

CLEIDIR EIDELWEIN BICCA

**Variações nas geleiras da porção norte da
Cordilheira Real durante o período de 1984 a 2010
através do Sensoriamento Remoto**

Porto Alegre - RS

Agosto de 2012

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO**



CLEIDIR EIDELWEIN BICCA

Variações nas geleiras da porção norte da Cordilheira Real durante o período de 1984 a 2010 através do Sensoriamento Remoto

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sensoriamento Remoto pelo Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Jorge Arigony Neto

Orientador

Banca Examinadora:

Dr. Cláudio Wilson Mendes Júnior (ICHI-FURG)

Dr. Marcio Rocha Francelino (UFRRJ)

Dr. Ulisses Franz Bremer (IGEO-UFRGS)

Porto Alegre

Agosto de 2012

Dedico esta dissertação ao meu
filho Murilo Adélio Bicca.

Agradecimentos

Ao meu pai Volnei, pelo apoio e incentivo.

Ao meu filho Murilo e sua mãe Janaina, pelo apoio, incentivo, pelas risadas, brigas, e alegrias, mas principalmente por estarem ao meu lado nos momentos difíceis.

Ao meu orientador Jorge Arigony Neto, pela paciência e compreensão, pelos conselhos e dicas, e pelos conhecimentos que me foram passados durante esse período.

Ao professores, colegas e funcionários do Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto da UFRGS, pela convivência durante as aulas.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Monitoramento da Criosféra (LaCrio) Adriano, Aline, Ana, Christian, Cristiano, Rafael, Jean, Joyce, Luiza, Robledo e Virginia, por toda a ajuda e pelos momentos de descontração.

Ao amigo e professor Claudio Wilson Mendes Junior, pela ajuda, esclarecimentos, dicas, ensinamentos e principalmente pela atenção dada aos meus questionamentos.

À CAPES, pela bolsa de estudos concedida.

À todos os meus amigos e familiares, que de perto ou de longe, contribuíram indiretamente para a realização deste trabalho, através da amizade e afeto.

Resumo

O presente trabalho utilizou uma série de dez imagens Landsat TM, adquiridas no período entre 1984 e 2010, e o modelo digital de elevação ASTER GDEM para catalogar as geleiras da porção Norte da Cordilheira Real, Bolívia, e analisar a variação na área dessas geleiras. O Índice de Diferença Normalizada de Neve e Gelo (NDSI) foi utilizado como principal critério, em uma abordagem por critérios múltiplos, para classificação das imagens TM e geração da posição das frentes das geleiras e os divisores de drenagem glacial foram delimitados manualmente com o auxílio de curvas de nível geradas com o ASTER GDEM. De acordo com a análise, a cordilheira mostrou uma predominância de geleiras com área entre 0,01 e 0,5 km², porém as geleiras entre 1 e 3 km² de área possuem um maior percentual na representatividade da área total, 38,3 % (55,75 km²) em 2010. As análises nas variações em elevação das geleiras mostraram um aumento de altitude média e nas elevações mínimas de ocorrência das geleiras na Cordilheira Real. Para o ano de 2010, a geleira de menor elevação ocorre em 4655 metros de altitude. Os resultados referentes a análise de orientação mostraram que existe uma grande influência desse fator na elevação mínima, no número total de geleiras por setor da cordilheira e no tamanho das geleiras. O setor Sul apresentou um número maior de geleiras, com 61 geleiras em 2010, e uma maior porcentagem na área total da cordilheira 21,84 %. As geleiras orientadas para o setor Sudeste apresentaram, no geral, a mais baixa elevação de ocorrência, com 4.335 metros de altitude em 1984. O setor Norte apresentou o menor número de geleiras, com 11 geleiras em 2010, e a maior altitude para as mínimas elevações analisadas, 4989 metros em 2010. Os resultados obtidos apresentaram uma redução gradativa na área das geleiras durante o período do estudo. No total, 49,12 % da área das geleiras foi perdida entre o período de 1984 a 2010. Porém essa perda não ocorreu de forma linear ao longo do período do estudo, pois todos os intervalos de tempo entre as imagens sofreram perda de área total, com exceção do período entre 1994 e 1997. Quanto a orientação, as geleiras com fluxo para o setor Sul foram as que mais sofreram perda em área. O número de massas de gelo identificadas como geleiras também foi reduzido em 39,57 % nesse mesmo período para toda a cordilheira. Os resultados mostraram-se semelhantes aos de outros estudos realizados com geleiras tropicais Andinas, confirmando as tendências de retração das geleiras situadas nessas regiões.

Abstract

This study used a time series of 10 Landsat TM images, acquired between 1984 and 2010, and the ASTER GDEM to catalog the glaciers in the Northern Cordillera Real, Bolivia, and analyze the variations in area of these glaciers. The Normalized Difference Snow Index (NDSI) was used as the main criterion, in a multiple criteria approach, for the classification of TM images and extraction of glacier frontal positions. Ice divides were manually digitized with the assistance of contour lines generated with the ASTER GDEM. This cordillera showed a predominance of glaciers with area between 0.01 km^2 and 0.5 km^2 . However, glaciers with size between 1 and 3 km^2 had a higher percentage of the total area, 38,3 % ($55,75 \text{ km}^2$) in 2010. The analyses of variations in elevation showed an increase of average altitude and in the minimum elevations of glaciers occurrence in the Cordillera Real. For the year 2010, the lowest glacier elevation occurred at 4655 meters of altitude. The results for the glaciers orientation showed a great influence of this factor on the minimum elevation of glacier occurrence, in the total number of glacier in each sector, and in the glacier size. The Southern sector had the largest amount of glaciers, with 61 glaciers in 2010, and the highest percentage of the total area of Cordillera Real, 21,84 %. Glaciers oriented to the SE sector had the lowest elevation of occurrence, 4335 meters of altitude in 1984. The Northern sector had the lowest number of glaciers, 11 glaciers in 2010, and the highest altitude for glacier occurrence, 4989 meters of altitude in 2010. The results showed a gradual reduction in the area of ice during the study period. In total, 49,12 % of the glacier area was lost between the period 1984-2010. But the glacier retreat was not linear over the study period. Ice loss was detected for almost all time intervals between image acquisitions, except for the period between 1994 and 1997. Glaciers oriented to the South were the most affected by changes in area. The number of ice bodies identified as glaciers was also reduced by 39,57 % during the same period for the entire range. The results were similar to other studies of tropical Andean glaciers, confirming the trends of glacier retreat located in these regions.

Lista de Figuras

Figura 1: Mapa de localização da porção norte da Cordilheira Real, Bolívia.....	18
Figura 2: Representação do fluxo de uma geleira	19
Figura 3: Representação da dinâmica de geleiras de montanha.....	20
Figura 4: Distribuição das geleiras ao redor do planeta	21
Figura 5: Estrutura de uma imagem	23
Figura 6: Flutuações do campo elétrico (E) e magnético (M) de uma onda eletromagnética em uma determinada direção (Z).....	25
Figura 7: Espectro Eletromagnético	26
Figura 8: Exemplo do comportamento espectral de alvos existentes na superfície Terrestre nos comprimentos de onda do visível e do infravermelho.	27
Figura 9: Curvas de reflectância espectral do gelo e da neve.....	28
Figura 10: Cadeia utilizada para o processamento das imagens Landsat, delimitação das Bacias Glaciais e a extração das informações topográficas da porção norte da Cordilheira Real.....	35
Figura 11: Pontos de controle utilizados para o georreferenciamento e ortorretificação das imagens.....	36
Figura 12: Ilustração dos limites Norte e Sul utilizados no recorte das imagens, exemplificado espacialmente na imagem RGB 542 de 08/07/1984.....	41
Figura 13: Histograma de frequência da imagem NDSI de 08/07/1984	43
Figura 14: Diferenças entre limiares de NDSI.	44
Figura 15: Exemplo de lago glacial encontrado na classificação com limiar de 0,4 no NDSI.	45
Figura 16: Teste com o limiar de 0,25 no NDWI da imagem de 1984	47
Figura 17: Exemplo de áreas com a necessidade de múltiplos critérios para a classificação .	48
Figura 18: Amostra da delimitação manual das bacias de drenagem com o auxílio das curvas de nível geradas a partir do modelo de elevação ASTER GDEM sobre a imagem RGB 542 de 08/07/1984.....	50
Figura 19: Exemplo de áreas onde os polígonos resultantes (linhas em vermelho) possuem uma frequência irregular ao longo do tempo.....	51

Figura 20: Gráfico de frequência mostrando o número de ocorrências de polígonos de neve ou gelo nas 991 bacias de drenagem delimitadas manualmente a porção Norte da Cordilheira Real, nas 10 imagens adquiridas para o estudo.	52
Figura 21: Tabela de atributos referentes à classificação da imagem de 1984	53
Figura 22: Gráfico de área total de superfície coberta por neve e gelo das geleiras da porção Norte da Cordilheira Real, resultante da análise das imagens Landsat TM	55
Figura 23: Gráfico do percentual da diferença de área total de gelo e neve, analisadas entre as imagens da porção Norte da Cordilheira Real, em relação à imagem anterior	57
Figura 24: Gráfico representando o número de geleiras da porção Norte da Cordilheira Real, identificadas em cada imagem neste trabalho	58
Figura 25: Gráfico da diferença no número de geleiras nas imagens analisadas no estudo....	58
Figura 26: Área total por intervalos de tamanhos das geleiras.....	59
Figura 27: Percentual da área total em cada classe com relação a área da cordilheira nas imagens.....	60
Figura 28: Número de Geleiras por intervalo de área	61
Figura 29: Mudanças no comprimento e área superficial de dez geleiras tropicais andinas, situadas no Equador (Antizana 15a and 15b), Peru (Yanamarey, Broggi, Pastoruri, Uruashraju, Gajap) e Bolívia Zongo, Charquini, Chacaltaya) entre 1930 e 2005.....	63
Figura 30: Exemplo de variações nas frentes de duas geleiras situadas no Monte Ancuhuma.	65
Figura 31: Gráfico de elevação mínima das geleiras.....	66
Figura 32: Gráfico de elevação máxima das geleiras.....	67
Figura 33: Média de elevação das geleiras.....	68
Figura 34: Gráfico do número de geleiras por classe de orientação, representando a distribuição das geleiras da porção Norte da Cordilheira Real	69
Figura 35: Gráfico de área das geleiras da Cordilheira Real (km ²) por orientação das geleiras.	70
Figura 36: Gráfico de elevação mínima das geleiras por orientação.....	71

