

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISA EM SENSORIAMENTO REMOTO E  
METEOROLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**VARIAÇÕES DE ÁREA DAS GELEIRAS DA  
COLÔMBIA E DA VENEZUELA ENTRE 1985 E  
2015, COM DADOS DE SENSORIAMENTO  
REMOTO**

ISABEL CRISTIANE REKOWSKY

Orientador: Prof. Dr. Ulisses Franz Bremer

Porto Alegre (RS), Outubro de 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E  
METEOROLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**VARIAÇÕES DE ÁREA DAS GELEIRAS DA COLÔMBIA E DA  
VENEZUELA ENTRE 1985 E 2015, COM DADOS DE SENSORIAMENTO  
REMOTO**

ISABEL CRISTIANE REKOWSKY

Dissertação de mestrado apresentada  
ao Programa de Pós-Graduação em  
Sensoriamento Remoto como requisito para  
obtenção do título de Mestre.

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Ulisses Franz Bremer

BANCA EXAMINADORA:

Prof.<sup>a</sup> Dr. Silvia Beatriz Alves Rolim

Prof.<sup>a</sup> Dr. Katia Kellem da Rosa

Prof. Dr. Rafael da Rocha Ribeiro

PORTO ALEGRE

2016

# UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Jane Tutikian

## INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Rekowsky, Isabel Cristiane

Variações de área das geleiras da Colômbia e da Venezuela entre 1985 e 2015, com dados de sensoriamento . / Isabel Cristiane Rekowsky. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2016.  
[95 f.] il.

Dissertação (Mestrado).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2016.

Orientador(es):Ulisses Franz Bremer

1. Geleiras tropicais 2. Norte andino 3. Normalize Difference Snow Index - NDSI 4. Modelo Digital de Elevação - MDE I. Título.

CDU 911

---

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Sibila F T Binotto

CRB 10/1743

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Ulisses Franz Bremer pela orientação e apoio durante a elaboração dessa dissertação.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da UFRGS, e professores de disciplinas cursadas em outros Programas, pelos ensinamentos.

Aos membros da banca do plano de dissertação e da dissertação, professores Jeferson Cardia Simões, Silvia Beatriz Alves Rolim, Katia Kellen da Rosa e Rafael da Rocha Ribeiro.

Aos colegas de orientação Bijesh Veetil e Tiago Rafael dos Santos, pelos textos, dados e demais subsídios compartilhados.

Aos meus revisores e co-orientadores informais: Sumire da Silva Hinata, Francis Birck e Marcia dos Santos por se disponibilizarem a ler, revisar e contribuir com essa dissertação.

Aos amigos geógrafos Ricardo Hellmann, Frantiesca Cheiran, Débora Ferreira, Raquel Chites, Pâmela Kornalewski, Paola Pereira e Aline Kaliski pela atenção e conhecimento compartilhado.

Aos amigos e colegas da Ecoplan Engenharia, da Profill Engenharia e Ambiente e da Pixel Planejamento, especialmente a Nilson Oliveira, Ana Helfer, Paula Riedger, Sidnei Agra, Liege Wosiacki, Júlia Campos pelo apoio e aprendizado.

Às amigas Suzielle Modkowski, Tássia Kastner, Caroline Baseggio e Angélica Medeiros pela amizade e incentivo durante essa jornada.

À minha mãe Neusa e à minha irmã Lucimar pelo carinho e apoio em todos os momentos.

E aos meus tios e primos que sempre estiveram próximos me incentivando de diversas formas, especialmente ao Rubens, à Carmen e à Lairane.

## RESUMO

### **Variações de área das geleiras da Colômbia e da Venezuela entre 1985 e 2015, com dados de sensoriamento remoto**

Nesse estudo foram mapeadas e mensuradas as variações de área, elevação mínima e orientação das geleiras da Colômbia e da Venezuela (trópicos internos), entre os anos 1985-2015. Para o mapeamento das áreas das geleiras foram utilizadas como base imagens Landsat, sensores TM, ETM+ e OLI. Às imagens selecionadas foi aplicado o *Normalized Difference Snow Index* (NDSI), no qual são utilizadas duas bandas em que o alvo apresenta comportamento espectral oposto ou com características bem distintas: bandas 2 e 5 dos sensores TM e ETM+ e bandas 3 e 6 do sensor OLI. Os dados de elevação e orientação das massas de gelo foram obtidos a partir do Modelo Digital de Elevação SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission – v03*). Em 1985, a soma das áreas das sete geleiras estudadas correspondia a 92,84 km<sup>2</sup>, enquanto no último ano estudado (2015/2016) esse valor passou para 36,97 km<sup>2</sup>. A redução de área ocorreu em todas as geleiras analisadas, com taxas de retração anual variando entre 2,49% a.a. e 8,46% a.a. Houve retração das áreas de gelo localizadas em todos os pontos cardeais considerados, bem como, elevação da altitude nas frentes de geleiras. Além da perda de área ocorrida nas menores altitudes, onde a taxa de ablação é mais elevada, também se observou retração em alguns topos, evidenciado pela ocorrência de altitudes menores nos anos finais do estudo, em comparação com os anos iniciais. Como parte das geleiras colombianas está localizada sobre vulcões ativos, essas áreas sofrem influência tanto de fatores externos, quanto de fatores internos, podendo ocorrer perdas de massa acentuadas causadas por erupção e/ou terremoto.

**Palavras-chave:** Geleiras tropicais. Norte andino. *Normalized Difference Snow Index* – NDSI. Modelo Digital de Elevação–MDE.

## ABSTRACT

### **Glaciers area variations in Colombia and Venezuela between 1985 and 2015, with remote sensing data**

In this study, glaciers located in Colombia and Venezuela (inner tropics) were mapped between 1985-2015. The area of these glaciers was measured and the variations that occurred in each glacier were compared to identify whether the glacier was growing or shrinking. The minimum elevation of the glaciers fronts and the aspect of the glaciers were analyzed. The glaciers areas were obtained by the use of Landsat images, TM, ETM+ and OLI sensors. The Normalized Difference Snow Index (NDSI) was applied to the selected images, in which two bands were used, where the ice mass has opposite (or very different) spectral behavior: bands 2 and 5 from sensors TM and ETM+, and bands 3 and 6 from sensors OLI. The elevation and the aspect data of the glaciers were obtained from SRTM (Shuttle Radar Topography Mission – v03) Digital Elevation Model. In 1985/1986, the sum of the areas of the seven studied glaciers corresponded to 92.84 km<sup>2</sup>, while in the last year analyzed (2015/2016), this value shrank to 36.97 km<sup>2</sup>. The area shrinkage occurred in all the glaciers that were mapped, with annual decline rates ranging from 2.49%/year to 8.46%/year. It is also possible to observe a decrease of the ice covered in all aspects considered, as well as an elevation in all glaciers fronts. In addition to the area loss occurred at lower altitudes, where the ablation rate is higher than in higher altitudes, shrinkage in some mountain tops was also present, which is evidenced by the occurrence of lower maximum elevations in the final years of the study, when compared with the initial years. Considering that part of the Colombian's glaciers are located on active volcanoes, these areas are influenced by external and internal factors, and the occurrence of volcanic eruption and/or earthquake can cause sharp mass losses.

**Keywords:** Tropical glaciers. Northern Andean. Normalized Difference Snow Index – NDSI. Digital Elevation Model - DEM.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo.....	14
Figura 2: Áreas de acumulação e ablação de uma geleira.....	16
Figura 3: Delimitação dos trópicos do ponto de vista glaciológico e distribuição das áreas glaciais. .....	17
Figura 4: Regime glacial dos trópicos internos.....	18
Figura 5: Regime glacial dos trópicos externos.....	19
Figura 6: Distribuição e condições climáticas médias para os grupos de geleiras andinas. ....	20
Figura 7: Domínios climáticos, padrões de ventos principais e localização atual da ZCIT sobre a América do Sul.....	23
Figura 8: Precipitação média mensal (mm) nas estações próximas à Sierra Nevada de Santa Marta. .....	25
Figura 9: Precipitação média mensal (mm) nas estações próximas à Sierra Nevada del Cocuy. ....	26
Figura 10: Precipitação média mensal (mm) nas estações localizadas próximo ao Parque Natural de Los Nevados.....	27
Figura 11: Precipitação média mensal (mm) nas estações próximas ao Nevado del Huila. ....	28
Figura 12: Precipitação média mensal (mm) em estações próximas a Sierra Nevada de Mérida.....	29
Figura 13: Comparativo entre a temperatura média mínima e a temperatura média máxima mensal, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação San Lorenzo. ....	30
Figura 14: Comparativo entre o número médio de horas de brilho solar diário por mês, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação San Lorenzo. ....	31
Figura 15: Comparativo entre a temperatura média mínima e a temperatura média máxima mensal, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Sierra Nevada Cocuy. ....	32
Figura 16: Comparativo entre a temperatura média mínima e a temperatura média máxima mensal, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Chita. ....	33
Figura 17: Comparativo entre o número médio de horas de brilho solar diário por mês, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação <i>Sierra Nevada Cocuy</i> . ....	33
Figura 18: Comparativo entre o número médio de horas de brilho solar diário por mês, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Chita. ....	34
Figura 19: Comparativo entre a temperatura média mínima e a temperatura média máxima mensal, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Las Brisas.....	35
Figura 20: Comparativo entre a temperatura média mínima e a temperatura média máxima mensal, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Cajamarca. ....	36
Figura 21: Comparativo entre o número médio de horas de brilho solar diário por mês, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Las Brisas. ....	36
Figura 22: Comparativo entre o número médio de horas de brilho solar diário por mês, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Cajamarca. ....	37
Figura 23: Comparativo entre a temperatura média mínima e a temperatura média máxima mensal, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Tenerife.....	38
Figura 24: Comparativo entre a temperatura média mínima e a temperatura média máxima mensal, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Sta Maria.....	39

Figura 25: Comparativo entre o número médio de horas de brilho solar diário por mês, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Tenerife.....	39
Figura 26: Comparativo entre o número médio de horas de brilho solar diário por mês, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Sta Maria.....	40
Figura 27: Bacias hidrográficas localizadas no norte andino.....	43
Figura 28: Segmentos do Arco Vulcânico Andino.....	44
Figura 29: Reflectância da neve em ângulos de reflectância de 60° e 30° para comprimentos de onda entre 0,4 e 2,5 µm.....	49
Figura 30: Segmento espacial do SRTM, mostra os principais componentes das bandas C e X do Radar de Abertura Sintética (SAR).....	58
Figura 31: Fluxograma com as etapas desenvolvidas na metodologia.....	60
Figura 32: Variação de área na Sierra Nevada de Santa Marta.....	65
Figura 33: Altimetria e perfil topográfico da Sierra Nevada de Santa Marta.....	66
Figura 34: Gráfico da área da geleira por orientação.....	67
Figura 35: Gráfico das elevações mínimas da geleira, de acordo com a orientação.....	68
Figura 36: Variação de área na Sierra Nevada del Cocuy.....	69
Figura 37: Altimetria e perfil topográfico da Sierra Nevada del Cocuy.....	70
Figura 38: Gráfico da área da geleira por orientação.....	71
Figura 39: Gráfico das elevações mínimas da geleira, de acordo com a orientação.....	72
Figura 40: Variação de área no Nevado del Ruiz.....	73
Figura 41: Altimetria e perfil topográfico do Nevado del Ruiz.....	74
Figura 42: Gráfico da área da geleira por orientação.....	75
Figura 43: Gráfico das elevações mínimas da geleira, de acordo com a orientação.....	75
Figura 44: Variação de área no Nevado Santa Isabel.....	76
Figura 45: Altimetria e perfil topográfico do Nevado Santa Isabel.....	77
Figura 46: Gráfico da área da geleira por orientação.....	78
Figura 47: Gráfico das elevações mínimas da geleira, de acordo com a orientação.....	79
Figura 48: Variação de área no Nevado del Tolima.....	79
Figura 49: Altimetria e perfil topográfico do Nevado del Tolima.....	80
Figura 50: Gráfico da área da geleira por orientação.....	81
Figura 51: Gráfico das elevações mínimas da geleira, de acordo com a orientação.....	81
Figura 52: Variação de área no Nevado del Huila.....	82
Figura 53: Altimetria e perfil topográfico do Nevado del Huila.....	83
Figura 54: Gráfico da área da geleira por orientação.....	84
Figura 55: Gráfico das elevações mínimas da geleira, de acordo com a orientação.....	84
Figura 56: Variação de área na Sierra Nevada de Mérida.....	85
Figura 57: Altimetria e perfil topográfico da Sierra Nevada de Mérida.....	86
Figura 58: Gráfico da área da geleira por orientação.....	87



Figura 59: Gráfico das elevações mínimas da geleira, de acordo com a orientação. ....87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Precipitação média mensal (em mm) na estação San Lorenzo, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010. ....	30
Tabela 2: Precipitação média mensal (em mm) nas estações Sierra Nevad Cocuy e Chita, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010. ....	31
Tabela 3: Precipitação média mensal (em mm) nas estações Las Brisas e Cajamarca, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010. ....	34
Tabela 4: Precipitação média mensal (em mm) nas estações Tenerife e Sta Maria, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010. ....	38
Tabela 5: Precipitação média mensal (em mm) nas estações La Aguada e Pico Espejo nos períodos indicados. ....	40
Tabela 6: Características das bandas dos sensores TM (Landsat 4 e 5), ETM (Landsat 7) e OLI/TIRS (Landsat 8). (Adaptado de USGS, 2016a). ....	54
Tabela 7: Imagens utilizadas no estudo. ....	56
Tabela 8: Cenas do SRTMGL1 utilizadas no estudo. ....	59
Tabela 9: Resíduo médio resultante da ortorretificação das imagens Landsat informado nos metadados das imagens. ....	61
Tabela 10: Erro quadrático médio (RMS) resultante do correção das cenas TM/Landsat-5, tendo por imagem de referência a cena OLI/Landsat da respectiva geleira. ....	62
Tabela 11: Pontos cardeais e respetivos intervalos de orientação. ....	64
Tabela 12: Síntese dos resultados obtidos no estudo. ....	88

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Período de funcionamento dos satélites da série Landsat. (Adaptado de USGS, 2016a).54	
Quadro 2: Principais aplicações do TM/ETM - Landsat para o mapeamento de geleiras. (Adaptado de Paul e Hendriks, 2010). ....	55

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	11
1.2	OBJETIVOS .....	12
1.3	ÁREA DE ESTUDO.....	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>
2.1	GELEIRAS (ORIGEM E DINÂMICA).....	15
2.1.1	Geleiras Tropicais .....	17
2.1.2	Evolução da cobertura de gelo na área de estudo .....	21
2.2	ORIGEM DAS PRECIPITAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO .....	23
2.2.1	Caracterização das precipitações na área de estudo .....	24
2.2.2	Variação de parâmetros climatológicos na área de estudo .....	29
2.3	A INSERÇÃO DAS GELEIRAS NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ENTORNO .....	41
2.4	RISCOS ASSOCIADOS ÀS INTERAÇÕES VULCÕES-GELEIRAS .....	43
2.5	SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO ESTUDO DE GELEIRAS TROPICAIS ....	48
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>53</b>
3.1	MATERIAIS.....	53
3.1.1	Imagens da série Landsat .....	53
3.1.2	Modelo de elevação SRTM.....	57
3.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	59
3.2.1	Análise das imagens da série Landsat .....	60
3.2.2	Determinação da orientação e elevação das geleiras .....	63
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>65</b>
4.1	Sierra Nevada de Santa Marta .....	65
4.2	Sierra Nevada del Cocuy.....	69
4.3	Nevado del Ruiz.....	72
4.4	Nevado Santa Isabel.....	76
4.5	Nevado del Tolima.....	79
4.6	Nevado del Huila .....	82
4.7	Sierra Nevada de Mérida.....	85
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>88</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>91</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

- ASTER**- *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*
- AVA** - Arco Vulcânico Andino
- DN** – *Digital Number*
- ETM+** - *Enhanced Thematic Mapper Plus*
- GMTED** - *Global Multi-resolution Terrain Elevation Data*
- IDEAM** - *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia*
- ISODATA** - *Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique*
- LE** – *Linha de equilíbrio*
- MDE** – *Modelo Digital de Elevação*
- MSS** - *Multispectral Scanner System*
- NASA** - *National Aeronautics and Space Administration*
- NDSI** – *Normalized Difference Snow Index*
- NDVI** - *Normalized Difference Vegetation Index*
- NDWI** - *Normalized Difference Water Index*
- NGA** - *National Geospatial-Intelligence Agency*
- NIR** - *Near infrared*
- OLI** - *Operational Land Imager*
- PIG** – *Pequena Idade do Gelo*
- RBV** - *Return Beam Vidicon*
- RMS** - *Erro Quadrático Médio (Root Mean Square)*
- SAM** - *Spectral Angle Mapper*
- SIAC** - *Sistema de Información Ambiental de Colombia*
- SIG** - *Sistema de Informações Geográficas*
- SRTM** - *Shuttle Radar Topography Mission*
- SWIR** - *Short-wave infrared*
- TIRS** - *Thermal Infrared Sensor*
- TM** - *Thematic Mapper*
- USGS** - *United States Geological Survey*
- VNIR** - *Visible and near infrared*
- ZCIT** – *Zona de convergência intertropical*

# 1 INTRODUÇÃO

Desde o fim do século XIX as geleiras alpinas têm apresentado retração e afinamento em resposta direta ao aquecimento atmosférico. Contudo, a magnitude dessa resposta não tem sido a mesma em todos os lugares (SAGREDO, RUPPER e LOWEL, 2014). A retração da área e do comprimento das geleiras nos Andes tropicais ao longo das últimas três décadas é sem precedentes desde a máxima extensão da Pequena Idade do Gelo – PIG (séc. XVI-XIX). No que se refere ao balanço de massa, apesar de ter ocorrido ganhos esporádicos em várias geleiras tropicais, a tendência é bastante negativa ao longo dos últimos 50 anos, com um balanço médio de massa apresentando um déficit ligeiramente superior ao computado em escala global (RABATEL et al, 2013).

Na Colômbia e na Venezuela, especificamente, as geleiras estão se reduzindo de forma acentuada. Na Colômbia, durante o último século, desapareceram oito pequenas geleiras, tanto por efeitos atmosféricos quanto por reativação vulcânica e, embora em épocas de chuva esses picos sejam cobertos temporariamente de neve, a formação de gelo não ocorre. Em 2006/2007 restavam seis geleiras na Colômbia, totalizando uma área de 47,2 km<sup>2</sup>, com uma taxa de redução de área entre 2% e 5% ao ano (CEBALLOS et al., 2010). Segundo Carrillo e Yopez (2010), as geleiras na Venezuela estão restritas às encostas dos picos Humboldt-Bonpland e Bolívar, na Sierra Nevada de Mérida.

Neste trabalho foram analisadas as variações de área, de orientação e de elevação das frentes das geleiras localizadas na Colômbia e na Venezuela, com base em dados de sensoriamento remoto, entre 1985 e 2015.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

As massas de gelo e neve existentes nos topos de montanhas tropicais são muito relevantes para o entorno, seja como fonte de recursos naturais, seja como um perigo potencial. Nos trópicos externos, as terras áridas e semiáridas do entorno dependem das cadeias de montanha cobertas de neve para seu abastecimento de água. Mesmo em regiões úmidas, caso da área de estudo, as geleiras atuam como reservatórios que regulam o fluxo de água sazonal em suas respectivas bacias hidrográficas (HOYOS-PATIÑO, 1998).

De acordo com Poveda e Pineda (2009), o provável desaparecimento das geleiras da Colômbia representa uma ameaça para a sobrevivência dos *páramos*, o que teria graves

implicações ecológicas para a região. Ainda de acordo com esses autores, os *páramos* são ecossistemas endêmicos dos Andes tropicais, os quais são fonte de água para muitas pequenas cidades e vilas ao longo dos Andes.

No que se refere ao risco causado pela justaposição de geleiras e vulcões ativos, ou de geleiras e terremotos, Hoyos-Patiño (1998) cita a ocorrência de inundações, *lahars*<sup>1</sup> e avalanchas de detritos. Na área de estudo esse autor cita dois eventos críticos: a erupção ocorrida no Nevado del Ruiz, em 1985, que soterrou a cidade de Armero e estima-se que provocou a morte de 23.000 pessoas e; a avalanche causada por um terremoto no Nevado del Huila, em 1994, que causou pelo menos 1.500 mortes, destruiu centenas de habitações, dezenas de pontes e quilômetros de estradas localizadas na bacia do rio Paez.

Devido à importância das geleiras em questão e, considerando a escassez de estudos sistemáticos sobre os glaciares dos trópicos internos, bem como, a relação direta dessas áreas com o clima, é fundamental conhecer as tendências sobre a evolução local e regional dessas geleiras. No entanto, em áreas montanhosas remotas a cobertura espacial e temporal de dados é, normalmente, muito escassa (SALZMANN et al., 2013). Assim, a cobertura global, obtida por distintos satélites e o longo período de dados disponíveis, representa uma alternativa para o desenvolvimento de metodologias capazes de mensurar o balanço de massa, a linha de equilíbrio, a variação de área, entre outros parâmetros, de geleiras localizadas nas diferentes regiões do planeta, mesmo aquelas localizadas em áreas remotas (WILLIAMS JR, HALL e BENSON, 1991).

## 1.2 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo principal quantificar as variações de área nas geleiras da Colômbia e Venezuela, entre os anos 1985 e 2015.

Com relação aos objetivos específicos, pretende-se:

- Determinar variações de área da geleira utilizando série temporal de imagens de satélite;

---

<sup>1</sup> Deslizamento de terra ou corrida de lama extremamente veloz e catastrófica, canalizada em vales, envolvendo material piroclástico, fragmentos de rochas, árvores, pontes e construções. Iniciada muitas vezes como uma avalanche de blocos devido ao derretimento de camadas e da capa de gelo e neve de geleira nas bordas elevadas de área vulcânica ao haver aquecimento da região da chaminé vulcânica por magma ascendente prestes a ser extrudido (CPRM, 2016).

- Obter dados de elevação, extensão e aspecto das geleiras, utilizando Modelo Digital de Elevação (MDE);

- Caso haja variação de área, avaliar o sentido das mudanças e a variação na altitude da frente da geleira.

### 1.3 ÁREA DE ESTUDO

O extremo norte da cordilheira dos Andes é dividido em três ramos montanhosos no sul da Colômbia: Cordilheira Ocidental, Cordilheira Central e Cordilheira Oriental, a qual segue no território venezuelano. Dois grandes rios, o Rio Cauca e o Rio Magdalena, separam as três Cordilheiras, as quais estão cercadas por extensas planícies costeiras no norte, grandes planícies no leste, e uma paisagem complexa de planícies aluviais e vales, planícies de maré e a Serrania de Baudo no oeste. Campos de gelo e geleiras estão restritos aos picos mais altos da Cordilheira Central, Cordilheira Oriental e Sierra Nevada de Santa Marta (HOYOS-PATÍÑO, 1998). A área de estudo compreende essas geleiras que se dividem em seis áreas na Colômbia (Sierra Nevada de Santa Marta, Sierra Nevada del Cocuy, vulcão Nevado del Ruiz, vulcão Nevado Santa Isabel, vulcão Nevado del Tolima, vulcão Nevado del Huila) e uma na Venezuela (Sierra Nevada de Mérida) (Figura 1). Todos os vulcões nevados da área de estudo são estruturas vulcânicas classificadas como ativas (IDEAM, 2000).

A Sierra Nevada de Santa Marta é um enorme maciço em forma de tetraedro, isolado da Cordilheira Central e localizado próximo à costa do Caribe (HOYOS-PATÍÑO, 1998). As elevações máximas observadas nessa área são de 5.777 m nos picos Simon Bolivar e Cristobal Colon (HOYOS-PATÍÑO, 1998).

A Sierra Nevada del Cocuy está localizada no nordeste colombiano, na porção norte da Cordilheira Oriental, sendo que a maior elevação é o pico Ritacuba Blanco, que está a 5.330 m de altura (HERRERA, 2009).

O Parque Natural de Los Nevados está localizado na Cordilheira Central, entre os vales dos rios Magdalena e Cauca. Nesse Parque estão localizadas três geleiras – de norte para sul: Nevado del Ruiz, Nevado Santa Isabel e Nevado del Tolima.

O Nevado del Huila é o vulcão mais meridional e alto da cordilheira Central, chegando a 5.655m de altitude (IDEAM, 2000).

Os Andes Venezuelanos formam uma cadeia de montanha alongada, com aproximadamente 450 km através do noroeste da Venezuela, com uma direção aproximada de

sudoeste-nordeste. A parte central e mais alta é chamada de Sierra Nevada de Mérida e é composta por três áreas distintas de cúpulas ou maciços: o Pico Bolívar, o Pico La Concha e o Pico Humboldt/Bompland (WEINGARTEN et al., 1990).

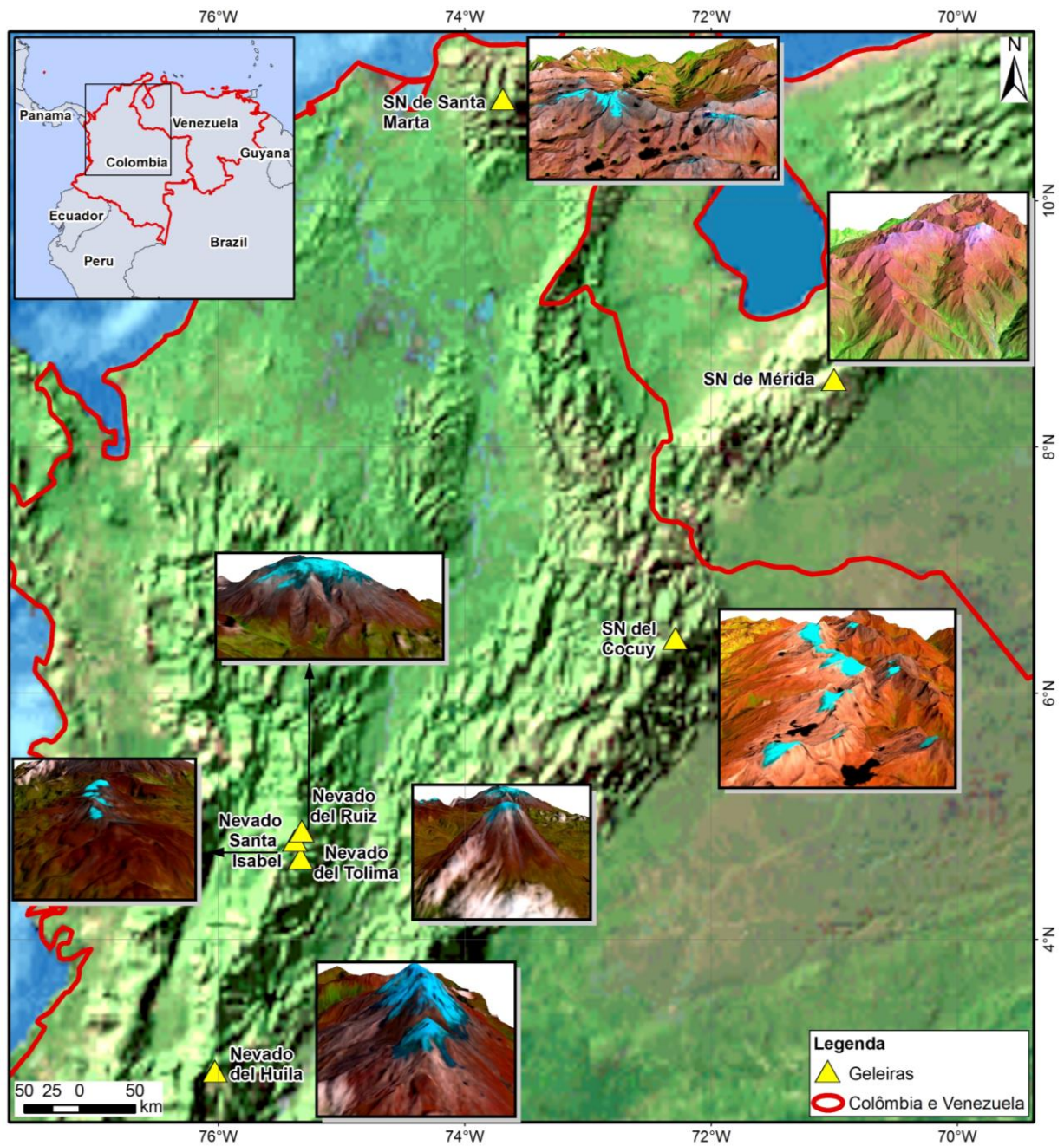


Figura 1: Localização da área de estudo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 GELEIRAS (ORIGEM E DINÂMICA)

Uma geleira consiste em um corpo de gelo ou neve que é observada no fim da estação de ablação ou, no caso das geleiras tropicais, após o derretimento da neve transitória (RAUP e KHALSA, 2010).

As altas latitudes e altas altitudes favorecem a glaciação principalmente devido às baixas taxas de ablação. Em áreas montanhosas as geleiras são, com frequência, resultado da alta acumulação, frequentemente induzida pela orografia, e da baixa taxa de ablação, a qual diminui com a altitude (LEPPÄRANTA & GRANBERG, 2010).

O gelo de uma geleira se forma pela recristalização da neve durante processos de metamorfismo e, em sítios mais amenos, pelo derretimento e recongelamento da neve sobreposta ao gelo, congelamento da chuva, condensação e congelamento do ar saturado na forma de geada (HAMBREY, 1994).

Durante a conversão da neve em gelo, a densidade do material aumenta progressivamente, isso ocorre pela compactação devido ao peso das camadas sobrepostas (HAMBREY, 1994) que faz com que ocorra a redução do volume de ar entre os poros (BENN e EVANS, 2003). O resultado é um depósito laminado, que vai da neve superficial até o gelo, o qual com o aumento da profundidade se torna bastante transparente. A razão para o aumento da transparência é a redução da quantidade de ar por unidade de volume (LEPPÄRANTA & GRANBERG, 2010). Além de gelo e ar, as geleiras contêm pequenas quantidades de outras substâncias, que foram trazidas pela precipitação, pela erosão do substrato devido ao fluxo da geleira, assim como, materiais terrestres trazidos pelo vento. Essas partículas são enterradas na zona de acumulação e depois trazidas à superfície na zona de ablação pelo fluxo de gelo. Algumas dessas partículas possuem efeitos secundários, por exemplo, a poeira de erupções vulcânicas pode aumentar a absorção da energia solar nas camadas superficiais, aumentando o gradiente de temperatura e provocando o aumento das crostas de evaporação ou a fusão (LEPPÄRANTA & GRANBERG, 2010).

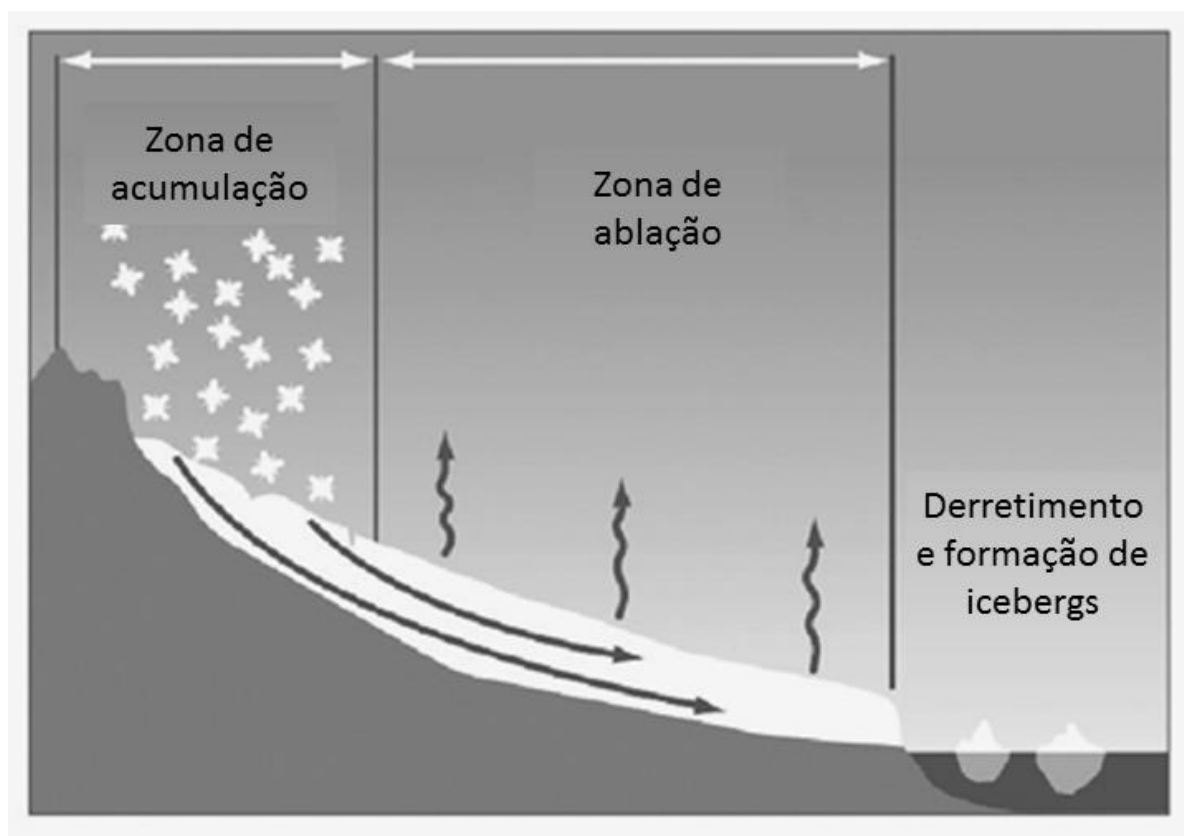
As geleiras são sistemas com entradas e saídas de massa, sendo que a relação entre ganho e perda de gelo é referida como balanço de massa (BELL, 2013). Quando considerados



os aspectos relacionados ao balanço de massa, uma geleira pode ser dividida em duas zonas: zona de acumulação e zona de ablação (Figura 2).

- a zona de acumulação ocorre tipicamente nas áreas mais elevadas, acima da linha de equilíbrio, onde a queda de neve é abundante o suficiente para durar até o próximo verão (BELL, 2013). Ano após ano, sucessivas camadas de neve são depositadas, sendo que as camadas mais profundas vão sendo compactadas devido ao peso das camadas sobrepostas.

- a zona de ablação se refere à área localizada abaixo da linha de equilíbrio, onde há perda líquida de gelo. Ablação corresponde aos processos pelos quais neve e gelo são perdidos pela geleira, destacando-se os processos de derretimento e desprendimento (BELL, 2013).



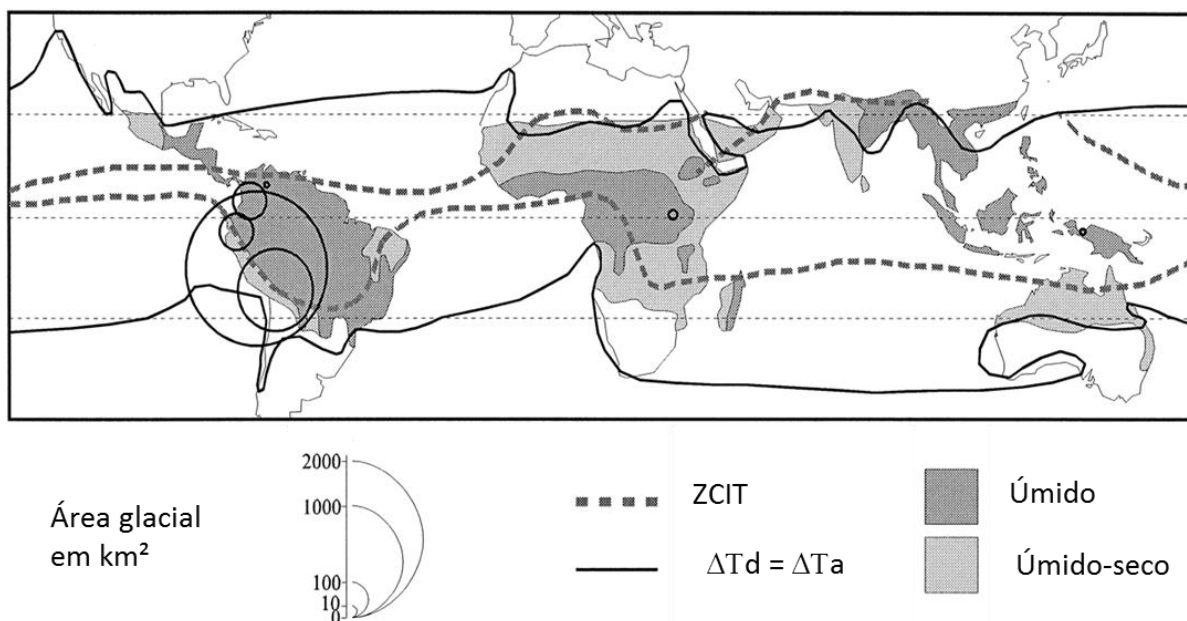
**Figura 2: Áreas de acumulação e ablação de uma geleira.**  
Adaptado de USGS (2009).

