</sup> ) por década			Total
	1992-2001	2002-2011	2012-2021	
4961 - 5000	-0,14	-0,05	0,00	<b>-0,19</b>
5001 - 5100	-0,41	-0,46	-0,16	<b>-1,03</b>
5101 - 5200	-0,98	-1,22	-0,72	<b>-2,91</b>
5201 - 5300	-1,40	-2,49	-1,44	<b>-5,33</b>
5301 - 5400	-0,78	-1,95	-1,76	<b>-4,48</b>
5401 - 5500	-0,21	-0,68	-0,66	<b>-1,55</b>
5501 - 5600	-0,04	-0,10	-0,18	<b>-0,32</b>
5601 - 5700	0,00	-0,02	-0,07	<b>-0,10</b>
5701 - 5800	0,00	0,00	-0,01	<b>-0,02</b>
5801 - 5900	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
5901 - 6000	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
6001 - 6034	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>

Fonte: tabela elaborada pela autora.

A perda de área glacial não ocorreu em todas as classes de elevação. As perdas mais significativas de área glacial, destacadas por cores, ocorreram entre as elevações 5101 e 5500 m, concentrando-se, principalmente, nas duas últimas décadas. Em amarelo estão as variações de -0,5 e -0,9 km<sup>2</sup>, em laranja as que estão entre -1,0 e -1,49 km<sup>2</sup> e em vermelho estão as variações entre -1,5 e -2,49 km<sup>2</sup> – sendo essa a maior perda glacial registrada nesta análise.

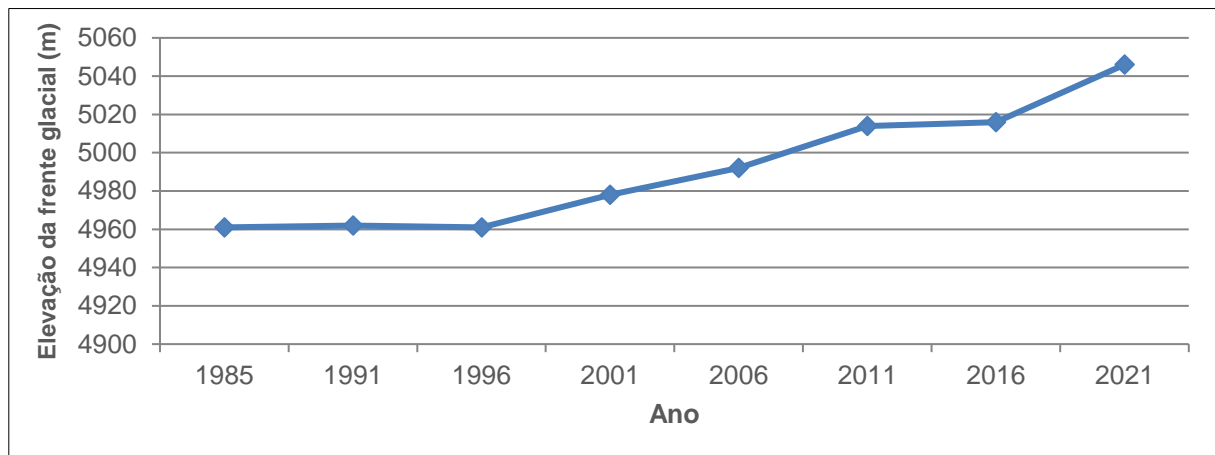
As altitudes mais elevadas – a partir de 5600 m até a elevação máxima (6034 m) não apresentaram variação (valor 0,00). As variações negativas mais expressivas ocorreram entre 5201 e 5400 m de altitude, no período de 2002 a 2011, década na qual foi registrada a maior retração glacial do período analisado, conforme a Figura 7. Nos trópicos externos úmidos, onde se encontra a CV, Braun *et al.* (2019) observaram uma perda de massa nas altitudes mais baixas.

Rabatel *et al.* (2013) e Yarleque *et al.* (2018) corroboram nesse sentido, ao afirmarem que nos Andes tropicais, de forma geral, muitas geleiras poderão desaparecer nas próximas décadas, especialmente aquelas abaixo de 5400 m. Segundo Taylor *et al.* (2022), a região mais ao norte da CV (Nevado Qolquepunco) tem a elevação média mais

baixa da região – 5163 m acima do nível do mar em 2020 – em comparação com 5451 m acima do nível do mar no campo de gelo Quelccaya.