Lista de Tabelas

Tabela 1: Distribuição das geleiras tropicais	22
Tabela 2: Características orbitais do satélite Landsat TM.....	31
Tabela 3: Características do sensor Landsat TM.....	32
Tabela 4: Imagens Seleccionadas para análise.....	33
Tabela 5: Aplicativos computacionais utilizados no processamento e manipulação das imagens.....	34
Tabela 6: Média do resíduo referente a ortorretificação das imagens Landsat TM observada nos metadados das imagens.....	37
Tabela 7: Valores encontrados nos metadados para o ano de 1984.	38
Tabela 8: Limiares de Números digitais, situação atmosférica equivalente e o modelo de espalhamento relativo sugerido. Fonte: Adaptado de Chavez (1988).	39
Tabela 9: Valores de reflectância subtraídos das imagens utilizadas no estudo, através do método DOS de correção Atmosférica.....	40
Tabela 10: Número de geleiras (N), área total e percentual do total	56
Tabela 11: Número de geleiras e sua representatividade no total da cordilheira	61
Tabela 12: Variações em área e volume da geleira Chacaltaya de 1860 a 1998.....	63
Tabela 13: Resultados referentes às geleiras de Chacaltaya e Zongo, obtidos neste estudo ...	64

Lista de Abreviaturas

ASTER - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

AVHRR - *Advanced Very High Resolution Radiometer*

CEPSRM – Centro estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia

CPFs - *Calibration Parameter Files*

DN - *Digital Number*

DOS – *Dark Object Subtraction*

FTP - *File Transfer Protocol*

FURG - Universidade Federal do Rio Grande

GCP - *Ground Control Point*

GDEM - *Global Digital Elevation Model*

GLIMS - *Global Land Ice Measurements from Space*

GLS2000 - *Global Land Surveys 2000*

IFOV - *Instantaneous Field of View*

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

LaCrio - Laboratório de Monitoramento da Criosfera

LANDSAT – *Land Satellite*

LIA – Little Ice Age

MDE - Modelo Digital de Elevação

METI - *Ministry of Economy, Trade, and Industry*

MSS - *Multispectral Scanner*

NASA - *United States National Aeronautics and Space Administration*

NDSI - *Normalized Difference Snow Index*

NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*

NDWI - *Normalized Difference Water Index*

NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*

ONU - Organização das Nações Unidas

RGB – *Red, Green and Blue*

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

TM - *Thematic Mapper*

TOA – *Top of Atmosphere*

UNEP - *United Nations Environment Programme*

USGS - *United States Geological Survey*

WGI - *World Glacier Inventory*

WGMS - *World Glacier Monitoring Service*

WGS84 - *World Geodetic System 1984*

Sumário

1. Introdução	14
1.1. Justificativa	15
1.2. Objetivos	16
1.3. Área de Estudo	16
2. Fundamentação Teórica	19
2.1. Geleiras	19
2.2. Geleiras de Montanha	20
2.3. Sensoriamento Remoto	22
2.4. Interações entre energia eletromagnética e a superfície	24
2.5. Características da reflectância da neve e do gelo	27
2.6. Processamento digital de Imagens de Sensoriamento Remoto	29
2.6.1. Pré-Processamento	29
2.6.2. Classificação de imagens de Sensoriamento remoto	30
3. Material e Métodos	31
3.1. Dados e Aquisição	31
3.1.1. Landsat Thematic Mapper	31
3.1.2. Modelo Digital de Elevação Global ASTER	33
3.2. Softwares e Ferramentas	33
3.3. Processamento das Imagens	34
3.3.1. Pré-processamento	36
3.3.2. Recorte da Imagem	41
3.3.3. Classificação	42
3.3.4. Pós-Classificação	49
3.4. Delimitação das Bacias Glaciais	49
3.5. Verificação da consistência dos resultados	51
3.6. Banco de Dados Topográfico e SIG	52
3.7. Considerações sobre possíveis erros sistemáticos inerentes ao método	53
4. Resultados e Discussão	55
4.1. Variações em área e no número de geleiras	55
4.2. Variações na elevação das geleiras	66
4.3. Variações nas geleiras de acordo com a sua orientação	68

4.4. Relações entre a elevação mínima e a orientação das geleiras.....	70
5. Conclusões.....	72
Bibliografia.....	74

1. Introdução

O aumento da temperatura média do Planeta traz inúmeras dúvidas e perspectivas sobre os futuros problemas que a humanidade enfrentará. De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o planeta tenderá a um aumento de temperatura média entre 1,8° e 4° C nos próximos 100 anos, caso as emissões de gases estufa se mantenham no nível atual (IPCC, 2007). Neste contexto, as massas de gelo do planeta irão sofrer alterações em sua dinâmica, ocasionando uma possível diminuição de sua área e volume, influenciando no balanço energético global (IPCC, 2007).

As geleiras de montanha constituem apenas 1% do total da Criosfera, porém possuem um papel importante a nível global. Em estudo realizado por Dyurgenov e Mayer (2004), no intervalo de dez anos (1989-1998) essas massas de gelo contribuíram em 25% no aumento do nível médio dos mares. De acordo com Francou *et al.* (2000), na década de 1970 as geleiras tropicais representavam 5% do total das geleiras de montanha do planeta. Essas massas de gelo possuem ocorrências na América do Sul, África e Indonésia, mas 99% estão concentradas na Cordilheira dos Andes (Kaser, 1999).

A Bolívia possui 20% do total das geleiras andinas. Sua importância econômica é confirmada pelo uso da água do degelo para o consumo, irrigação de cultivos agrícolas, mineração, geração de hidroeletricidade, entre outros (Ramirez *et al.* 2001; Espinoza, 2007). Assim, com a aceleração do processo de derretimento, inúmeras atividades econômicas serão prejudicadas, além de influenciar na disposição de reservas de água doce e alterar a dinâmica dos cursos fluviais que as possuem como nascente. No Brasil, o balanço hídrico da Bacia Amazônica pode sofrer grande influência com a perda de área coberta de gelo dos Andes, pois ela possui afluentes que tem suas nascentes originadas no escoamento do degelo das geleiras andinas.

Diversos estudos mostram que as geleiras tropicais estão se retraindo drasticamente nas últimas décadas (*i.e.*, Ramirez *et al.* 2001; Francou *et al.* 2000; Francou *et al.* 2003; Ribeiro, 2007). Assim, devido à grande relevância das geleiras de montanhas tropicais, não somente para a população local que sobrevive dos recursos diretos do degelo e do turismo, mas também em escala global, em função do potencial de aumento do nível médio dos oceanos e alterações no padrão de drenagem dos rios, é necessário um monitoramento das áreas que possuem maior risco ou maior tendência ao derretimento.

Nesse contexto, pesquisas realizadas com séries temporais de dados de Sensoriamento Remoto sobre a Criosfera (*e.g.*, Degrassi, 2004; Ribeiro, 2007; Arigony-Neto *et al.* 2006; Mendes Júnior, 2011; entre outros), têm contribuído para o mapeamento, monitoramento e quantificação das áreas do degelo, principalmente através de esforços realizados em conjunto com grupos como o *Global Land Ice Measurements from Space* (GLIMS), *World Glacier Inventory* (WGI) e o *World Glacier Monitoring Service* (WGMS), que visam obter um inventário das geleiras do planeta e o monitoramento contínuo dessas áreas mesmo em regiões de difícil acesso. Assim, esse estudo pretende contribuir para o monitoramento das massas de gelo Andinas na Bolívia, somando esforços com esses grupos, para um melhor entendimento sobre a situação atual da região.

1.1. Justificativa

Uma das grandes preocupações de cientistas, pesquisadores e políticos na atualidade, está associada às mudanças climáticas. Diversas conferências e cúpulas convocadas pela Organização das Nações Unidas (ONU) já reuniram os principais líderes políticos, com o objetivo de discutir as consequências dessas mudanças e traçar metas sustentáveis para a preservação do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais para as futuras gerações (*i.e.*, Conferência de Estocolmo, Eco 92, Rio +20).

Na América do Sul, o derretimento das geleiras da Cordilheira dos Andes pode afetar diversas comunidades, pois muitas delas dependem desse recurso (Ramirez *et al.* 2001; Espinoza, 2007). Aproximadamente 70% do abastecimento de água da cidade de La Paz provêm do derretimento das geleiras (Ramirez *et al.*, 2006). Assim, as consequências do derretimento acelerado podem ser preocupantes para o futuro dessa região.