As zonas de acumulação e de ablação são separadas pela linha de equilíbrio (LE), onde a acumulação e a ablação anual são iguais (BENN e EVANS, 2003). A linha de equilíbrio é um parâmetro que marca a elevação da geleira onde a acumulação de neve é exatamente equilibrada com a ablação, ou seja, onde o balanço de massa é igual a zero. A

sensibilidade da LE a mudanças na temperatura e precipitação está fortemente ligada ao processo de ablação dominante, o qual, por sua vez, é determinado pelo padrão de acumulação (SAGREDO, RUPPER & LOWEL, 2014).

### 2.1.1 Geleiras Tropicais

Kaser (1999) apresenta algumas delimitações para definir os trópicos do ponto de vista glaciológico: (1) estar entre os trópicos astronômicos, (2) apresentar variação da temperatura diária maior que a variação da temperatura anual e (3) estar localizada na área onde ocorre a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Figura 3).



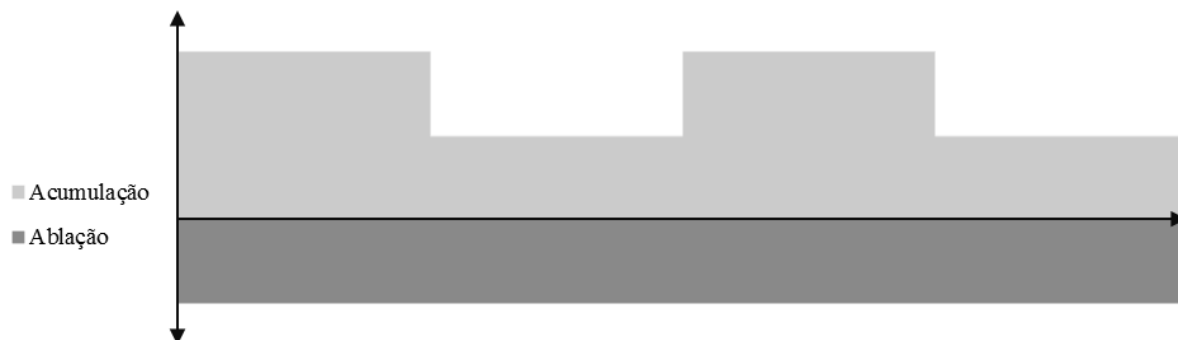
**Figura 3: Delimitação dos trópicos do ponto de vista glaciológico e distribuição das áreas glaciais.** Adaptado de Kaser (1999). ZCIT: Zona de Convergência Intertropical,  $\Delta T_d$ : variação de temperatura diária,  $\Delta T_a$ : variação de temperatura anual.

Segundo Kaser e Osmaston (2002), para aquelas geleiras que estão dentro dos trópicos astronômicos, mas fora da ZCIT e, portanto, em clima extremamente árido dos subtrópicos, deverão ser feitas diferentes considerações sobre a energia e o balanço de massa. Esse é o caso das geleiras do norte do Chile e do sul da Bolívia. Ainda segundo esses autores, há duas outras situações em que geleiras atendem parcialmente às restrições que definem uma geleira como tropical: os vulcões mexicanos que, mesmo estando entre os trópicos astronômicos e em locais onde há uma estação úmida e outra seca, estão fora da ZCIT; e, geleiras do Himalaia que, mesmo estando em locais onde a ZCIT se estenda durante a estação de monções no Sul da Ásia, estão fora da classificação termal e astronômica dos trópicos.

Assim, as geleiras tropicais, ou seja, aquelas que atendem a todos os critérios listados acima, ocorrem no sudeste da Ásia, na África e na América do Sul e estão associadas a altas altitudes. A maior parte desse tipo de geleira está localizada na América do Sul (99,7%), sendo que desse total, 71% estão no Peru, 20% na Bolívia, 4% no Equador e 4% na Colômbia e na Venezuela (KASER, 1999).

Dentro dos limites que definem uma geleira como tropical, destacam-se dois regimes de precipitação: os trópicos internos (*inner tropics*) e os trópicos externos (*outer tropics*).

Nos trópicos internos há precipitação durante todo o ano, com um pequeno aumento de intensidade duas vezes ao ano durante a passagem da ZCIT, sendo que nessas regiões as condições de umidade e temperatura estáveis conduzem a uma situação na qual a acumulação e a ablação ocorrem simultaneamente ao longo do ano - Figura 4 (KASER e OSMASTON, 2002; KASER, 1999). Nessas áreas, a ablação na LE é dominada por processos de fusão e a altitude da linha de equilíbrio é mais sensível a mudanças de temperatura (SAGREDO, RUPPER & LOWEL, 2014). É nesse regime que estão inseridas as geleiras da área de estudo.



**Figura 4: Regime glacial dos trópicos internos.**  
Adaptado de Kaser e Osmaston, 2002.

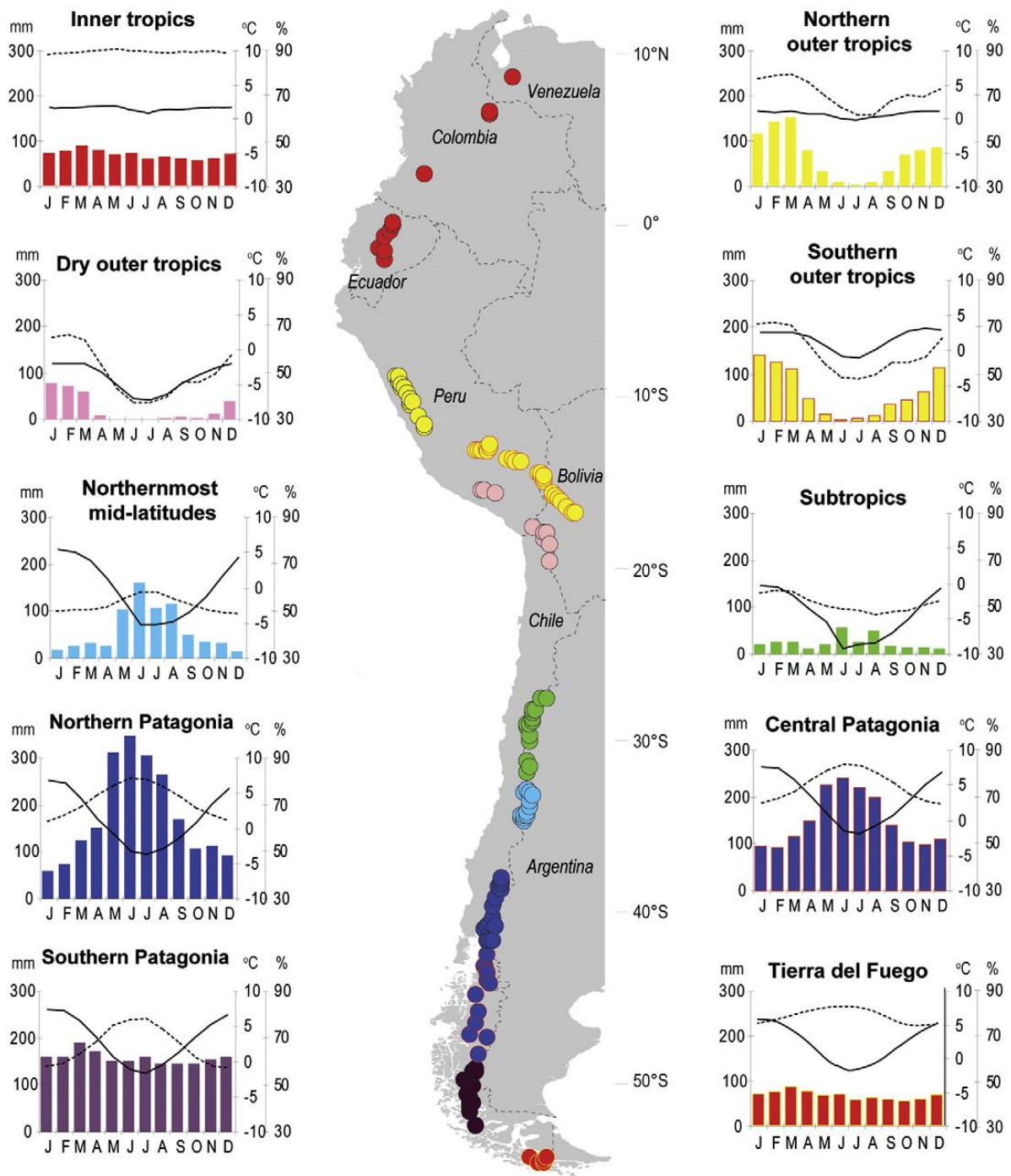
Os trópicos externos são caracterizados por uma estação seca e outra chuvosa, onde ocorre acumulação apenas durante a estação úmida e, durante a estação seca há pouca ou nenhuma acumulação, sendo que a ablação também é reduzida - Figura 5 (KASER e OSMASTON, 2002; KASER, 1999). Nesses locais, onde a ablação é dominada por processos de sublimação, a altitude da linha de equilíbrio é mais sensível a mudanças na precipitação (SAGREDO, RUPPER & LOWEL, 2014).



**Figura 5: Regime glacial dos trópicos externos.**  
Adaptado de Kaser e Osmaston, 2002.

Entretanto, Sagredo e Lowell (2012) refinaram a classificação das regiões andinas com geleiras em sete grupos climáticos: 1) *inner tropics and Tierra del Fuego*, 2) *wetter outer tropics*, 3) *drier outer tropics*, 4) *subtropics*, 5) *central Chile-Argentina (semi-arid)*, 6) *northern and central Patagonia*, e 7) *southern Patagonia* (Figura 6).

Na divisão em sete grupos, a área de estudo possui a mesma classificação que na divisão em dois grupos: trópicos internos (*inner tropics*), sendo esse o primeiro grupo criado por Sagredo e Lowell (2012). De acordo com esses autores, nessa região a temperatura varia pouco durante o ano e a variação da elevação da isoterma de 0°C também é pequena. Ainda que essas geleiras recebam precipitação ao longo de todo o ano, o padrão de acumulação apresenta alguma sazonalidade. Durante os meses de primavera e outono, quando a zona de convergência intertropical cruza a área em seu ciclo de migração anual, essas geleiras recebem precipitação extra, o que é responsável por duas temporadas ligeiramente “mais úmidas” (SAGREDO e LOWELL, 2012).



**Figura 6: Distribuição e condições climáticas médias para os grupos de geleiras andinas.**  
 Fonte: Sagredo e Lowell (2012).

A precipitação sólida (neve e gelo) é a entrada primária de massa para as geleiras tropicais, sendo que o desenvolvimento de uma geleira depende da sobrevivência da neve e do gelo de um ano para o outro e isso é diretamente dependente dos fatores climáticos e topográficos (BENN e EVANS, 2003).

Climaticamente, em regiões tropicais onde há pequenas variações de temperatura, o fator mais importante é a umidade do ar e a duração das estações. Na questão topográfica, o fator que mais influencia na sobrevivência da geleira de montanha é a declividade, pois a acumulação de neve em ou acima de encostas muito íngremes está sujeita à ocorrência de avalanches que levam o gelo para altitudes menores onde a taxa de ablação é mais elevada. Assim, as geleiras crescem onde condições climáticas e topográficas permitem que a acumulação seja maior que a perda, e a geleira recua onde as saídas são maiores que as entradas (BENN e EVANS, 2003)

A fusão é o principal mecanismo de perda de massa das geleiras não polares, mas também pode ser resultado de processos de sublimação, comum em geleiras tropicais, principalmente nos trópicos externos (KASER e OSMASTON, 2002). Além disso, pode ocorrer perda de matéria pelo vento que sopra neve para além da superfície glacial, ou partes da geleira podem se desintegrar através de desprendimentos e avalanches (PELLIKA e REES, 2010).

### **2.1.2 Evolução da cobertura de gelo na área de estudo**

Nesse item são apresentadas as variações ocorridas na área de estudo, de acordo com autores consultados durante a elaboração da dissertação.

#### **a) Santa Marta**

O IDEAM (2000) traz um resumo da evolução da dinâmica glacial na Sierra Nevada de Santa Marta. Durante a Pequena Idade do Gelo - PIG (séc. XVI-XIX) o gelo nessa serra chegou a cobrir 82,6 km<sup>2</sup>, sendo que essa geleira estava distribuída em três massas de gelo, alongadas no sentido Leste-Oeste, respondendo principalmente às condições topográficas. Entre o fim da PIG e 1954 (período de um século), essa geleira perdeu 76% da área e as três massas glaciais localizadas na Sierra de Santa Marta em 1850 se dividiram em 50 geleiras de diferentes tamanhos. Destaca-se que essa divisão em massas menores é um dos fatores que acelerou o degelo pela exposição de uma área maior aos agentes atmosféricos. E entre 1954 e 1995, devido à redução no tamanho das massas e a falta de alimentação dessas geleiras, desapareceram 17 massas de gelo com áreas entre 3 e 10 ha e a área total da geleira chegou, em 1995, a 11,1 km<sup>2</sup>.

b) Sierra Nevada del Cocuy

De acordo com IDEAM (2000), a Sierra Nevada del Cocuy é a geleira mais extensa da Colômbia. Através de registros de morainas, estima-se que a área dessa geleira em 1850 era de 148,7 km<sup>2</sup>, sendo que 80% da área da geleira estava localizada na vertente oeste, devido às condições topográficas. Segundo Ceballos et al. (2006) em 1955 a área de gelo em Cocuy era de 38,9 km<sup>2</sup>, chegando a 31,4 km<sup>2</sup> em 1986.

c) Nevado del Ruiz

O Nevado del Ruiz possuía área de 47,5 km<sup>2</sup> em 1850, passando para 21 km<sup>2</sup> em 1959. Além da retração que já vinha sofrendo, esse vulcão foi adicionalmente afetado pela erupção de 1985 (CEBALLOS et al., 2006).

d) Nevado Santa Isabel

Durante a PIG o Santa Isabel chegou a ocupar 27,8 km<sup>2</sup> (IDEAM, 2000), passando para apenas 9,4 km<sup>2</sup> em 1959 (CEBALLOS et al., 2006).

e) Nevado del Tolima

Segundo Ceballos et al. (2006), a geleira localizada nesse vulcão ocupava uma área de 8,6 km<sup>2</sup> em 1850 e apenas 2,7 km<sup>2</sup> em 1958.

f) Huila

Durante a PIG, o Nevado del Huila cobria uma área de 33,7 km<sup>2</sup>, em 1959 passou para 17,5 km<sup>2</sup>, chegando a 15,4 km<sup>2</sup> em 1981 (CEBALLOS et al., 2006). De acordo com IDEAM (2000), apesar da taxa de retração do Nevado del Huila ser menor que nas outras geleiras da Colômbia, é possível observar que há retrocesso do gelo no cume, fazendo com que a rocha aflore em partes do topo.

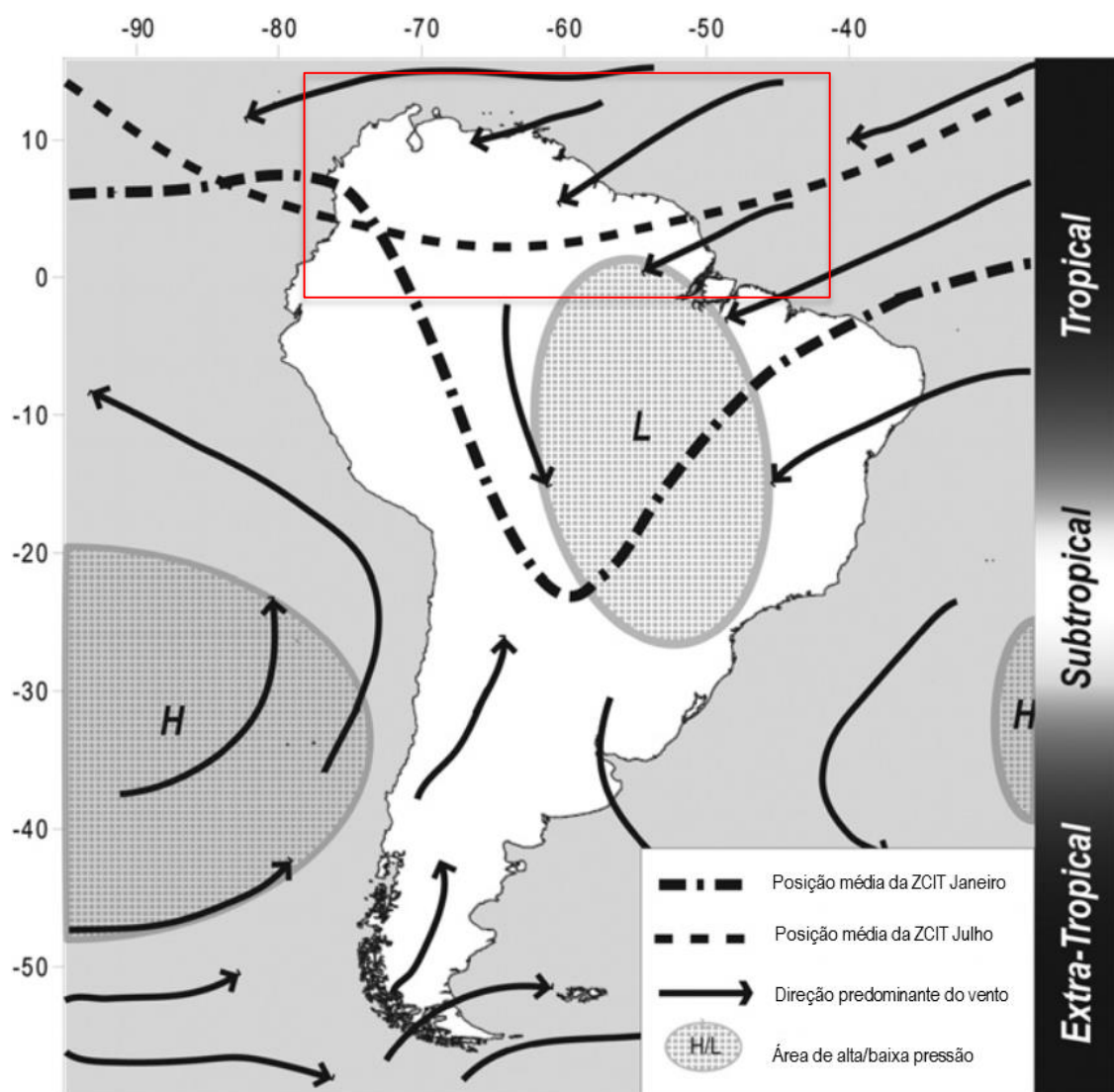
g) Sierra Nevada de Mérida

O último avanço do gelo nessa área teve um máximo em torno de 20.000 anos antes do presente e terminou por volta de 13.000 anos antes do presente, sendo chamado de Glaciação de Mérida. Nesse período a área coberta por gelo na Venezuela era de aproximadamente 600 km<sup>2</sup>, sendo que aproximadamente 200 km<sup>2</sup> estavam localizados na SN de Mérida. Após essa glaciação, o degelo na região tem sido elevado (SCHUBERT, 1998). De acordo com Braun e Bezada (2013), em 1952 a área de geleira remanescente na Sierra Nevada de Mérida correspondia a pouco mais de 3 km<sup>2</sup>, chegando a 0,1 km<sup>2</sup> em 2011.

## 2.2 ORIGEM DAS PRECIPITAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO

O norte dos Andes é uma região topograficamente complexa, cujo clima sofre uma gama de influências. Apesar disso, o maior controle sobre o ciclo anual de precipitações na região é a migração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e o padrão de ventos associados (POVEDA, WAYLEN e PULWARTY, 2006).

O ciclo anual hidroclimático é dominado pela migração meridional da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) a qual, por sua vez, controla as várias dinâmicas dos ventos alísios sobre oceanos e massas de terra. Diversos padrões de circulação local e regional interagem com a ZCIT e sua migração para modificar o ciclo anual de precipitação (POVEDA, WAYLEN & PULWARTY, 2006).



**Figura 7: Domínios climáticos, padrões de ventos principais e localização atual da ZCIT sobre a América do Sul.**

Adaptado de Sagredo e Lowell (2012).



Schubert (1975) analisou o clima da Venezuela e, segundo esse autor, durante os meses de inverno (hemisfério norte: novembro a abril) a maior parte do país está sob a influência dos ventos alísios de nordeste os quais, sobre a terra, mudam para um sentido mais leste sobre os *Llanos* (leste dos Andes) e uma direção mais norte na bacia do Maracaibo (noroeste dos Andes). Ao atingir os Andes estes ventos ascendem e a escassa umidade que se manteve após a passagem pelo mar do Caribe é precipitada nos montes e flancos da cadeia montanhosa e pouca umidade alcança os vales internos dos Andes (como o vale do rio Chama). Durante os meses de verão (maio a outubro) a maior parte da Venezuela fica sob a influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e recebe chuva abundante.

Assim como a Venezuela, o norte da Colômbia também é caracterizado por um ciclo anual bimodal de precipitação, com duas estações chuvosas distintas (abril-maio e outubro-novembro) e duas estações menos chuvosas (dezembro-fevereiro e junho-agosto), as quais são resultantes da dupla passagem da ZCIT sobre a região com (POVEDA et al, 2005).

### **2.2.1 Caracterização das precipitações na área de estudo**

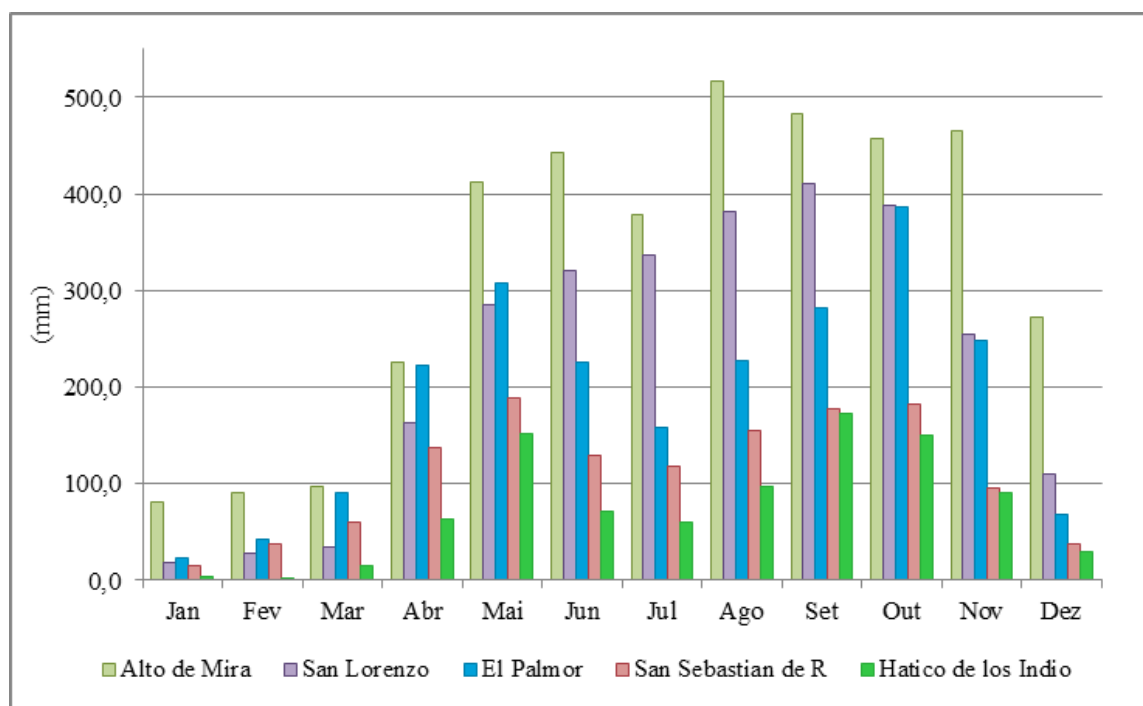
Visando apresentar um panorama das precipitações em diferentes faces de cada geleira, foi utilizado, na Colômbia, o arquivo vetorial do Catalogo Nacional de Estaciones – disponibilizado na página do *Sistema de Información Ambiental de Colombia - SIAC* (2016). Após a delimitação de cada geleira, foram selecionadas estações próximas e que pudessem caracterizar as precipitações do entorno de cada geleira. Não foi encontrado dado vetorial com a localização de estações meteorológicas na Venezuela, nem normais de precipitação para longos períodos; por isso, foram utilizados dados de publicações nas quais foram analisados dados de precipitação no entorno da Sierra Nevada de Mérida.

#### **a) Sierra Nevada de Santa Marta**

Ao analisar os dados de precipitação das estações meteorológicas mais próximas, observa-se que os maiores volumes de precipitação média anual ocorrem ao norte da geleira, como pode ser observado na Figura 8, na qual estão representadas as médias mensais de precipitação disponibilizadas pelo SIAC (2016) e que correspondem aos valores médios de precipitação registrados entre 1981-2010. Os maiores valores de precipitação são registrados na estação Alto de Mira (15015110), instalada a uma altitude 1.080 m, localizada ao norte da serra, na qual o valor médio anual é 3.923,8 mm. Na estação San Lorenzo, localizada a noroeste da Serra, a uma altitude de 2.200 m, a média de precipitação anual é de 2.730,1 mm.

Na estação El Palmor (29060340), localizada a oeste da serra, a uma altitude de 1.200 m, a precipitação média anual é de 2.280,5 mm. Na estação San Sebastian de R (29060090) - altitude 2.000 m, que está ao sul da geleira, a precipitação anual média é de 1.336 mm. As menores precipitações registradas no entorno ocorrem na estação Hatico de los Indios (28010200), localizada a leste da geleira, a uma altitude de 594 m, onde a média anual é de 907,7 mm.

Ao considerar a variação mensal de precipitação, observa-se que as menores médias ocorrem entre os meses de dezembro e março nas estações El Palmor, San Lorenzo, San Sebastian de R e Hatico de los Indios. Na estação Alto de Mira, os menores valores estão concentrados nos meses de janeiro a março. Considerando que nos meses com menores valores de precipitação, é provável que haja menor cobertura de nuvens e de neve, os meses entre dezembro a março correspondem ao melhor período para delimitar a área dessa geleira.



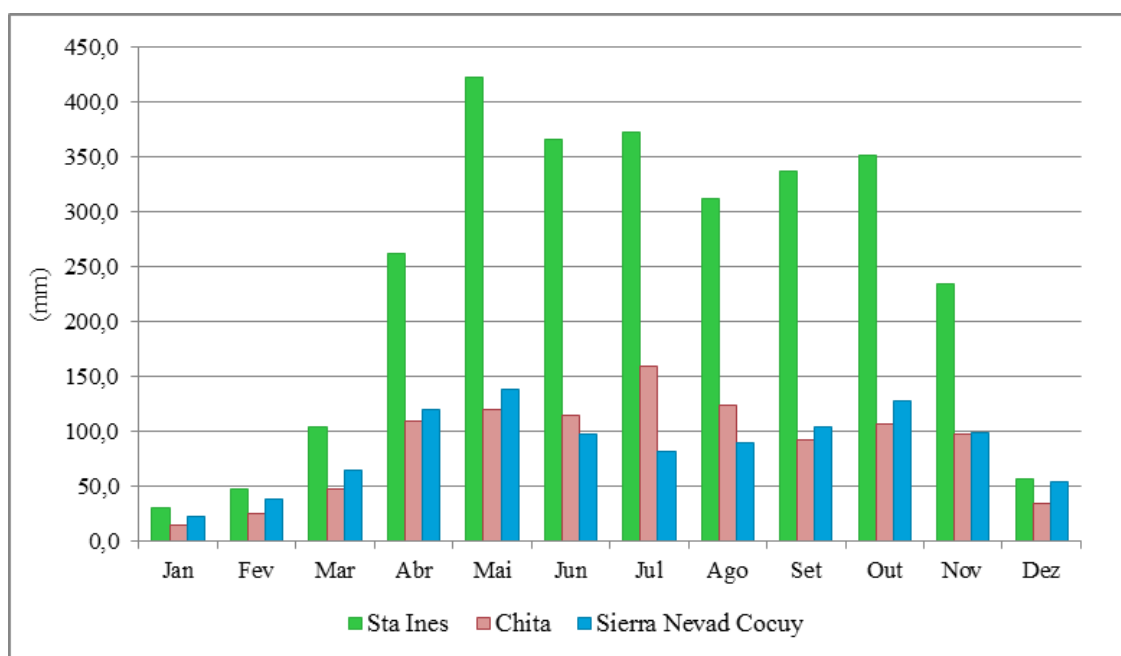
**Figura 8: Precipitação média mensal (mm) nas estações próximas à Sierra Nevada de Santa Marta.**  
 Fonte: Elaborado a partir de SIAC (2016) – média entre 1981-2010.

#### b) Sierra Nevada del Cocuy

De acordo com Van Der Hammen (1980), o lado leste da cordilheira no trecho próximo à geleira El Cocuy é bastante úmido, com alta umidade atmosférica e precipitação anual, sendo que há apenas uma estação mais seca, que ocorre entre os meses de dezembro e

fevereiro. A face oeste é bem mais seca que a leste, sendo que a vegetação nas partes mais baixas possui características xerofíticas.

Essa diferença entre as precipitações nas duas faces é evidenciada pelos dados de precipitação média anual disponíveis no Sistema de Informação Ambiental da Colômbia (2016) e representados na Figura 9. A média anual na estação Santa Ines (36020030), altitude de 860 m, localizada a leste da geleira, chega a 2.900 mm. Nas estações localizadas ao sul e a oeste da geleira, a precipitação média anual é semelhante, sendo que na estação Sierra Nevada del Cocuy (24035240), a oeste da geleira, a uma altitude de 3.716 m, é de 1.042 mm, enquanto na estação Chita (24035250) que está ao sul, a 2.888m de altitude, a média anual é de 1.049 mm.



**Figura 9: Precipitação média mensal (mm) nas estações próximas à Sierra Nevada del Cocuy.**  
 Fonte: Elaborado a partir de SIAC (2016) – média entre 1981-2010.

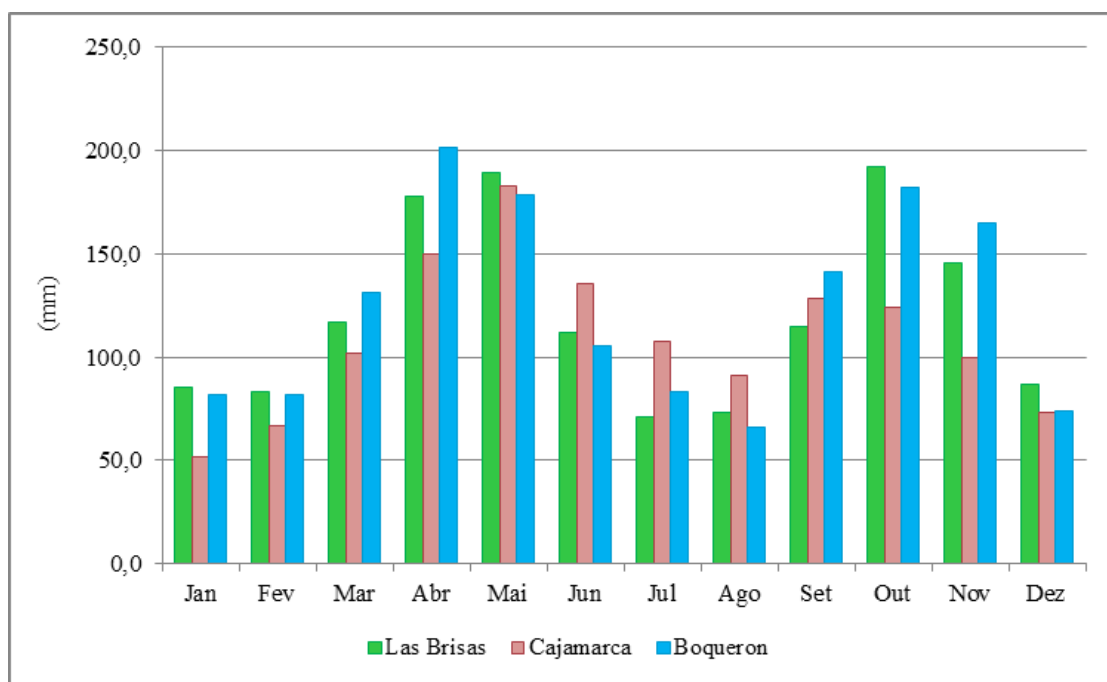
### c) Parque Natural de los Nevados

Devido à proximidade das geleiras Nevado del Ruiz, Nevado Santa Isabel e Nevado del Tolima, as quais estão localizadas no Parque Natural de los Nevados, foram consideradas as mesmas estações pluviométricas para as três geleiras.

A estação Cajamarca (21215100), instalada a uma altitude de 1.920m, ao sul dos vulcões nevados considerados nesse estudo, possui média anual de precipitação de 1.341 mm. Na estação Las Brisas (26155150), localizada a uma altitude de 4.150 m, que fica no flanco

oeste da geleira, a média anual de precipitação é de 1.448 mm. E, na face leste, na estação Boqueron (21250170), altitude de 3.740 m, o valor anual médio de precipitação é de 1.492 mm (SIAC, 2016).

Nas três estações ocorrem precipitações em todos os meses, inclusive variando o lado mais chuvoso em alguns meses (Figura 10). Contudo, em todas as estações há uma redução nos períodos de julho a agosto e de dezembro a fevereiro.

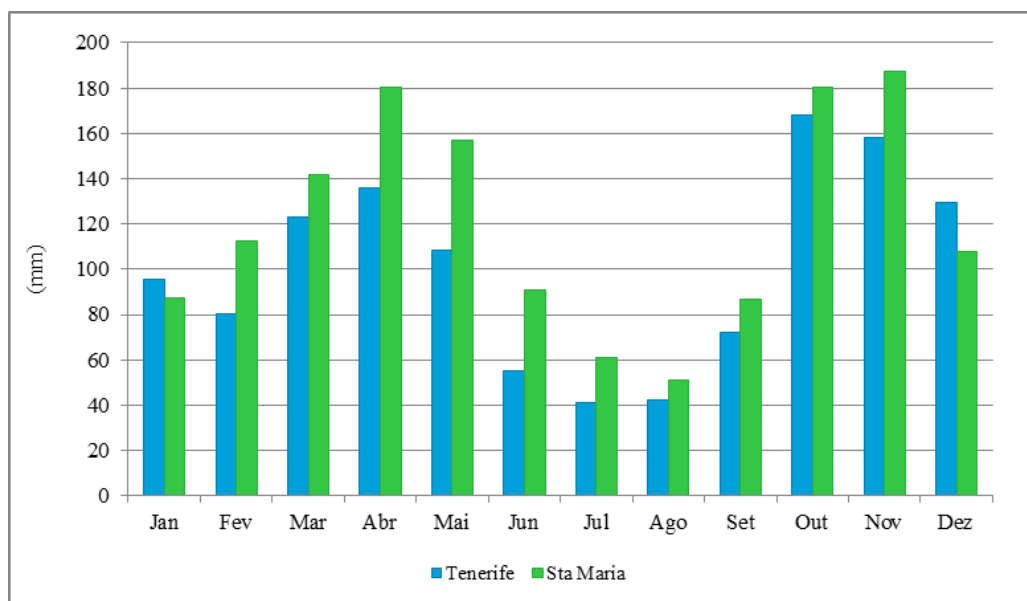


**Figura 10: Precipitação média mensal (mm) nas estações localizadas próximo ao Parque Natural de Los Nevados.**

Fonte: Elaborado a partir de SIAC (2016) – média entre 1981-2010.