Nesse sentido, considera-se relevante discutir sobre o tempo de resposta de uma geleira<sup>15</sup>. Na área de estudo, aquelas que possuíam classes de menor altitude recuaram mais rápido no período do que as que possuíam apenas classes de altitude mais altas devido ao feedback do albedo, assim como destaca Turpo Cayo *et al.* (2022). Nesse sentido, a Figura 11 permite observar o aumento da elevação mínima da linha de frente glacial da CV entre 1985 e 2021, o qual reflete o balanço de massa negativo das geleiras.

**Figura 11** – Gráfico de elevação da frente glacial (m) da CV – vertente do Atlântico (1985, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011, 2016 e 2021).



Fonte: elaborado pela autora.

O tamanho da geleira também influencia no tempo de resposta da mesma aos parâmetros climáticos (DAVIES, 2020). As geleiras de montanha são particularmente sensíveis às mudanças de temperatura por serem, em geral, pequenas e íngremes (BACH; RADIC; SCHOOF, 2018; BOLIBAR *et al.*, 2022). Dessa forma, variações na temperatura impulsionam o equilíbrio da massa glacial, podendo resultar em mudanças na posição da ELA o que, globalmente, está aumentando devido às mudanças do clima (SIX; VINCENT, 2014; LORREY *et al.*, 2022).

<sup>15</sup> É, em grande parte, função da espessura média e da taxa de ablação das geleiras, a qual varia conforme sua hipsometria e o gradiente do balanço de massa glacial. Gradientes de balanço de massa expressivos são indicativos de alto fluxo através da altitude da linha de equilíbrio (DAVIES, 2020).



## CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A CV (vertente do Atlântico) perdeu 39% (37,4 km<sup>2</sup>) da superfície glacial entre 1985 e 2021, sendo que a maior retração ocorreu entre 2002 e 2011, especialmente na primeira metade desse período. As variações são diferentes quando se analisa as faixas de altitude devido as características do clima e da resposta ao albedo. A hipsometria glacial indicou retração das geleiras nos intervalos mais baixos de elevação, sendo mais significativa entre 5101 e 5500 m de altitude, concentrando-se, principalmente, nas duas últimas décadas. Ademais, constatou-se o aumento da elevação mínima da frente glacial. Assim, pode ser interpretado que ocorre a elevação da linha de equilíbrio e diminuição da área de acumulação.

Optou-se por coletar informações sobre o clima através de pesquisa bibliográfica, considerando o que há, até o momento, de investigações sobre a CV. Os estudos indicaram mudanças nos padrões de temperatura e precipitação que, por sua vez, impactam negativamente no balanço de massa das geleiras e levam ao aumento da elevação da linha de frente glacial. Outrossim, algumas bibliografias também relacionaram as mudanças identificadas com a retração glacial.

As geleiras são componentes importantes do sistema hidrológico para o ambiente e comunidades da área de estudo, especialmente na estação seca. Dessa forma, a ruptura dos regimes de fluxo nos sistemas fluviais e nos biomas está entre os impactos da retração e desaparecimento glacial. Salienta-se que esses impactos nos recursos hídricos locais ocasionam alterações no volume de descarga da água na Bacia Amazônica, pois a CV é uma das nascentes dessa bacia.

As atividades econômicas e culturais da área de estudo estão intrinsecamente relacionadas com a qualidade e quantidade de recursos naturais, especialmente água e solo que, por sua vez, estão associados às geleiras. Dessa forma, a retração glacial impacta negativamente a Sociocriosfera da Cordilheira.

Nesse sentido, salienta-se a necessidade de investimento em políticas públicas focadas em estratégias de adaptação às mudanças climáticas que atingem as

comunidades e o ambiente da CV. Ademais, em vista da escassez dos recursos hídricos e suas consequências para as populações da cordilheira, é relevante o monitoramento de geleiras, rios, lagos e demais componentes hidrológicos, sendo as pesquisas científicas uma fonte de contribuição em potencial para o diagnóstico de impactos ambientais e climáticos, a fim de corroborar com a elaboração de estratégias de adaptação e com gestão das comunidades.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALGANCI U, BESOL B, SERTEL E. 2018. Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 7. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ijgi7030114>>. Acesso em: 16 jan. 2024.