Além disso, as geleiras podem ser consideradas bons indicadores na identificação de alterações climáticas, pois a evolução das zonas superficiais das geleiras (*i.e.*, neve seca, neve úmida, percolação, gelo exposto) é altamente influenciada por parâmetros meteorológicos e climáticos locais e regionais (Rau *et al.* 2000). Fato que ficou evidenciado no trabalho de Arigony-Neto *et al.* (2009), pois em um curto espaço de tempo foram observadas mudanças em altitude da linha de neve seca¹, que foram atribuídas a eventos extremos de alta temperatura e condições meteorológicas.

¹ A linha ou faixa que separa as áreas onde a neve caída desaparece no verão das áreas nas quais a neve permanece ao longo de todo o ano (Simões, 2004).

Nesse contexto, se faz necessário e importante entender o comportamento das massas de gelo, para auxiliar em possíveis diagnósticos sobre a futura disponibilidade de água do degelo para as cidades e comunidades próximas, podendo assim, ser utilizado na tomada de decisões e manejo desse recurso.

1.2.Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal quantificar e analisar as variações das geleiras da porção norte da Cordilheira Real com a utilização do Índice Normalizado de Neve e Gelo (NDSI) como critério principal na classificação das imagens do sensor Landsat TM, no período entre 1984 e 2010.

Os objetivos específicos necessários para a realização desse trabalho são:

- Adaptar uma cadeia de processamento para transformação radiométrica de imagens Landsat TM;
- Analisar diferentes limiares de NDSI para a obtenção de uma classificação aprimorada;
- Desenvolver uma rotina de classificação com multicritérios para delimitar os limites das geleiras;
- Digitalizar as Bacias de Drenagem Glacial da porção norte da Cordilheira Real; e
- Extrair informações altimétricas e topográficas das geleiras dessa cordilheira.

1.3.Área de Estudo

De acordo com Jordan (1998), na Bolívia as geleiras estão restritas a cotas altimétricas mais elevadas da cordilheira dos Andes. A localização, distribuição, e balanço de massa das geleiras bolivianas são o resultado do clima, da orientação e da elevação das suas cadeias de montanhas. Devido à escassez de precipitação, não existem geleiras no sul da Bolívia.

As duas principais cadeias de montanhas que abrigam essas massas de gelo na Bolívia são:

a) Cordilheira Ocidental, que é formada por vulcões extintos com geleiras de cratera e pequenos cumes isolados cobertos por gelo, onde se destacam: o Nevado Sajama, com 6.542

metros de altitude, o Nevado Payachata, com 6.222 metros de altitude, e o Cerro Quimsachata, com elevação de 6.032 metros; e

b) Cordilheira Oriental, com aproximadamente 600 km² de geleiras. Pode ser dividida em quatro partes: Cordilheira Apolobamba, com maior elevação de 6.059 metros, Cordilheira Real, com altitude de até 6.436 metros, Cordilheira de Muñecas, com elevação máxima de 5.237 metros, e a Cordilheira Tres Cruces (Quimsa Cruz), com maior altitude de 5.760 metros.

A Cordilheira Real está localizada na cadeia de montanhas da Cordilheira Oriental, mais precisamente entre 15° 45' e 16° 40' S e 67° 40' e 68° 35' W, aproximadamente 100 km a nordeste da cidade de La Paz (Smith *et al.*, 2005). O conjunto de Montanhas da Cordilheira Real está dividido em duas partes, a porção Norte (Figura 1) situa-se entre as coordenadas 15° 45' - 16° 20' S, e 68° 01' - 68° 34' W, já porção Sul entre 16° 20' - 16° 40' S e 67° 40' - 67° 58' W (Jordan, 1998).

Seus principais picos são: Illampu, Aconcuma, Calzada, Chiaroco, Chachacomani, Nigruni, Condoriri, Saltuni, Huayna Potosi, Zongo, Cumbre e Chacaltaya (Jordan, 1998). De acordo com Francou *et al.* (2000), o período de acumulação nessa região ocorre entre os meses de janeiro a abril, com um total de mais de 70 % da média da precipitação anual, enquanto a ablação atinge o seu máximo entre outubro e dezembro. Assim, o período anual pode ser dividido em estação seca (de maio a agosto), estação úmida (de janeiro a abril) e um período de transição (de setembro a dezembro), onde ocorre uma formação gradual da estação chuvosa, com as precipitações sendo cada vez mais freqüentes (Sicart *et al.*, 2002).

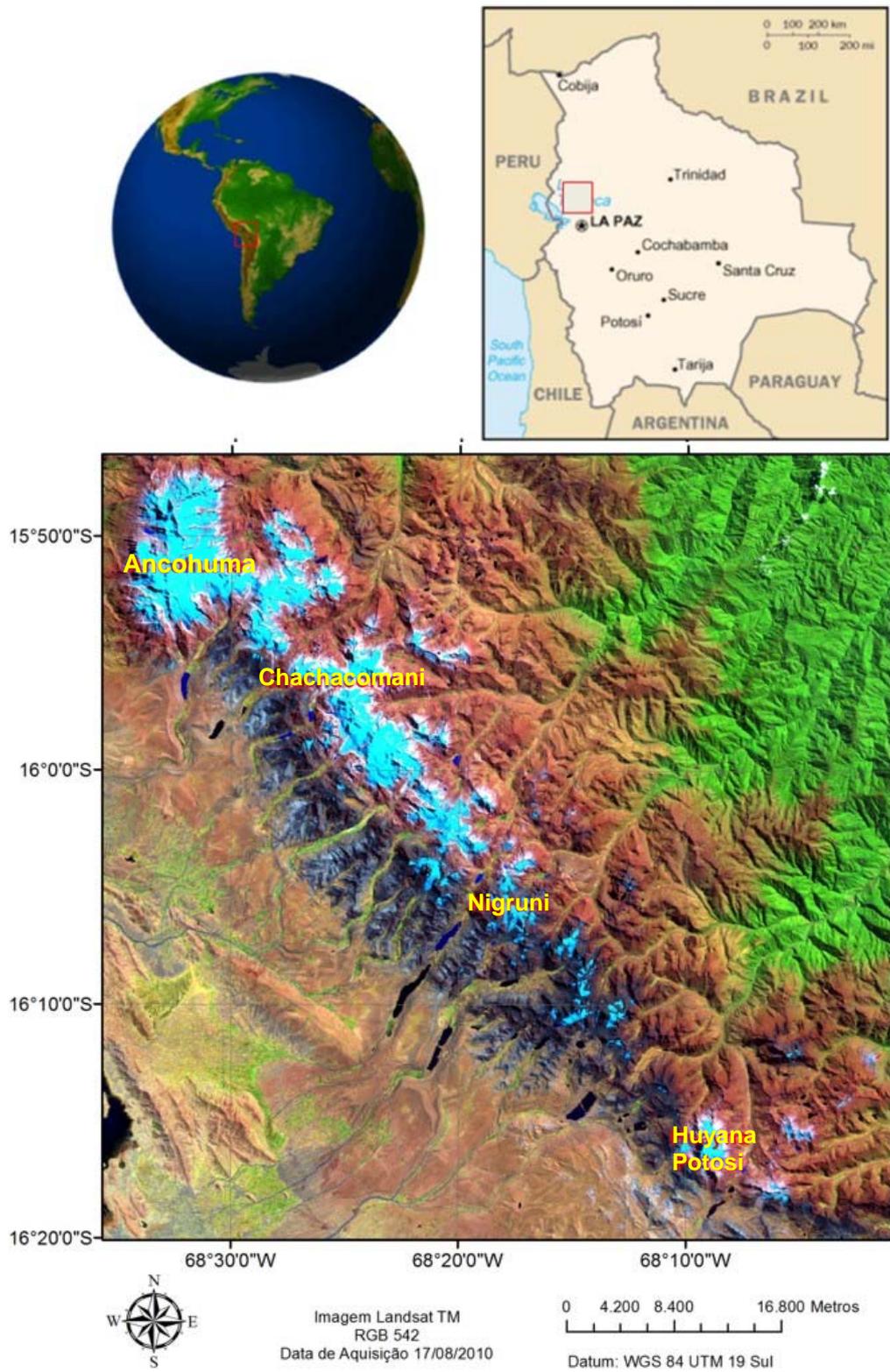


Figura 1: Mapa de localização da porção norte da Cordilheira Real, Bolívia.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Geleiras

Geleiras são corpos de gelo originados pela acumulação de neve (Paterson, 1994). Essas massas de neve e gelo se movem continuamente por fluência, e muitas vezes por deslizamento basal. Esse deslizamento ocorre de um ponto mais alto para outro mais baixo (Figura 2). Se flutuante, a massa de gelo espalha-se continuamente em direção à água aberta. Sua formação acontece onde a acumulação anual de neve é maior que a ablação. As principais formas de ocorrência das geleiras são: mantos de gelo, plataformas de gelo, calota de gelo, geleiras de piemonte e geleiras de montanha (Simões, 2004).