#### d) Nevado del Huila

Ao analisar a precipitação média anual nas faces leste e oeste desse vulcão, constata-se que não há grandes diferenças entre os lados: na estação Toríbio Alertas, localizada a noroeste, altitude de 2.609 m, a média anual é de 1.210 mm/ano; na estação Sta Maria, que está a leste da geleira, a uma altitude de 1.300 m, a média anual é de 1.444 mm (SIAC, 2016). Ao observar a variação mensal, constata-se que o lado oeste é mais chuvoso entre outubro e abril, enquanto o lado leste possui maiores volumes de chuva entre maio e setembro (Figura 11).



**Figura 11: Precipitação média mensal (mm) nas estações próximas ao Nevado del Huila.**

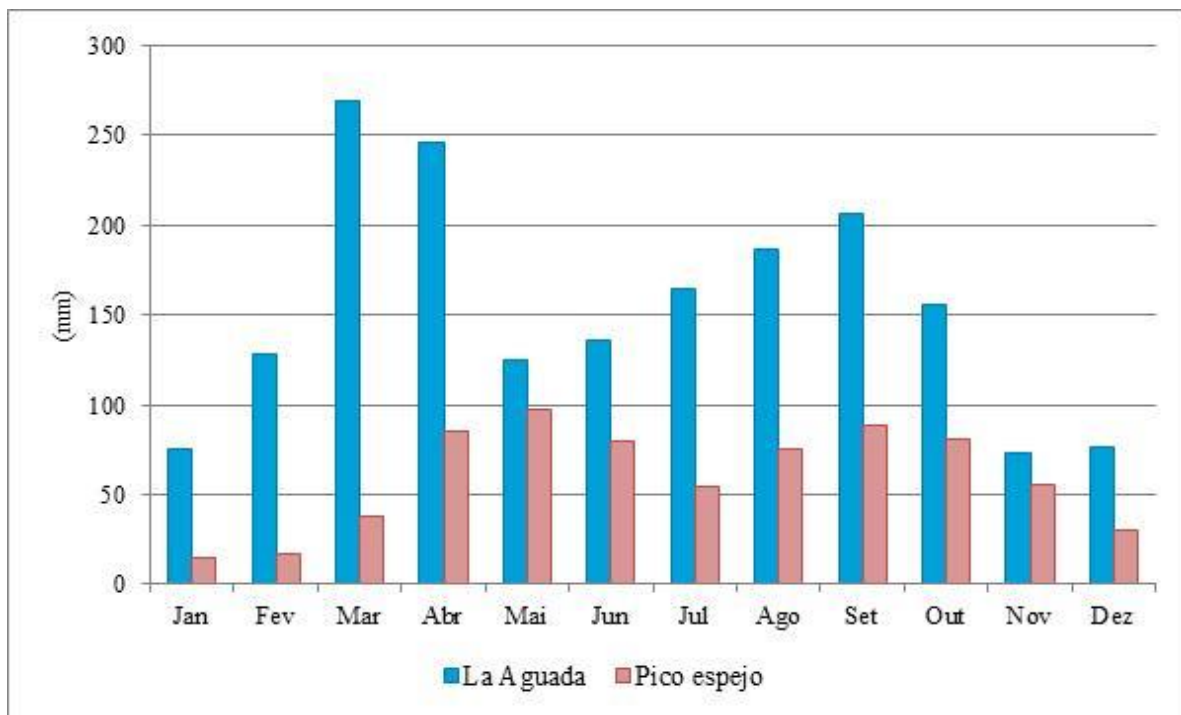
Fonte: Elaborado a partir de SIAC (2016) – média entre 1981-2010.

#### e) Sierra Nevada de Mérida

De acordo com Braun e Bezada (2013), a precipitação anual média nas maiores elevações da Sierra Nevada de Mérida é estimada entre 1.000 e 1.200 mm. De acordo com Pulwarty et al. (1998), há uma área seca a sudoeste de Mérida, no vale do rio Chama, onde os totais anuais estão por volta de 500 mm.

Não foram encontradas séries de dados longas nas estações pluviométricas localizadas próximo à Sierra Nevada de Mérida, disponibilizadas por órgãos oficiais. Pulwarty et al. (1998) compilaram dados de estações próximas a essa serra, sendo que dados de duas dessas estações estão representados na Figura 12. A estação La Aguada está localizada a oeste da geleira, a uma altitude de 3.452 m; segundo o estudo de Pulwarty et al. (1998), entre os anos de 1981-1991, a precipitação média anual nessa estação foi de 1.841 mm. Na estação Pico Espejo, localizada a sudoeste da geleira, a uma altitude de 4.765 m, a precipitação média anual no período 1983-1991 foi de 707 mm.

Além da falta de séries mais longas para a caracterização das precipitações nas proximidades da Sierra Nevada de Mérida, não foram encontrados dados de estações localizadas no flanco leste da cordilheira, não sendo possível identificar se há um lado mais chuvoso que outro nessa serra.



**Figura 12: Precipitação média mensal (mm) em estações próximas a Sierra Nevada de Mérida.**  
 Fonte: Adaptado de Pulwarty et al. (1998).

### 2.2.2 Variação de parâmetros climatológicos na área de estudo

De acordo com IDEAM (2012), os processos meteorológicos e micrometeorológicos que influenciam na fusão das geleiras são complexos e dependem, além da temperatura ambiente, de variáveis como a radiação solar, a precipitação, o vento, a nebulosidade e a umidade relativa. Nesse estudo, destaca-se também que, durante a temporada seca a temperatura mínima na madrugada é mais baixa que a temperatura média anual, o que favorece a diminuição da temperatura do gelo; em consequência disso, é necessário mais energia para a geleira alcance o ponto de fusão durante o dia, ou seja, a intensidade da fusão dependerá de quão baixa foi a temperatura mínima na madrugada.

Nesse item são apresentados dados referentes à comparação das médias dos dados climatológicos entre os períodos 1971-2000 e 1981-2010, os quais são disponibilizados pelo SIAC. Visando avaliar se houve variação entre esses dois períodos, foram comparados os dados de estações com dados disponíveis nas duas séries e próximas das geleiras. Como diversas estações utilizadas na caracterização das precipitações, feita no item anterior, foram instaladas após 1971 algumas não estavam disponíveis para a verificação de variação.

a) Sierra Nevada de Santa Marta

Nas proximidades da Sierra Nevada de Mérida há apenas uma estação com médias de dados disponíveis no período 1971-2000: estação San Lorenzo.

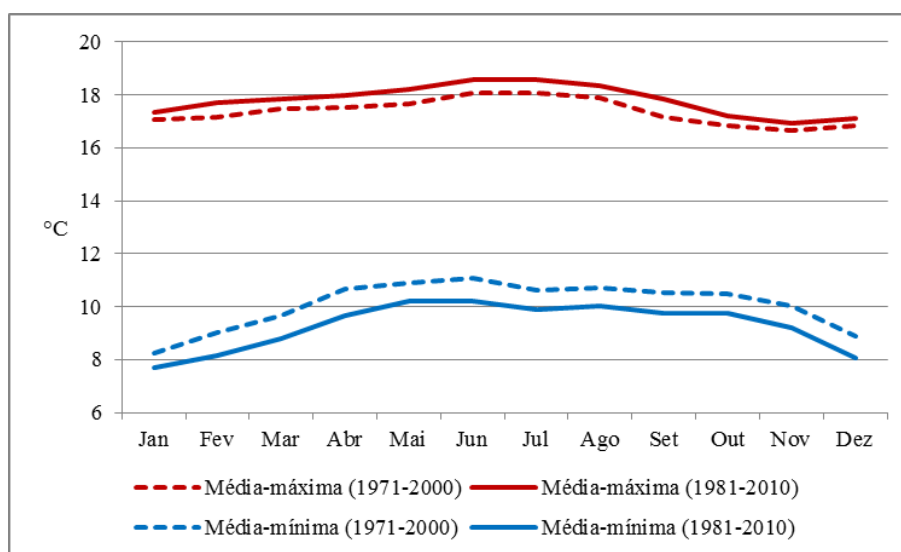
**Tabela 1: Precipitação média mensal (em mm) na estação San Lorenzo, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010.**

Período	Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
1971-2000	San Lorenzo	15	24	25	154	271	309	309	367	412	375	234	87	2.582
1981-2010	San Lorenzo	17	28	35	163	286	320	337	382	411	388	255	110	2.730

Fonte: SIAC (2016).

Nessa estação, que fica a noroeste da Sierra Nevada de Santa Marta, houve aumento de 148 mm na média anual quando comparadas as séries temporais de 1971-2000 e 1981-2010 (Tabela 1). Houve redução na média mensal de precipitação apenas no mês de setembro; enquanto que nos meses de julho, novembro e dezembro, foram observados os maiores aumentos médios mensais no período mais recente.

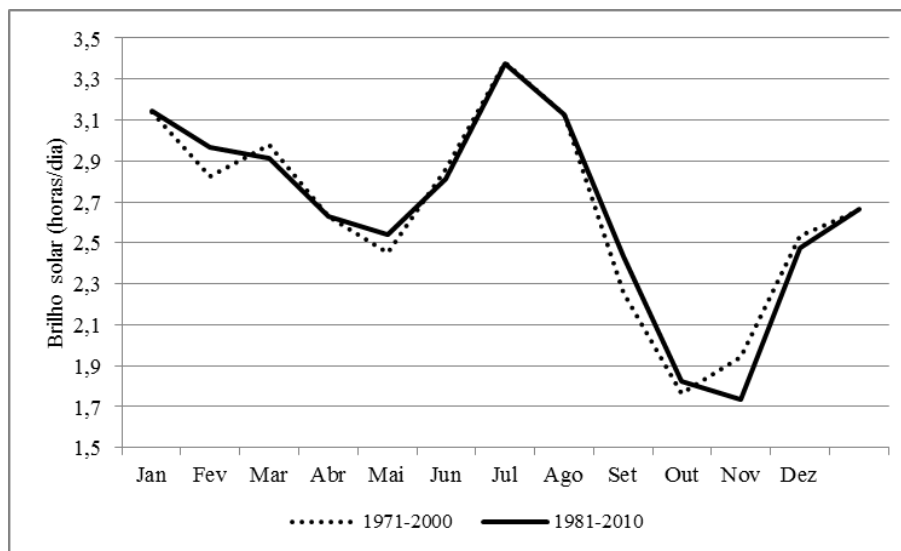
A temperatura média anual, na estação San Lorenzo, no período 1981-2010 foi 0,89°C superior à média anual do período 1971-2000. Nessa estação, as médias mínimas e as médias máximas apresentaram comportamentos opostos, como pode ser observado na Figura 13. No período mais recente (1981-2010) houve redução das médias mínimas em todos os meses, enquanto as médias máximas deste período foram superiores às médias máximas de 1971-2000.



**Figura 13: Comparativo entre a temperatura média mínima e a temperatura média máxima mensal, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação San Lorenzo.**

Fonte: SIAC (2016).

A média diária de horas de brilho solar nessa estação ficou estável entre os dois períodos analisados. Quando são comparadas as médias diárias em cada mês, observa-se que as maiores variações ocorreram em novembro: diminuição média de 0,21 h/dia entre 1981-2010 quando comparado a 1971-2000 e, aumento médio de 0,18 horas/dia em setembro no período mais recente (Figura 14).



**Figura 14: Comparativo entre o número médio de horas de brilho solar diário por mês, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação San Lorenzo.**

Fonte: SIAC (2016).

#### b) Sierra Nevada del Cocuy

Foram obtidos dados de duas estações meteorológicas localizadas próximo à Sierra Nevada del Cocuy e que possuíam dados nos dois períodos disponibilizados pelo SIAC: Sierra Nevada Cocuy (oeste da geleira) e Chita (sul da geleira).

Na Tabela 2 são apresentadas as precipitações médias mensais dessas estações nos dois intervalos de tempo considerados. No lado oeste da serra (estação Sierra Nevada Cocuy) a média de precipitação anual foi 58 mm menor no período de 1981-2010, em comparação com 1971-2000; por outro lado, na estação que está ao sul da geleira (Chita), a média anual de precipitação apresentou um incremento de 47 mm no período de 1981-2010.

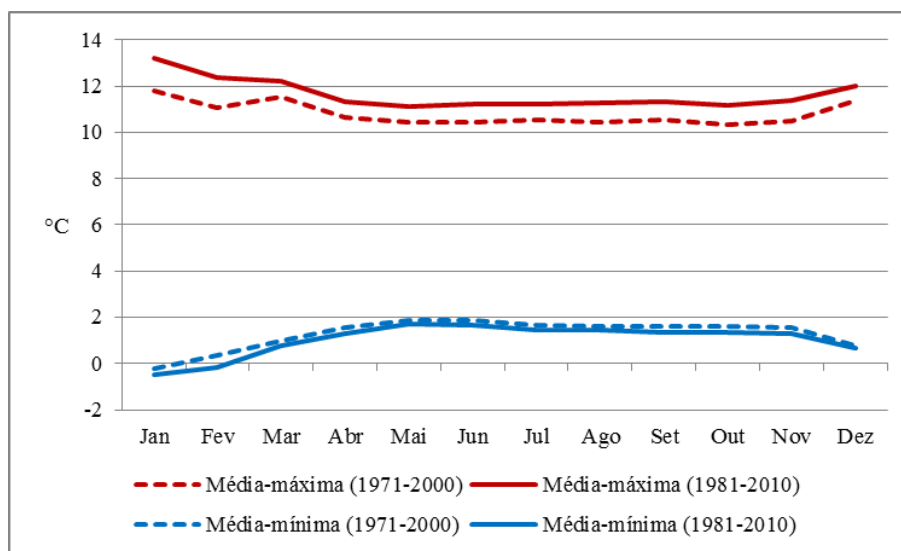
**Tabela 2: Precipitação média mensal (em mm) nas estações Sierra Nevada Cocuy e Chita, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010.**

Período	Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
1971-2000	Sierra Nevada Cocuy	19	43	68	143	142	107	89	93	109	135	97	55	1.100
1981-2010	Sierra Nevada Cocuy	23	38	65	121	138	98	82	90	104	128	100	54	1.042
1971-2000	Chita	12	27	51	110	105	108	150	114	93	105	94	34	1.002
1981-2010	Chita	15	25	48	109	120	115	160	124	93	107	98	35	1.049

Fonte: SIAC (2016).

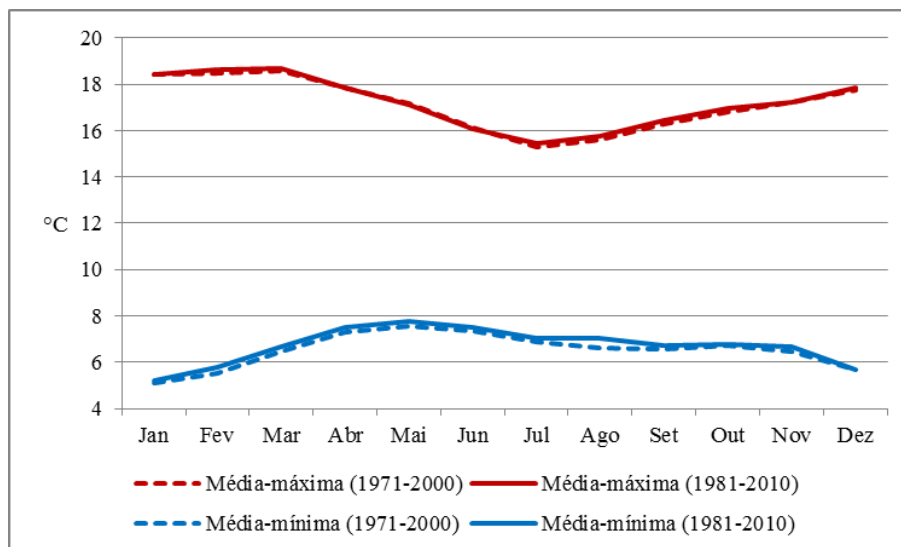


A temperatura média anual na estação Sierra Nevad Cocuy foi 0,24 °C mais elevada no período 1981-2010. Nessa estação destaca-se a variação das temperaturas médias máximas, que foram 0,88 °C mais elevadas no período mais recente, tendo ficado acima das médias máximas mensais do período anterior, em todos os meses do ano (Figura 15). Por sua vez, as médias mínimas mensais do período 1981-2010 foram levemente inferiores às médias mínimas mensais registradas entre 1971-2000, com destaque para o mês de fevereiro, no qual as temperaturas mínimas foram em média 0,5 °C mais baixas que no período anterior (1971-2000).



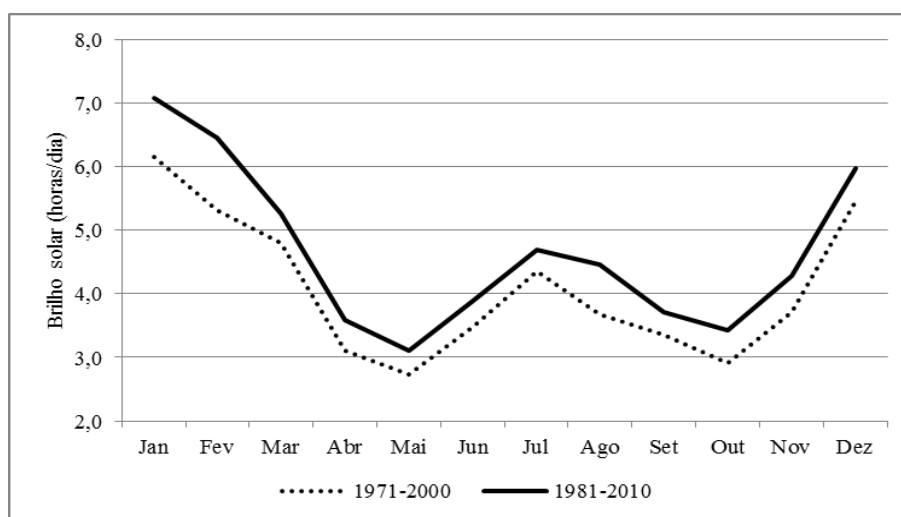
**Figura 15: Comparativo entre a temperatura média mínima e a temperatura média máxima mensal, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Sierra Nevad Cocuy.**  
 Fonte: SIAC (2016).

Na estação Chita a maior variação média anual ocorreu nas temperaturas médias mínimas, que foram 0,20 °C mais elevadas no período 1981-2010. Ao analisar os valores mensais, verifica-se que o mês que apresentou maior elevação média no período recente foi agosto, onde houve um aumento de 0,4 °C em comparação com as médias de 1971-2000 (Figura 16). As médias máximas mensais apresentaram valores muito semelhantes nos dois períodos, sendo que a variação da média anual desse parâmetro foi de apenas 0,02 °C.



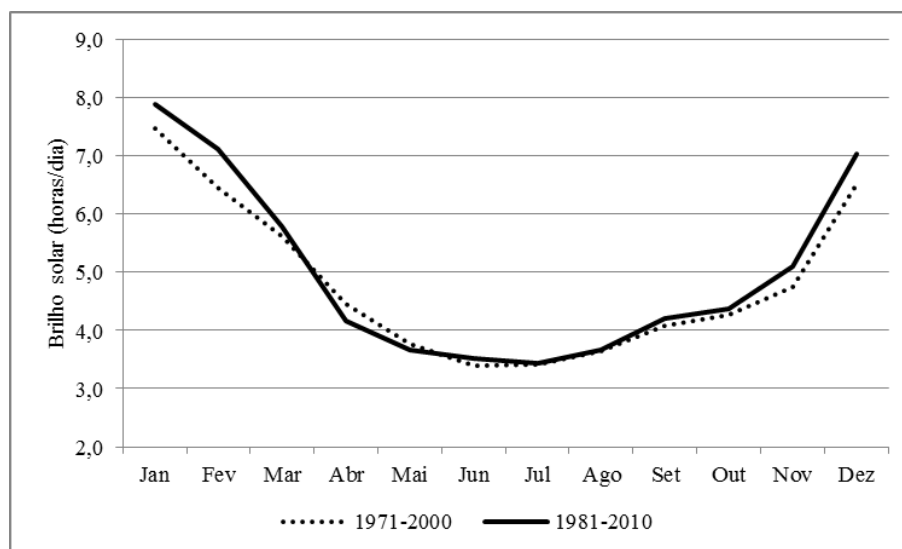
**Figura 16: Comparativo entre a temperatura média mínima e a temperatura média máxima mensal, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Chita.**  
 Fonte: SIAC (2016).

Na estação Sierra Nevad Cocuy houve aumento no número médio de horas de brilho solar por dia em todos os meses no período 1981-2010 (Figura 17). Quando considerada a média anual de horas de brilho solar por dia, houve um aumento de 0,6 h/dia, passando de 4,1 h/dia em média entre 1971-2000 para 4,7 h/dia em média.



**Figura 17: Comparativo entre o número médio de horas de brilho solar diário por mês, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Sierra Nevad Cocuy.**  
 Fonte: SIAC (2016).

Na estação Chita, o aumento da média de horas de brilho solar diário no ano passou de 4,8 h/dia (média de 1971-2000) para 5 h/dia (média de 1981-2010). Os meses de dezembro a fevereiro foram os que tiveram os maiores aumentos (Figura 18).



**Figura 18: Comparativo entre o número médio de horas de brilho solar diário por mês, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Chita.**

Fonte: SIAC (2016).

Quando consideradas as duas estações com séries de dados médios disponíveis no entorno dessa geleira, observa-se que as maiores variações ocorreram na estação que está a oeste da serra, destacando-se a redução da precipitação, o aumento das temperaturas máximas e o aumento da média de horas de brilho solar diário.

### c) Parque Natural de los Nevados

A média anual de precipitação sofreu uma leve redução nas duas estações analisadas. Quando comparadas as médias mensais, observa-se que no mês de setembro ocorreram as maiores variações, sendo que as médias do período mais recente foram 13 mm e 10 mm menores nas estações Las Brisas e Cajamarca, respectivamente (Tabela 3).

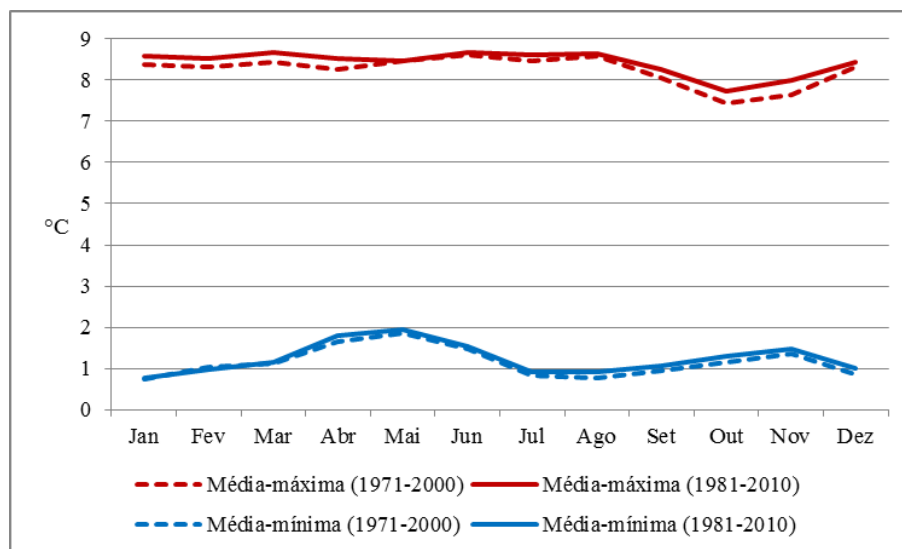
**Tabela 3: Precipitação média mensal (em mm) nas estações Las Brisas e Cajamarca, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010.**

Período	Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
1971-2000	Las Brisas	91	91	108	182	188	109	75	72	128	190	140	81	1.455
1981-2010	Las Brisas	86	83	117	178	189	112	71	73	115	192	146	87	1.449
1971-2000	Cajamarca	55	63	100	149	189	136	99	99	139	130	101	71	1.329
1981-2010	Cajamarca	52	67	102	150	183	135	108	91	129	124	99	73	1.314

Fonte: SIAC (2016).

Na estação Las Brisas, a maior variação nas médias anuais de temperatura ocorreu no parâmetro médias máximas, cujo aumento foi de 0,18 °C quando comparadas as médias máximas dos anos 1981-2010 com as médias máximas do período anterior (1971-2000). Ao considerar as médias máximas mensais, observa-se que os maiores aumentos ocorreram nos

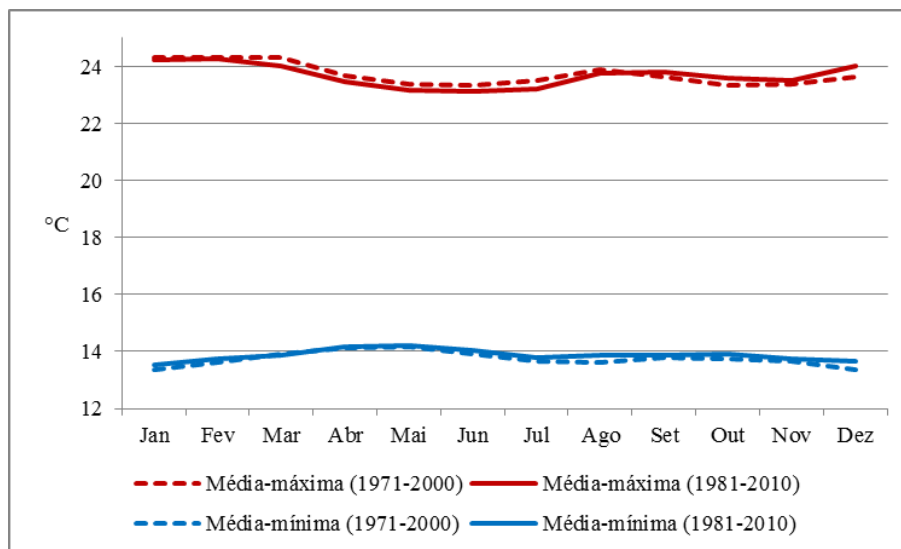
meses de abril, outubro e dezembro, que apresentaram média máxima mensal de 0,3°C maior no período mais recente (Figura 19). As médias mensais mínimas dessa estação variaram entre -0,1 e 0,2°C entre os dois períodos analisados, com aumento da média mínima anual em 0,08°C.



**Figura 19: Comparativo entre a temperatura média mínima e a temperatura média máxima mensal, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Las Brisas.**

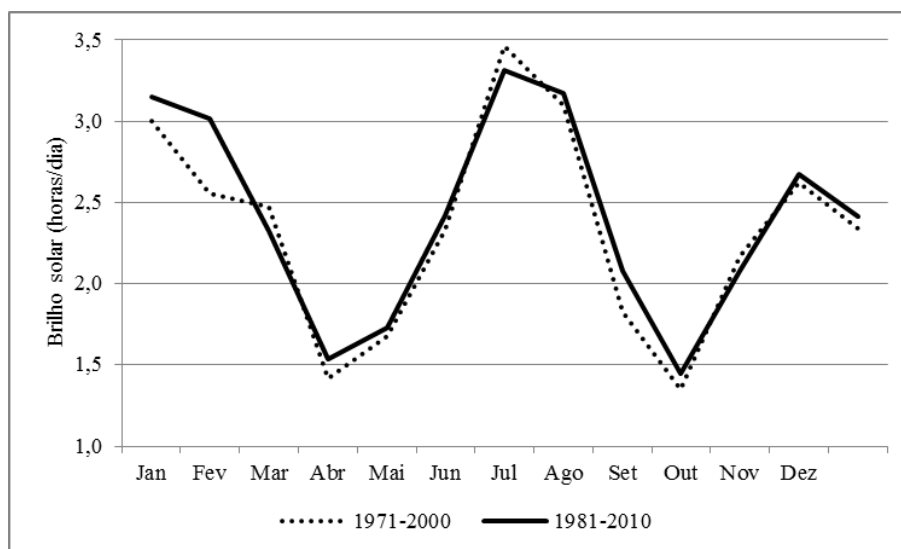
Fonte: SIAC (2016).

Na estação Cajamarca, a temperatura média anual foi 0,53°C maior no período de 1981-2010, em comparação com 1971-2000. No que se refere às médias máximas mensais, as maiores variações ocorreram nos meses de dezembro (aumento de 0,4°C), março, abril e julho (diminuição da temperatura máxima média em 0,3°C). A média mínima anual teve um aumento de 0,12°C entre os dois períodos analisados; quando consideradas as variações mensais, destacam-se agosto e dezembro, que tiveram médias mínimas 0,3°C mais elevadas no período mais recente (Figura 20).



**Figura 20: Comparativo entre a temperatura média mínima e a temperatura média máxima mensal, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Cajamarca.**  
 Fonte: SIAC (2016).

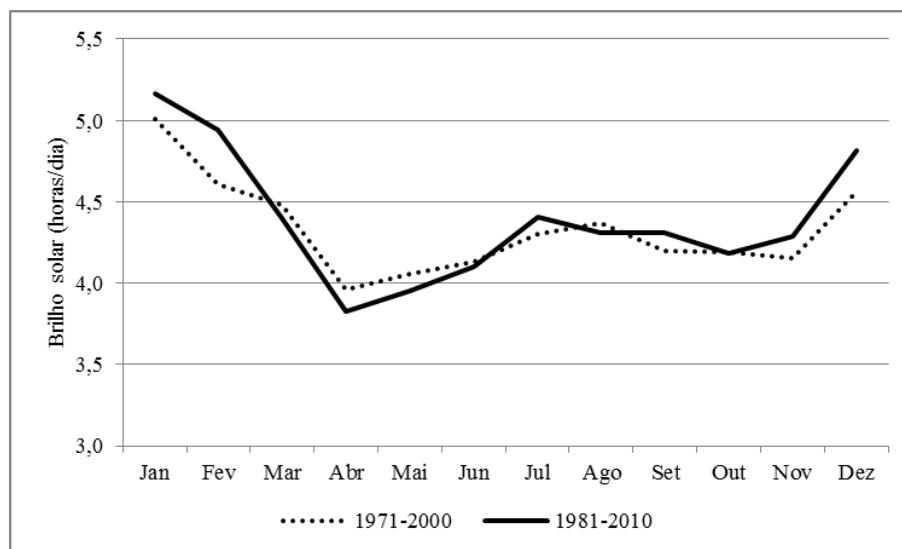
A média anual de brilho solar, em horas por dia, na estação Las Brisas apresentou um pequeno aumento no período mais recente, 0,07 horas/dia. As maiores variações mensais ocorreram em fevereiro e setembro, sendo que nesses meses houve aumento médio de 0,5 e 0,3 horas/dia, respectivamente. Nos demais meses, as variações foram inferiores a 0,2 horas/dia, tendo ocorrido tanto aumento quanto diminuição.



**Figura 21: Comparativo entre o número médio de horas de brilho solar diário por mês, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Las Brisas.**  
 Fonte: SIAC (2016).

A média anual de horas de brilho solar diário na estação Cajamarca aumentou 0,05 horas/dia no período 1981-2010. Os meses com maior variação foram fevereiro e dezembro,

nos quais a média diária de brilho solar apresentou aumento de 0,3 horas/dia. Os demais meses apresentaram variações menores, sendo que o comportamento não foi uniforme, ocorrendo aumento em alguns meses e redução da média de horas de brilho solar diário em outros.



**Figura 22: Comparativo entre o número médio de horas de brilho solar diário por mês, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Cajamarca.**

Fonte: SIAC (2016).

No geral, as variações dos parâmetros climatológicos foram semelhantes nas duas estações: pequena redução da precipitação, aumento das temperaturas médias e médias mínimas anuais e aumento da média anual de horas de brilho solar diário.

#### d) Nevado del Huila

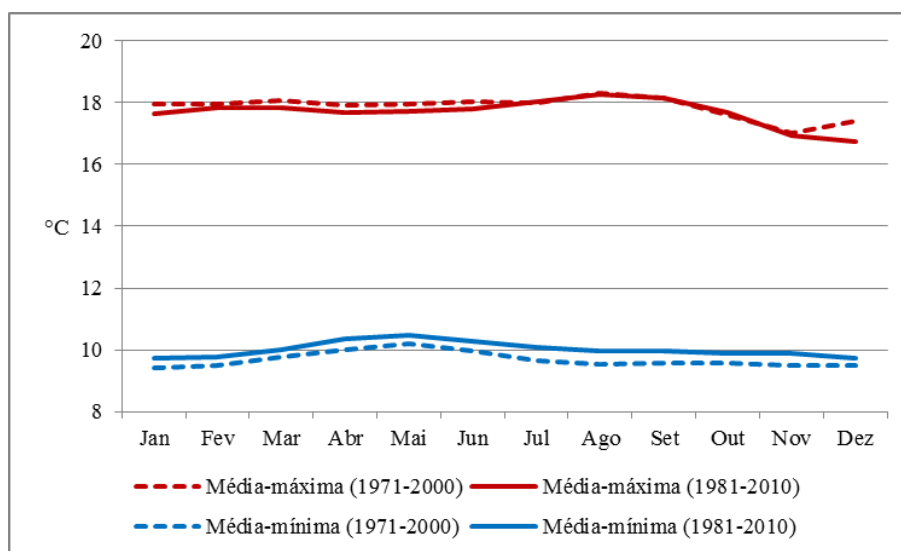
Nas duas estações próximas ao Nevado del Huila analisadas nesse trabalho houve aumento da média anual de precipitação no período mais recente (1981-2010). A maior variação ocorreu na estação Sta. Maria, onde a média anual entre 1981-2010 foi 44 mm superior à média registrada nos anos do período 1971-2000. Os maiores aumentos mensais ocorreram nos meses de novembro (27 mm) e março (19 mm) na estação Sta. Maria e em dezembro (16 mm) na estação Tenerife (Tabela 4). Por outro lado houve redução das médias mensais nos meses mais secos, destacando-se agosto (-15 mm) e junho (-11 mm) em Sta. Maria e setembro (-8 mm) e agosto (-7 mm) em Tenerife.

**Tabela 4: Precipitação média mensal (em mm) nas estações Tenerife e Sta Maria, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010.**

Período	Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
1971-2000	Tenerife	96	86	128	136	106	52	39	50	80	162	155	114	1.204
1981-2010	Tenerife	96	80	123	136	109	55	41	43	72	168	158	130	1.210
1971-2000	Sta Maria	76	112	123	174	165	102	55	66	96	169	161	101	1.400
1981-2010	Sta Maria	87	113	142	180	157	91	61	51	87	180	188	108	1.444

Fonte: SIAC (2016).

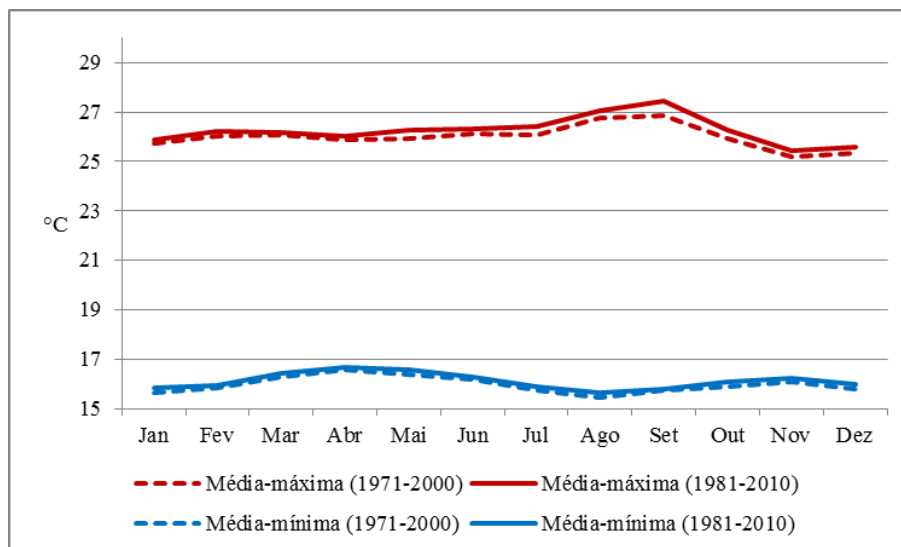
Na estação Tenerife a temperatura média anual teve uma elevação de 0,48 °C no período mais recente (1981-2010). As maiores variações ocorreram nas médias mínimas mensais, como pode ser observado na Figura 23. As médias máximas ficaram levemente abaixo no último período, com destaque para o mês de dezembro que, entre 1981-2010, apresentou temperatura média máxima 0,7 °C inferior ao registrado entre 1971-2000.