BACH, E.; RADIĆ, V.; SCHOOF, C. 2018. How sensitive are mountain glaciers to climate change? Insights from a block model. *Journal of Glaciology*, v. 64, p. 247–258. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1017/jog.2018.15>>. Acesso em: 18 jan. 2024.

BOLIBAR, J.; RABATEL, A.; GOUTTEVIN I.; ZEKOLLARI, H.; GALIEZ C. 2022. Nonlinear sensitivity of glacier mass balance to future climate change unveiled by deep learning. *Nature Communications*, v. 13(1): 409. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41467-022-28033-0>>. Acesso em: 19 jan. 2024.

BRAUN, M.H.; MALZ, P.; SOMMER, C.; FARÍAS-BARAHONA, D.; SAUTER, T.; CASASSA, G.; SORUCO, A.; SKVARCA, P.; SEEHAUS, T. C. 2019. Constraining glacier elevation and mass changes in South America. *Nature Climate Change*, v. 9, p. 130–136. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0375-7>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

CAI, W.; BORLACE, S.; LENGAIGNE. M.; VAN RENSCH, P.; COLLINS, M.; VECCHI G. 2014. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, v. 4, p. 111-116. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/nclimate2100>>. Acesso em: 17 jan. 2024.

CAI, W.; BORLACE, S.; LENGAIGNE. M.; VAN RENSCH, P.; COLLINS, M.; VECCHI G. 2014. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, v. 4, p. 111-116. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/nclimate2100>>. Acesso em: 27 dez. 2023.

CAUVY-FRAUNIÉ, S.; DANGLES, O. 2019. A global synthesis of biodiversity responses to glacier retreat. *Nature Ecology & Evolution*, v. 3, p. 1675–1685. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41559-019-1042-8>>. Acesso em: 17 jan. 2024.

CHENG, C.; DU, W.; LI, J.; BAO, A.; GE, W.; WANG, S.; MA, D.; PAN, Y. 2023. Spatiotemporal Variations of Glacier Mass Balance in the Tomur Peak Region Based on Multi-Source Altimetry Remote Sensing Data. *Remote Sensing*, v. 15, p. 4143. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs15174143>>. Acesso em: 17 jan. 2024.

COSTA, R.M. 2022. **Migrações na comunidade campesina de Phinaya, CV, Peru:** contexto das mudanças climáticas e socioambientais. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, UFRGS, Porto Alegre, 112 f. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/251024>. Acesso em: 3 dez. 2023.

DAVIES, B. 2020. Glacier response time. *AntarcticGlaciers.org*. Disponível em: <<https://www.antarcticglaciers.org/glacier-processes/mass-balance/glacier-response->

time/>. Acesso em: 20 dez. 2023.

EDWIN, M.; SIMONE, S.; CHRISTIAN, H.; WILFRIED, H.; ALEJO, C.; THOMAS, C.; FABIAN, D.; CLAUDIA, G.; NADINE, S.; LUÍS, J.; NILTON, M.; MAXWEL, R.; NICACIO, C. H.; JAIME SAMATA, S.; WILSON, S.; SANDRO, A.; FELIPE, S. 2015. Iniciación de un monitoreo del balance de masa en el glaciar Suyuparina, Cordillera Vilcanota, Perú. **Climate Change in the Tropical Andes**, v. 2. Disponível em: <<http://190.12.92.167/bitstream/handle/20.500.12543/3185/ANA0001765.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em 02 jun. 2021.

ESTRADA, A.; MOSCOSO, J. 2014. **Plan de gestión de las praderas naturales de la Comunidad de Phinaya em un escenario de cambio climático**. Cusco: CBC. 52 p.

FIGUEIREDO, A. R. 2017. **A sociocriofera nos andes centrais: Percepções, adaptações e impactos dos desastres glaciais no Callejón de Huaylas, Peru**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, UFRGS, Porto Alegre, 128 f. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/156775>>. Acesso em: 06 jun. 2021.

FIGUEIREDO, A. R. 2021. **Sociocriofera andina: etnoconhecimento ancestral e ruptura pós-colonial nos Andes Centrais**. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, UFRGS, Porto Alegre, 158 f. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/226139>>. Acesso em: 04 out. 2022.