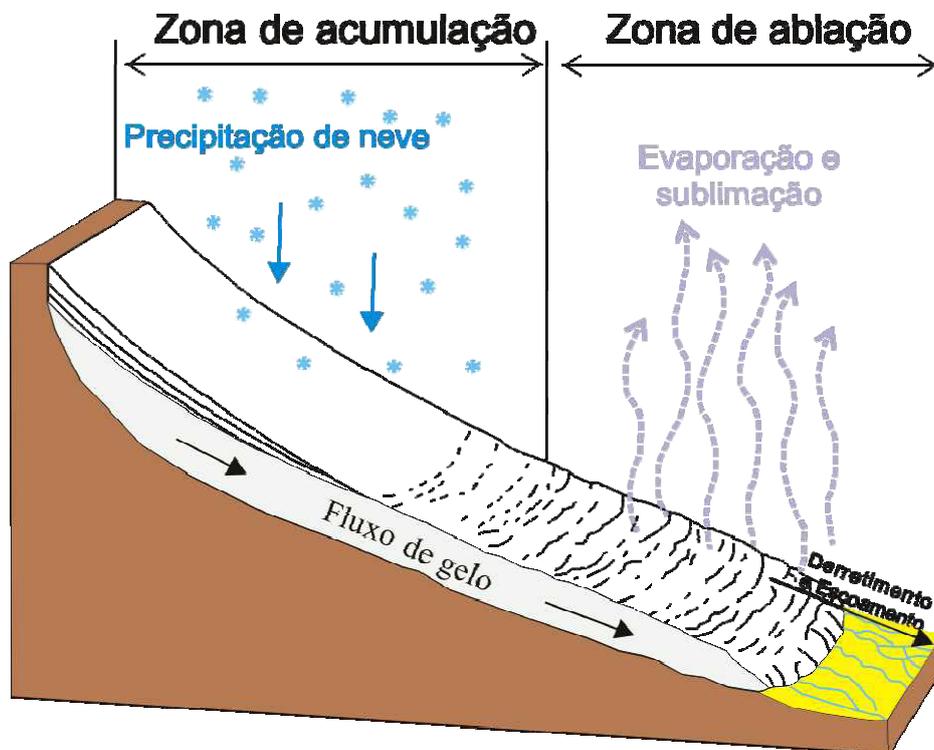


Figura 2: Representação do fluxo de uma geleira, de um local mais alto para outro mais baixo.

Fonte: Ribeiro (2007).

Uma geleira é um sistema que tende a um estado de equilíbrio (*i.e.*, *steady-state*), onde a acumulação total nas partes superiores é igual à ablação na parte inferior (Menziés, 1995). Este equilíbrio se rompe ao variar o balanço anual de acumulação e ablação. Em caso de balanço positivo, o excesso de massa causa aumento da espessura e velocidade da geleira, tendo como consequência avanço de sua frente, ao contrário, com a diminuição da espessura e velocidade, a geleira se retrai. Na maioria das geleiras a troca de massa varia com a altitude,

enquanto a altitude da superfície da geleira se ajusta com o fluxo, caracterizando uma relação indireta de grande importância (Paterson, 1994).

2.2. Geleiras de Montanha

De acordo com Simões (2004), geleira de montanha é qualquer geleira que flui entre as paredes de um vale de montanha, refletindo as principais feições da topografia subglacial. Existem diversas feições morfológicas dessas massas, como geleiras de vale, geleiras de anfiteatro, geleiras de descarga, etc.

A figura 3 mostra os vetores de velocidade do gelo em uma típica geleira de montanha. Na visão em planta da superfície da geleira, a deformação e velocidade do gelo é maior no centro do vale. A parte superior, entre 50-60 m de profundidade, tem comportamento elástico e, portanto sofre fraturamento (*i.e.*, se formam fendas), a parte interna sofre deformação interna por fluência devido ao comportamento visco-plástico do gelo. Finalmente, no contato gelo-substrato, ocorre deslizamento basal, onde a geleira se move em bloco sobre um filme d'água (Paterson, 1994).

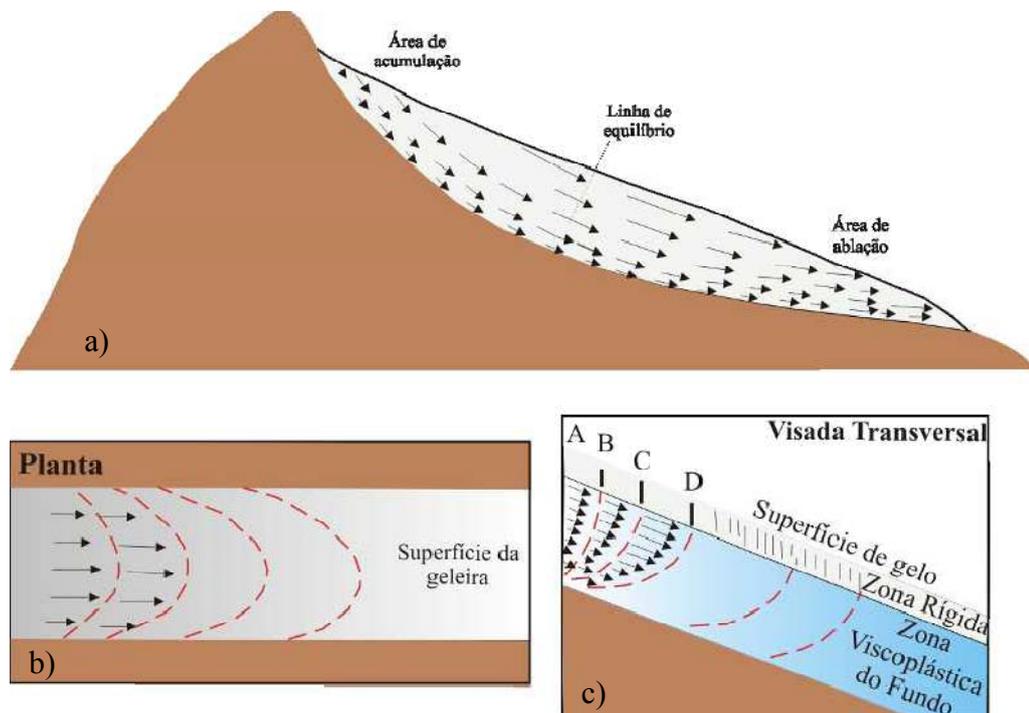


Figura 3: Representação da dinâmica de geleiras de montanha. a) Deslocamento da área de acumulação para locais de menor elevação, devido a ação da gravidade, onde observamos que a superfície da geleira possui maior velocidade que a base. b) Visão em planta da superfície da geleira, onde observamos que a velocidade no centro do vale é maior. c) Visada transversal de uma geleira de montanha, onde observamos a diferença da velocidade em relação as características físicas da geleira. Fonte: Ribeiro (2007).

O projeto *Global Land Ice Measurements from Space* (GLIMS), um esforço internacional com objetivo de criar um inventário global abrangente de gelo da Terra, inclui informações como área das geleiras, geometria, velocidade de superfície e elevação da linha de neve; estima que existam, aproximadamente 160.000 geleiras ao redor do planeta (Armstrong, 2005), distribuídas nas áreas indicadas na figura 4.

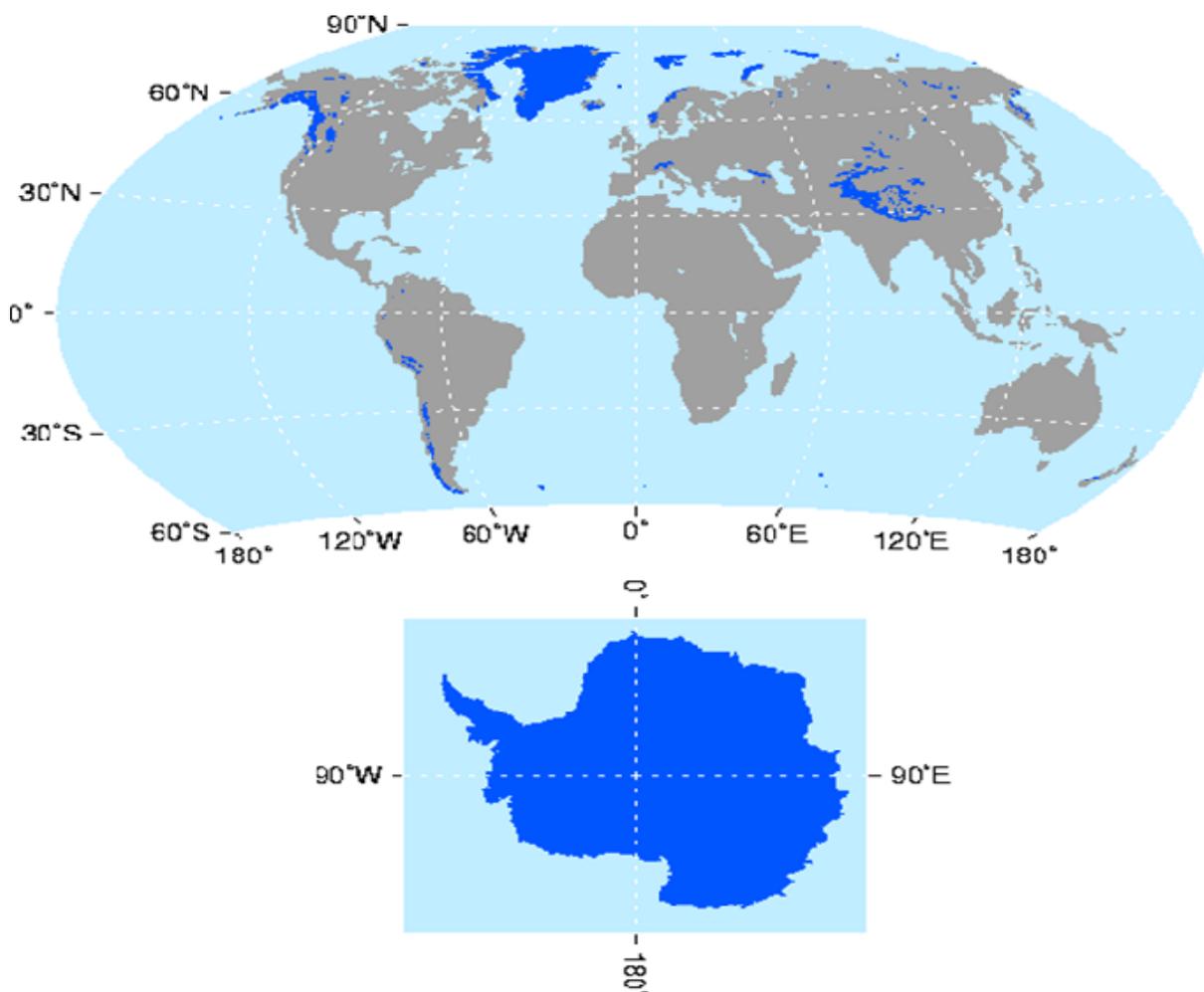


Figura 4: Distribuição das geleiras ao redor do planeta. Fonte: <http://www.glims.org>