**Figura 23: Comparativo entre a temperatura média mínima e a temperatura média máxima mensal, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Tenerife.**

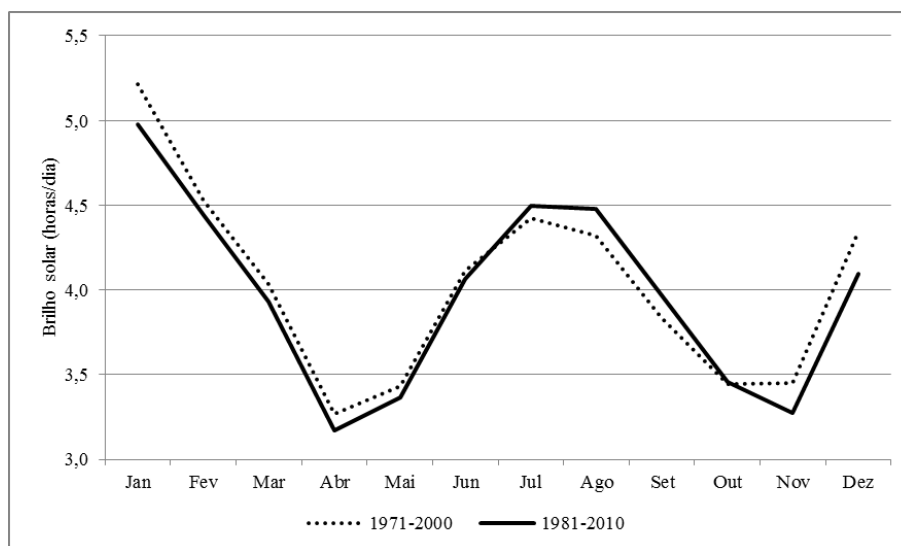
Fonte: SIAC (2016).

Na estação Sta. Maria as temperaturas médias anuais foram 0,50 °C mais elevadas no período 1981-2010. Além disso, também houve aumento nas médias máximas e nas médias mínimas anuais nessa estação. Na Figura 24 estão representadas as médias máximas e médias mínimas mensais, na qual pode ser observado que os maiores aumentos foram registrados nas médias máximas dos meses de setembro (0,6 °C) e outubro (0,4 °C).



**Figura 24: Comparativo entre a temperatura média mínima e a temperatura média máxima mensal, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Sta Maria.**  
 Fonte: SIAC (2016).

A média anual de horas de brilho solar diário variou apenas -0,06 horas/dia quando comparados os períodos 1971-2000 e 1981-2010. Entre os meses de julho a outubro a média diária de brilho solar foi levemente superior no período mais recente, enquanto nos meses de novembro a junho houve pequena redução na média diária de horas de brilho solar durante o período 1981-2010 (Figura 25).

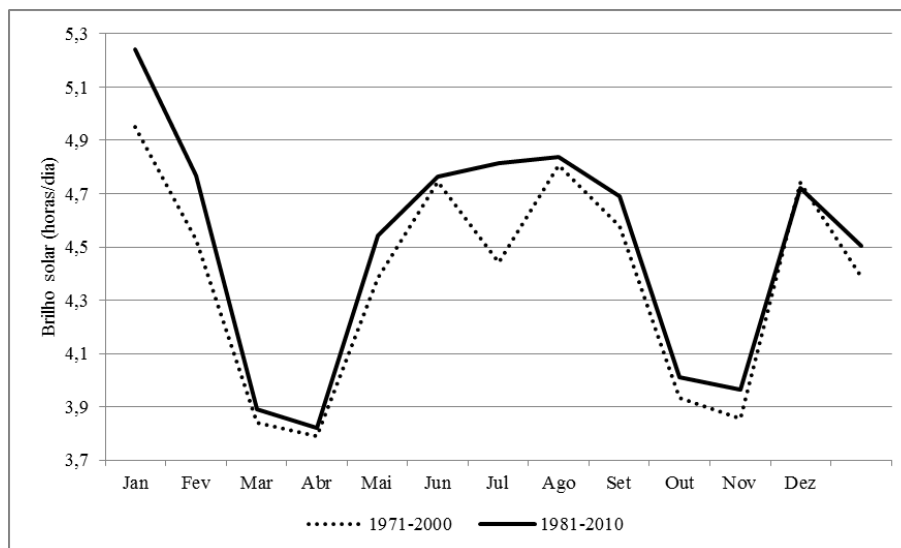


**Figura 25: Comparativo entre o número médio de horas de brilho solar diário por mês, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Tenerife.**  
 Fonte: SIAC (2016).

Na estação Sta. Maria houve aumento médio anual de 0,12 horas de brilho solar ao dia no período mais recente. Quando analisadas as médias mensais, observa-se na Figura 26, que



as maiores variações ocorreram nos meses de julho (0,4 horas/dias) e de janeiro (0,3 horas/dia).



**Figura 26: Comparativo entre o número médio de horas de brilho solar diário por mês, nos períodos 1971-2000 e 1981-2010, estação Sta Maria.**  
Fonte: SIAC (2016).

As duas estações selecionadas para análise do comportamento climático no entorno da geleira Nevado del Huila apresentaram comportamentos semelhantes nos seguintes quesitos: aumento da precipitação média anual e aumento das temperaturas médias e médias mínimas anuais.

e) Sierra Nevada de Mérida

Nas estações próximas à Sierra Nevada de Mérida foram encontrados apenas dados de séries mais curtas, sendo que nas duas estações utilizadas, a primeira média de precipitação ocorreu antes do início da coleta de imagens de satélite desse trabalho.

Como pode ser observado na Tabela 5, houve aumento superior a 10%, nas precipitações das duas estações próximas à geleira e com dados disponíveis, no período mais recente.

**Tabela 5: Precipitação média mensal (em mm) nas estações La Aguada e Pico Espejo nos períodos indicados.**

Período	Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
1970-1976	La Aguada	53	128	204	240	122	132	146	194	185	132	68	44	1.648
1981-1991	La Aguada	75	128	269	246	125	136	164	187	206	156	73	76	1.841
1970-1980	Pico Espejo	4	7	35	79	90	74	51	81	79	63	46	28	637
1983-1991	Pico Espejo	15	17	38	85	97	80	54	75	89	81	56	30	717

Fonte: Pulwarty et al. (1998).

Não foram encontrados dados médios de temperatura e horas de brilhos solar para essas estações.

### 2.3 A INSERÇÃO DAS GELEIRAS NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ENTORNO

De acordo com IDEAM (2012), a água sólida passa por complexos processos de fusão glacial para converter-se em água líquida e fluir entre fendas e túneis subglaciais até concentrar-se em canais de drenagem que formarão um rio. Contudo, apesar das geleiras colombianas contribuírem com o sistema de drenagem do entorno, a relação entre esse escoamento superficial e o abastecimento das comunidades do entorno é pequena.

As geleiras do norte andino estão inseridas em quatro grandes bacias hidrográficas, com destaque para a bacia do Magdalena-Cauca, que recebe contribuições de todas as geleiras colombianas analisadas nesse estudo (Figura 27).

#### a) Sierra Nevada de Santa Marta

No contexto hidrográfico da região, os rios que nascem na Sierra Nevada de Santa Marta escoam, predominantemente, em três sentidos: norte (bacia hidrográfica do Mar do Caribe), ocidental e sul-oriental (bacia hidrográfica dos rios Magdalena-Cauca). A vertente norte é caracterizada por maior umidade que a encosta sul, recebendo 52% da drenagem dessa geleira (IDEAM, 2000).

#### b) Sierra Nevada del Cocuy

Essa serra possui direção norte-sul, assim, há duas grandes vertentes: Ocidental (bacia hidrográfica dos rios Magdalena-Cauca) e Oriental (bacia hidrográfica do rio Orinoco). O balanço de acumulação negativo que a serra apresenta aporta grande quantidade de água à vertente ocidental, correspondendo a 76% da drenagem da serra; sendo que o aporte à vertente oriental é 24% (IDEAM, 2000).

#### c) Parque Natural de los Nevados

O Parque Natural de Los Nevados está localizado na cordilheira central, entre os vales dos rios Magdalena e Cauca. Nesse Parque estão localizadas três geleiras – de norte para sul: Nevado del Ruiz, Nevado Santa Isabel e Nevado del Tolima, as quais, a partir do degelo, fornecem água para o curso inicial de rios divididos em 10 sub-bacias hidrográficas (IDEAM, 2000).

### Nevado del Ruiz

O Nevado del Ruiz é a geleira localizada mais ao norte do Parque Natural de los Nevados, faz parte do divisor de águas da Cordilheira Central e escoo para as bacias dos rios Magdalena e Cauca (IDEAM, 2000).

### Nevado Santa Isabel

Está localizado entre os vulcões Ruiz e Tolima, sobre o eixo da Cordilheira Central (IDEAM, 2000). A geleira de Santa Isabel está sobre substrato vulcânico, onde se alternam camadas de lava de forma e composição diferentes. A rede de drenagem possui forma radial, adaptando-se à estrutura estrato-vulcânica (IDEAM, 2000). Esse escoamento acaba chegando às bacias dos rios Cauca e Magdalena.

### Nevado del Tolima

O vulcão Nevado del Tolima faz parte do complexo vulcânico Ruiz-Tolima e está localizado sobre o flanco oriental da Cordilheira Central, assim todas as drenagens correm para o rio Magdalena (IDEAM, 2000).

#### d) Nevado del Huila

Esse vulcão ocupa o cume topográfico da cordilheira central. Destaca-se que nesse local, o divisor de águas não coincide com o divisor topográfico e todos os cursos de água que recebem contribuição do Nevado del Huila drenam para o rio Magdalena. Além de ser um caso pouco comum, essa configuração concentra os riscos de eventos relacionados à junção vulcão-nevado no flanco oriental da cordilheira (IDEAM, 2000).

#### e) Mérida

Ao norte da geleira está o rio Chama, um tributário do lago Maracaibo, já as vertentes nordeste e leste deságuam no rio Siniguis, pertencente à bacia do rio Orinoco.

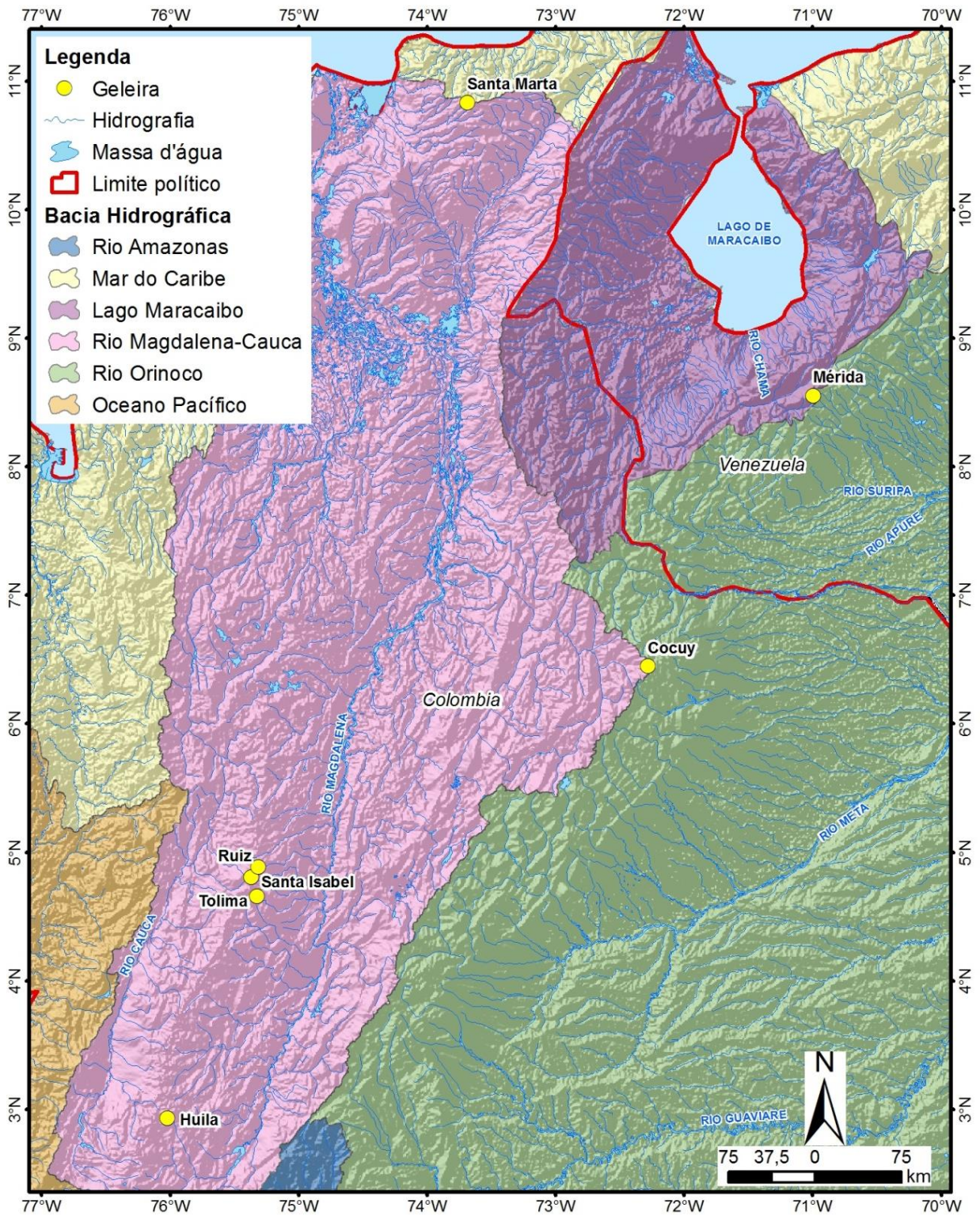
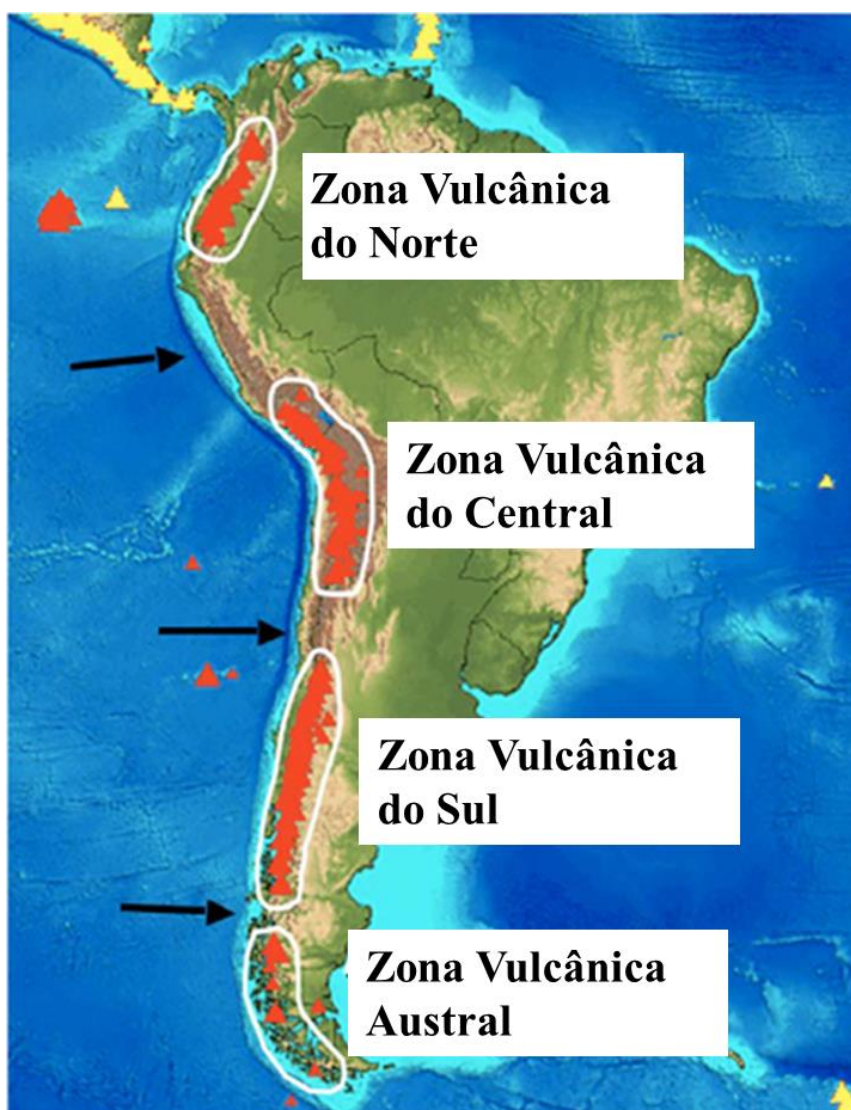


Figura 27: Bacias hidrográficas localizadas no norte andino.

## 2.4 RISCOS ASSOCIADOS ÀS INTERAÇÕES VULCÕES-GELEIRAS

O vulcanismo nos Andes ocorre no Arco Vulcânico Andino (AVA), o qual é resultante da subducção das Placas de Nazca e Antártica sob a Placa Sul Americana. O Arco Vulcânico

Andino corresponde à maior margem continental vulcânica da Terra, com mais de 8.000 km de extensão, contudo, esse arco é descontínuo e dividido em quatro segmentos: Zona Vulcânica do Norte, Zona Vulcânica Central, Zona Vulcânica do Sul e Zona Vulcânica Austral (Figura 28). As diversas zonas do AVA são separadas por lacunas inativas vulcanicamente, sendo que a principal hipótese é que essas lacunas coincidem com as regiões onde os mergulhos das placas de subducção são muito rasos para favorecer a geração de magma por fusão parcial no manto quente que sustenta o vulcanismo (TILLING, 2009).



**Figura 28: Segmentos do Arco Vulcânico Andino.**

Adaptado de Tilling (2009). As setas pretas marcam as regiões onde o ângulo de subducção é relativamente plano.

A área de estudo está localizada na Zona Vulcânica do Norte, que consiste em 19 vulcões na Colômbia e 55 no Equador. Os vulcões dessa zona estão distribuídos em cinturões com direção norte-sul ao longo de duas cadeias montanhosas: a Cordilheira Ocidental, no

oeste, e a Cordilheira Central, mais a leste, sendo que esta é conhecida como Cordilheira Real no Equador. Essas cordilheiras são separadas pelo vale intermontano chamado depressão Cauca-Patria (Colômbia) ou Valle Intermedio (Equador). Na Colômbia os vulcões são divididos em três grupos, denominados segmentos norte, central e sul. Os vulcões dos segmentos norte e central estão localizados na Cordilheira Central, enquanto os vulcões do segmento sul estão localizados na Cordilheira Ocidental (STERN, 2004).

De acordo com Huggel et al (2007), as geleiras sobre os vulcões colombianos têm apresentado significativas mudanças em termos de extensão, volume e estrutura, destacando-se o recuo acentuado das áreas das geleiras. Por outro lado, a população em numerosas comunidades localizadas no entorno dos vulcões tem crescido continuamente, fazendo com que a vulnerabilidade aos perigos associados à associação vulcão-geleira tenha aumentado nos últimos anos. De acordo com esses autores, as principais interações entre gelo/neve e atividades vulcânicas, relevantes para a geração de movimento de massa nos vulcões cobertos de gelo da Colômbia, são:

- Fluxos de lava: a transferência de calor através das bases e dos lados desses fluxos geralmente não é suficiente para derreter a quantidade de neve e gelo necessária para gerar *lahars* ou inundações; a neve e o gelo derretidos por fluxos de lava subsuperficial geralmente são convertidos em vapor. Esse tipo de interação foi observado nos vulcões chilenos Llaima e Villarica, em 1979 e 1984, respectivamente. Em ambos os casos, pequenas avalanches de rocha e gelo foram produzidas pela mistura do fluxo de lava resfriada, fragmentada e misturada com a neve e o gelo (HUGGEL et al, 2007).

- *Pyroclastic density current*, corresponde a uma corrente, composta por piroclastos e gases, que tende a se deslocar lateralmente controlada pela gravidade. É um termo genérico que descreve tanto derrames (corrente densa de material piroclástico, geralmente muito quente e composta por uma mistura de gases e partículas), quanto fluxos piroclásticos (fluxo turbulento, diluído e de baixa densidade). Esse tipo de evento pode gerar grandes quantidades de água de degelo se os detritos se misturarem com neve e o gelo, podendo causar avalanche de neve parcialmente derretida e, *lahars* caso haja continuação do processo de derretimento devido à fricção (HUGGEL et al, 2007).

- *Pyroclastic fall*, que é caracterizada pela dispersão aérea de materiais rochosos formados por uma explosão vulcânica. Esse tipo de interação pode levar à acumulação de

cinzas e detritos em áreas vizinhas à erupção, influenciando no albedo da superfície de gelo (HUGGEL et al, 2007).

- Avalancha de gelo-rocha/detritos: movimento rápido de massas de detritos de rochas, produzidas por deslizamentos que se espalham por muitos quilômetros a partir da fonte, enterrando tudo que está pelo caminho. Esse tipo de evento pode ser provocado por erupções vulcânicas, abalos sísmicos ou desestabilização de encostas devido a atividades vulcânicas prévias. Um exemplo importante desse tipo de evento corresponde à avalancha de detritos provocada pelo terremoto de magnitude 6,4, ocorrido no Nevado del Huila em 1994 (HUGGEL et al, 2007).

Segundo Huggel et al (2007), a calota de gelo do Nevado del Ruiz apresentou forte recuo nas décadas recentes, sendo que a área da geleira apresentou retração superior a 50% nos últimos 40 anos. Esses autores estimam que, em 2003, o volume total de gelo dessa calota era de  $484 \times 10^6 \text{ m}^3$  e, baseado na densidade média do gelo de  $0,85 \text{ g/cm}^3$  foi calculado que o Nevado del Ruiz possui  $411 \times 10^6 \text{ m}^3$  de água equivalente. As interações entre atividade vulcânica e a calota de gelo são a chave para que a pequena erupção de 1985 tenha causado um dos maiores desastres vulcânicos da história. Os principais processos identificados naquele evento foram: *pyroclastic density currents* que são capazes de gerar grandes quantidades de água de degelo, caso os detritos quentes sejam misturados com neve e gelo; *slush avalanches*, induzidas pela carga repentina de neve e gelo em encostas instáveis; avalancha de rocha e gelo, desencadeada pelo abalo sísmico, água de derretimento percolada e súbito aumento da tensão de cisalhamento. Durante o evento de 1985, aproximadamente 10% do volume de gelo foi removido. Desde então a área da geleira recuou significativamente, contudo apesar do volume reduzido dessa calota de gelo, dependendo da combinação de variações dos processos críticos envolvidos (como por exemplo, a magnitude da erupção, formação inicial dos lahars), a magnitude dos lahars que podem ser gerados atualmente pode ser similar ou mesmo maior do que ao observado em 1985.

O Nevado de Santa Isabel é caracterizado por uma série de cúpulas e dois picos principais ao longo da cordilheira, com orientação norte-sul. Nas últimas décadas, as geleiras do Nevado Santa Isabel têm passado por uma das mais dramáticas retrações observadas na Colômbia. Considerando estudos existentes sobre área e espessura do gelo, Huggel et al. (2007), calcularam que o volume total de gelo estimado para essa geleira, para o ano de 2002, foi de  $198 \times 10^6 \text{ m}^3$ , o que equivale a  $168 \times 10^6 \text{ m}^3$  de água. Segundo esse estudo, o cenário de risco mais provável envolve a formação de *lahars*, resultantes de eventos de derretimento da

neve/gelo, causada por tempestades suficientemente grandes para mobilizar cinzas e outros sedimentos não consolidados.

A calota de gelo do Nevado Tolima drena para quatro sistemas principais de drenagem: Rio Totaré (norte), Rio San Rumualdo (leste), Rio Combeima (sul) e Rio Toche (oeste), sendo que os assentamentos mais próximos e populosos estão localizados ao longo do Rio Combeima, destacando-se a capital provincial do Ibagué (~400.000 habitantes) situada a 27 km do cume do Nevado del Tolima. Como em outras geleiras tropicais, os últimos 150 anos têm sido caracterizados pelo rápido recuo do gelo no Nevado del Tolima. Para o ano de 2002, foi estimado que essa geleira possuía volume total de  $73 \times 10^6 \text{ m}^3$ , o que é equivalente a  $62 \times 10^6 \text{ m}^3$  de água (assumindo-se densidade do gelo de  $0,85 \text{ g/cm}^3$ ). Com base em registros geológicos e nas condições atuais, os mais importantes processos de risco causados pela interação vulcão-geleira são a geração de grandes fluxos de detritos, devido ao derretimento do gelo por *pyroclastic density currents*, e avalanches de gelo e rocha que podem se transformar em fluxo de detritos. A topografia da bacia hidrográfica do Rio Combeima, a qual drena 60% da superfície de gelo, é caracterizada por um vale íngreme e profundo, sendo que *lahars* podem se intensificar rapidamente e se deslocar em velocidades maiores, o que indica para uma elevada vulnerabilidade da cidade de Ibagué. Um perigo adicional nessa geleira corresponde a avalanches de gelo e rocha, devido ao gradiente acentuado de inclinação e à estrutura fortemente falhada; além disso, esse tipo de avalanche pode ocorrer mesmo quando não há erupções, pois essa região é sismicamente ativa e a ocorrência de terremotos pode desestabilizar as geleiras do Nevado del Tolima, bem como, o fluxo de calor geotermal ou atividades fumarólicas podem levar ao aumento do derretimento de gelo na interface gelo-rocha, reduzindo as forças de resistência (HUGGEL et al, 2007).

O Nevado del Huila é o vulcão coberto por geleira mais meridional da Colômbia e o menos estudado devido ao afastamento, à topografia da região e à atividade da guerrilha (HUGGEL et al, 2007). Não há registros de erupções recentes desse Nevado, mas há conhecimento de atividade fumarólica durante os últimos 400 anos, principalmente nos setores central e norte. No flanco ocidental do vulcão, no limite da geleira, são observadas fontes termais e há registro de atividades sísmicas desde 1986, sendo que o mesmo vem sendo observado continuamente desde 1993. A redução da área dessa geleira foi de ~25% entre 1960 e 2000, para estimar o volume da geleira Huggel et al. (2007) assumiram que a espessura média do gelo no Huila seja semelhante ao Nevado del Ruiz, assim, o volume de gelo em 2001 foi estimado em  $684 \times 10^6 \text{ m}^3$ , equivalente a  $550 \times 10^6 \text{ m}^3$  de água. De acordo



com o registro geológico e histórico, o maior risco potencial nessa área corresponde a avalanchas e fluxos de detritos, destacando-se o evento de 1994, no qual um terremoto de magnitude 6,4 provocou um grande número de deslizamentos de terra e pequenas avalanchas que se combinaram em um fluxo de detritos. Esse fluxo de detritos desceu o Rio Páez, provocando uma inundação com altura de 40 m e velocidades máximas de 25 m/s, o que causou a morte de cerca de 1.000 e danos maciços na região. A topografia acidentada, a estrutura fraturada do gelo, a alta sismicidade e o potencial geotermal podem induzir o derretimento de gelo na interface gelo-rocha e tornar as geleiras propensas à instabilidade (HUGGEL et al, 2007).

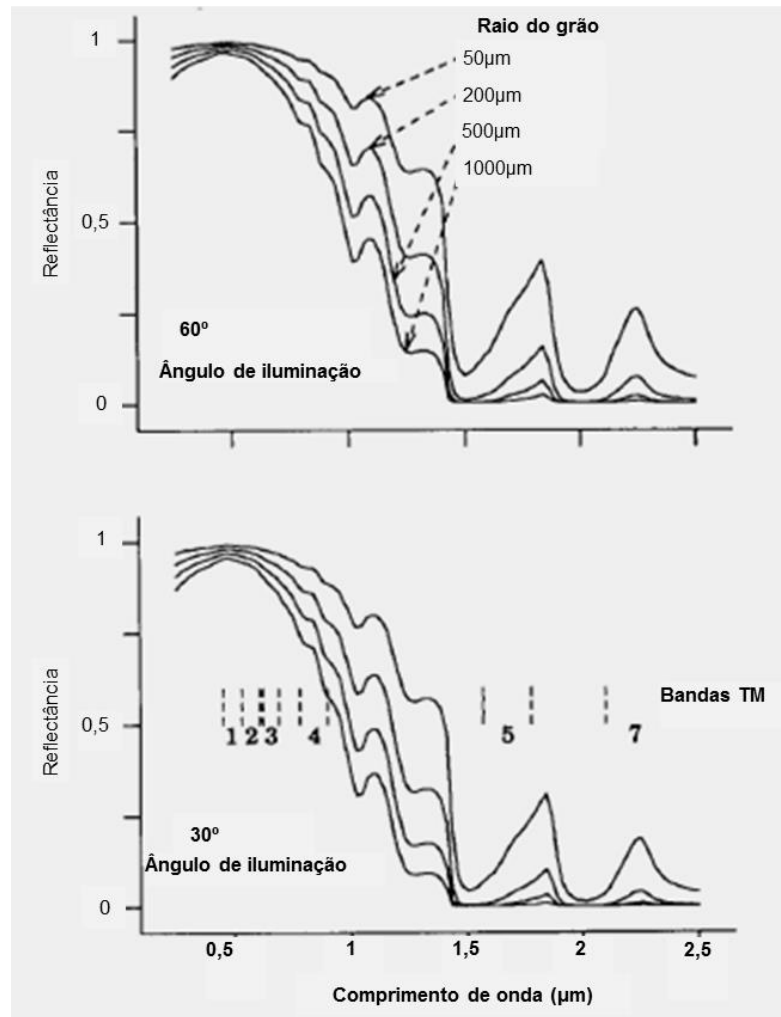
## 2.5 SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO ESTUDO DE GELEIRAS TROPICAIS

Os dados de sensoriamento remoto podem ser obtidos de forma sistemática sobre grandes áreas, ao contrário de levantamentos terrestres em que apenas um único ponto é observado (JENSEN, 2005). Isso torna viável a realização de levantamentos mais extensivos e frequentes de áreas montanhosas, onde estão localizadas as geleiras tropicais as quais são em muitos casos de difícil acesso.

O comportamento espectral da neve é dependente de parâmetros como tamanho e forma do grão, conteúdo de impurezas, conteúdo de água líquida próximo à superfície, profundidade e rugosidade da superfície, assim como da elevação solar (HALL e MARTINEC, 1985).

Segundo Dozier (1989), nos comprimentos de onda do visível, o gelo é altamente transparente, assim, o albedo da neve é sensível a pequenas quantidades de impurezas, mas o aumento do tamanho do grão não afeta de forma considerável a reflectância, pois a probabilidade de um fóton ser absorvido é pequena e essa probabilidade não aumenta muito com o aumento do tamanho do grão.

Já nos comprimentos de onda do infravermelho próximo, o gelo é mais absorptivo e o albedo depende majoritariamente do tamanho do grão, sendo que essa sensibilidade aumenta nos comprimentos de onda entre 1,0 e 1,3  $\mu\text{m}$ , conforme pode ser observado na Figura 29.



**Figura 29: Reflectância da neve em ângulos de reflectância de 60° e 30° para comprimentos de onda entre 0,4 e 2,5  $\mu\text{m}$ .**

As curvas representam grãos com raios de 50  $\mu\text{m}$  (superior), 200  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$  e 1.000  $\mu\text{m}$  (inferior). Nos comprimentos de onda do visível (0,4 – 07  $\mu\text{m}$ ) a reflectância não é sensível ao tamanho do grão. No infravermelho próximo, especialmente entre 0,9 e 1,3  $\mu\text{m}$ , a reflectância é muito sensível ao tamanho do grão. De 1,55  $\mu\text{m}$  a 1,7  $\mu\text{m}$  a reflectância é sensível, mas apenas para grãos pequenos. O efeito do ângulo de iluminação é maior no infravermelho próximo. Adaptado de Dozier (1989).

O albedo da superfície de neve ou gelo muda consideravelmente com a idade e a deposição de poeira. A neve fresca possui alta reflectância nos comprimentos de onda do visível, com o aumento da idade, a reflectividade da neve diminui no visível e especialmente nos comprimentos de onda maiores, como no infravermelho próximo. Esse maior decréscimo nos comprimentos de onda do infravermelho próximo é devido, em grande parte, ao derretimento e recongelamento dentro das camadas superficiais e à natural adição de impurezas. O derretimento da neve aumenta o tamanho médio do grão e a densidade pela fusão das partículas menores (HALL e MARTINEC, 1985). Este fator é mais agudo próximo às margens da geleira, onde o gelo exposto fica mais empoeirado e pode desenvolver uma cobertura superficial semelhante às morainas glaciais do entorno. Além disso, a reflectância

do gelo e da neve depende altamente da declividade e da orientação da superfície, do ângulo zenital e do azimute do Sol e do ângulo zenital e do azimute do satélite. Uma vez que a geometria do Sol e do satélite são fixas durante a obtenção da imagem, variações adicionais medidas na reflectância do gelo pelo satélite podem ser causadas pela declividade e a orientação da superfície. Geralmente, paredes íngremes de gelo e fendas na imagem são altamente sombreadas e possuem reflectâncias bastante baixas, pois o gelo sombreado possui uma curva espectral que se aproxima da curva espectral da água. Outro fator que confunde a identificação do gelo é que os pixels da borda são suscetíveis de ser combinação de gelo e do material circundante, resultando em um sinal misto (ALBERT, 2002).

Em áreas tropicais é comum a ocorrência de nuvens durante a passagem do satélite, o que dificulta e algumas vezes até inviabiliza o uso de diversas cenas.

De forma similar ao que ocorre com a neve, a reflectância e a transmitância das nuvens dependem da espessura e da densidade, tamanho e distribuição das gotículas. De acordo com Dozier (1989), as propriedades que levam as nuvens a apresentar reflectância espectral diferente da neve são, em ordem de importância: 1) gotículas de nuvens ou cristais de gelo são menores que grãos de neve. É provável que um elemento de dispersão menor absorva menos radiação. 2) A maioria das nuvens é composta por gotículas de água, mesmo em temperaturas inferiores a 0°C. Considerando que o gelo é mais absorvivo que a água nos comprimentos de onda de 1,55 a 1,75  $\mu\text{m}$ , é possível diferenciar os dois alvos. 3) A neve no solo é geralmente opticamente mais espessa que nuvens, por isso, nos comprimentos de onda do visível a neve é, por vezes, mais brilhante pois parte da luz incidente sobre as nuvens é transmitida através delas. Essa propriedade não é válida para nuvens espessas, as quais podem ser tão brilhantes quanto a neve.

No que se refere aos métodos de mapeamento da extensão das geleiras, de acordo com Paul e Hendriks (2010), o delineamento manual das geleiras é aplicado com frequência, especialmente quando dados multiespectrais não estão disponíveis (fotografias aéreas ou imagens de satélite pancromáticas) ou quando as geleiras estão cobertas por detritos. Apesar de esse método ser, em geral, o mais preciso, é extremamente demorado para ser aplicado em um número elevado de geleiras. Em função disso, um grande número de métodos de mapeamento automatizado de geleiras, usando dados multiespectrais, foi desenvolvido. Dentre eles, destacam-se:

- Classificação supervisionada: nesse método é necessário que o operador identifique as classes de cobertura da terra conhecidas na imagem e selecione pixels que são representativos de cada classe. Esses conjuntos de pixels são referidos como conjuntos de treinamento e, geralmente, a maior parte do tempo de processamento para todas as técnicas supervisionadas é dedicado à definição desses conjuntos. Albert (2002) aplicou esse método para delimitação de geleiras utilizando quatro diferentes algoritmos de classificação: máxima verossimilhança, distância mínima, paralelepípedo e mapeador do ângulo espectral (SAM), sendo que o último foi o que apresentou os melhores resultados, com precisão estimada em 96,7%.

- Classificação não supervisionada: é o processo por meio do qual são realizadas operações numéricas para o agrupamento de pixels com características espectrais semelhantes. A partir desses agrupamentos, o operador combina e rotula os clusters espectrais em classes de cobertura do solo, o que nem sempre é fácil, pois os agrupamentos, por vezes, representam misturas de cobertura do solo (JENSEN, 2005). Ao testar diferentes métodos para a classificação de geleiras, na classificação não-supervisionada Albert (2002) utilizou o método de agrupamento ISODATA (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique*), o qual apresentou precisão estimada em 90,6%.