FLORES, A; KANCHA, K.; MINAN, F.; ROMERO, G.; DAMONTE, G. 2011. **Impactos de la variabilidad y cambio climatico en los sistemas productivos rurales y en las condiciones de vida y desarrollo campesino – una vision desde la poblacion rural de Cusco**. PACC Perú [Serie: Estudios regionales en Apurímac y Cusco]. Disponível em: [https://issuu.com/paC.C.\\_peru/docs/erc-003/126](https://issuu.com/paC.C._peru/docs/erc-003/126). Acesso em: 03 jun. 2021.

FYFFE, C. L.; POTTER, E.; FUGGER, S.; ORR, A.; FATICHI, S.; MEDINA, K.; HELLSTRÖM, R. Å.; SHAW, T. E.; BERNAT, M.; LLACZA, A.; JACOME, G.; AUBRY-WAKE, C.; GURGISER, W.; PERRY, L. B.; SUAREZ, W.; QUINCEY, D. J.; LOARTE, E.; PELLICCIOTTI, F. 2021. Quantifying the controls of Peruvian glacier response to climate, **EGU General Assembly**, p. 19–30, EGU21-7524. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-7524>>. Acesso em: 18 jan. 2024.

GUTH, P.L.; VAN NIEKERK, A.; GROHMANN, C.H.; MULLER, J.-P.; HAWKER, L.; FLORINSKY, I.V.; GESCH, D.; REUTER, H.I.; HERRERA-CRUZ, V.; RIAZANOFF, S. 2021. Digital Elevation Models: Terminology and Definitions. **Remote Sensing**, v. 13, p. 3581. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs13183581>>. Acesso em: 17 jan. 2024.

HANSHAW M. N.; BOOKHAGEN B. 2014. Glacial areas, lake areas, and snow lines from 1975 to 2012: status of the Cordillera Vilcanota, including the Quelccaya Ice Cap, northern central Andes, Peru. **The Cryosphere**, v. 8, p. 359–376.

HASTENRATH, S. 1998. Cordillera Blanca on Landsat imagery and Quelccaya Ice Cap. IN: WILLIAMS, R.S.; FERRIGNO, J.G. (Eds.). **Satellite Image Atlas of Glaciers of the**

**World:** South-America. US Government Printing Office.

HUSS, M.; HOCK, R. 2018. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. **Nature Climate Change**, v. 8, p. 135–140. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>>. Acesso em: 17 jan. 2024.

IMFELD N.; SEDLMEIER K.; GUBLER S.; MARROU, K. C.; DAVILA, C. P.; HUERTA, A.; LAVADO-CASIMIRO W.; ROHRER, M.; SCHERRER, S. C.; SCHWIERZ, C. 2021. A combined view on precipitation and temperature climatology and trends in the southern Andes of Peru. **International Journal of Climatology**, v. 41, p. 679-698. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/joc.6645698>>. Acesso em: 18 jan. 2024.

INAIGEM – INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA. 2018. **Inventario Nacional de Glaciares: las Cordilleras Glaciares del Perú**. Huaraz: Instituto Nacional de Investigación En Glaciares y Ecosistemas de Montaña - Biblioteca y Publicaciones. 348 p. Disponível em: <[http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//5176\\_inventario-nacional-de-glaciares-las-cordilleras-glaciares-del-peru.pdf](http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//5176_inventario-nacional-de-glaciares-las-cordilleras-glaciares-del-peru.pdf)>. Acesso em: 14 maio 2020.

IPCC – INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2014. **Aquecimento Global de 1,5°C**. Trad.: OLIVEIRA, M.A.R. Brasília: MCTIC. 28 p. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf>>. Acesso em: 28 dez. 2023.

IPCC. 2022. **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 Press, Cambridge, p. 2897–2930. Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGII\\_Annex-II.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Annex-II.pdf)>. Acesso em: 27 set. 2022.

KAEZING, R. 2015. Can glacial retreat lead to migration? A critical discussion of the impact of glacier shrinkage upon population mobility in the Bolivian Andes. **Population and Environment**, v. 36, n. 4, p. 480-496. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11111-014-0226-z>>. Acesso em: 23 jun. 2021.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K. C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, R.; JENNE, R.; JOSEPH, D. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, p. 437-470. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)>. Acesso em: 18 jan. 2023.

KASER, G. e OSMASTON, O. 2002. **Tropical Glaciers**. Cambridge: Cambridge University Press. 210p.