As ocorrências das geleiras tropicais no planeta estão limitadas à Indonésia (Nova Guiné), à América do sul (região entre a Venezuela e a Bolívia) e ao leste do continente africano (Tabela 1). De acordo com Kaser (1999), o clima tropical é caracterizado por uma atmosfera homogênea, sem atividade frontal e de uma a duas diferentes estações de precipitação. Consequentemente, o clima tropical influencia a dinâmica das geleiras, de forma diferente das interações climáticas que ocorrem nas geleiras das médias e altas latitudes. As geleiras tropicais da América do Sul, África e Nova Guiné tiveram, em geral, um limite máximo de extensão que ocorreu entre os séculos XV e XIX, durante a Pequena Idade Glacial

(LIA, sigla em inglês), e que têm diminuído desde a segunda metade do século 19. Desde então, as flutuações têm sido diferentemente pronunciadas nas diversas regiões, mas o seu comportamento em geral tem sido em grande parte síncrono.

Tabela 1: Distribuição das geleiras tropicais. Adaptado de Kaser (1999).

Continentes	Local	km²	%	Ano	Fonte
África	Rwenzori	1,7	0,06	1990	Kaser (1998)
	Mt. Kenya	0,4	0,01	1993	Hastenrath (1995)
	Kibo (kilimanjaro)	3,3	0,12	1989	Hastenrath e Greichar (1997)
Ásia	Irian Jaya	3	0,11	1988	Peterson e Peterson (1994)
América do Sul	Colômbia	108,5	3,92	1950	Jordan (1991)
	Venezuela	2,7	0,1	1950	Jordan (1991)
	Equador	112,8	4,08	1970	Jordan (1991)
	Peru	1.972,0	71,28	1970	Jordan (1991)
	Bolívia	562	20,32	1980	Jordan (1991)
	Total	2.766,40	100	1950 - 1990	
Área total de superfície estimada em 1990: < 2,5 x 10 ³ Km ²					

2.3.Sensoriamento Remoto

De acordo com Novo (2010), o Sensoriamento Remoto é definido como a utilização conjunta de sensores, equipamentos de processamento e transmissão de dados colocados a bordo de aeronaves, espaçonaves, ou outras plataformas, com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e a superfície.

O Sensoriamento Remoto pode ser usado para medir e monitorar importantes características biofísicas e atividades humanas no Planeta Terra. É uma ferramenta ou técnica similar a matemática, pois o uso de sofisticados sensores para medir a quantidade de energia eletromagnética que emana de um objeto ou área geográfica a distância (alvo), e depois a extração da informação dos dados através de algoritmos baseados na matemática e estatística, a torna uma atividade científica (Fussell et al., 1986).

As imagens coletadas por sensores remotos possuem algumas características que as diferenciam de outras imagens digitais, que são principalmente a sua estrutura e a sua resolução (Crosta, 1992). A estrutura dessas imagens (Figura 5) é constituída por uma matriz

cujos índices de linhas e de colunas identificam um ponto na imagem, e o correspondente valor do elemento da matriz identifica o nível de cinza daquele ponto (Gonzales e Woods, 2000). Cada célula ou *pixel* (do inglês “*Picture element*”) dessa matriz tem a sua localização definida em um sistema de coordenadas do tipo “linha e coluna”, representados por “y” e “x”, respectivamente, e geralmente tem a sua origem no canto superior esquerdo. Cada *pixel* representa sempre uma área com as mesmas dimensões na superfície da Terra, além de possuir também um atributo numérico “z”, que indica o nível de cinza, o qual varia do preto para o branco. Esse nível de cinza é conhecido como DN (do inglês “*digital number*”), que representa a intensidade da energia eletromagnética (refletida ou emitida) medida pelo sensor sobre uma determinada superfície (Crosta, 1992).

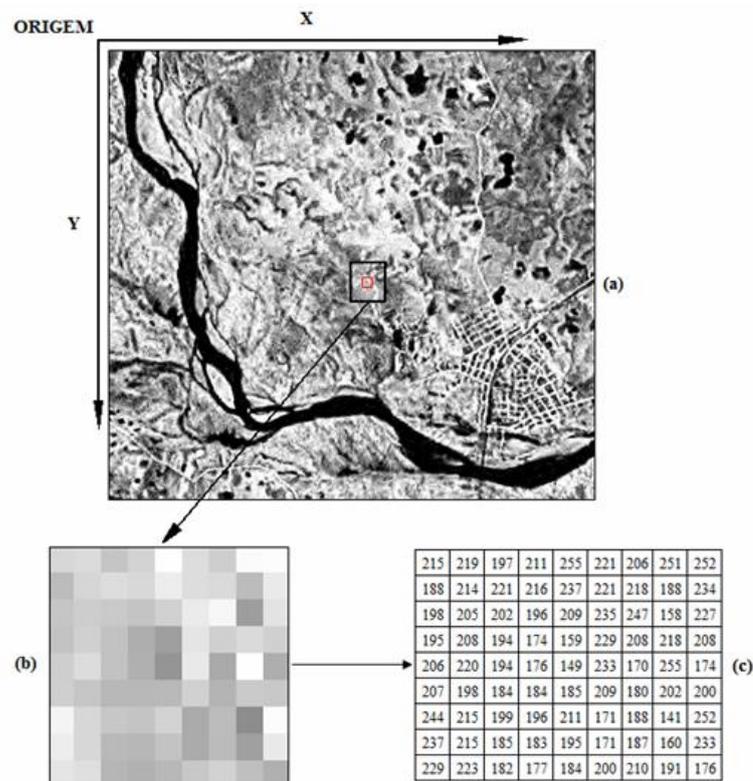


Figura 5: Estrutura de uma imagem. A figura “a” mostra uma imagem de sensoriamento remoto, com destaque para a origem X e Y no canto superior esquerdo. A figura “b” apresenta os pixels e os níveis de cinza de um recorte da imagem. A figura “c” representa os valores digitais (DN) da escala de cinza do recorte da imagem.

Outra característica peculiar das imagens de sensores remotos é a sua resolução. A resolução se desdobra em quatro parâmetros independentes, que são: resolução espacial, resolução temporal, resolução espectral e resolução radiométrica.

A resolução espacial refere-se ao campo de visada instantânea (IFOV, do inglês, Instantaneous Field of View) (Moreira, 2011). Assim, é definida como sendo a capacidade do sistema sensor em “enxergar” objetos na superfície terrestre. Portanto, quanto menor o objeto possível de ser visto, maior é a resolução espacial (Crosta, 1992).

A resolução espectral refere-se à caracterização dos alvos em função da largura da banda espectral em que o sensor opera (Moreira, 2011). Assim, é definida pelo número de bandas espectrais de um sistema sensor e pela largura do intervalo de comprimento de onda coberto por cada banda. Quanto maior o número de bandas e menor a largura do intervalo, maior é a sua resolução espectral (Crosta, 1992).

A resolução radiométrica é definida como a sensibilidade de um detector a diferenças na potencia do sinal à medida que ele registra o fluxo radiante refletido (Jensen, 2009). Assim, é representada pelo número de níveis digitais (DN), representando níveis de cinza, usados para expressar os dados coletados pelo sensor. Portanto, quanto maior os níveis de cinza de uma imagem, maior será a quantidade de detalhes perceptíveis, portanto terá uma melhor resolução radiométrica (Crosta, 1992).

A resolução temporal refere-se a quão frequentemente o sensor registra imagens de uma área particular (Jensen, 2009), ou seja, é o intervalo de tempo que o satélite leva para voltar a recobrir a mesma área. Essa resolução é função das características da plataforma na qual o sensor está colocado (Moreira, 2011).

2.4. Interações entre energia eletromagnética e a superfície

De acordo com as formulações de Maxwell, a aceleração de uma carga elétrica provoca perturbações no campo elétrico e magnético. Essas perturbações são chamadas de ondas eletromagnéticas (Novo, 2010). O comprimento de onda (λ) da radiação eletromagnética depende do tempo pelo qual a partícula é acelerada. Formalmente é definido como a distância média entre duas cristas (Figura 6) e normalmente é medida em micrômetros (μm) e nanômetros (nm) (Jensen, 2009). A frequência de uma onda eletromagnética é dada como o número de comprimentos de onda que passa por um ponto do espaço num determinado tempo (Novo, 2010).