- Razão de bandas: a reflectividade do gelo é altamente dependente da insolação e do ângulo de visualização, assim, bandas espectrais individuais não apresentam resultados satisfatórios para determinar a presença ou ausência de gelo (ALBERT, 2002). Por outro lado, a razão de bandas tende a aumentar o contraste da imagem para os tipos de superfícies selecionadas e reduzir a influência do ângulo de iluminação no terreno (PAUL e HENDRIKS, 2010). Exemplos de trabalhos que utilizaram essa metodologia recentemente são Albert (2002), Paul (2000), Paul et al (2001), Paul e Hendriks (2010). Paul e Hendriks (2010) destacam as razões das bandas TM4/TM5 e TM3/TM5 como as mais utilizadas para determinação de área de geleira. Neve e gelo têm reflectâncias altas no visível (V) e no infravermelho próximo (NIR) e reflectância muito baixa da região do infravermelho de ondas curtas (SWIR). Assim, quando os contadores digitais (DNs) elevados do VNIR, que ocorrem em áreas de geleiras, são divididos pelos DNs baixos do SWIR, a razão de bandas TM4/TM5 resulta em valores altos nas áreas de gelo. Quando os DNs elevados de outros alvos, como solo e vegetação, ou baixos, como água e sombra no NIR, são divididos pelo DN correspondente no SWIR, a razão de bandas apresenta valores resultantes baixos para estes alvos. Assim, ao definir um valor de limiar, as geleiras podem ser separadas dos demais alvos.

Situação semelhante ocorre na razão TM3/TM5, na qual pixels resultantes com valores altos indicam que eles têm reflectância muito mais elevada no vermelho do que no SWIR sendo propensos a serem neve ou gelo. Ao comparar as razões TM4/TM5 e TM3/TM5 Paul e Hendriks (2010), observaram que o mapeamento do gelo resultante da aplicação da razão de banda TM3/TM5 é um pouco maior na região de sombra e cobre mais regiões cobertas por uma fina camada de detritos; por outro lado mais manchas de neve na área iluminada foram mapeadas e algumas regiões com gelo na sombra foram perdidas. Em síntese, destacam que as diferenças entre TM3/TM5 e TM4/TM5 são muito pequenas, havendo uma ligeira preferência para o método TM3/TM5 no exemplo apresentado. Por outro lado, ao comparar a acurácia desses dois métodos, Albert (2002) estimou que a razão TM3/TM5 possui precisão de 91%, enquanto a razão TM4/TM5 possui precisão de 92%.

- O *Normalized Difference Snow Index* (NDSI) baseia-se nas diferenças espectrais de neve e gelo na região de comprimento de onda do visível (verde) e na região do SWIR. Ele é calculado com base na diferença normalizada da TM 2 e TM 5, ou seja,  $(TM\ 2 - TM\ 5) / (TM\ 2 + TM\ 5)$ . Um limiar é aplicado aos resultados para se obter o mapa de neve e gelo (ALBERT, 2002). De acordo com Silverio e Jaquet (2005), o NDSI possibilita discriminar espectralmente a neve, tanto exposta ao sol quanto em áreas de sombra, podendo ser considerado um método robusto para delinear o limite de geleiras. Contudo, esse método não possui um valor fixo de limiar devido às diferenças de iluminação de cada cena, sendo que, de acordo com Hendriks e Pellikka (2007), em imagens Landsat TM o limiar costuma variar entre 0,5  $\mu$ m e 0,7  $\mu$ m. Outros limiares foram utilizados por: Silverio e Jaquet (2012), que aplicaram valores entre 0,39 e 0,47 ao analisar a variação de área do Nevado Coropuna no Peru; Morris, Poole e Klein (2006) que utilizaram o limiar de 0,4 no mapeamento de geleiras do norte andino, e; Sanches (2013) que utilizou o limiar de 0,59 para delimitar a cobertura de gelo no Nevado Cololo na Bolívia.

Ao comparar o uso da razão de bandas e do NDSI aplicados aos contadores digitais para delimitação de geleiras, Paul e Hendriks (2010) concluíram que o NDSI foi o que apresentou resultados um pouco melhores, contudo, os três métodos (TM4/TM5, TM3/TM5, NDSI) podem ser recomendados para o mapeamento de geleiras. Na avaliação da acurácia feita por Albert (2002), este método obteve 93,9% de precisão.

### 3 METODOLOGIA

Neste trabalho foram usadas imagens de satélite multitemporais, juntamente com informações topográficas de modelo de terreno. Esses dados foram integrados em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), de forma a desenvolver um banco de dados que possibilitasse quantificar as variações de área, elevação e orientação das geleiras da Colômbia e da Venezuela nos últimos 30 anos (1985 – 2015).

#### 3.1 MATERIAIS

Nesse item serão descritos os dados utilizados para a obtenção dos parâmetros das geleiras.

##### 3.1.1 Imagens da série Landsat

A descrição a respeito do histórico dos satélites, sensores e suas características se baseia nas informações que estão disponíveis em USGS (2016a). A série de imagens Landsat representa a mais longa coleção de dados de sensoriamento remoto por satélite de média resolução. São quatro décadas de imageamento contínuo que estão disponíveis e proporcionam um recurso único para análises das mudanças de uso e cobertura do solo ocorridas nesse período.

O primeiro satélite da série foi lançado em 1972, chamado inicialmente de *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS), sendo o primeiro satélite lançado com o objetivo de observar os recursos naturais do planeta. No Quadro 1 estão representados os períodos de funcionamento dos satélites da série Landsat.

Os satélites Landsat 1, 2 e 3 levavam a bordo as câmeras RBV (*Return Beam Vidicon*) e MSS (*Multispectral Scanner System*). O sensor MSS possuía 4 bandas (sendo uma no verde, uma no vermelho e duas no infravermelho próximo) com resolução espacial de 80 m nesses canais. No Landsat 3 foi acrescentada uma banda no termal com 120 m de resolução espacial.

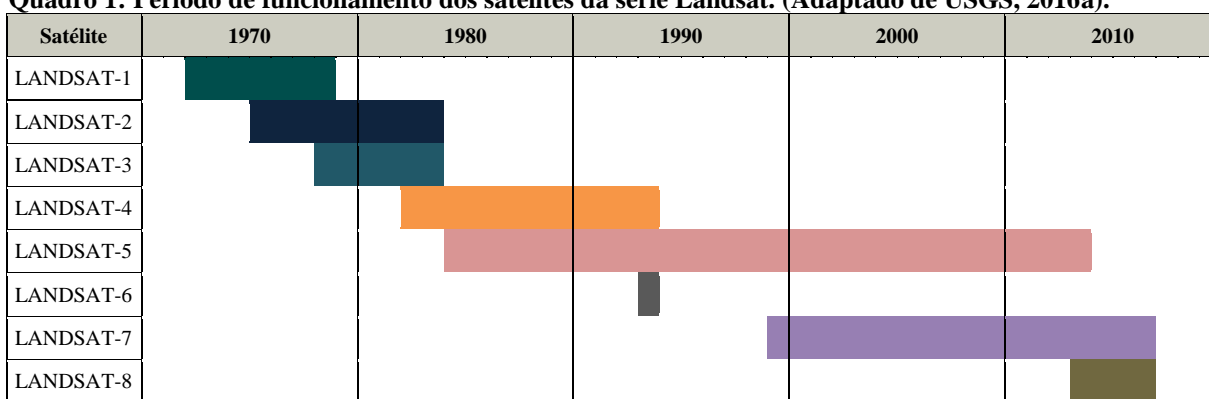
Lançado em 1982, o Landsat 4 era significativamente diferente dos 3 primeiros sensores da série: adicionalmente ao MSS, o Landsat 4 (e o Landsat 5) possuía o sensor *Thematic Mapper* (TM), o qual possuía melhor resolução espectral e espacial.

Houve falhas no lançamento do Landsat 6, o qual não chegou a entrar em órbita.

O sensor ETM+ a bordo do Landsat 7 manteve os mesmos intervalos espectrais dos antecessores, sendo que as principais mudanças foram a ampliação da resolução espacial da banda 6 (120 m para 60 m) e a inserção de uma banda pancromática com 15 m de resolução espacial.

O último lançamento da série ocorreu em 2013. O Landsat 8 opera com dois instrumentos OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), sendo que o primeiro dará continuidade aos produtos gerados pelos sensores TM e ETM+, além de incluir duas novas bandas espectrais: uma projetada para estudos de áreas costeiras e outra para detecção de nuvens do tipo cirrus.

**Quadro 1: Período de funcionamento dos satélites da série Landsat. (Adaptado de USGS, 2016a).**



Nessa dissertação foram usadas imagens dos seguintes satélites e respectivos sensores: Landsat 4 – TM, Landsat 5 – TM, Landsat 7 – ETM+ e Landsat 8 – OLI. As principais características de cada sensor estão apresentadas na Tabela 6.

**Tabela 6: Características das bandas dos sensores TM (Landsat 4 e 5), ETM (Landsat 7) e OLI/TIRS (Landsat 8). (Adaptado de USGS, 2016a).**

Banda ETM+	Comprimento de onda TM ( $\mu\text{m}$ )	Comprimento de onda ETM+ ( $\mu\text{m}$ )	Resolução das bandas dos sensores TM/ETM+ (m)	Banda OLI/TIRS	Comprimento de onda OLI/TIRS ( $\mu\text{m}$ )	Resolução das bandas dos sensores OLI/TIRS (m)
-	-	-	-	1 – Aerossol costeiro	0,43 - 0,45	30
1 – Azul	0,45 - 0,52	0,45 - 0,52	30	2 - Azul	0,45 - 0,51	30
2 – Verde	0,52 - 0,60	0,52 - 0,60	30	3 - Verde	0,53 - 0,59	30
3 – Vermelho	0,63 - 0,69	0,63 - 0,69	30	4 - Vermelho	0,64 - 0,67	30
4 – IV Próximo	0,76 - 0,90	0,77 - 0,90	30	5 - IV Próximo	0,85 - 0,88	30
5 – IV Médio	1,55 - 1,75	1,55 - 1,75	30	6 - IV Médio	1,57 - 1,65	30
6 - Termal	10,40 - 12,50	10,40 - 12,50	120/60	10 – Termal 1	10,60 – 11,19	100
				11 – Termal 2	11,50 – 12,51	100
7 – IV Médio	2,08 - 2,35	2,09 - 2,35	30	7 - IV Médio	2,11 - 2,29	30
8 - Pancromática	-	0,52 - 0,90	15	8 - Pancromática	0,50 - 0,68	15
-	-	-	-	9 - Cirrus	1,36 - 1,38	30

Os sensores TM e ETM+ possuíam resolução radiométrica de 8 bits e tempo de revisita de 16 dias. Esses sensores captam a radiação utilizando o sistema de varredura mecânica (*whiskbroom*). De acordo com Menezes e Almeida (2012) esse sistema se caracteriza pelo uso de um espelho externo para varredura de terreno e um conjunto de detectores discreto por bandas. Tem como principal característica o fato de o imageamento do terreno ser feito pixel a pixel, ao longo de uma linha de quilômetros de extensão, no sentido transversal ao deslocamento do satélite. Esse mecanismo de varredura tem como principal limitação a reduzida taxa de permanência para a medição da radiância dos alvos contidos no pixel, o que impossibilita uma alta razão sinal/ruído.

O sensor OLI passou a ter resolução radiométrica de 16 bits, sendo que o tempo de revisita também é de 16 dias. A principal mudança do OLI para os sensores anteriores ocorreu no sistema de imageamento utilizado: ao invés de varredura mecânica, o OLI usa um sistema de varredura eletrônica (*push-broom*) composto por um arranjo de mais de 7.000 detectores por banda espectral, distribuídos perpendicularmente à direção de deslocamento do satélite. Esse sistema tem maior tempo de permanência para a medida da radiância de cada pixel, resultando em um instrumento mais sensível, que produz imagens de melhor qualidade sobre a superfície da terra no que diz respeito à razão sinal/ruído (NASA, 2016).

A longa série temporal de dados dos satélites Landsat possibilita a realização de análises multitemporais da cobertura da terra. Diversos pesquisadores tem utilizado esse tipo de imagem no mapeamento de geleiras (DOZIER, 1989; HEISKANEN et al. 2002; MORRIS, POOLE e KLEIN, 2006; PODEVA e PINEDA, 2009, entre outros) e Paul & Hendriks (2010) listaram as principais aplicações de cada banda dos sensores TM e ETM+ para o mapeamento de geleiras (Quadro 2).

**Quadro 2: Principais aplicações do TM/ETM2 - Landsat para o mapeamento de geleiras. (Adaptado de Paul e Hendriks, 2010).**

Banda TM/ETM+	Aplicação
1 – Azul	Identificação de neve/gelo em áreas de sombra, mapeamento de lagos glaciais
2 – Verde	Parte do NDSI (neve) e identificação de neve/gelo em áreas de sombra
3 – Vermelho	Parte da razão de bandas, e NDVI (vegetação)
4 - IV Próximo	Parte da razão de bandas, NDVI (vegetação) e NDWI (água)

<sup>2</sup> São apresentadas as características do sensor TM/ETM, pois a maioria das imagens utilizadas foram coletadas por esses sensores. Quando se referir ao sensor OLI, são consideradas as bandas equivalentes a estas.



Banda TM/ETM+	Aplicação
5 - IV Médio	Principal banda usada na classificação automática (razão, NDSI)
6 - Termal	Alternativa a banda 5 em áreas cobertas por fina camada de poeira vulcânica
7 - IV Médio	Similar a banda 5, mas muito ruidosa em áreas de sombras
Pancromática	Delineação manual, identificação de detritos nas geleiras

As imagens utilizadas nesse trabalho são disponibilizadas gratuitamente USGS (2016b), mediante cadastro na página. Inicialmente foram definidos três requisitos para o download da imagem: ter sido obtida durante o período com as menores médias mensais de precipitação, não apresentar cobertura de nuvens na área da geleira e ter sido obtida entre os anos de 1985 e 2016.

Nas geleiras Sierra Nevada de Santa Marta, Sierra Nevada del Cocuy e Sierra Nevada de Mérida o período menos chuvoso ocorre nos meses de dezembro a março; na cordilheira central, onde está localizado o Parque Natural de los Nevados e o Nevado del Huila, há uma sazonalidade menor da precipitação, sendo que os períodos menos chuvosos ocorrem entre julho e agosto e entre dezembro e fevereiro.

Nas geleiras do norte (Sierra Nevada de Santa Marta, Sierra Nevada del Cocuy e Sierra Nevada de Mérida) foi possível obter uma boa série de dados que atendiam os requisitos listados. Contudo, nas geleiras da Cordilheira Central o número de imagens com boa qualidade que está disponível é bastante reduzido. Assim, foram ampliados os meses de busca e considerada a possibilidade de utilizar cenas em que havia alguma cobertura de nuvem, desde que essa não inviabilizasse a delimitação da geleira. Apesar disso, o número de imagens obtidas para as geleiras da Cordilheira Central foi inferior ao que se obteve para as demais geleiras, tornando inviável manter intervalos padronizados. No Tabela 7 estão listadas as imagens utilizadas para a delimitação da área de cada uma das geleiras consideradas nesse estudo.

**Tabela 7: Imagens utilizadas no estudo.**

Geleira	Data	Missão	Sensor	Órbita/ Ponto	Azimute solar	Elevação Solar	Processamento
Sierra Nevada de Santa Marta	03/06/1985	Landsat 5	TM	008/53	112,21	51,19	L1T
	23/03/1991	Landsat 5	TM	008/53	101,7	52,32	L1T
	20/12/1997	Landsat 5	TM	008/53	138,15	44,7	L1T
	28/02/2003	Landsat 7	ETM+	008/53	118,85	53,19	L1T
	22/01/2010	Landsat 5	TM	008/53	134,53	47,63	L1T
	22/12/2015	Landsat 8	OLI	008/53	144,17	48,46	L1T

Geleira	Data	Missão	Sensor	Órbita/ Ponto	Azimute solar	Elevação Solar	Processamento
Sierra Nevada del Cocuy	26/01/1985	Landsat 5	TM	007/56	124,88	46,41	L1T
		Landsat 5	TM	007/55	126,25	45,74	L1T
	16/03/1991	Landsat 5	TM	007/56	100,19	51,34	L1T
	13/12/1997	Landsat 5	TM	007/56	134,89	48,14	L1T
	04/01/2003	Landsat 7	ETM+	007/56	134,99	48,91	L1T
	14/12/2009	Landsat 5	TM	007/56	138,57	50,69	L1T
	16/01/2016	Landsat 8	OLI	007/56	134,59	51,33	L1T
Parque Natural de los Nevados (Ruiz, Santa Isabel, Tolima)	13/03/1985	Landsat 5	TM	009/57	100,54	53,27	L1T
	14/01/1987	Landsat 5	TM	009/57	125,69	44,28	L1T
	24/10/1997	Landsat 5	TM	009/57	119,72	56,96	L1G
	14/10/2002	Landsat 7	ETM+	009/57	115,9	61,23	L1T
	30/01/2016	Landsat 8	OLI	009/57	127,88	53,44	L1T
Nevado del Huila	08/09/1986	Landsat 5	TM	009/58	74,96	52,51	L1T
	24/10/1997	Landsat 5	TM	009/58	117,59	57,47	L1G
	14/10/2002	Landsat 7	ETM+	009/58	113,3	61,64	L1T
	30/01/2016	Landsat 8	OLI	009/58	126,12	54,14	L1T
Sierra Nevada de Mérida	06/01/1986	Landsat 5	TM	006/54	132,69	43,48	L1T
	20/01/1988	Landsat 4	TM	006/54	128,5	43,2	L1T
	28/12/1999	Landsat 5	TM	006/54	135,98	43,04	L1T
	31/01/2001	Landsat 5	TM	006/54	127,61	47,46	L1T
	06/01/2015	Landsat 8	OLI	006/54	140,01	49,13	L1T

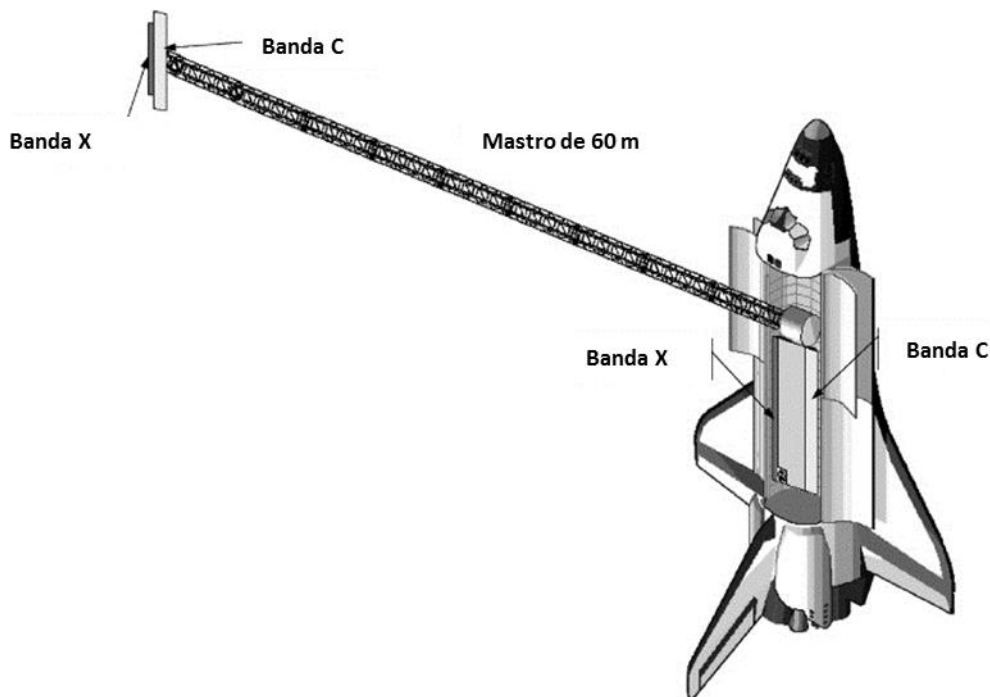
### 3.1.2 Modelo de elevação SRTM

O modelo digital de elevação do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) é um projeto de cooperação entre *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) e das agências espaciais Alemã e Italiana. Esse projeto gerou um Modelo Digital de Elevação (MDE) quase global, que recobre as áreas continentais localizadas entre 60°N e 56°S, o que corresponde a aproximadamente 80% do total de massas terrestres (NASA, 2013).

Todos os dados dessa missão foram coletados em 11 dias, pois o sistema de radar usado escaneava ativamente a superfície da terra, independente da escuridão ou cobertura de nuvens (RABUS et al., 2003).

Nessa missão foi usado o instrumento *Spaceborne Imaging Radar-C/X-Band Synthetic Aperture Radar* (SIR-C/X-SAR) a bordo do ônibus espacial *Endeavour*. Os canais principais

de transmissão e recepção das bandas C e X foram posicionados na área de carga do ônibus espacial, enquanto as antenas secundárias (receptoras) foram colocadas em um mastro retrátil de 60 m de comprimento (FARR et al., 2000) (Figura 30).



**Figura 30: Segmento espacial do SRTM, mostra os principais componentes das bandas C e X do Radar de Abertura Sintética (SAR).**  
Adaptado de Rabus (2002).

Nesse sistema, os pulsos do radar transmitidos pela antena convencional do SAR são recebidos pelo receptor SAR convencional e pelo receptor adicional instalado no mastro acoplado ao ônibus espacial. Ao combinar de forma coerente os sinais dos dois receptores, a diferença de fase entre os sinais pode ser estimada, sendo que essa diferença de fase está relacionada com a altitude do ponto (ROSEN et al., 2000).

A versão NASA 3.0 SRTM (SRTM Plus), utilizada nesse trabalho, inclui dados topográficos de fontes externas, os quais foram utilizados para preencher lacunas existentes nas versões anteriores dos dados SRTM. Os principais dados de preenchimento são provenientes do sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), o qual produz um modelo digital de elevação a partir de pares estereoscópicos. A segunda fonte de dados utilizadas no preenchimento é *USGS Global Multi-resolution Terrain Elevation Data* (GMTED2010), o qual possui menor resolução e é derivado de diversas fontes (NASA, 2013). Na Tabela 8 estão listadas as cenas do modelo de elevação utilizadas nesse trabalho, essas cenas são disponibilizadas por USGS (2016b).

**Tabela 8: Cenas do SRTMGL1 utilizadas no estudo.**

Geleira	Cena	Dimensões	Tamanho do pixel
Sierra Nevada de Santa Marta	N10W074	1° x 1°	~30 m
Sierra Nevada del Cocuy	N06W073	1° x 1°	~30 m
Parque Natural de los Nevados (Ruiz, Santa Isabel, Tolima)	N04W076	1° x 1°	~30 m
Nevado del Huila	N02W077	1° x 1°	~30 m
Sierra Nevada de Mérida	N08W071 N08W072	1° x 1° 1° x 1°	~30 m

Podem ser citados como exemplos de estudos em que dados de SRTM foram aplicados no estudo de geleiras localizadas em montanhas as publicações de Bolch e Camp (2006) e Racoviteanu et al. (2007).

### 3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos aplicados para a obtenção dos resultados desse trabalho podem ser divididos, basicamente, em duas etapas: análise das imagens da série Landsat e determinação da orientação e elevação das geleiras.

Na Figura 31 são apresentadas as etapas desenvolvidas em formato de fluxograma.

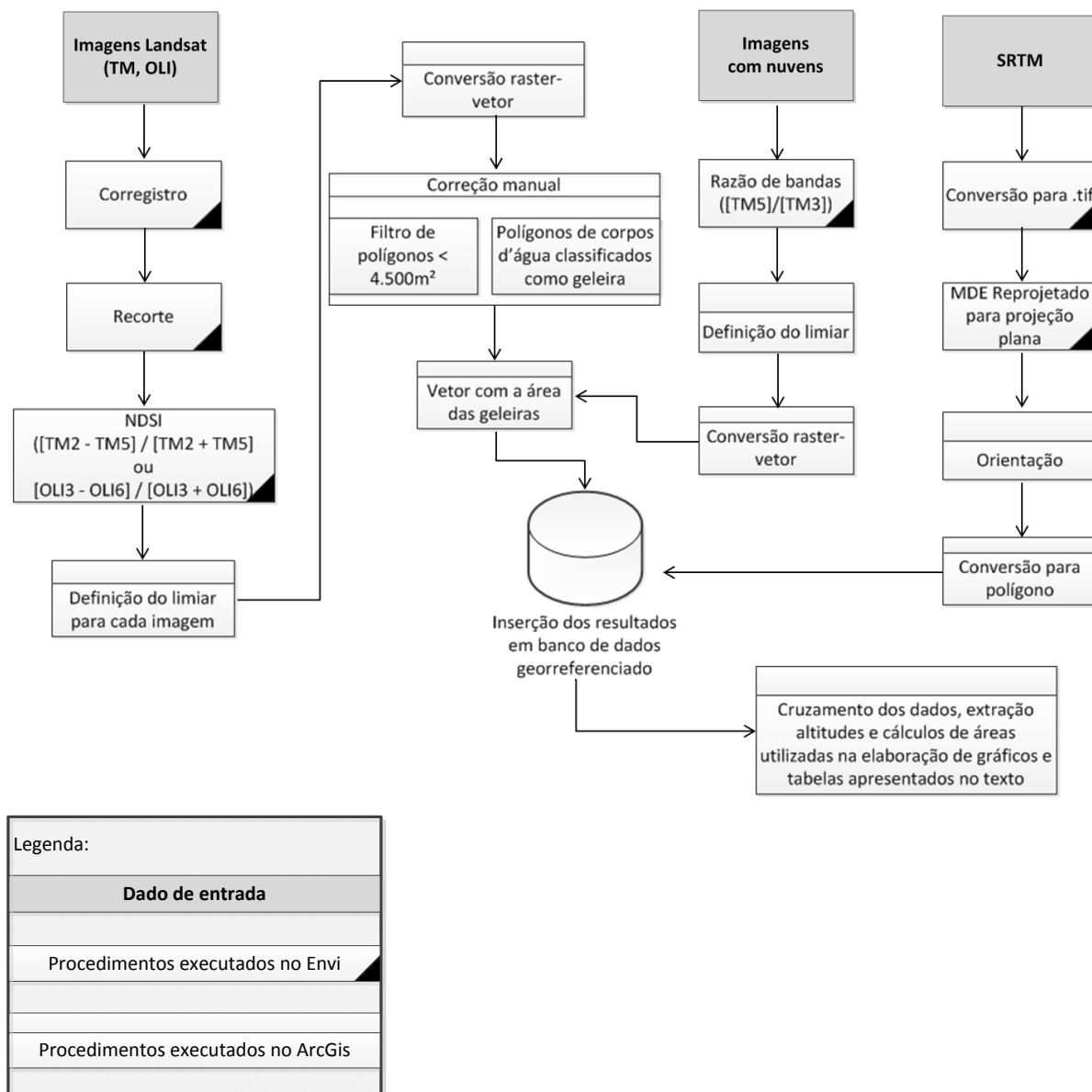


Figura 31: Fluxograma com as etapas desenvolvidas na metodologia.

### 3.2.1 Análise das imagens da série Landsat

Dentre as imagens selecionadas foram observados dois níveis de correção: L1T e L1G (Tabela 7). De acordo com USGS (2016c), a Correção Padrão de Terreno (*Standard Terrain Correction*) aplicada no nível 1T (L1T) oferece precisão radiométrica e geométrica através da incorporação de pontos de controle no terreno, enquanto emprega um Modelo Digital de Elevação (MDE) para a correção topográfica. Nas cenas onde não há pontos de controle no terreno ou MDE necessário para a correção L1T é aplicada uma correção sistemática (L1G) que proporciona precisão radiométrica e geométrica, a qual é derivada de dados coletados

pelo sensor. As cenas com esse nível de correção (L1G) não passaram por correção topográfica. Na Tabela 9 são apresentados o número de pontos de controle utilizados na correção e o erro quadrático médio em X e em Y de cada cena utilizada, dados esses que são disponibilizados nos metadados das imagens.

**Tabela 9: Resíduo médio resultante da ortorretificação das imagens Landsat informado nos metadados das imagens.**

Geleira	Data	Número de Pontos de Controle (GCPs) <sup>3</sup>	Resíduo <sup>4</sup> em Y (m)	Resíduo em X (m)
Sierra Nevada de Santa Marta	06/03/1985	79	3,6	2,64
	23/03/1991	122	3,82	2,96
	20/12/1997	159	3,22	3,68
	28/02/2003	121	3,2	3,14
	22/01/2010	157	3,46	3,33
	22/12/2015	215	5,89	6,4
Sierra Nevada del Cocuy	26/01/1985	37	3,98	3,9
	16/03/1991	108	3,62	3,32
	13/12/1997	88	4,18	3,82
	04/01/2003	189	4,25	2,27
	14/12/2009	141	3,16	2,75
	16/01/2016	316	4,37	6,42
Parque Natural de los Nevados (Ruiz, Santa Isabel, Tolima)	08/09/1986	95	3,74	3,79
	24/10/1997	-	-	-
	14/10/2002	80	3,79	3,23
	30/01/2016	75	6,98	5,54
Nevado del Huila	08/09/1986	67	4,03	3,07
	24/10/1997	-	-	-
	14/10/2002	142	5,84	3,2
	30/01/2016	95	6,62	6,55
Sierra Nevada de Mérida	06/01/1986	47	3,47	6,96
	20/01/1988	111	3,56	4,61
	28/12/1999	57	3,65	5,31
	31/01/2001	93	3,2	3,3
	06/01/2015	165	6,33	6,8

<sup>3</sup> Número de pontos de controle no solo usados na verificação do produto com correção topográfica.

<sup>4</sup> (m) medido a partir dos pontos de controle usados na correção da precisão geométrica.

A partir da análise visual das cenas selecionadas, conclui-se que seria necessário fazer o corregristo das duas imagens com correção L1G, as quais estavam bastante deslocadas em comparação com as demais. Após uma inspeção visual das cenas selecionadas, conclui-se que era necessário registrar três imagens, todas do ano de 1997, que abrangiam as geleiras Sierra Nevada del Cocuy, Parque Natural de los Nevados e Nevado del Huila. O corregristo das cenas deslocadas foi efetuado no software Envi, com geração automáticas de pontos, tendo como referência a imagem mais recente da respectiva geleira. Na Tabela 10 são apresentados os erros resultantes do corregristo realizado nas imagens com deslocamento, sendo que todas elas ficaram com um erro inferior a 1 pixel.

**Tabela 10: Erro quadrático médio (RMS) resultante do corregristo das cenas TM/Landsat-5, tendo por imagem de referência a cena OLI/Landsat da respectiva geleira.**

Geleira	Data	RMS (pixel)
Sierra Nevada del Cocuy	13/12/1997	0,44
Parque Natural de los Nevados (Ruiz, Santa Isabel, Tolima)	24/10/1997	0,71
Nevado del Huila	24/10/1997	0,45

Visando diminuir o tempo de processamento, as imagens selecionadas foram recortadas, de forma que recobrissem a geleira e uma faixa de aproximadamente 10 km de margem.

Para delimitar a área das geleiras foi aplicado o *Normalized Difference Snow Index* (NDSI) diretamente aos contadores digitais. Nesse índice são utilizadas duas bandas nas quais o alvo apresenta comportamento espectral oposto ou com características bem distintas: bandas 2 e 5 dos sensores TM e ETM+ e bandas 3 e 6 do sensor OLI, conforme as equações 1 e 2, a seguir.

$$\text{NDSI} = [\text{TM2} - \text{TM5}] / [\text{TM2} + \text{TM5}] \quad (1)$$

$$\text{NDSI} = [\text{OLI3} - \text{OLI6}] / [\text{OLI3} + \text{OLI6}] \quad (2)$$

A aplicação desse índice gerou um arquivo em formato raster, com valores entre -1 e 1. Cada imagem resultante da aplicação do Índice foi comparada com uma composição colorida em que a cobertura de gelo se destacava (TM e ETM: RGB542 e OLI: RGB653). Após essa análise, foram definidos os limiares de cada imagem, os quais variaram entre 0,4 e 0,7 nas imagens TM e ETM+ e, entre 0,25 e 0,35 nas imagens do sensor OLI.

As áreas classificadas como geleiras foram então convertidas para vetor e os polígonos com área menor que 4.500 m<sup>2</sup> (5 pixels) foram removidos por serem insignificantes no contexto considerado. Em seguida, os polígonos restantes passaram por uma nova análise visando identificar se apenas áreas de geleiras estavam demarcadas, sendo que em algumas imagens, restaram alguns polígonos em áreas cobertas por água, os quais foram selecionados e deletados manualmente.

Em algumas imagens da Cordilheira Central observou-se a ocorrência de nuvens finas sobre as geleiras. Essas imagens não puderam ser descartadas devido ao pequeno número de cenas em que não há cobertura total de nuvens.

As áreas de nuvens apresentaram valores baixos na imagem resultante da aplicação do NDSI, ou seja, para abranger as áreas de gelo com nuvens finas sobrepostas, seria necessário usar um valor de limiar muito baixo, o que levaria a uma sobre estimativa da área total. Então, optou-se por aplicar a razão de bandas TM5/TM3, pois, como a cobertura de nuvens nessas imagens não era espessa, parte da radiação é transmitida, possibilitando diferenciar as áreas de gelo e de solo. O raster resultante da aplicação da razão de bandas apresentou valores entre 0 e 5, sendo que os menores valores correspondiam a áreas somente cobertas por gelo, valores pouco superiores em áreas de geleira e nuvens finas e, valores bem mais elevados em áreas de nuvens e solo ou apenas nuvens. Assim, após inspeção visual, foi determinado um limiar que variou entre 0,55 e 0,9 nas imagens utilizadas para delimitar as áreas de gelo que estavam cobertas por nuvens finas. Esse dado foi convertido para vetor e mesclado ao vetor resultante da aplicação do NDSI, chegando-se assim ao limite da geleira.

### **3.2.2 Determinação da orientação e elevação das geleiras**

Os dados SRTM V3, que são disponibilizados pelo Earth Explorer estão em formato .hgt e em projeção geográfica, foram convertidos para o formato .tif e reprojatados para projeção plana.

Para obter a orientação do terreno nas áreas de estudo foi utilizada a ferramenta “*Aspect*” disponível no software ArcGis. Essa ferramenta identifica a orientação ou a direção da encosta, ou seja, a direção de máximo declive de uma célula em relação aos seus vizinhos.

O arquivo resultante apresenta valores angulares que variam entre 0 e 360, cujos intervalos relativos a cada ponto cardinal estão representados na Tabela 11. Às células da grade de entrada que não possuem declividade (áreas planas) é atribuído o valor -1.



**Tabela 11: Pontos cardeais e respectivos intervalos de orientação.**

Orientação	Intervalo (grau)
Norte	0-22,5
Nordeste	22,5-67,5
Leste	67,5-112,5
Sudeste	112,5-157,5
Sul	157,5-202,5
Sudoeste	202,5-247,5
Oeste	247,5-292,5
Noroeste	292,5-337,5
Norte	337,5-360

Os dados raster foram então convertidos para vetor e recortados utilizando os polígonos de área da geleira como limite, sendo determinado, dessa forma, a orientação predominante em cada período analisado.