KRONENBERG, M.; SCHAUWECKER, S.; HUGGEL, C.; SALZMANN, N.; DRENKHAN, F.; GIRÁLDEZ, C.; GURGISER, W.; KASER, G.; SUAREZ, WI.; GARCÍA H. J.; ROHRER, M. 2016. ¿Cuál es el futuro del caudal en las cuencas glaciadas de los Andes Centrales? **XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica**, Lima (Peru), 28 September 2016 - 30 September 2016, 1364-1373.

LANDAU, E. C.; GUIMARÃES, D. P. 2011. **Análise comparativa entre os modelos digitais de elevação: ASTER, SRTM e TOPODATA.**

LAVADO, W., FERNANDEZ, C.; VEGA, F.; CAYCHO, T.; ENDARA, S.; HUERTA, A.; OBANDO, O. 2016. **PISCO**: Peruvian interpolated data of the SENAMI's climatological and hydrological observations. Precipitación v1.0. Lima: SENAMHI.

LORREY, A. M.; VERGO, L.; PURDIE, H.; ANDERSON, B.; CULLEN, N. J.; SIRGUEY P.; MACKINTOSH, A.; WILLSMAN, A.; MACARA, G.; CHINN, W. 2022. Southern Alps equilibrium line altitudes: four decades of observations show coherent glacier-climate responses and a rising snowline trend. **Journal of Glaciology**. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/jog.2022.27>>. Acesso em: 19 jan. 2024.

MARJANI, S.; ALIZADEH-CHOOBARI, O.; IRANNEJAD, P. 2019. Frequency of extreme El Niño and La Niña events under global warming. **Climate Dynamic**, v. 53, p. 5799–5813. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00382-019-04902-1>>. Acesso em: 23 ago. 2022.

PERRY, L. B.; SEIMON, A.; KELLY, G. M. 2014. Precipitation delivery in the tropical high Andes of southern Peru: new findings and paleoclimatic implications. **Journal of Climatology**, v. 34, p. 197-215. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/joc.3679>>. Acesso em: 27 set. 2022.

PODGÓRSKI, J.; KINNARD, C.; PEŁLICKI, M.; URRUTIA, R. 2019. Performance Assessment of TanDEM-X DEM for Mountain Glacier Elevation Change Detection. **Remote Sensing**, v. 11, p.187. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs11020187>>. Acesso em: 17 jan. 2024.

POREMBA, R. J.; PERRY, L. B.; SEMON, ANTON.; MARTIN, D. T. TUPAYACHI, A. 2015. Meteorological Characteristics of Heavy Snowfall in the Cordillera Vilcanota, Peru. **72 nd EASTERN SNOW CONFERENCE** - Sherbrooke, Québec, Canada, 2015.

PROYECTO MAPBIOMAS PERÚ. 2021. **Aspectos destacados del mapeo anual de la cobertura y uso de suelo en el Perú entre 1985 Y 2021.** p. 10. Disponível em: <[https://peru.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/14/2023/08/MB\\_Peru\\_C1\\_Factsheet.pdf](https://peru.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/14/2023/08/MB_Peru_C1_Factsheet.pdf)>. Acesso em 11 jan. 24.

PROYECTO MAPBIOMAS PERÚ. 2023. **Proyecto Mapbiomas Perú – Colección [1.0] de la Serie Anual de Mapas de Cobertura y Uso del Suelo del Perú** Disponível em: <<https://peru.mapbiomas.org/>>. Acesso em: 20 dez. 2023.

RABATEL, A.; FRANCOU, B. SORUCO, A. GOMEZ, J. CÁCERES, B. CEBALLOS, J.L. BASANTE, R. VUILLE, M. SICART, J.E. HUGGEL, C.; SCHEEL, M. 2013. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. **Cryosphere**, v. 7, p. 81-102.

RANDOLPH GLACIER INVENTORY – RGI. 2017. Randolph Glacier Inventory - A Dataset of Global Glacier Outlines, Version 6 [Data Set]. Boulder, Colorado USA. **National Snow and Ice Data Center**. Disponível em: <<https://doi.org/10.7265/4m1f-gd79>>. Date Accessed 01-06-2024>. Acesso em: 19 jan. 2024.

RIBEIRO, R. R.; SIMÕES, J. C.; RAMIREZ, E. 2017. The Amazon Glaciers. In: **Glacier Evolution in a Changing World**. IntechOpen.