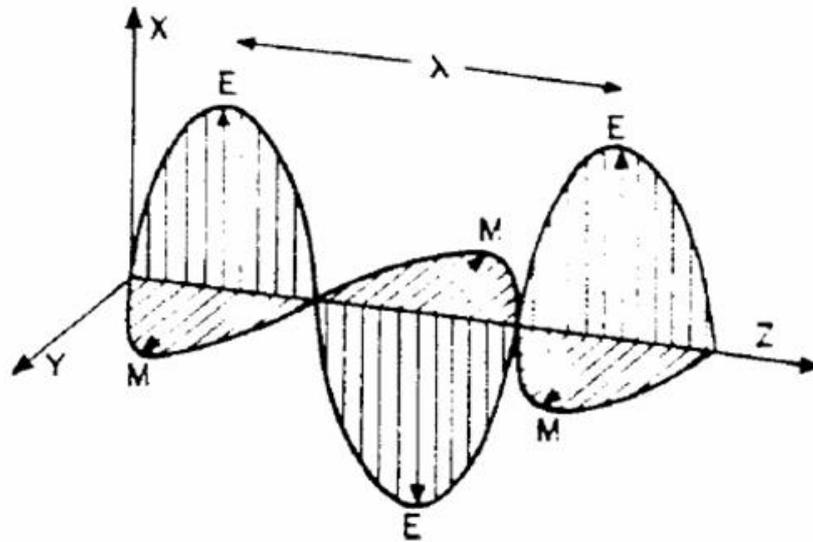


Figura 6: Flutuações do campo elétrico (E) e magnético (M) de uma onda eletromagnética em uma determinada direção (Z). O eixo X representa o plano de excitação do campo elétrico e o eixo Y representa o plano de excitação do campo magnético e o λ representa o comprimento de onda. Fonte: Novo, 2010.

A frequência da onda eletromagnética é inversamente proporcional ao comprimento de onda, pois quanto maior o comprimento de onda, menor é a frequência, e vice-versa (Figura 7). A relação entre comprimento de onda e frequência baseia-se na equação 1.

$$\lambda = c/v \quad (1)$$

onde:

λ = comprimento de onda;

c = velocidade da luz (3×10^8 m/s, vácuo); e

v = frequência

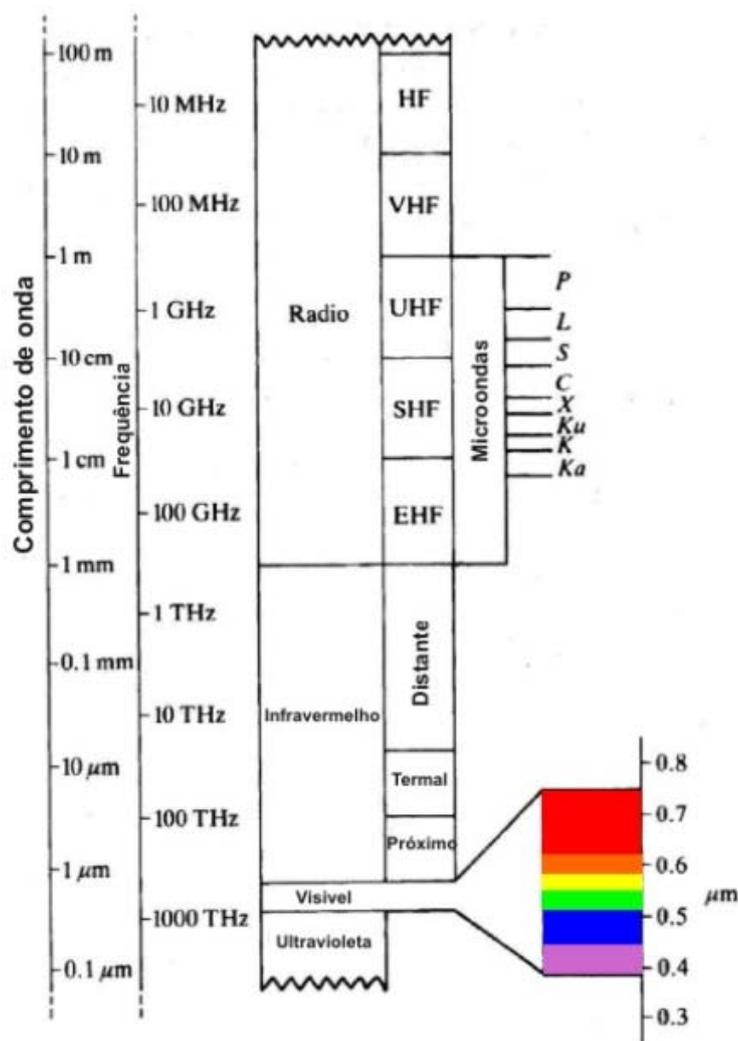


Figura 7: Espectro Eletromagnético. A figura mostra o comprimento de onda e a frequência de algumas regiões do espectro eletromagnético, importantes para o sensoriamento remoto. Fonte: Rees, 2001.

O Sol é a principal fonte de energia eletromagnética disponível para o sensoriamento remoto. Essa radiação, ao interagir com os alvos da superfície terrestre pode ser absorvida, refletida, transmitida e emitida por eles seletivamente. As proporções dessas componentes da interação dependem dos fatores ambientais além das propriedades de cada alvo. Assim, conhecendo o comportamento espectral da radiação refletida e/ou emitida de diferentes alvos da superfície terrestre, é possível identificar alvos semelhantes, baseado apenas nas semelhanças do comportamento espectral (Moreira, 2011).

No sensoriamento Remoto, a energia que emana da superfície da Terra é medida através de sensores acoplados em plataformas, terrestre, suborbital e orbital (Richards e Jia, 2005). Esses dispositivos são capazes de detectar e registrar essa radiação eletromagnética

refletida e/ou emitida pelos alvos, em determinadas faixas do espectro eletromagnético, e gerar informações que possam ser transformadas num produto passível de interpretação, como gráficos de comportamento espectral dos alvos (Figura 8) ou imagens (Moreira, 2011).

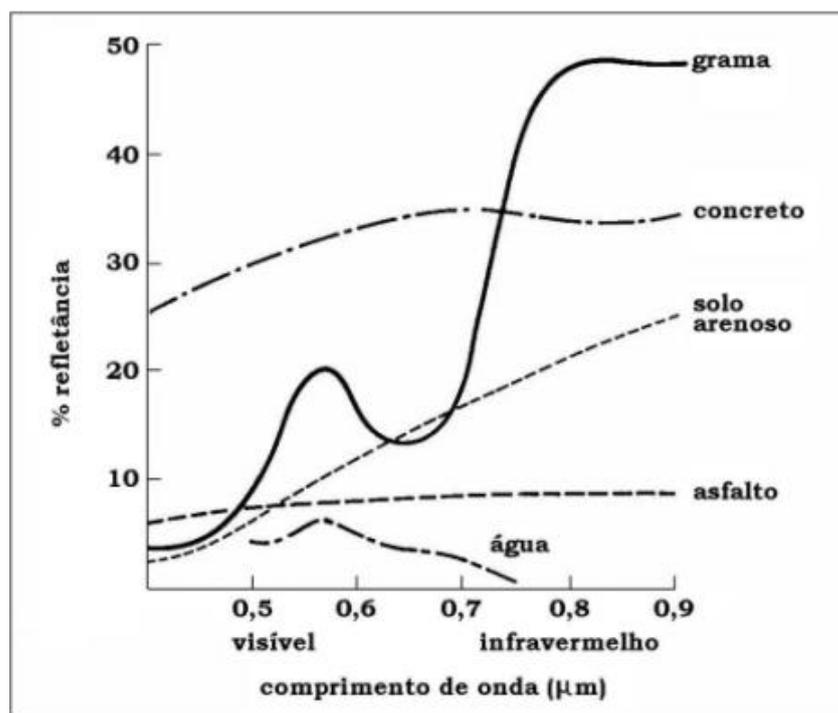


Figura 8: Exemplo do comportamento espectral (porcentagem da radiação eletromagnética que é refletida) de alvos existentes na superfície Terrestre nos comprimentos de onda do visível e do infravermelho. Fonte: Moreira (2011).

2.5. Características da reflectância da neve e do gelo

De acordo com Jensen (2009), a *reflectância* pode ser definida como o processo pela qual a radiação é refletida de um objeto, como por exemplo, o solo exposto, o topo de uma nuvem, um corpo d'água etc. Esse processo envolve a rerradiação de fótons por átomos e moléculas numa camada de aproximadamente metade do comprimento de onda em profundidade. Essa reflectância pode ser medida a grandes distâncias usando sistemas multiespectrais de sensoriamento remoto.

A reflectância espectral da neve e do gelo é influenciada pelo tamanho dos cristais de neve, presença de impurezas, derretimento e recongelamento das camadas superficiais, topografia do terreno e angulo solar (Hall e Martinec, 1985). As respostas espectrais são identificadas na sua superfície devido a variações na quantidade de água livre, rugosidade

superficial, espessura das camadas, tamanho e formato dos grãos. É possível, desta maneira, usar o sensoriamento remoto para distinguir diferentes feições glaciais, entre si e de outros alvos (Williams *et al.*, 1991).

Na figura 9, podemos identificar os valores da reflectância para os diferentes estágios de formação do gelo.