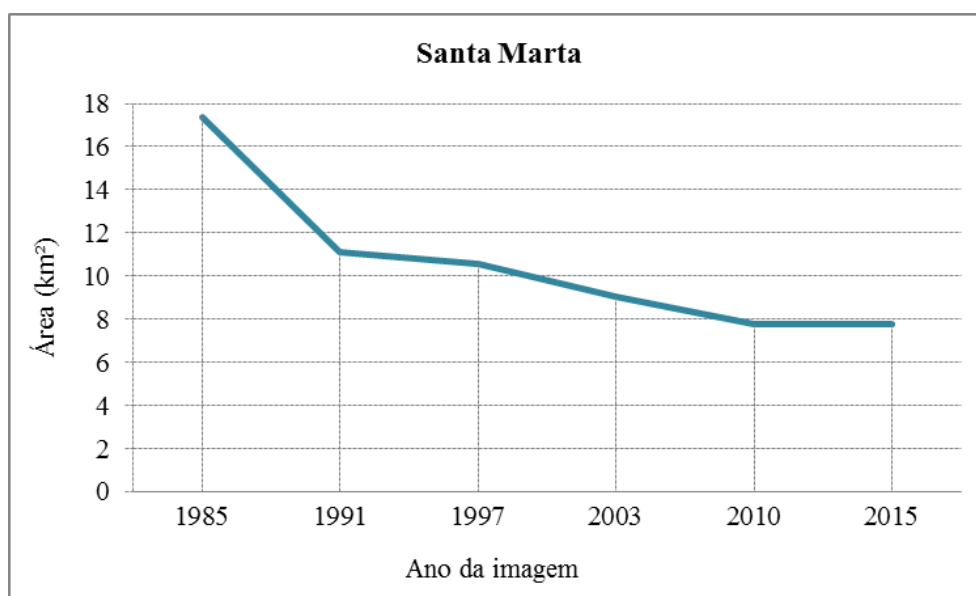
As informações sobre altimetria estão disponíveis no raster original, sendo que para a extração das mesmas, apenas foi feito um recorte do MDT pela área da geleira.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item são apresentados os resultados de variação de área, elevação e orientação das geleiras do extremo norte andino, localizadas na Colômbia e na Venezuela.

### 4.1 SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA

A área coberta com gelo na Sierra Nevada de Santa Marta apresentou retração de 55% no período analisado, passando de 17,39 km<sup>2</sup> em 1985 para 7,79 km<sup>2</sup> em 2015. Como pode ser observado na Figura 32, o período em que houve maior retração foi entre 1985 e 1991; por outro lado, entre 2010 e 2015 a área dessa geleira permaneceu estável.



**Figura 32: Variação de área na Sierra Nevada de Santa Marta.**

Os resultados obtidos nesse estudo, indicando retração da Sierra Nevada de Santa Marta, condizem com o que tem sido observado por diversos autores desde o fim da Pequena Idade do Gelo (PIG). De acordo com levantamento de Ceballos et al. (2006), entre 1850 e 2002, a Sierra Nevada de Santa Marta perdeu 90% da área de gelo. Ceballos e Tobon (2007) dividiram a perda de área desde o fim da PIG até a segunda metade da década de 1950 e da segunda metade da década de 1950 até o começo dos anos 2000, de acordo com esse estudo, a Sierra Nevada de Santa Marta perdeu 76% da área no primeiro período (~106 anos) e 60% no segundo período (~45 anos). Ao comparar a área com gelo entre os anos 1989 e 2007, Poveda e Pineda (2009) concluíram que houve retração de 41% no período.

De acordo com dados de SRTM, essa serra chega a 5.696 m e, como pode ser observado na Figura 33, possui formato alongado no sentido oeste-leste.

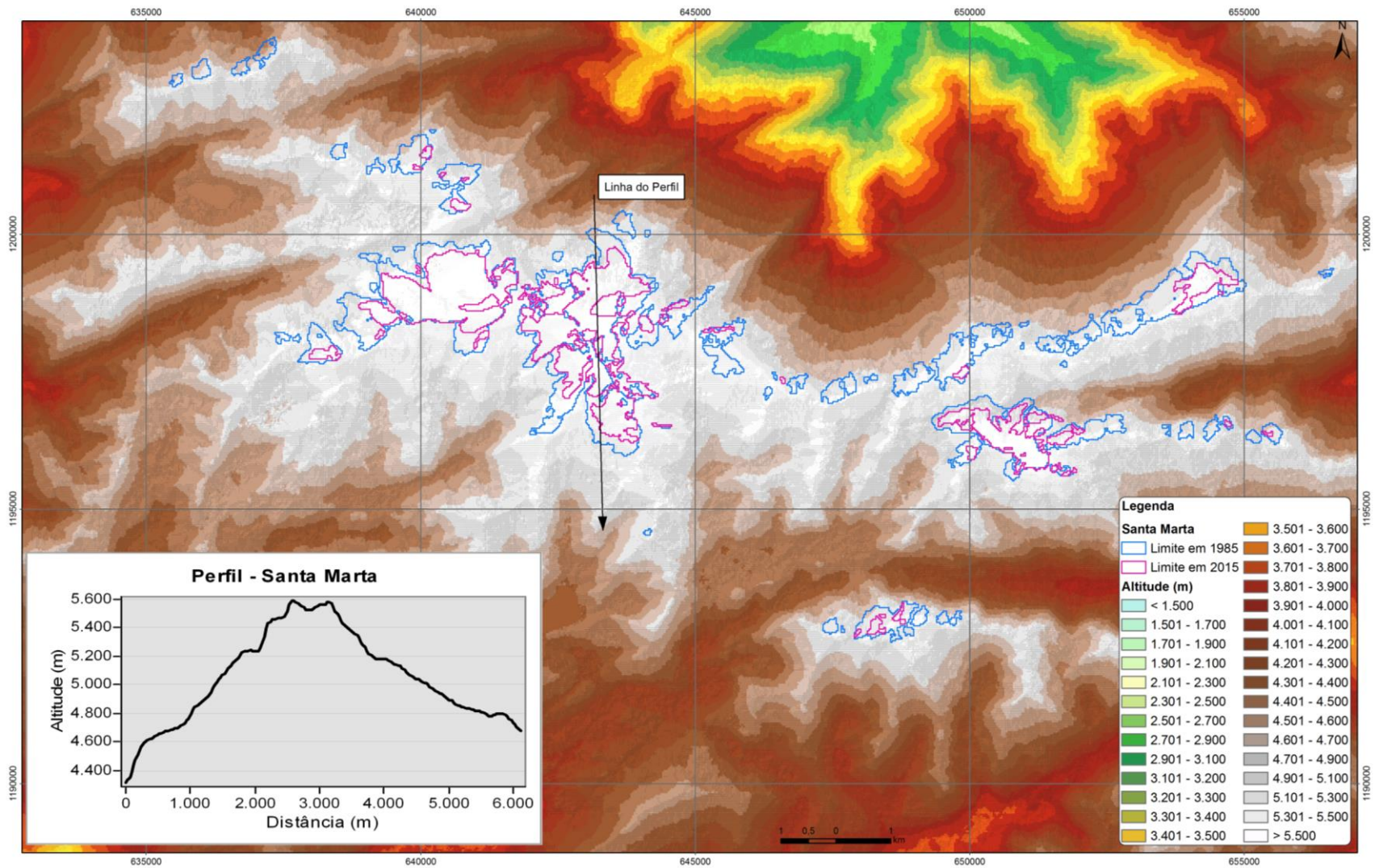


Figura 33: Altimetria e perfil topográfico da Sierra Nevada de Santa Marta.

De acordo com IDEAM (2000) a acumulação de gelo em determinada direção geralmente está relacionada a condições climáticas favoráveis à formação de gelo e, conseqüente alimentação da geleira, ou a condições topográficas que favorecem a acumulação.

Como pode ser observado no perfil elaborado a partir de dados SRTM e apresentado na Figura 33, as declividades da vertente norte são um pouco maiores que as declividades da face sul, sendo mais propício à acumulação de gelo. Em uma análise das altitudes da frente da geleira anterior e posterior a 1958, Hoyos-Patiño (1998) observou que a perda de massa mais acentuada naquele período ocorreu nas encostas voltadas para o sul e abaixo dos 5.100 m de altitude.

Atualmente, a área coberta por gelo na Sierra Nevada de Santa Marta está concentrada nos setores norte e noroeste (Figura 34). Foi nesses dois setores em que ocorreu maior retração da área da geleira, com redução superior a 60% da área durante o período analisado, apesar disso, as maiores áreas de geleira dessa serra ainda estão localizados nessas vertentes. Os setores orientados para leste e nordeste são os que apresentaram os menores percentuais de variação no período, tendo apresentado um leve aumento entre os anos de 2010 e 2015.

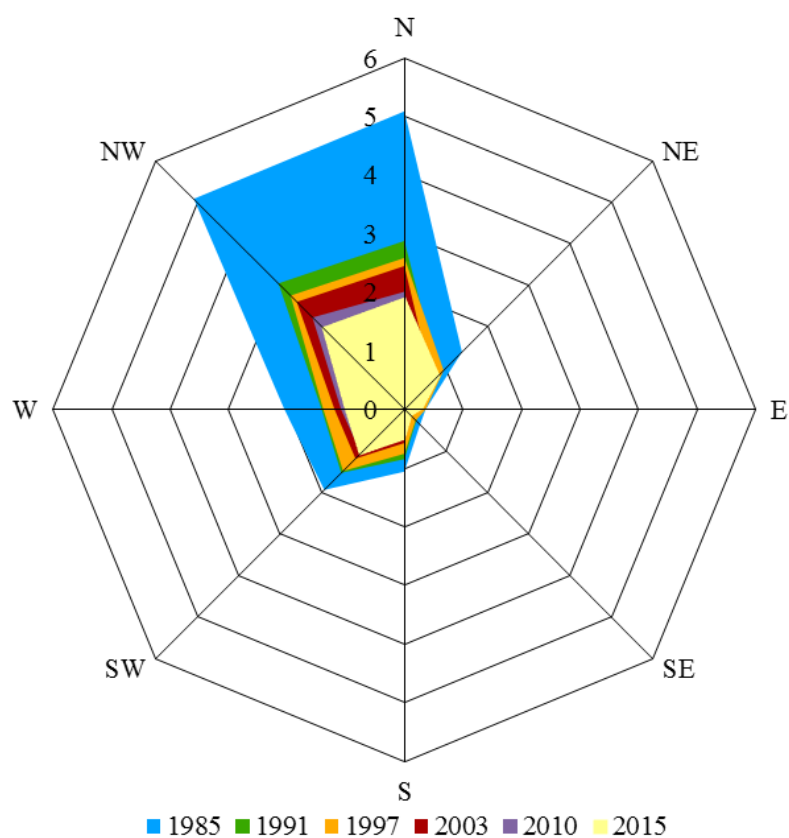


Figura 34: Gráfico da área da geleira por orientação.

Quando considerados os dados de precipitação das estações próximas ao Nevado Santa Marta (Figura 8), observa-se que entre as cinco estações pluviométricas selecionadas, as que estão localizadas nas porções norte e noroeste são as que registram os maiores valores médios anuais, coincidindo com a direção em que há maior cobertura de gelo.

Das cinco estações com dados médios de precipitação entre 1981-2010, apenas uma possui dados das médias do período anterior (1971-2000). Na estação San Lorenzo, localizada a noroeste da geleira, a precipitação média anual foi 5,73% maior no período 1981-2010 do que no período 1971-2000. Nessa estação, houve aumento das temperaturas médias e médias máximas anuais, bem como, da média de horas de brilho solar diário no período mais recente.

Na Figura 35 estão representadas as elevações mínimas (em m) das áreas cobertas por gelo, de acordo com a orientação. Observa-se que houve retração em direção às cotas mais elevadas em todas as direções, sendo que as variações mais acentuadas ocorreram nos setores oeste (330 m) e noroeste (213 m). Em 1985 o término das frentes glaciais chegava até a cota de 4.442 m (noroeste), enquanto em 2015 a cota mínima observada foi de 4.655 m (noroeste). Ou seja, em consequência da redução da área, a altitude mínima onde são encontradas áreas com gelo está aumentando. Contudo, além da perda de gelo nos limites inferiores da geleira, também está ocorrendo retração em áreas de topo, o que causa a fragmentação das massas gelo.

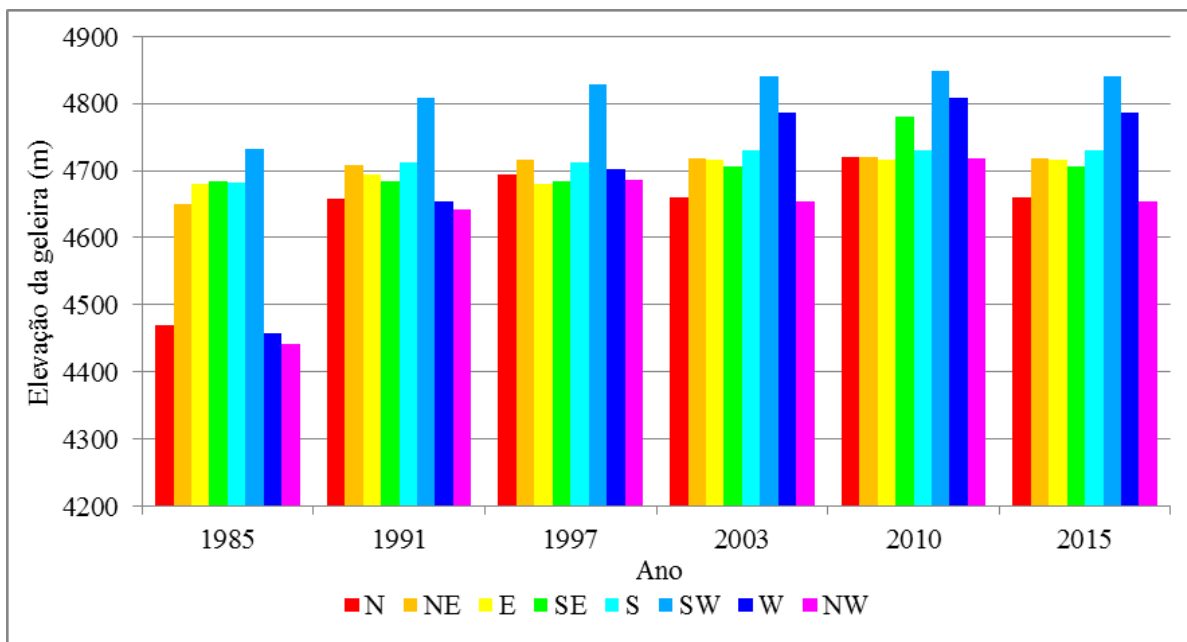
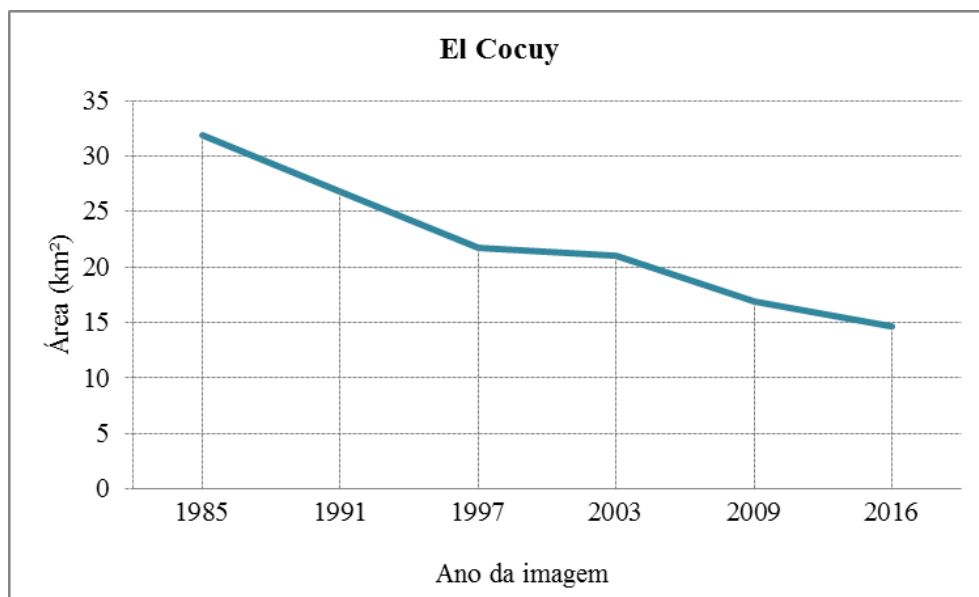


Figura 35: Gráfico das elevações mínimas da geleira, de acordo com a orientação.

## 4.2 SIERRA NEVADA DEL COCUY

A geleira da Sierra Nevada del Cocuy é a área glacial mais extensa da Colômbia, essa geleira passou de 31,93 km<sup>2</sup> em 1985 para 14,63 km<sup>2</sup> em 2016, o que representa uma redução de 54%. Como pode ser observado na Figura 36, a retração mais acentuada ocorreu entre 1985 e 1997, durante o qual essa geleira perdeu 32% da área.



**Figura 36: Variação de área na Sierra Nevada del Cocuy.**

A retração da área da Sierra Nevada del Cocuy também foi observada em estudos anteriores. Segundo Ceballos et al. (2006), desde 1850 até 2003, essa geleira perdeu 86% da área. Em estudo que analisa as variações ocorridas em período mais recente (1989 e 2007), Poveda e Pineda (2009) observaram que houve retração de 41% da área entre os anos analisados.

De acordo com dados de balanço de massa obtidos pelo IDEAM (2012) no pico Ritabuca Blanco, entre 2009 e 2011, houve um aparente equilíbrio durante os anos 2009 e 2011, enquanto que, em 2010, as perdas foram elevadas; esse comportamento se deve à influência do fenômeno El Niño sobre as principais variáveis meteorológicas que regulam a dinâmica da geleira (IDEAM, 2012).

A Sierra Nevada del Cocuy possui direção norte-sul, sendo que a altitude máxima é de 5.343 m (Figura 37).

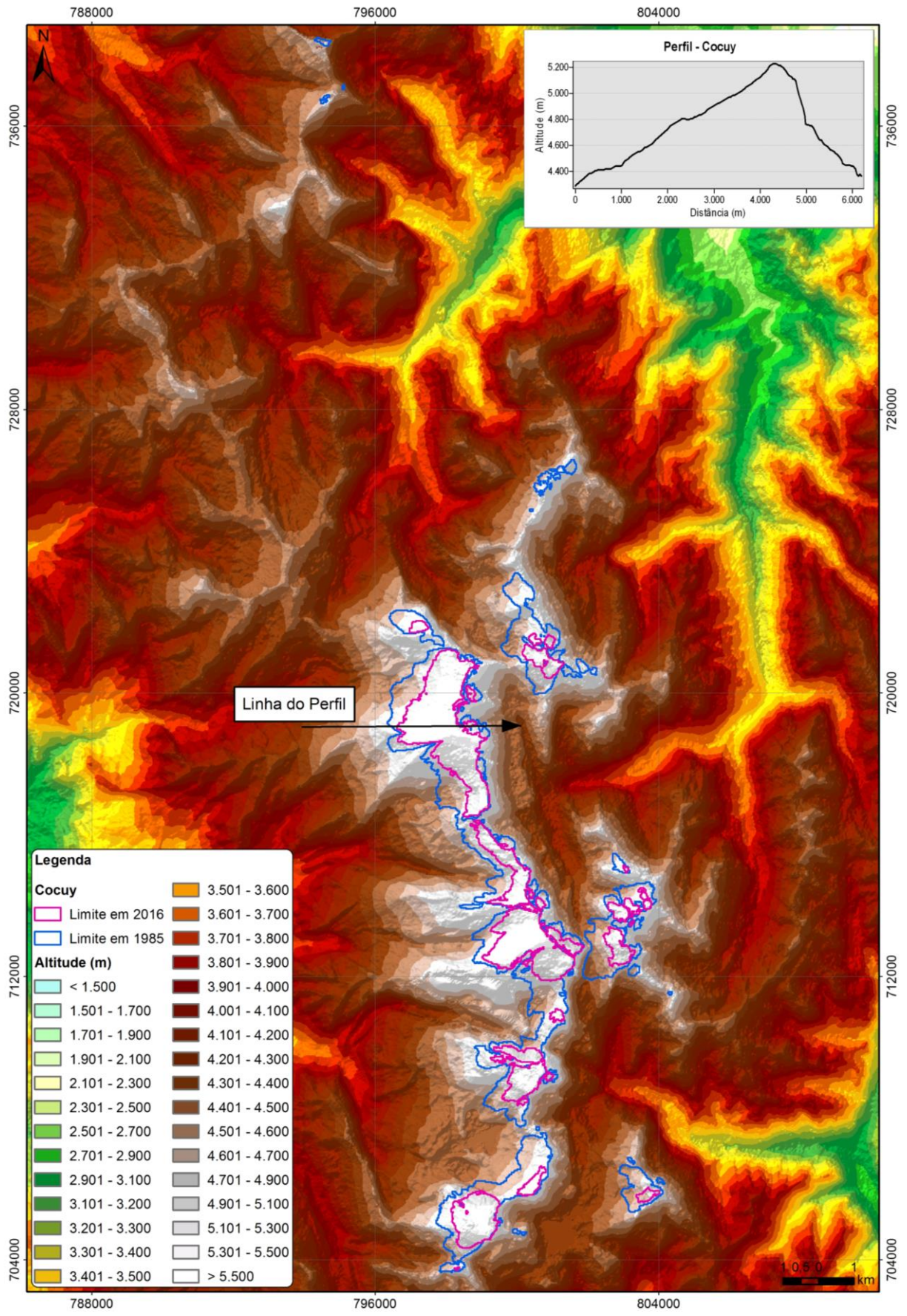
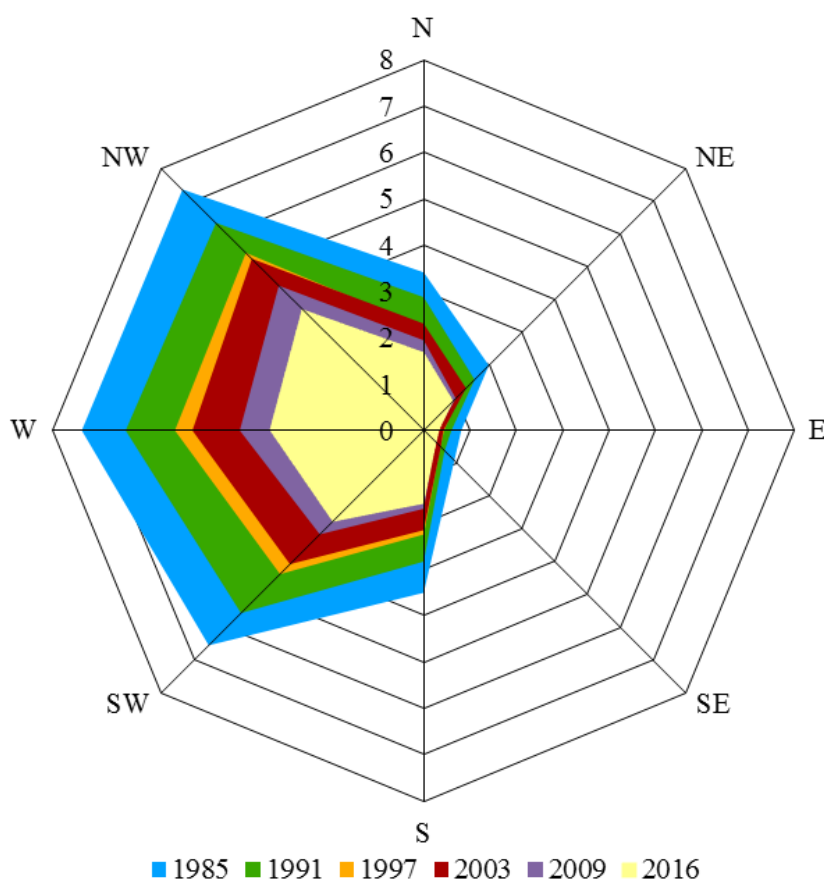


Figura 37: Altimetria e perfil topográfico da Sierra Nevada del Cocuy.

As geleiras dessa serra estão, em sua maioria, localizadas nos setores noroeste, oeste e sudoeste (Figura 38). Essa distribuição tem como causa a situação topográfica da serra, que possui vertentes escarpadas a leste e uma inclinação bem mais suave para oeste (Figura 37), fato este que possibilita a acumulação do gelo, mesmo na vertente com os menores valores de precipitação (Figura 9).

Os setores onde ocorreu maior retração no período analisado foram leste e sudeste, nos quais a perda de área foi superior a 60%, enquanto o setor noroeste foi o que apresentou menor variação no período.



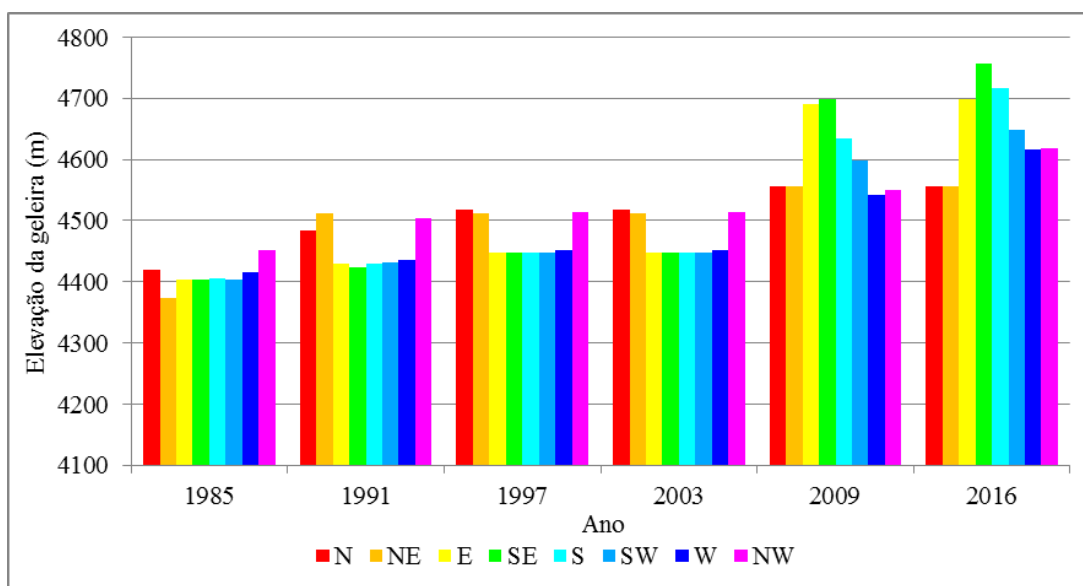
**Figura 38: Gráfico da área da geleira por orientação.**

As médias da precipitação anual apresentaram comportamento oposto nas estações meteorológicas analisadas. Enquanto no oeste a média anual de precipitação entre 1981-2010 foi 58 mm inferior ao período 1971-2000, na estação localizada ao sul da geleira, houve um aumento de 47 mm na média anual do período mais recente. No que se refere ao comportamento das temperaturas, destaca-se o aumento nas médias máximas, ocorrido na estação localizada a oeste da geleira, e o aumento das médias mínimas na estação localizada a



sul. Quanto a media de horas de brilho solar diário, o aumento foi mais acentuado na estação Sierra Nevad Cocuy, que está a oeste da geleira.

Houve retração das frentes de geleira em direção às cotas mais elevadas em todas as direções (Figura 39). As variações mais acentuadas ocorreram nas vertentes voltadas para sudeste (354 m) e sul (310 m), enquanto as áreas voltadas para o norte foram as que variaram menos no período (136 m). Em 1985, a cota mais baixa com geleira mapeada era 4.374 m, na direção nordeste da geleira e, em 2016, esse valor chegou a 4.556 m nas direções norte e nordeste.



**Figura 39: Gráfico das elevações mínimas da geleira, de acordo com a orientação.**

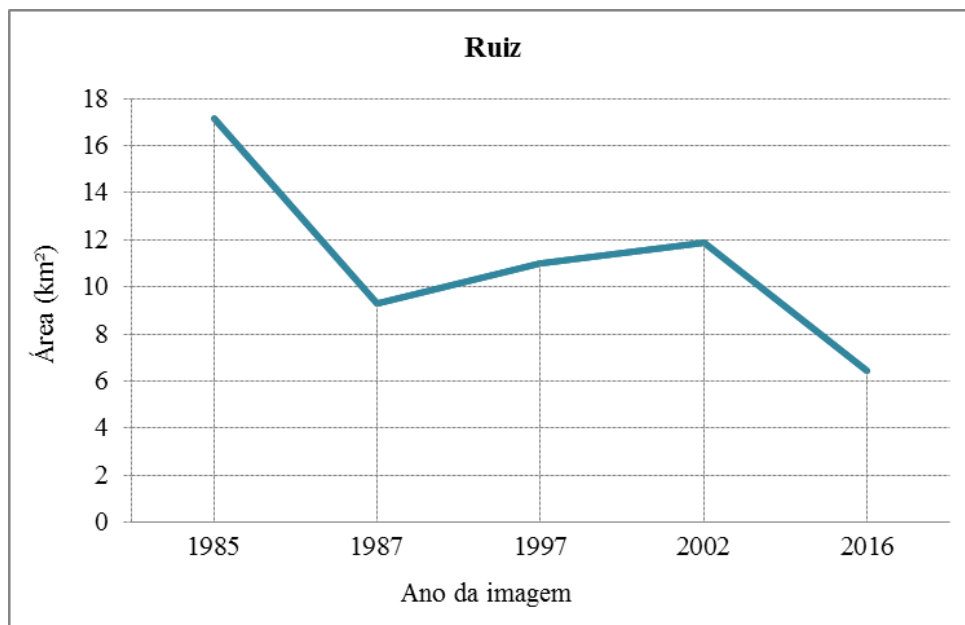
O IDEAM monitora a variação da frente da geleira em 11 pontos distribuídos pela Sierra Nevada del Cocuy desde o ano de 1986. De acordo com esse monitoramento, o maior retrocesso entre 1986 e 2011 foi de 610 m, com uma velocidade média de retração de 20 a 25 m/ano (IDEAM, 2012).

#### 4.3 NEVADO DEL RUIZ

A área coberta com gelo no vulcão Nevado del Ruiz passou de 17,15 km<sup>2</sup> em 1985 para 6,47 km<sup>2</sup> em 2016, o que corresponde a uma redução de 62 % da área. Como pode ser observado na Figura 40, houve redução acentuada entre 1985 e 1987 e entre 2002 e 2016.

Além dos fatores externos que têm influenciado na retração do Nevado del Ruiz, a atividade vulcânica também têm acelerado a fusão dessa geleira. Durante o período analisado ocorreu uma erupção no vulcão Ruiz em novembro de 1985 (IDEAM, 2000). Conforme

gráfico da Figura 40, verifica-se que nos anos seguintes à erupção, a geleira recuperou parte da área perdida em 1985, contudo, entre os anos de 2002 e 2016 o Nevado del Ruiz voltou a apresentar retração.



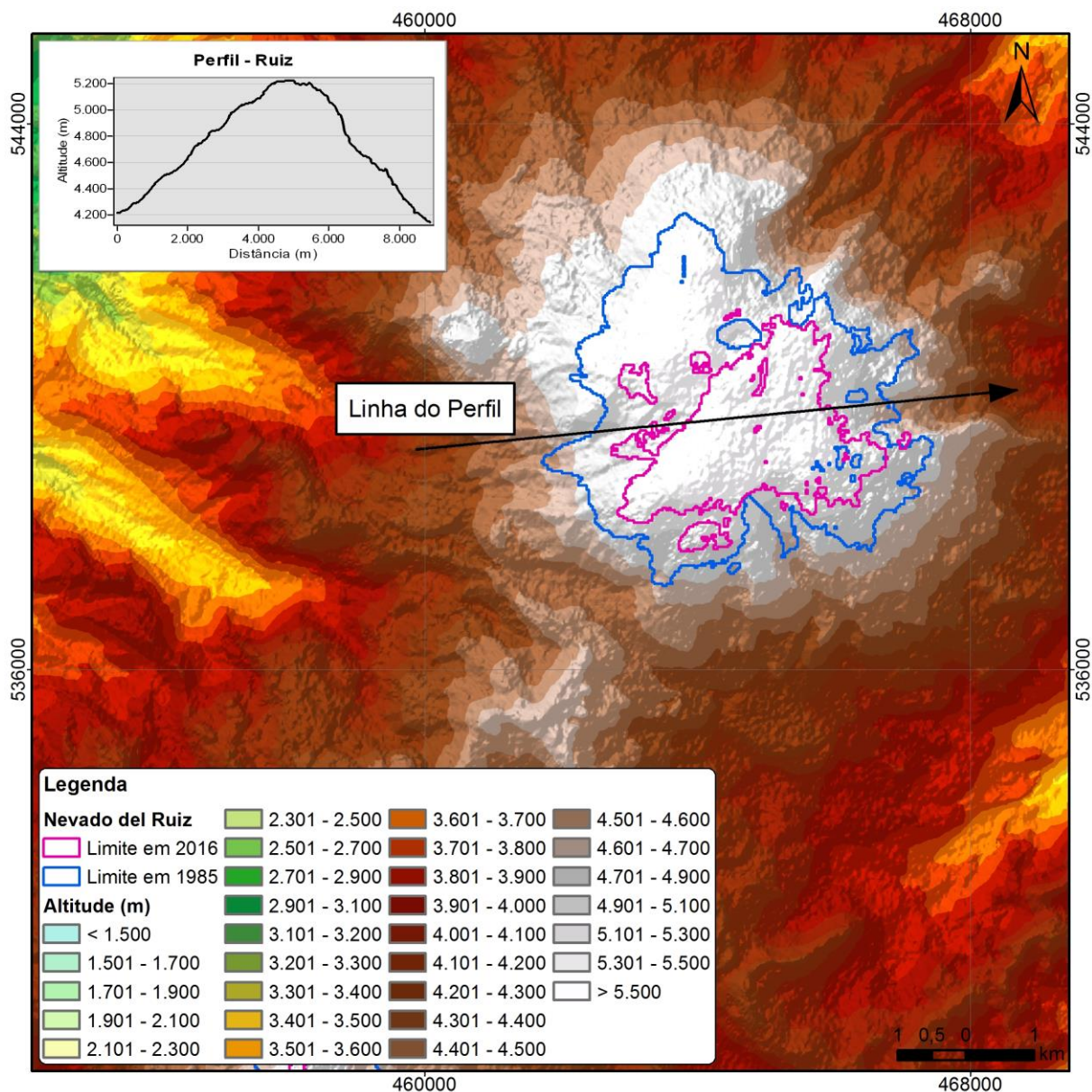
**Figura 40: Variação de área no Nevado del Ruiz.**

Tanto o clima quanto a atividade vulcânica tem induzido a mudanças no tamanho do Nevado del Ruiz. Depois da Pequena Idade Glacial, há registro de atividades vulcânicas no local nos anos 1845, 1934, 1984-1990 (IDEAM, 2000). Além disso, de acordo com Poveda e Pineda (2009), atualmente o Nevado del Ruiz exibe atividade vulcânica de baixo nível, o que aumenta o processo de aquecimento e perda glacial.

Entre 1850 e 2002, a perda de área no Nevado del Ruiz foi de 78% (POVEDA et al., 2006). Segundo IDEAM (2000), entre 1850 e o início da atividade vulcânica de 1985, a taxa média anual de perda de área nesse Nevado era de 0,5%; durante a maior atividade vulcânica, apresentada em finais de 1985, o Ruiz perdeu aproximadamente 10% da sua massa e, posteriormente as perdas médias anuais tem sido de 5%.

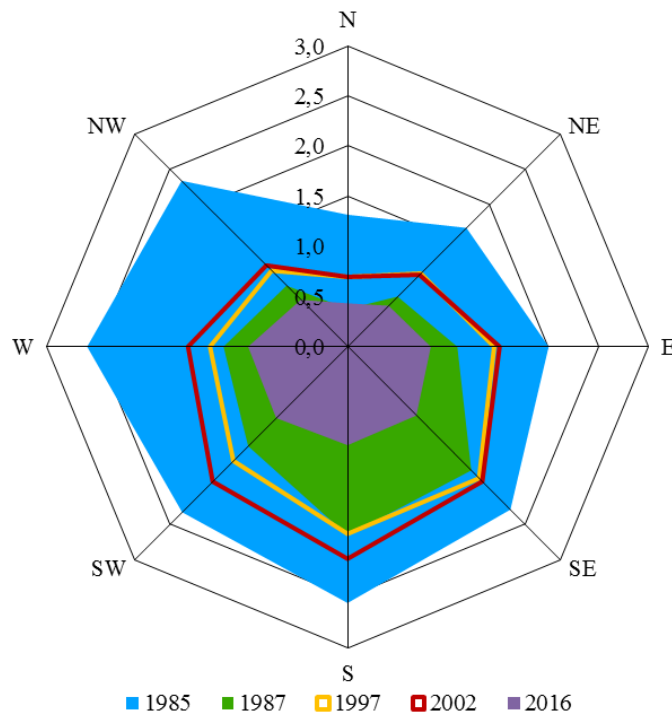
No que se refere à variação das condições climáticas nas proximidades do Ruiz, destaca-se uma pequena redução da média anual de precipitação, aumento das temperaturas médias mínimas anuais e pequena variação na média de horas de brilho solar diário no período 1981-2010, quando comparado às médias do período 1971-2000.