SALZMANN, N.; ROHRER, M; HUGGEL, C.; SILVERIO, W. 2013. **Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, Southern Peruvian Andes**. The Cryosphere, v. 7, p. 103–118.

SENAMHI – SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ. 1988. **Mapa de clasificación climática del Perú. Método de Thornthwaite**. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Disponível em: <https://idesep.senamhi.gob.pe/geonetwork/srv/por/catalog.search;jsessionid=AB673E6D32DE4CE603184AE47CB60673#/metadata/d4518248-af56-4419-9b5d-b42de7dba471>. Acesso em: 11 jan. 2021.

SENAMHI. 2021. **Análisis del periodo de lluvias 2019-2020 a nivel nacional**. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/20.500.12542/475>>. Acesso em: 23 ago. 2022.

SIMÕES, J. C. 2004. Glossário da língua portuguesa da neve, do gelo e termos correlatos. **Pesquisa Antártica Brasileira**, n. 4.

SIX, D.; VINCENT C. 2014. Sensitivity of mass balance and equilibrium-line altitude to climate change in the French Alps. **Journal of Glaciology**, v. 60(223), p. 867–878. Disponível em: <<https://doi.org/10.3189/2014JoG14J014>>. Acesso em: 18 jan. 2024.

STIBAL, M.; BRADLEY, J. A.; EDWARDS, A.; HOTALING, S.; ZAWIERUCHA, K.; ROSVOLD, J.; LUTZ, S.; CAMERON, K. A.; MIKUCKI, J. A.; KOHLER, T. J.; SABACKA, M.; ANESIO, A. M. 2020. Glacial ecosystems are essential to understanding biodiversity responses to glacier retreat. **Nature Ecology & Evolution**, v. 4, p. 686–687. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41559-020-1163-0>>. Acesso em: 17 jan. 2024.

TAKAHASHI, K.; MONTECINOS, A.; GOUBANOVA, K. Y.; DEWITTE, B. 2011. ENOS regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. **Geophysical Research Letters**, v. 38. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2011GL047364>>. Acesso em: 23 ago. 2022.

TANGBORN, W.; FOUNTAIN, A.; SIKONIA, W. 1990. Effect of Area Distribution with

Altitude on Glacier Mass Balance – A Comparison of North and South Klawatti Glaciers, Washington State, U.S.A. **Annals of Glaciology**, v. 14, p. 278-282. Disponível em: <<https://doi.org/10.3189/S0260305500008752>>. Acesso em: 17 jan. 2024.

TAYLOR, L.S.; QUINCEY, D.J.; SMITH, M.W.; POTTER, E.R.; CASTRO, J.; FYFFE, C.L. 2022. Multi-Decadal Glacier Area and Mass Balance Change in the Southern Peruvian Andes. **Frontiers in Earth Science**, v. 10. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/feart.2022.863933>>. Acesso em: 17 jan. 2024.

TURPO TURPO CAYO, E.Y.; BORJA, M.O.; ESPINOZA-VILLAR, R.; MORENO, N.; CAMARGO, R.; ALMEIDA, C.; HOPFGARTNER, K.; YARLEQUE, C.; SOUZA, C.M., JR. 2022. Mapping Three Decades of Changes in the Tropical Andean Glaciers Using Landsat Data Processed in the Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 14, p. 1-21. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs14091974>>. Acesso em: 17 jan. 2024.

UGRH – UNIDAD DE GLACIOLOGIA Y RECURSOS HIDRICOS. 2014. **Inventario De Glaciares del Peru**. 2. ed. Huaraz: Ana - Autoridad Nacional del Agua, 56 p.

VUILLE, M.; FRANQUIST, E.; GARREAUD, R.; CASIMIRO, W. S. L.; CÁCERES, B. 2015. Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. **Journal of Geophysical Research**, v. 120, n. 9, p. 3745-3757. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/2015JD023126>>. Acesso em: 28 dez. 2023.

YARLEQUE C.; VUILLE M.; HARDY, D.R.; TIMM, O. E.; DE LA CRUZ, J.; RAMOS, H.; RABATEL, A. 2018. Projections of the future disappearance of the Quelccaya ice cap in the Central Andes. **Scientific Reports**, v. 8 (1): 15564. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-018-33698-z>>. Acesso em: 17 jan. 2024.