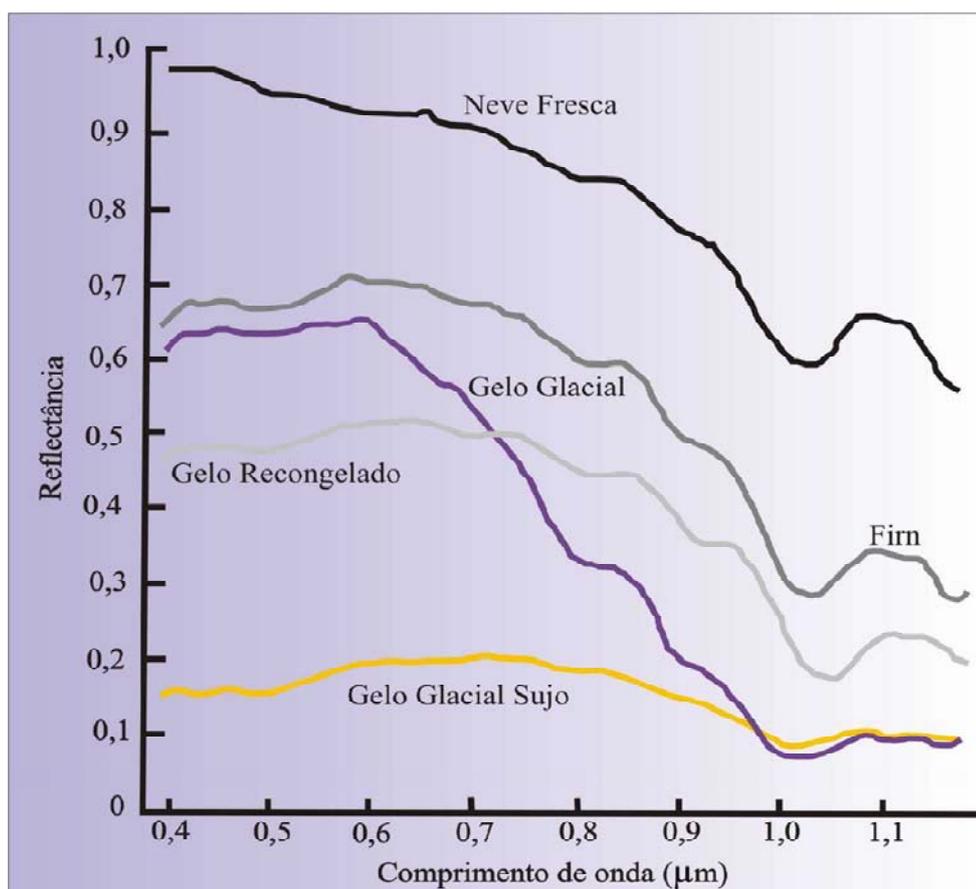


Figura 9: Curvas de reflectância espectral do gelo e da neve. Adaptado de Ribeiro (2007).

A reflectância do gelo, em comparação com a neve, é relativamente baixa nos comprimentos de onda do espectro do visível (0,4 – 0,7 μm). Na região do visível a reflectância da neve praticamente não sofre influência pelo tamanho dos grãos, porém é susceptível às impurezas (Dozier *et al.*, 1981). Enquanto o albedo de uma cobertura de neve fresca pode exceder 90%, este valor pode cair para 40% ou para menos que 20% com a neve suja (Hall e Martinec 1985).

No infravermelho próximo e médio (0,7 – 3,0 μm), a reflectância é sensível ao tamanho do grão e não às impurezas, pois quanto maior o seu diâmetro mais baixo será sua reflectância (Dozier *et al.*, 1981). A reflectância de neve úmida no infravermelho próximo é

menor do que a de neve seca, devido a alterações micro estruturais causadas pela água (Dozier,1989). De acordo com Hall e Martinec (1985), a reflectância de neve não depende diretamente da densidade, embora os processos que causam o aumento na densidade ao longo do tempo também levam a um aumento no tamanho do grão.

2.6. Processamento digital de Imagens de Sensoriamento Remoto

A função primordial do processamento digital de imagens de sensoriamento remoto é a de facilitar a identificação e a extração das informações contidas nas imagens. Assim, sistemas computacionais são utilizados para atividades interativas de análise e manipulação das imagens brutas, pois vários tipos de degradações e distorções, inerentes ao processo de aquisição, transmissão e visualização, contribuem para limitar ainda mais o visual humano, que dificilmente é capaz de processar o enorme volume de informações presentes numa imagem (Crosta, 1992). O processamento de imagens digitais envolve procedimentos que são geralmente expressos em forma algorítmica (Gonzales e Woods, 2000).

De acordo com Gonzales e Woods (2000) o processamento de imagens é caracterizado por soluções específicas, ou seja, técnicas que funcionam bem em uma área podem se mostrar totalmente inadequada em outra área.

2.6.1. Pré-Processamento

A função chave no pré-processamento é melhorar a imagem de forma a aumentar as chances para o sucesso dos processos seguintes (Gonzales e Woods, 2000). Assim, o pré-processamento é a preparação dos dados provenientes das imagens de satélites para a utilização em análises visuais, classificações, etc. Algumas técnicas são empregadas com o objetivo de melhorar a qualidade visual e radiométricas, sendo as mais utilizadas a redução de ruídos, a retificação geométrica, o registro e a redução da dimensionalidade (Moreira, 2011).

De acordo com Novo (2010), essas técnicas referem-se ao conjunto de programas que permitem a transformação de dados digitais brutos em dados corrigidos radiométrica e geometricamente, além de correções dos efeitos atmosféricos.

A correção radiométrica tem como função minimizar as diferenças entre os níveis de cinza registrados (problemas de calibração dos detectores) através de filtros e ajuste do histograma (Novo, 2010), e ou transformar imagens em DN para valores em radiância e reflectância. As correções geométricas têm com objetivo reorganizar os *pixels* da imagem em

relação a determinados sistemas de projeção cartográfico, através de uma reamostragem utilizando pontos de controle no terreno (Novo, 2010). A correção atmosférica tem como objetivo reduzir o efeito da interferência da atmosfera sobre os valores de DN das imagens, pois ao atravessar a atmosfera terrestre, a radiação pode sofrer alterações (*i.e.* absorção, espalhamento) e assim afetar o sinal registrado pelo detector (Novo, 2010).

2.6.2. Classificação de imagens de Sensoriamento remoto

A interpretação computacional das imagens de Sensoriamento Remoto é referida como uma análise quantitativa, pela capacidade de identificar pixels de acordo com suas propriedades numéricas e devido à sua capacidade para a contagem desses pixels para as estimativas de área. Essa interpretação, geralmente chamada de classificação, é um método através do qual classes podem ser ligadas a pixels, tendo em conta o seu caráter espectral (Richards e Jia, 2005). De acordo com Novo (2010), as técnicas de classificação digital implicam na implementação de um processo de decisão para que o computador possa atribuir um certo conjunto de pontos na imagem a uma determinada classe.

Para Richards e Jia (2005), a classificação de dados de imagens multiespectrais deve ser simples. Porém, para alcançar resultados de precisão aceitável são necessários alguns cuidados, primeiro na escolha das ferramentas analíticas para serem usadas e, em seguida, na sua aplicação.

3. Material e Métodos

A metodologia deste trabalho propõe uma análise multitemporal de imagens Landsat 5 TM com a utilização do Índice de Diferença Normalizada da Neve e Gelo (NDSI) como critério de classificação. Neste item serão descritos todos os dados e métodos utilizados no estudo.

3.1. Dados e Aquisição

Os dados de Sensoriamento Remoto utilizados neste estudo foram adquiridos gratuitamente através de download via internet. Foram utilizadas imagens do satélite *Landsat 5*, e o modelo digital de elevação global (GDEM) elaborado com dados do sensor ASTER.

3.1.1. Landsat Thematic Mapper

O satélite *Landsat 5* com o sensor *Thematic Mapper* (TM) foi lançado em março de 1984. O Landsat TM é um sensor óptico, que registra a energia eletromagnética nas regiões do visível, infravermelho próximo, infravermelho médio e infravermelho termal. Esse sensor gera imagens multiespectrais com melhores resoluções espacial, espectral, e radiométrica do que a do seu antecessor, o sensor *Multispectral Scanner* (MSS) (Jensen, 2009). As características orbitais do satélite estão apresentadas na Tabela 2. Além disso, o sensor TM do satélite Landsat possui uma resolução temporal de 16 dias, e uma cena representa no solo uma área de abrangência de 185 x 185 km. Possui sete bandas, sendo que cada banda representa uma faixa do espectro eletromagnético (Tabela 3).

Tabela 2: Características orbitais do satélite Landsat TM. Fonte: www.dgi.inpe.br/html/landsat.htm.

Altitude	705 km
Velocidade	7,7 km/seg
Peso	2 ton
Tempo de obtenção de uma cena	24 seg.

Tabela 3: Características do sensor Landsat TM. Fonte:
<http://www.sat.cnpem.embrapa.br/conteudo/landsat.htm>.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral (μm)	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Resolução Radiométrica
TM (Thematic Mapper)	(B1) Azul	0.45 - 0.52	30 m	16 dias	8 bits
	(B2) Verde	0.50 - 0.60			
	(B3) Vermelho	0.63 - 0.69			
	(B4) Infravermelho próximo	0.76 - 0.90			
	(B5) Infravermelho médio	1.55 - 1.75			
	(B6) Infravermelho termal	10.4 - 12.5	120 m		
	(B7) Infravermelho médio	2.08 - 2.35	30 m		

As imagens Landsat TM utilizadas no estudo foram adquiridas gratuitamente através da busca e solicitação via internet, pelos sites do *United States Geological Survey* (USGS) nos seguintes endereços: <http://earthexplorer.usgs.gov> e <http://glovis.usgs.gov>. Esses catálogos online permitem uma interação com o banco de dados do USGS, onde são disponibilizadas imagens dos satélites *Landsat-1*, *Landsat-2*, *Landsat-3*, *Landsat-5*, *Landsat-7*, além de outros produtos como fotografias aéreas, dados do *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), Modelos Digitais de Elevação (MDEs), mapas digitais, entre outros. A escolha por esse sensor foi realizada devido a grande disponibilidade de séries temporais de dados.