A área coberta com gelo ocupa o cume do vulcão Ruiz, atingindo elevação de 5.289 m (Figura 41).



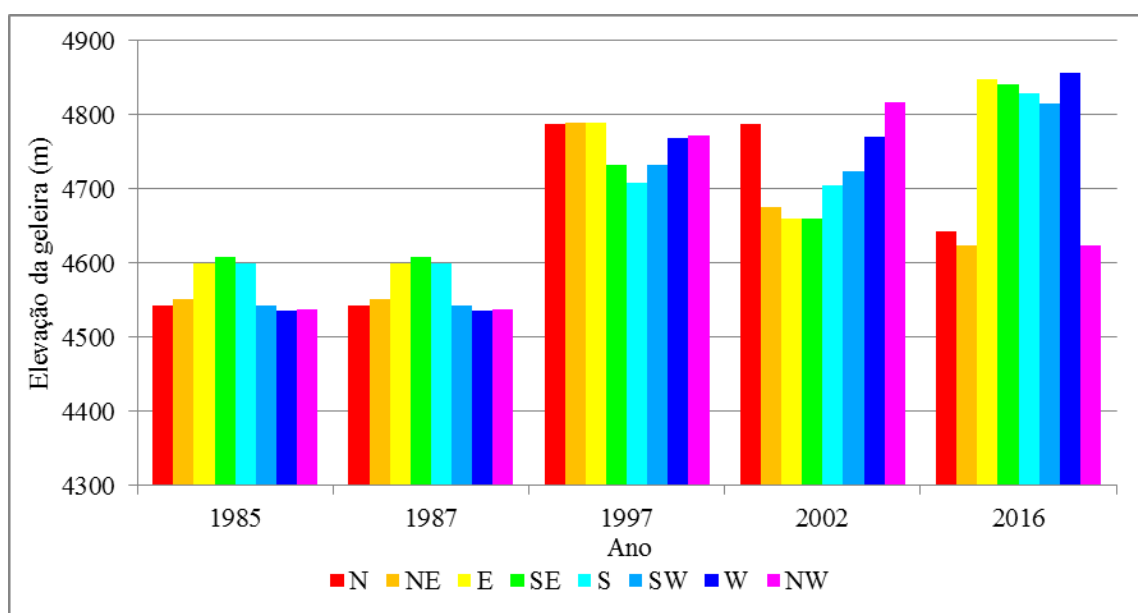
**Figura 41: Altimetria e perfil topográfico do Nevado del Ruiz.**

Os setores onde estavam concentradas as maiores áreas no início do estudo eram oeste e sul (Figura 42). Ao analisar a topografia dessa geleira, observa-se que não há grandes diferenças de declividade entre as vertentes, havendo condições topográficas para o acúmulo de gelo em todas as direções. As vertentes voltadas para norte e noroeste foram as mais impactadas pela erupção de 1985, e também foram as tiveram as maiores reduções durante todo o período analisado: perda de 71% da área voltada para norte e de 63% da área voltada para noroeste.



**Figura 42: Gráfico da área da geleira por orientação.**

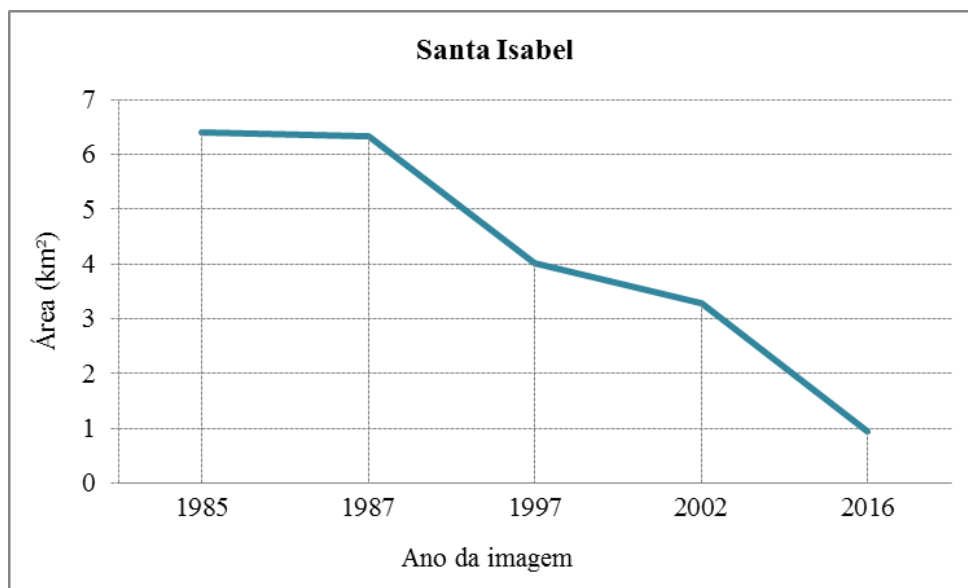
Houve retração e, conseqüentemente, elevação das áreas das frentes de geleira em todos as direções do Nevado del Ruiz, sendo que a maior elevação pode ser observada nas áreas voltadas para oeste – 320 m (Figura 43). Em 1985, as áreas de frente da geleira chegavam a uma altitude de 4.536 m (oeste), enquanto em 2016, as frentes de geleira com menor elevação passaram para 4.623 m e possuíam direção noroeste.



**Figura 43: Gráfico das elevações mínimas da geleira, de acordo com a orientação.**

#### 4.4 NEVADO SANTA ISABEL

O nevado de Santa Isabel apresentou perda acentuada de área no período analisado. Essa geleira passou de 6,40 km<sup>2</sup> em 1985 para 0,96 km<sup>2</sup> em 2016, o que representa um encolhimento de 85% (Figura 44). Essa retração levou à elevação das frentes da geleira nas menores altitudes, mas também ao derretimento de gelo nas áreas mais elevadas desse vulcão, fato esse que levou à fragmentação da massa de gelo.



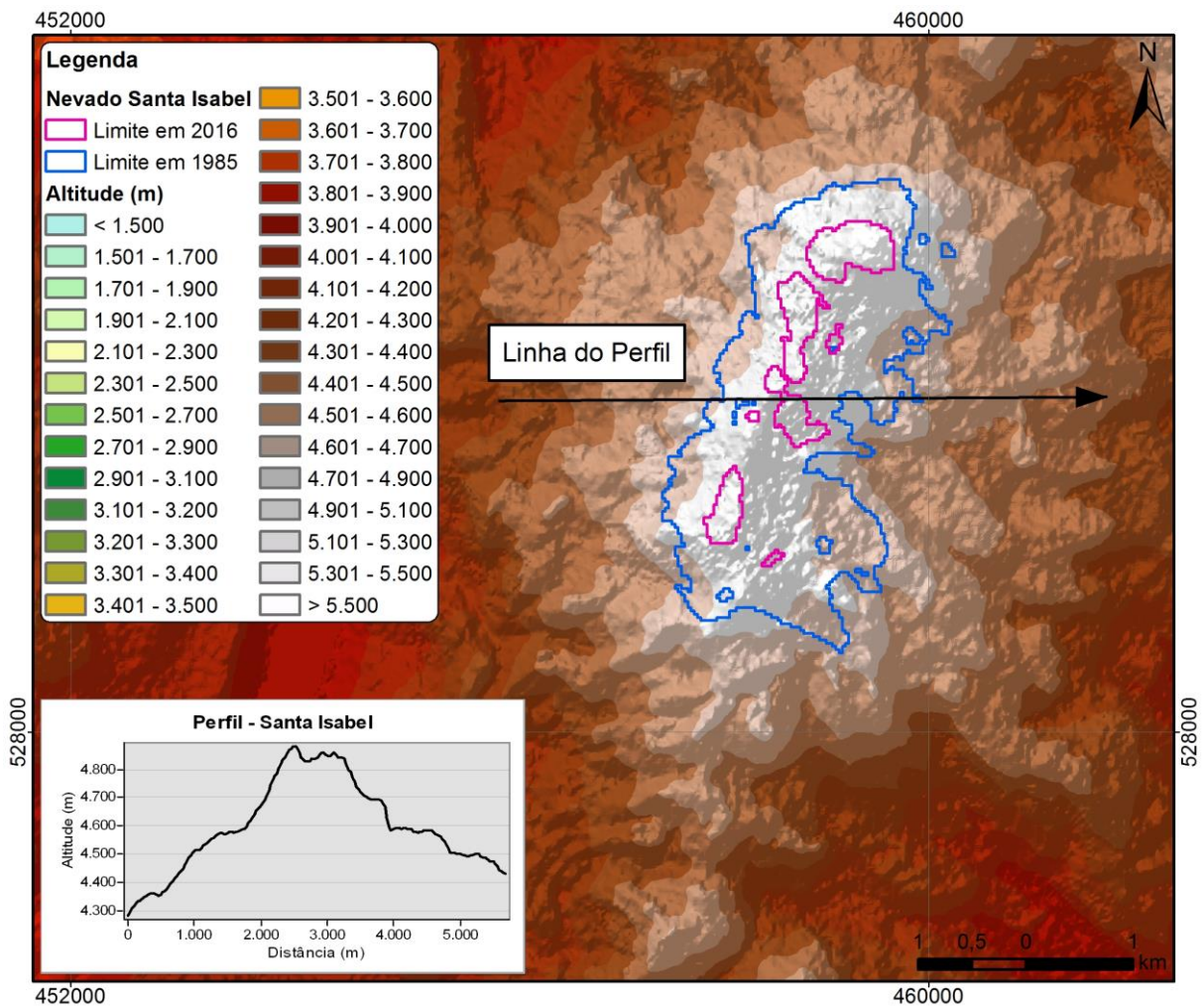
**Figura 44: Variação de área no Nevado Santa Isabel.**

Entre 1850 e 2002, a área glacial do Nevado Santa Isabel diminuiu 88% (CEBALLOS et al. 2006); já, entre 1989 e 2004, Podeva e Pineda (2009) estimaram que a retração dessa geleira foi de 49%. Além da perda de área, a perda de espessura tem variado de 2 a 3 m por ano, sendo que as perdas de espessura, para o período 1959-1987, variaram entre 20 e 70 m nas bordas e entre 10 e 20 m na parte alta (IDEAM, 2000). Em estudo sobre a situação mais recente da espessura do gelo nesse Nevado, observou-se que espessura média na geleira foi de 46,0 m em 2008 e de 40,5 m em 2010 (IDEAM, 2012).

Segundo Ceballos et al. (2006), efeitos de borda e escala se tornam efetivos quando a geleira atinge um tamanho crítico e, nesse estudo, sugere-se que o Nevado de Santa Isabel atingiu a dimensão crítica para esses efeitos na década de 1990. Além disso, com a perda de gelo em partes do topo, o aquecimento das rochas do entorno pela radiação solar, pode implicar em advecção local do ar quente e isso pode aumentar o fluxo de calor sensível.

IDEAM (2012) disponibilizou dados do glaciário Conejeras, entre 2006 e 2011, segundo esse estudo, o balanço de massa glacial calculado no Nevado Santa Isabel mostra uma tendência de perda de massa durante o período de observação. Ressalta-se que apesar de ter ocorrido aumentos de precipitação, gerados pela influência de fenômenos ENSO (*El Niño Southern Oscillation*), que caracterizaram os anos 2008 e 2011, a tendência a fusão glacial se manteve, embora com reduções em suas perdas anuais nesses momentos.

Essa geleira está orientada no sentido sudoeste-nordeste e tem altitude máxima de 4.947 m (Figura 45).

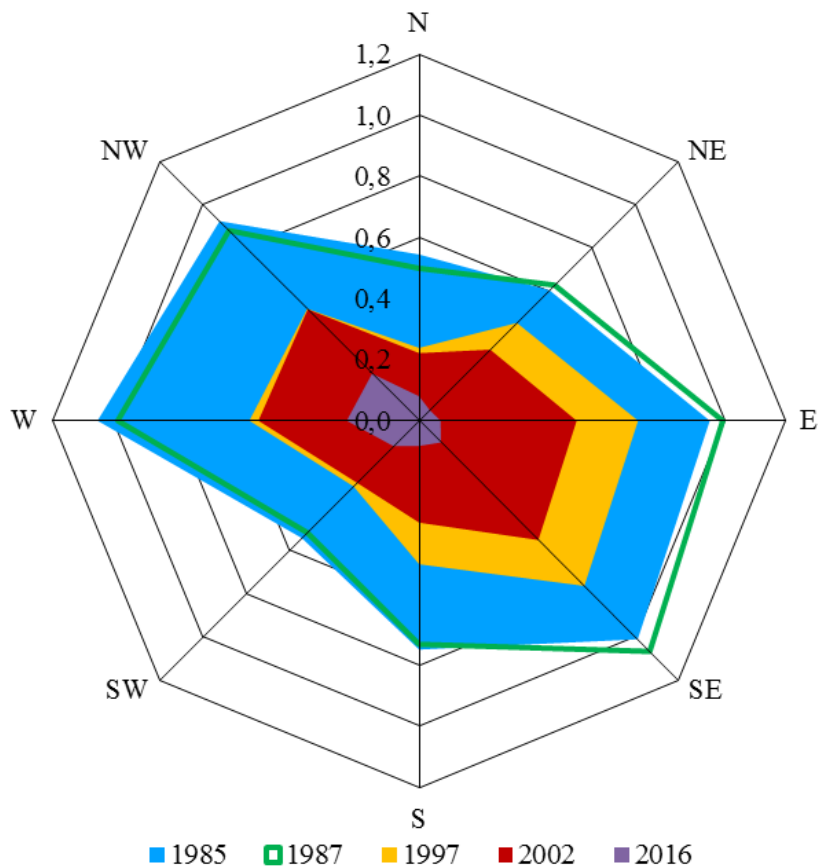


**Figura 45: Altimetria e perfil topográfico do Nevado Santa Isabel.**

Em 1985 as maiores concentração de áreas cobertas por gelo estavam voltadas para oeste, sudeste e leste. De acordo com IDEAM (2000), as atividades recentes do vulcão do Ruiz aceleraram a fusão no Santa Isabel devido à queda de cinzas e pequenos fragmentos vulcânicos, os quais levam à diminuição do albedo, além disso, a ocorrência de atividade

vulcânica superficial poderia estar acelerando a fusão no flanco oriental dessa geleira. Durante os anos estudados, os setores da borda leste (leste, nordeste e sudeste) foram os que apresentaram as maiores retrações, com perdas de área superiores a 90% (Figura 46).

Em estudo no qual analisa a relação entre variações do brilho solar e as alterações no tamanho do Nevado Santa Isabel, Euscátegui (2002), deduziu que o brilho solar possui participação importante no processo de fusão da vertente ocidental dessa geleira.



**Figura 46: Gráfico da área da geleira por orientação.**

A retração de áreas que ocorreu em todas as direções se reflete na variação da elevação das frentes de geleira, a qual ocorreu de forma quase uniforme em todos os setores (Figura 47). Em 1985, as áreas com gelo chegavam a 4.546 m no leste e sudeste, enquanto em 2016, os setores nordeste e leste são os que possuem gelo nas menores altitudes, 4.715 m.

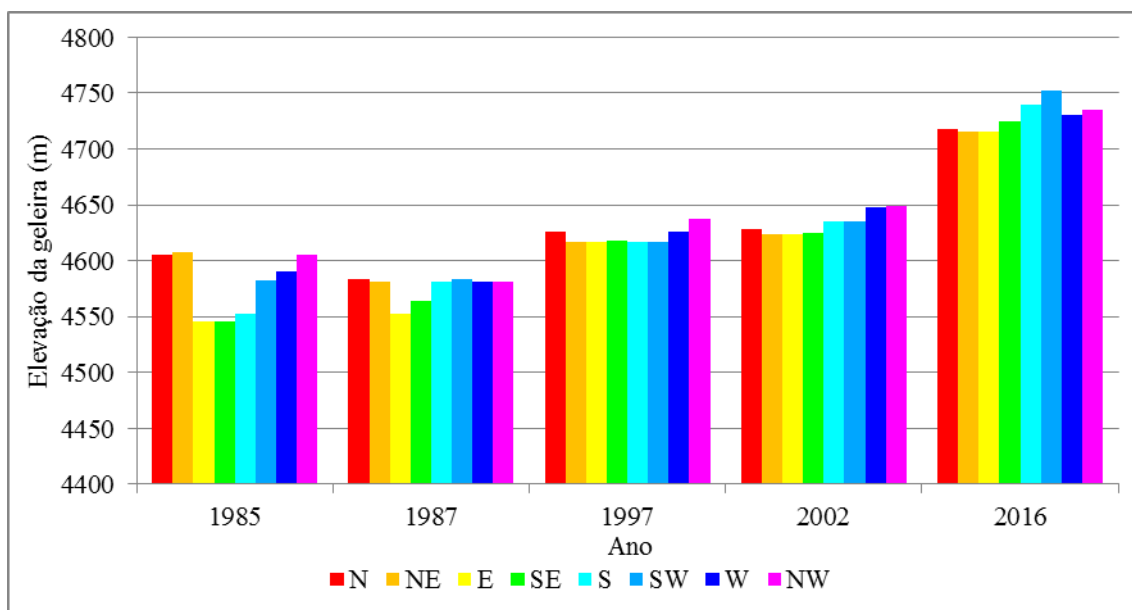


Figura 47: Gráfico das elevações mínimas da geleira, de acordo com a orientação.

#### 4.5 NEVADO DEL TOLIMA

O vulcão Nevado del Tolima é a menor geleira da Colômbia devido à condição estrutural (tamanho) do cone vulcânico onde está localizado (IDEAM, 2000). Esse vulcão possui declividade elevada em torno do cone onde está localizada a geleira e alcança 5.218 m de altitude (Figura 49). A geleira possuía área de 1,89 km<sup>2</sup> em 1985 e passou para 0,58 km<sup>2</sup> em 2016, o que corresponde a uma redução de 69% do total (Figura 48).

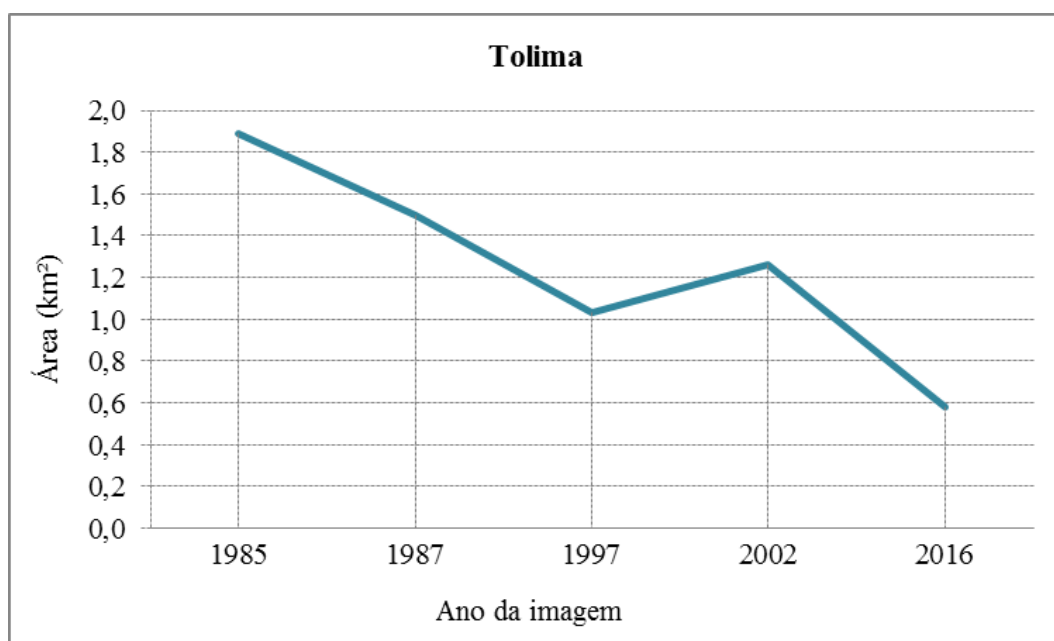
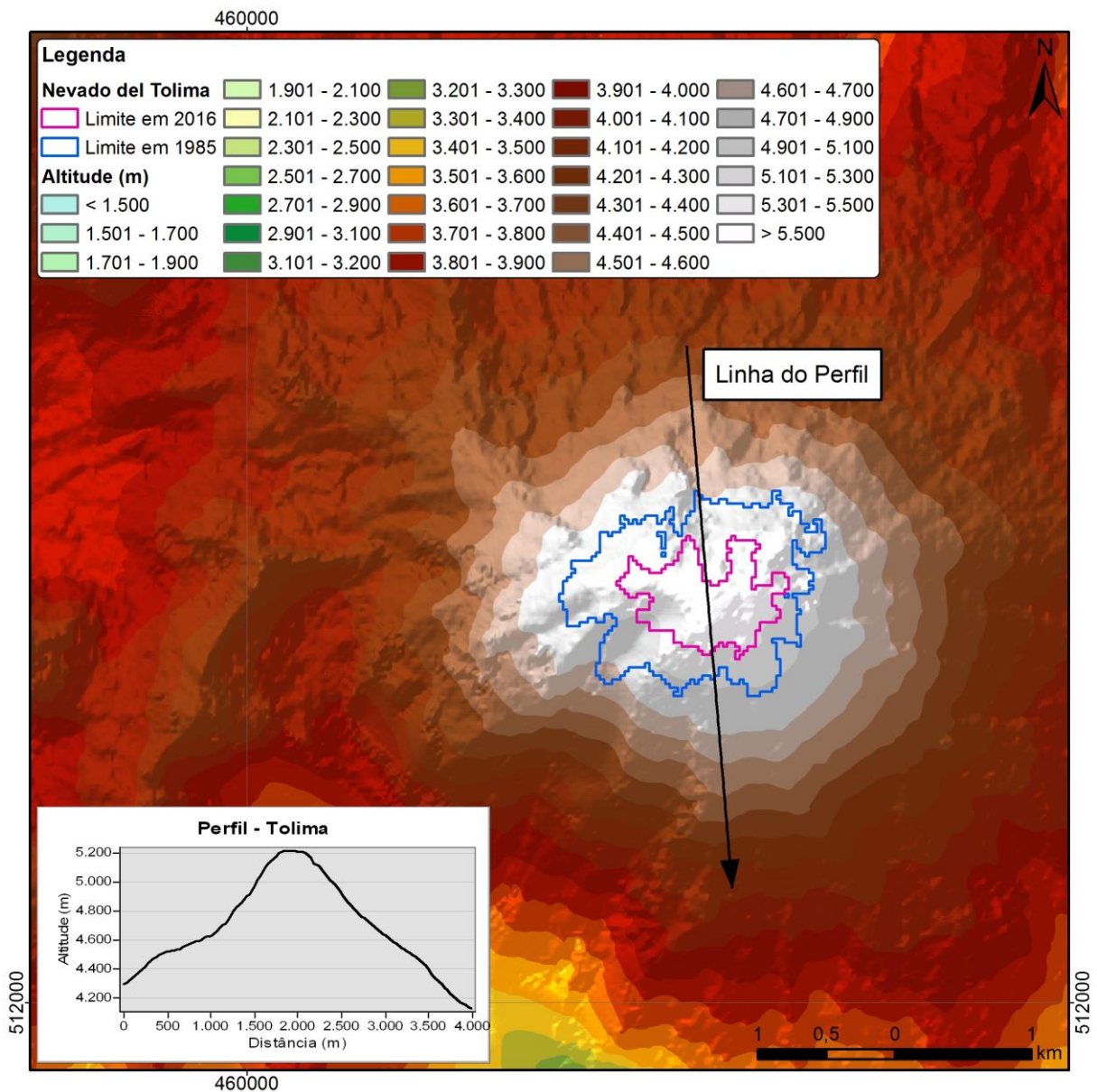


Figura 48: Variação de área no Nevado del Tolima.

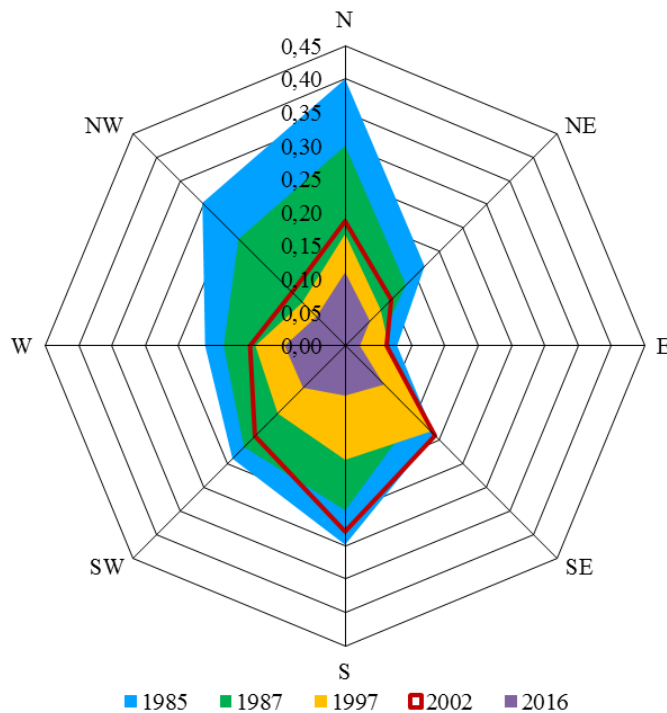


A perda de área no Nevado del Tolima já vem sendo observada desde o fim da Pequena Idade do Gelo, de acordo com IDEAM (2000), entre 1850 e 1958 esse vulcão perdeu 71% da área e, entre 1958 e 1997, a retração foi de 60%. De acordo com esse estudo, a retração das últimas décadas se deve não só a pequenas mudanças térmicas, mas também à forte declividade da parte superior do vulcão.



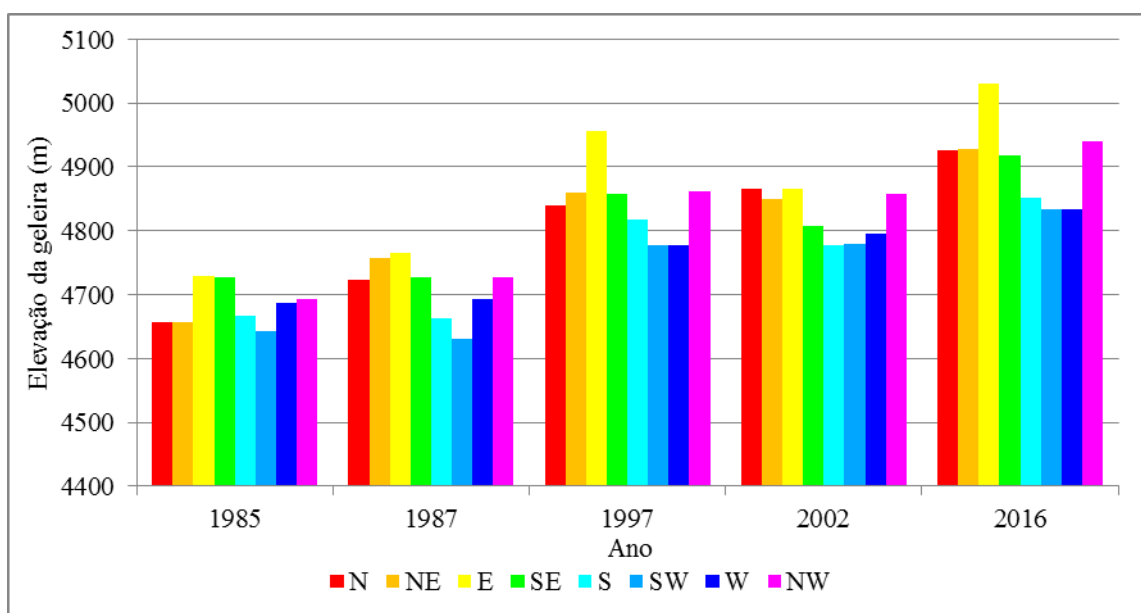
**Figura 49: Altimetria e perfil topográfico do Nevado del Tolima.**

A orientação predominante do gelo no Nevado del Tolima nos anos inicial e final do estudo corresponde à face norte, contudo, em 2002 houve um avanço da geleira para o sul, expansão essa que não se manteve (Figura 50). Os setores onde houve maior retração entre 1985 e 2016 foram noroeste e sul com redução igual ou superior a 75% da área total.



**Figura 50: Gráfico da área da geleira por orientação.**

As frentes de geleira no Nevado del Tolima apresentaram retração em todas as direções, sendo que a elevação mais acentuada ocorreu nos trechos voltados para leste – 302 m (Figura 51). Em 1985 a geleira se estendia até a cota de 4.636 m, no sudoeste, sendo que em 2016, as menores elevações das frentes de geleira no Tolima foram registradas no sudoeste e oeste, correspondendo a 4.833 m.

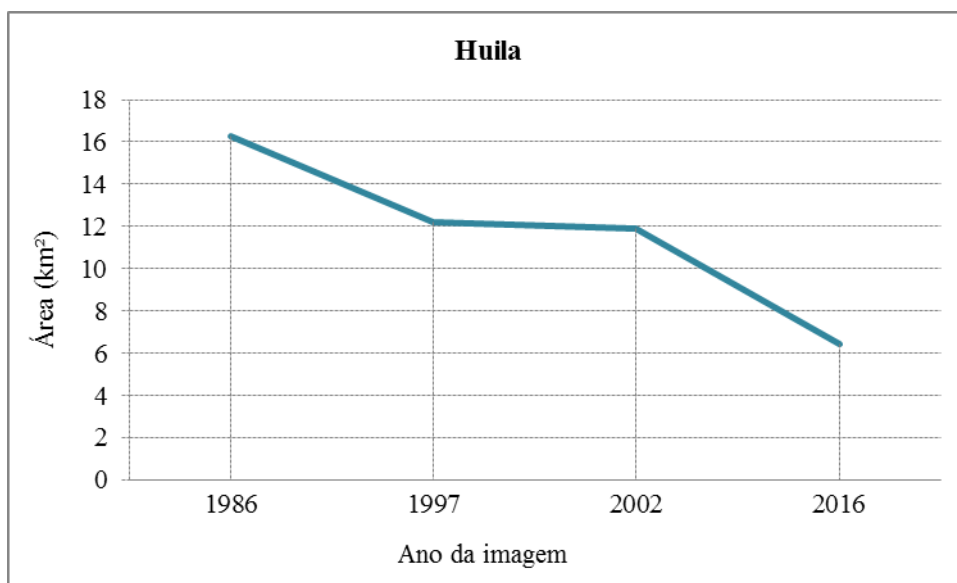


**Figura 51: Gráfico das elevações mínimas da geleira, de acordo com a orientação.**

#### 4.6 NEVADO DEL HUILA

O Nevado del Huila possuía área de 16,25 km<sup>2</sup> em 1986, sendo que esse valor caiu para 6,41 km<sup>2</sup> em 2016 (Figura 52), o que corresponde a uma redução de 61% da área ocupada pela geleira. Destaca-se que a retração identificada não ocorreu apenas nas partes mais baixas da geleira, mas partes do topo também perderam massa de gelo, marcado pelo fraturamento de uma massa única de gelo existente em 1986 em fragmentos menores.

Em junho de 1994, um terremoto de magnitude 6.2 na escala Richter, desencadeou uma avalanche a partir da geleira do Nevado del Huila sobre as encostas íngremes da bacia do rio Paez. Esse evento ocasionou a morte de pelo menos 1.500 pessoas e causou a destruição de habitações pontes e estradas na bacia do rio Paez (HOYOS-PATIÑO, 1998). De acordo com IDEAM (2000), é provável que esse terremoto tenha aumentado o fraturamento da geleira, o que poderia levar a um aumento da perda de massa. Infelizmente não há imagens do ano subsequente a esse evento disponíveis, assim, não foi possível analisar nesse estudo se houve alguma mudança aparente na área da geleira nos meses seguintes ao terremoto citado.

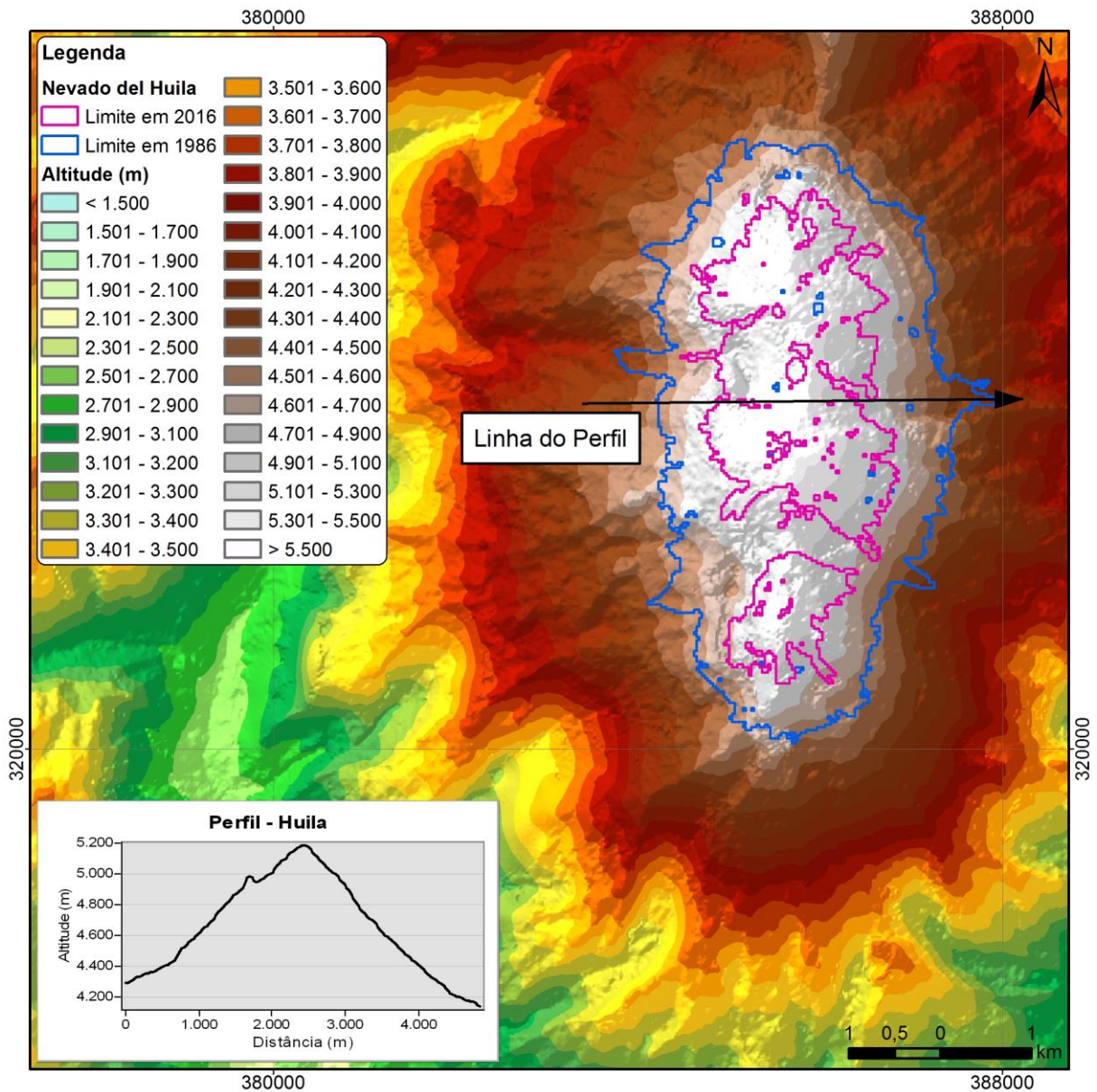


**Figura 52: Variação de área no Nevado del Huila.**

O Nevado del Huila foi a geleira que apresentou os menores índices de perda de área entre 1850 e 2001, com uma redução de 62% (CEBALLOS et al. 2006). Apesar da perda de área não ter sido tão expressiva, o gelo desse Nevado tem apresentado rachaduras, assim como tem ocorrido perda de gelo no cume, sendo possível observar afloramentos rochosos no topo da geleira (IDEAM, 2000), e redução na espessura da geleira (IDEAM, 2016), características essas que indicam redução importante no volume de gelo.

Segundo Poveda e Pineda (2009), desde 2006, o Huila tem apresentado sinais de atividade vulcânica, o que pode acelerar o processo de encolhimento da geleira.

O Nevado del Huila possui formato alongado na direção norte-sul, com elevação máxima de 5.388 m (Figura 53).

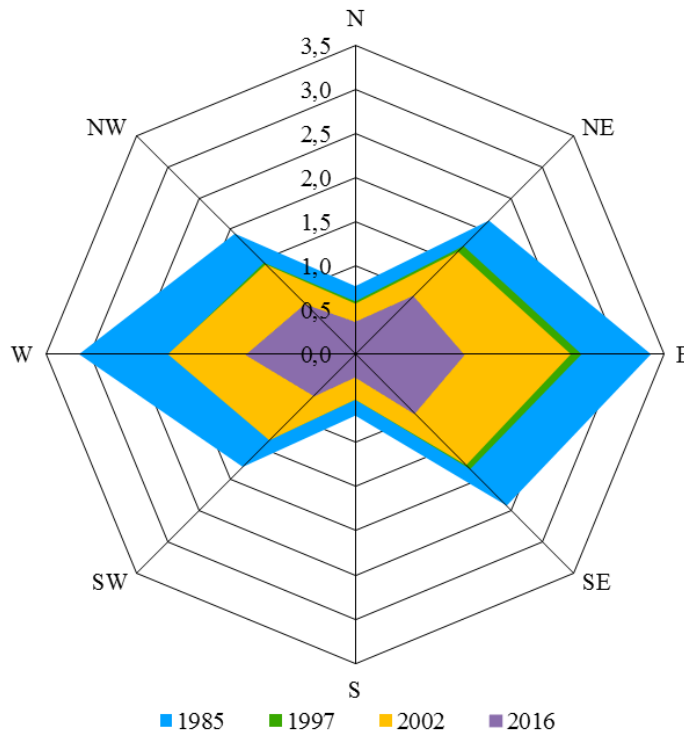


**Figura 53: Altimetria e perfil topográfico do Nevado del Huila.**

Ao analisar a orientação das áreas de gelo, observa-se que o gelo está concentrado nas vertentes voltadas para leste e oeste (Figura 54). As áreas com orientação sudoeste, sul e leste foram as que tiveram maior retração no período, com perdas superiores a 63% do total.

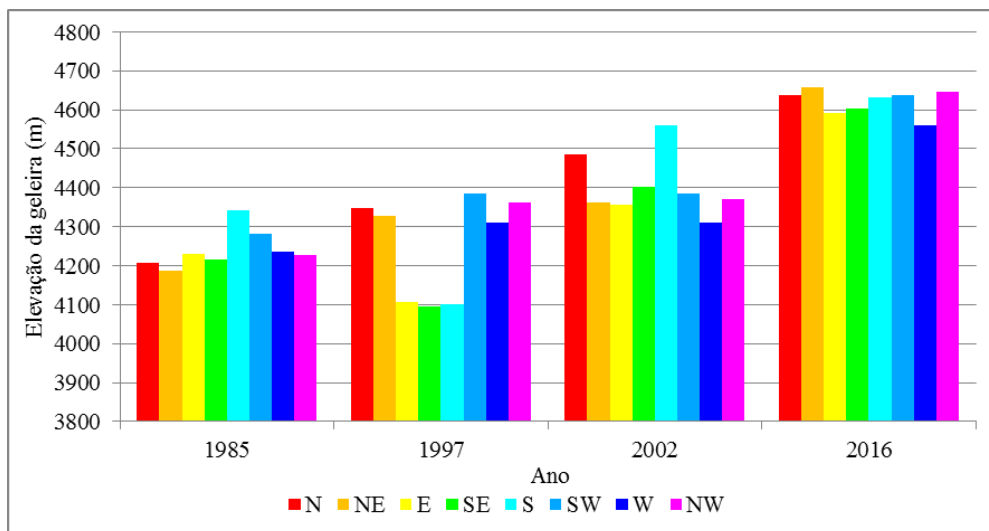
No que se refere às variações de parâmetros climáticos entre os períodos 1971-2000 e 1981-2010, destacam-se as seguintes mudanças: aumento da precipitação média anual e

aumento das temperaturas médias e médias mínimas anuais no período mais recente, nas duas estações utilizadas no estudo.



**Figura 54: Gráfico da área da geleira por orientação.**

Houve elevação na frente da geleira em todas as orientações no Nevado del Tolima, sendo que as maiores variações ocorreram nas porções voltadas para nordeste (470 m), norte (429 m) e noroeste (418 m) (Figura 55). Em 1985 áreas com gelo chegavam até 4.188 m no nordeste e, em 2016, a menor altitude com gelo está a 4.560 m, orientação oeste.

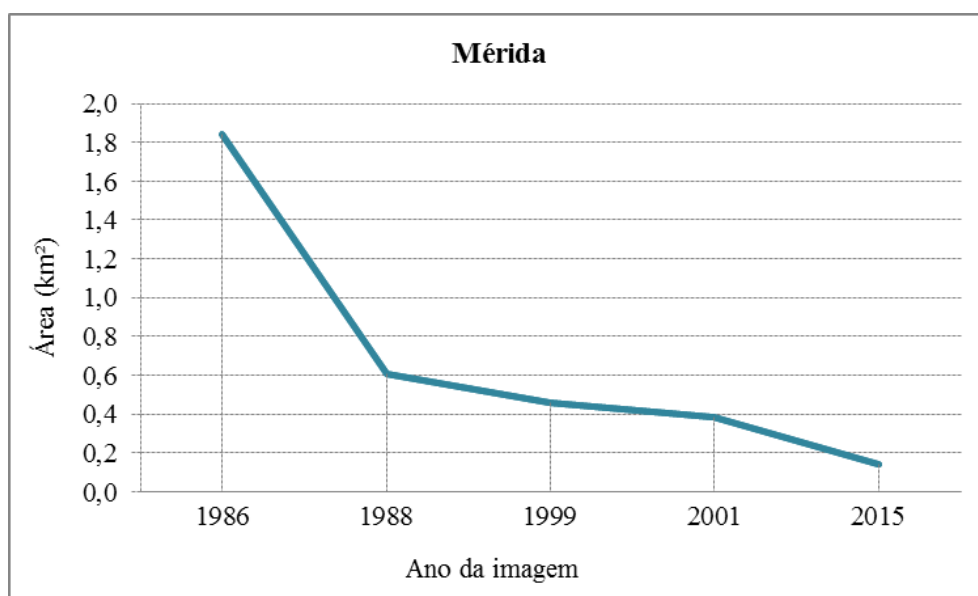


**Figura 55: Gráfico das elevações mínimas da geleira, de acordo com a orientação.**

#### 4.7 SIERRA NEVADA DE MÉRIDA

A Sierra Nevada de Mérida é a última área coberta com gelo permanente na Venezuela. Em 1986 havia cobertura de gelo em quatro picos na Sierra Nevada de Mérida: Bolívar (PBr), la Concha (PC), Bonpland (PBd) e Humboldt (PH), sendo que os dois últimos estavam conectados. Já no mapeamento realizado com imagens de 2015, foram identificadas áreas com geleira apenas nos picos Humboldt/Bonpland (Figura 57).

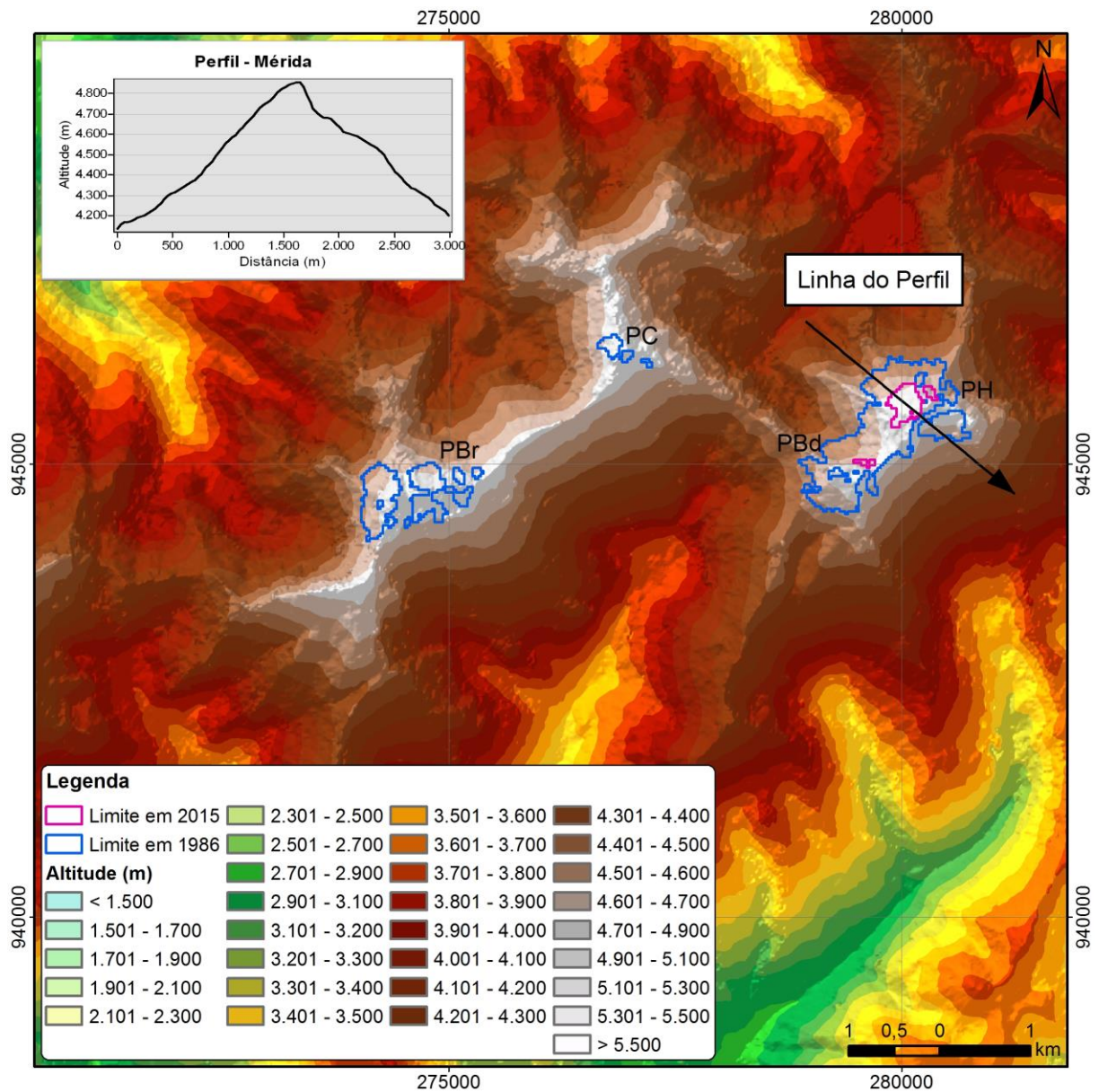
Entre as geleiras estudadas, a Sierra Nevada de Mérida foi a que apresentou a maior retração no período, 92%, passando de 1,84 km<sup>2</sup> em 1986 para apenas 0,14 km<sup>2</sup> em 2015 (Figura 56).



**Figura 56: Variação de área na Sierra Nevada de Mérida.**

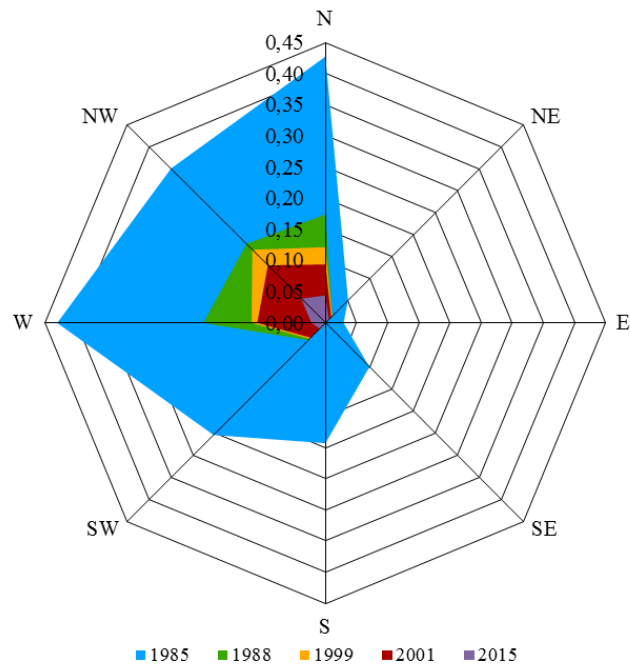
A área coberta com gelo na Sierra Nevada de Mérida era de aproximadamente 10 km<sup>2</sup> em 1910, passando para 2,91 km<sup>2</sup> em 1952. Entre 1972 e 1991, pelo menos três geleiras desapareceram totalmente, sendo que duas dessas geleiras estavam localizadas no flanco sudeste dos seus respectivos maciços (SCHUBERT, 1992). Ainda de acordo com Schubert (1992), um fator que provavelmente foi significativo no derretimento acelerado dessas áreas, foi a exposição ao sol da manhã, uma vez que, durante as tardes, a Sierra Nevada de Mérida é normalmente coberta por nuvens, que protegem as geleiras voltadas para noroeste.

De acordo com os dados de SRTM utilizados nesse estudo, o ponto mais elevado da Sierra Nevada de Mérida está localizado no Pico Bolívar, o qual chega a uma altitude de 4.926 m (Figura 57).



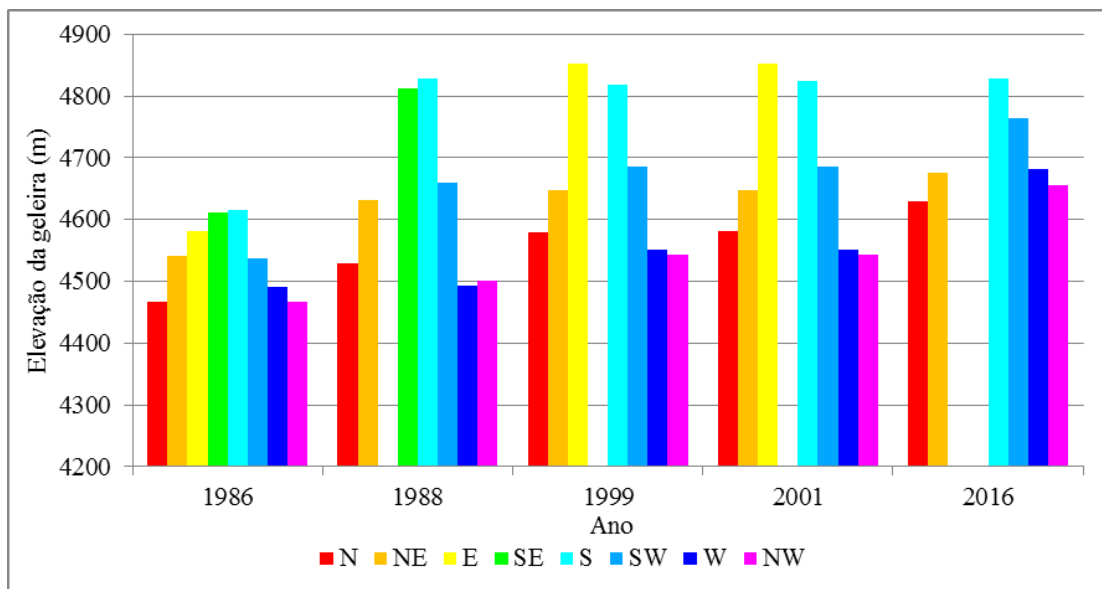
**Figura 57: Altimetria e perfil topográfico da Sierra Nevada de Mérida.**

No primeiro ano da série observada, os setores com maiores áreas de gelo estavam voltados para norte e oeste, enquanto no último ano da série há mais áreas cobertas por gelo em vertentes voltadas para noroeste. De acordo com dados obtidos nesse estudo, os setores leste e sudeste já não possuem mais cobertura de gelo (Figura 58).



**Figura 58: Gráfico da área da geleira por orientação.**

Com a retração que ocorreu no período analisado, as frentes de geleira em Mérida chegaram às maiores elevações no setor leste (4.853 m) antes de desaparecerem. No último ano analisado, o setor sul atingiu as maiores elevações – 4.828 m (Figura 59).



**Figura 59: Gráfico das elevações mínimas da geleira, de acordo com a orientação.**



## 5 CONCLUSÕES

Todas as geleiras mencionadas nesse trabalho apresentaram redução da área no período analisado. Nos anos iniciais do estudo (1985/1986), a área total coberta com gelo na Colômbia e na Venezuela chegava a 92,84 km<sup>2</sup>, mas com a retração ocorrida no período, a área total das geleiras passou para 36,97 km<sup>2</sup> nos anos 2015/2016 (Tabela 12). As taxas de retração anual variaram entre 2,49% a.a., na Sierra Nevada del Cocuy, e 8,43% a.a. na Sierra Nevada de Mérida.

**Tabela 12: Síntese dos resultados obtidos no estudo.**

Geleira	Período	Nº anos	Área inicial (km <sup>2</sup> )	Área final (km <sup>2</sup> )	Retração (%)	Tx retração anual	Elevação mínima inicial (m)	Elevação mínima final (m)	Retração da frente da geleira (m)	Elevação máxima (m) <sup>5</sup>
Sierra Nevada de Santa Marta	1985-2015	30	17,39	7,79	55,21	-2,64	4.442	4.655	213	5.696
Sierra Nevada del Cocuy	1985-2016	31	31,93	14,63	54,19	-2,49	4.374	4.556	182	5.343
Nevado del Ruiz	1985-2016	31	17,15	6,47	62,29	-3,10	4.536	4.623	87	5.289*
Nevado Santa Isabel	1985-2016	31	6,40	0,96	85,06	-5,95	4.546	4.715	169	4.947
Nevado del Tolima	1985-2016	31	1,89	0,58	69,13	-3,72	4.643	4.833	190	5.218
Nevado del Huila	1986-2016	31	16,25	6,41	60,56	-2,96	4.188	4.560	372	5.388
Sierra Nevada de Mérida	1986-2015	29	1,84	0,14	92,22	-8,43	4.466	4.629	163	4.926**

\*Elevação máxima em 2016: 5.280 m. \*\* Elevação máxima em 2016: 4.869 m.

No que se refere à variação da área da geleira por orientação, em quatro das sete áreas, o setor onde ocorreram as maiores perdas foi o leste, contudo, as condições de declividade, alimentação da geleira e ocorrência ou não de interferência de fatores internos no derretimento é muito diversa, tornando difícil relacionar essas variações a um único fator, como por exemplo, variação nas precipitações, diferença de brilho solar ou ocorrência de atividade vulcânica.

Houve retração da frente da geleira em todas as consideradas nesse trabalho. Além disso, também houve perda de área em alguns topos, o que pode ser identificado pela redução da altitude máxima em algumas áreas, pela exposição de rocha em setores internos das geleiras e pelo fraturamento das mesmas.

<sup>5</sup> A elevação máxima é a mesma, no primeiro e no último ano analisado, na maioria das geleiras. Houve alteração apenas no Nevado del Ruiz e na Sierra Neva de Santa Marta. Nessas geleiras, o valor apresentado na tabela corresponde ao valor observado no primeiro ano analisado, enquanto o valor atual aparece como nota logo abaixo.

A delimitação das áreas de geleira feita a partir da aplicação do NDSI diretamente aos contadores digitais se mostrou adequada para o mapeamento de geleiras, reduzindo as correções manuais. Destaca-se que a definição do limiar baseado no comportamento de cada imagem é um passo chave do processo, pois o uso de valores muito altos ou muito baixos pode levar a uma subestimativa ou sobre estimativa da área coberta por gelo e, conseqüentemente, a obtenção de resultados que não correspondem à realidade.

Apesar da resolução espacial dos sensores TM, ETM+ e OLI não permitir a identificação de detalhes na área de geleiras pequenas, a resolução espectral se mostrou adequada para a identificação de áreas de gelo. Além disso, a longa série de dados disponíveis fornece um importante registro histórico, que possibilita comparar as mudanças ocorridas ao longo de várias décadas. Embora haja incertezas inerentes ao tipo de dado utilizado, destaca-se que o nível de correção LIT aplicado a maior parte das imagens utilizadas, as quais foram disponibilizadas pelo USGS (2016b), dispensa a necessidade de correção, facilitando a comparação de cenas multitemporais. Nas imagens em que foi necessário efetuar esse tipo de correção, considera-se que o resultado foi satisfatório, tornando viável o comparativo com as cenas já corrigidas.

Os dados de SRTM, utilizados para extrair informações sobre orientação e elevação, possuem limitações quanto à precisão, especialmente em encostas com grandes declividades. Racoviteanu et al (2007) compararam os modelos digitais de elevação AsterGdem e SRTM a mapas topográficos, os quais foram usados como dado de referência. De acordo com esses autores, em dados SRTM podem ocorrer erros de elevação que variam de -25/+50 m em encostas com declividades variando entre 60-65°. Por sua vez, Bolch e Kamp (2006), ao comparar dados de SRTM v3 com dados do modelo digital de elevação *Swiss* DHM25L2, observou que, em geral, as elevações do SRTM são frequentemente mais baixas do que as elevações do modelo de referência. Apesar dessas limitações, os dados de elevação do SRTM v3 eram os únicos disponíveis em todas as áreas estudadas e que não possuíam falhas a ponto de inviabilizar a análise. Dessa forma, conclui-se que os dados de elevação utilizados possuem limitações, mas possibilitam a obtenção de uma caracterização geral, tanto das elevações, quanto da orientação das áreas de geleiras andinas.

Em função da ocorrência de cobertura de nuvens ser frequente na área, especialmente na Cordilheira Central, onde estão localizados quatro nevados considerados nesses estudo, não foi possível utilizar os mesmos intervalos de tempo, nem os mesmos anos em todas as geleiras. Por isso, os anos de início variam entre 1985 e 1986 e os anos de fim da série

temporal variam entre 2015 e 2016, resultando em intervalos de dados que variam de 29 a 31 anos.

O monitoramento das áreas ocupadas com neve e gelo mediante do uso de imagens de sensoriamento remoto se mostrou satisfatório e permitiu obter um panorama das mudanças ocorridas na área nas últimas três décadas, mesmo sem a execução de trabalho de campo.

## 6 REFERÊNCIAS

- ALBERT, T. 2002. Evaluation of remote sensing techniques for ice-area classification applied to the tropical Quelccaya ice cap, Peru. **Polar Geography**, v 26, n 3, p. 210-226.
- BELL, R.C. 2013. **Glacial systems and landforms: A Virtual Interactive Experience**. Londres. Anthem Press. 136 pp.
- BENN, D. I; EVANS, D. J. A. 2003. **Glaciers and glaciation**. Londres, Arnold, 734 pp.
- BOLCH, T; KAMP, U. 2006. Glacier mapping in high mountains using DEMs, Landsat and ASTER data. **8th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography**, p. 37-48.
- BRAUN, C.; BEZADA, M. 2013. The history and disappearance of glaciers in Venezuela. **Journal of Latin American Geography**, v. 12, p. 85–124.
- CARRILLO, E; YÉPES, S. 2010. Evolución de los glaciares en los Andes venezolanos: glaciares de los Picos Humboldt y Bonpland. In: ARENAS, C. D. L.; CADENA, J. R. (Comp.). **Glaciares, nieves y hielos de América Latina: Cambio climático y amenazas**. Bogotá: Ingeominas. p. 123-136.
- CEBALLOS, J. L; EUSCÁTEGUI, C; RAMÍREZ, J; CAÑÓN, M; HUGGEL, C; HAEBERLI, W; MACHGUTH, H. 2006 Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia. **Annals of Glaciology**, v 43, p, 194–201.
- CEBALLOS, J. L; TÓBON, E. 2007. Glaciares Colombianos: evolución reciente y estado actual. **Boletín de Geología**. v. 29, nº 2, julio-diciembre de 2007. p. 143-151.
- CEBALLOS, J. L; TÓBON, E; ARIAS, M; CARVAJAL, J; LÓPEZ, O; BUITRAGO, V; VALDERRAMA, J; RAMÍREZ, J. 2010. Glaciares Santa Isabel y el Cocuy (Colombia): Seguimiento a su dinámica durante el período 2006-2008. In: ARENAS, C. D. L.; CADENA, J. R. (Org.). **Glaciares, nieves y hielos de América Latina: Cambio climático y amenazas**. Bogotá: Ingeominas. p. 91-114.
- CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2016. **Glossário geológico ilustrado**. Disponível em: <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/>. Acesso em agosto de 2016.
- DOZIER, J. 1989. Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper. **Remote Sensing of Environment**, v. 28, p.9-22.
- EUSCÁTEGUI, C. 2002. Incidencia de las variaciones del brillo solar en la dinámica glacial del volcán Nevado Santa Isabel (Cordillera Central, Colombia). **Meteorol. Colomb.**, 6, 1–11.
- FARR, T. G; ROSEN, P. A; CARO, E; CRIPPEN, R; DUREN, R; HENSLEY, S; KOBRICK, M; PALLER, M; RODRIGUEZ, E; ROTH, L; SEAL, D; SHAFFER, S; SHIMADA, J; UMLAND, J. 2000. **The Shuttle Radar Topography Mission**. Disponível em: [http://www3.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM\\_paper.pdf](http://www3.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_paper.pdf). Acesso em abril de 2016.
- HALL, D. K.; MARTINEC, J. 1985. **Remote sensing of ice and snow**. Remote Sensing Applications. Cambridge, Great Britain at the Universit Press, 189 pp.
- HAMBREY, M. 1994. **Glacial environments**. Londres, UCL Press, 296 pp.

- HEISKANEN, J; KAJUUTTI, K; JACKSON, M; ELVEHØY, H; PELLIKKA, P. 2002. Assessment of glaciological parameters using Landsat satellite data in Svartisen, northern Norway. **Workshop Observing our Cryosphere from Space**, Bern, nº 2, p. 34-42.
- HENDRIKS, J.P.M.; PELLIKKA, H. 2007. Semi-automatic glacier delineation from Landsat imagery over Hintereisferner in the Austrian Alps. **Zeitschrift Für Gletscherkunde Und Glazialgeologie**, v. 41, p. 55–75.
- HERRERA, G.; RUIZ, J. 2009. Retroceso glaciar en la Sierra Nevada del Cocuy, Boyaca – Colombia, 1986-2007. **Perspectiva Geográfica**, v. 13, p. 27–36.
- HOYOS-PATIÑO, F. 1998. Glaciers of Colombia. In: WILLIAMS Jr. R. S; FERRIGNO J. G (Comp.). **Satellite Image Atlas of Glaciers of the World - South America**. United States Geological Survey Professional Paper 1386-1. United States Government Printing Office, Washington. p. 111-130.
- HUGGEL, C; CEBALLOS, J.L; PULGARÍN, B; RAMÍREZ, J; THOURET, J-C. 2007. Review and reassessment of hazards owing to volcano–glacier interactions in Colombia. **Annals of Glaciology** v. 45, p. 128 – 136.
- IDEAM 2000. **Los glaciares Colombianos**, expresión del cambio climático global, Bogotá, 19 pp., online disponível em: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/009724/glaciares.pdf>. Acesso em fevereiro de 2016.
- IDEAM 2012. **Glaciares de Colombia**, más que montañas con hielo, Bogotá, D.C., 344 pp.
- JENSEN, J. R. 2005. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. 3ª ed. New Jersey: Prentice-Hall, c2005. 526 pp.
- KASER, G. 1999. A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. **Global and Planetary Change**, v. 22, p. 93–103.
- KASER, G; OSMASTON, H. 2002. **Tropical glaciers**. International Hydrology Series. Cambridge, Cambridge University Press, 207 pp.
- LEPPÄRANTA, M; P.; GRANBERG, H.B. 2010. Physics of glacier remote sensing. In: PELLIKKA, P.; REES, W.G. (eds.). **Remote Sensing of glaciers: Techniques for topographic, spatial and thematic mapping of glaciers**. London: CRC Press, p. 81-98.
- MENESES, P. R; ALMEIDA, T. (org.). 2012. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UNB. 266 pp.
- MORRIS, J. N., POOLE, A. J., and KLEIN, A. G. 2006. Retreat of tropical glaciers in Colombia and Venezuela from 1984 to 2004 as measured from ASTER and Landsat images, In: Proc. 63<sup>a</sup> Eastern Snow Conference, Newark, Delaware, USA, p. 181–191.
- NASA JPL. 2013. **Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second**. NASA LP DAAC. Disponível em: <http://doi.org/10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL1.003>. Acesso em abril de 2016.
- NASA, 2016. **Earth Observatory**. Disponível em: [http://earthobservatory.nasa.gov/Features/EO1/eo1\\_2.php](http://earthobservatory.nasa.gov/Features/EO1/eo1_2.php). Acesso em: março de 2016.
- PAUL, F. Evaluation of different methods for glacier mapping using Landsat TM. Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop Land Ice and Snow, Dresden/FRG, June 16 – 17. p. 239 – 245.

- PAUL, F. KÄÄB, A. MAISCH, M. KELLENBERGER, T. HAEBERLI, W. 2001. The new remote sensing derived Swiss glacier inventory: I. Methods. **4th International Symposium on Remote Sensing in Glaciology**, p. 1-12.
- PAUL, F.; HENDRIKS, J. 2010. Optical remote sensing of glacier extent. In: PELLIKA, P.; REES, W.G. (eds.). **Remote Sensing of Glaciers: Techniques for Topographic, Spatial and Thematic Mapping of Glaciers**. Londres, CRC Press, p. 137–152.
- PELLIKA, P.; REES, W. G. 2010. **Remote sensing of glaciers: Techniques for Topographic, Spatial and Thematic Mapping of Glaciers**. Londres, CRC Press, 330 pp.
- POVEDA, G; MESA, O. J; SALAZAR, L. F; ARIAS, P. A; MORENO, H. A; VIEIRA, S. C; AGUDELO, P. A; TORO, V. G; ALVAREZ, J. F. 2005. The diurnal cycle of precipitation in the Tropical Andes of Colombia. **American Meteorological Society**, v. 133, p. 228-240.
- POVEDA, G.; WAYLEN, P.R; PULWARTY, R.S. 2006. Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 234, p. 3–27.
- POVEDA, G.; PINEDA, K. 2009. Reassessment of Colombia's tropical glaciers retreat rates: are they bound to disappear during the 2010–2020 decade? **Advances in Geosciences**, v. 22, p. 107–116.
- PULWARTY, R. S; BARRY R. G; HURST C. M; SELLINGER K; MOGOLLON L. E. 1998. Precipitation in the Venezuelan Andes in the Context of Regional Climate. **Meteorology, and Atmospheric Physics**, v. 67, p. 217-237.
- RABATEL, A; FRANCOU, B; SORUCO, A; GOMEZ, J; CÁCERES, B; CEBALLOS, J. L; BASANTES, R; VUILLE, M; SICART, J.-E; HUGGEL, C; SCHEEL, M; LEJEUNE, Y; ARNAUD, Y; COLLET, M; CONDOM, T; CONSOLI, G; FAVIER, V; JOMELLI, V; GALARRAGA, R; GINOT, P; MAISINCHO, L; MENDOZA, J; MÉNÉGOZ, M; RAMIREZ, E; RIBSTEIN, P; SUAREZ, W; VILLACIS, M; WAGNON, P. 2013. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. **The Cryosphere**, v. 7, n. 1, p. 81–102.
- RABUS, B; EINEDER, M; ROTH, A; BAMLER, R. 2003. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, p. 241-262.
- RACOVITEANU, A. E; MANLEY, W. F; ARNAUD, Y; WILLIAMS, M. W. 2007. Evaluating digital elevation models for glaciologic applications: An example from Nevado Coropuna, Peruvian Andes. **Global and Planetary Change**, v. 59, p. 110-125.
- RAUP, B.; KHALSA, S. J. S. 2010. **GLIMS Analysis Tutorial**. 15 pp., online, disponível em: [http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS\\_Analysis\\_Tutorial.pdf](http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Analysis_Tutorial.pdf). Acesso em junho de 2016.
- ROSEN, P. A; HENSLEY, S; JOUGHIN, I.R; LI, F. K; MADSEN, S. N; RODRÍGUEZ, E; GOLDSTEIN, R. M. 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry. **Proceedings of the IEEE**, v. 88, nº. 3, p. 333-382.
- SAGREDO, E.A; LOWELL, T.V. 2012. Climatology of Andean glaciers: A framework to understand glacier response to climate change. **Global and Planetary Change**, v. 86-87, p. 101-109.

- SAGREDO, E.A; RUPPER, S; LOWELL, T.V. 2014. Sensitivities of the equilibrium line altitude to temperature and precipitation changes along the Andes. **Quaternary Research**, v. 81, p. 355-366.
- SALZMANN, N; HUGGEL, C; ROHRER, M; SILVERIO, W; MARK, B. G; BURNS, P; PORTOCARRERO, C. 2013. Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes. **The Cryosphere**, v. 7, n. 1, p. 103–118.
- SANCHES, A. M. 2013. **Variações na extensão da cobertura de gelo do Nevado Cololo, Bolívia**. 93 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SCHUBERT, C. 1975. Glaciation and Periglacial Morphology in the Northwestern Venezuelan Andes. **Quaternary Science**, v. 26, p. 196-211.
- SCHUBERT, C. 1992. The Glaciers of the Sierra Nevada de Mérida (Venezuela): a photographic comparison of recent deglaciation. **Erdunke**. v. 46, p. 58-64.
- SCHUBERT, C. 1998. Glaciers of Venezuela. In: WILLIAMS Jr. R. S; FERRIGNO J. G (Comp.). **Satellite Image Atlas of Glaciers of the World - South America**. United States Geological Survey Professional Paper 1386-1. United States Government Printing Office, Washington. p. I1-I10.
- SIAC - Sistema de Informação Ambiental da Colômbia. 2016. **Promedios 81-10**. Disponível em: <http://www.siac.gov.co/>. Acesso em maio de 2016.
- SILVERIO, W; JAQUET, J. M. 2005. Glacial cover mapping (1987–1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 95, p. 342-350.
- SILVERIO, W; JAQUET, J. M. 2012. Multi-temporal and multi-source cartography of the glacial cover of Nevado Coropuna (Arequipa, Peru) between 1955 and 2003. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, nº. 18, p. 5876-5888.
- STERN, C. R. 2004. Active Andean volcanism: Its geologic and tectonic setting. **Revista Geológica de Chile**, v. 31, n. 2, p. 161–206.
- TILLING, R. I. 2009. Volcanism and associated hazards: the Andean perspective. **Advances in Geosciences**, v. 22, p. 125–137.
- USGS - United States Geological Survey. 2009. **Fifty-Year Record of Glacier Change Reveals Shifting Climate in the Pacific Northwest and Alaska, USA**. Disponível em: <http://pubs.usgs.gov/fs/2009/3046/>. Acesso em abril de 2016.
- USGS - United States Geological Survey. 2016a. **Landsat Missions**. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/>. Acesso em março de 2016.
- USGS - United States Geological Survey. 2016b. **EarthExplorer**. Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: junho de 2015.
- USGS - United States Geological Survey. 2016c. **Landsat Processing Details**. Disponível em: [http://landsat.usgs.gov/Landsat\\_Processing\\_Details.php](http://landsat.usgs.gov/Landsat_Processing_Details.php). Acesso em março de 2016.
- VAN DER HAMMEN, T; BARELDS, J; DE JONG, H; DE VEER, A. A. 1980. Glacial sequence and environmental history in the Sierra Nevada del Cocuy (Colombia). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 32, p. 247-340.

VERGARA, W. 2007. Economic Impacts of Rapid Glacier Retreat in the Andes. **EOS**, v. 88, n. 25, p. 261–268.

WEINGARTEN, B; YURETICH, R. F; BRADLEY, R. S; SALGADO-LABOURIAU, M. L. 1990. Characteristics of sediments in an altitudinal sequence of lakes in the Venezuelan Andes: Climatic implications. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 3, n. 2/, p. 113-124.

WILLIAMS JR, R. S; HALL, D. K; BENSON, C. S; 1991. Analysis of glacier facies using satellite techniques. **Journal of Glaciology**, v. 37, n. 125, p. 120–128.