Primeiramente, foram identificadas as imagens dos sensores Landsat TM disponíveis para a Cordilheira Real. Após, foi efetuada a seleção daquelas que não possuíam cobertura de nuvens sobre a área de estudo. Outro fator atribuído na seleção das imagens é referente a data de aquisição, pois as imagens de uma mesma época do ano tendem a ter uma mesma característica quanto ao regime climático, o qual influencia nas características superficiais das geleiras e da neve. Assim, para minimizar a influência da neve mascarando os limites das geleiras com as rochas e o solo, todas as imagens selecionadas possuíram como critério primário sua aquisição ter sido efetuada na estação seca, entre os meses de julho e setembro. Ao final da busca foram selecionadas 10 imagens do sensor Landsat TM 5 (Tabela 4), na órbita 071, ponto 001.

Tabela 4: Imagens Seleccionadas para análise.

Data de Aquisição	Satélite	Sensor
08/07/1984	Landsat 05	TM
20/08/1988	Landsat 05	TM
05/08/1994	Landsat 05	TM
28/07/1997	Landsat 05	TM
03/08/1999	Landsat 05	TM
05/08/2000	Landsat 05	TM
15/07/2004	Landsat 05	TM
27/08/2008	Landsat 05	TM
30/08/2009	Landsat 05	TM
17/08/2010	Landsat 05	TM

3.1.2. Modelo Digital de Elevação Global ASTER

O Modelo Digital de Elevação Global (GDEM), elaborado a partir de pares estereoscópicos de imagens do sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), é um projeto em parceria entre o *Ministry of Economy, Trade and Industry* (METI) do Japão e a *United States National Aeronautics and Space Administration* (NASA). A cobertura do ASTER GDEM vai de 83° de latitude norte a 83° de latitude Sul, com resolução espacial de 1 arco-segundo, aproximadamente 30 metros na linha do equador, e referenciada para o *World Geodetic System 1984* (WGS84). Sua precisão vertical global é de 20 metros, com confiança de 95%. (ASTER GDEM Validation Team, 2009).

Os dados do GDEM estão disponíveis para download em sua primeira versão no site <https://wist.echo.nasa.gov/~wist/api/imswelcome/>. A solicitação foi realizada através da busca por coordenadas geográficas e o download ocorreu sem custo, via Protocolo de Transferência de Arquivos (FTP). A escolha por esse modelo de elevação foi realizada devido a ausência de ruídos área de estudo.

3.2. Softwares e Ferramentas

Esse trabalho foi realizado no Laboratório de Monitoramento da Criosfera (LaCrio) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), o qual é coordenado pelo Prof. Dr. Jorge Arigony Neto. Todos os softwares e hardwares necessários para a realização da dissertação

estavam disponíveis no Lacio. Na Tabela 5 são descritas as aplicações dos programas computacionais de processamento digital de imagens e SIG que foram utilizadas na execução da pesquisa.

Tabela 5: Aplicativos computacionais utilizados no processamento e manipulação das imagens.

SOFTWARE	APLICAÇÃO
Erdas Imagine 10	Pré-Processamento das Imagens; Classificação; Pós-Processamento;
ARCGIS™	Delimitação das Bacias Glaciais; Álgebra de vetores (overlay); Extração de informações altimétricas e de orientação da superfície das geleiras (<i>Zonal Statistics</i>); Geração Tabelas e Mapas.

3.3. Processamento das Imagens

A Figura 10 representa a cadeia de processamento utilizada para o processamento das imagens, modelo digital de elevação, e realização de outros procedimentos em SIG. As etapas de processamento e os parâmetros utilizados para o tratamento dos dados serão descritos nesta seção.

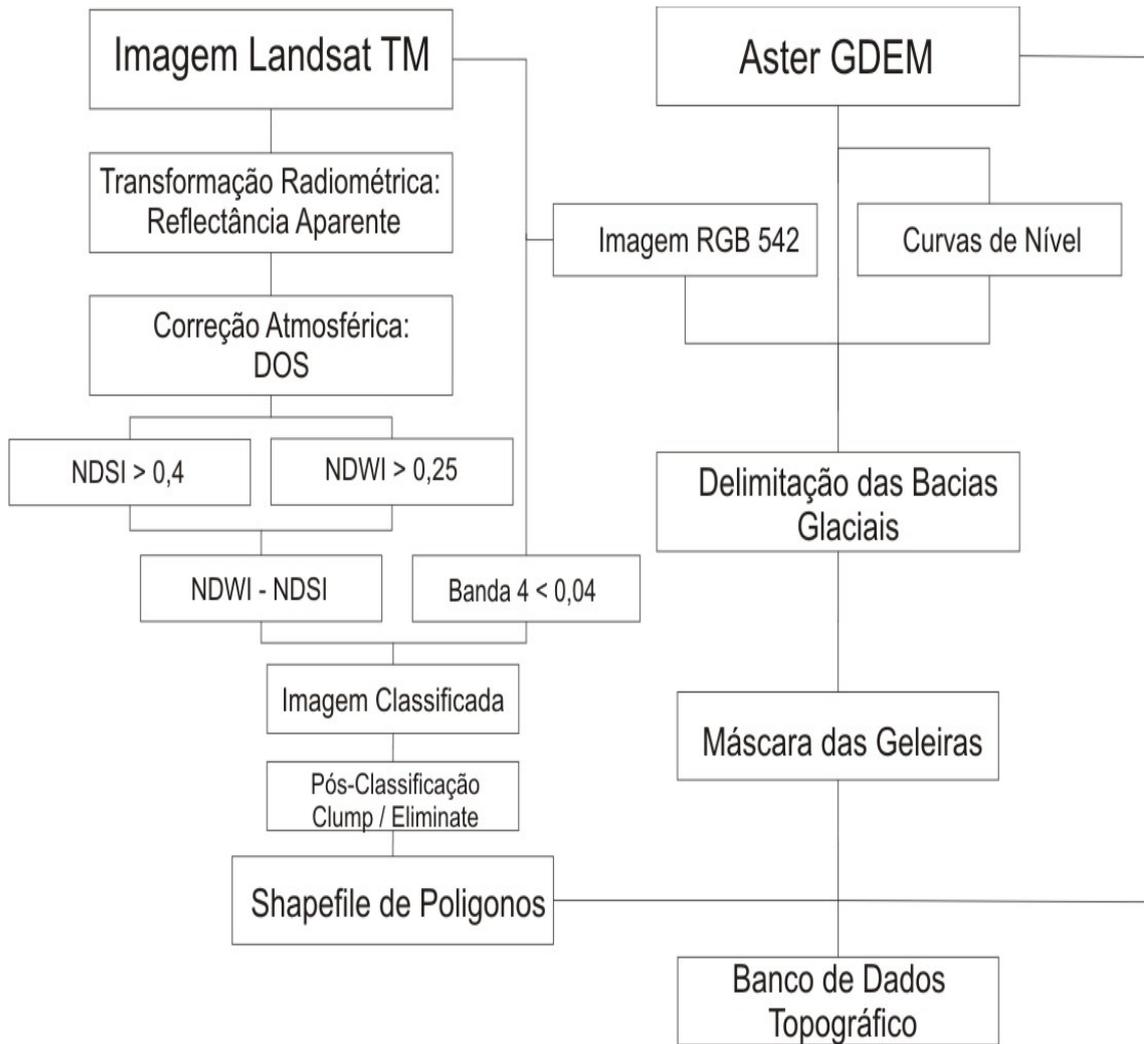


Figura 10: Cadeia utilizada para o processamento das imagens Landsat, delimitação das Bacias Glaciais e a extração das informações topográficas da porção norte da Cordilheira Real.

No processamento, as imagens adquiridas, no formato de DN, foram transformadas para Reflectância Aparente e conseqüentemente transformadas para Reflectância Superficial. A correção atmosférica foi realizada através do método de Subtração do Pixel Escuro (DOS). A classificação foi realizada com a subtração dos produtos de NDSI e NDWI, auxiliados pela reflectância da Banda do infravermelho próximo, e após foram transformados em arquivos vetorizados. A delimitação das geleiras ocorreu de forma manual, com auxílio do modelo digital de elevação, curvas de nível, e uma imagem RGB de referência. Após a criação da máscara das geleiras, os arquivos vetorizados foram interseccionados com os resultados da classificação, gerando mascaras de geleiras para todas as imagens analisadas. Após, foram geradas tabelas de atributos com informações extraídas do modelo de elevação GDEM, tornando possível analisar as mudanças temporais em área, elevação e orientação das geleiras através do banco de dados.

3.3.1. Pré-processamento

As imagens adquiridas foram disponibilizadas com o nível de processamento “LT1” (*i.e.*, com correção das distorções do terreno, nível 1) realizado pelo USGS, ou seja, os dados foram fornecidos com correções geométrica (Figura 11), geradas com pontos de controle do terreno (GCP, sigla em inglês) originadas da base de dados do projeto *Global Land Surveys 2000* (GLS2000), e empregando o Modelo Digital de Elevação (MDE) do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) para a correção dos efeitos topográficos (USGS, 2011). Dessa forma, após uma análise visual do co-registro entre as imagens, percebeu-se que não era necessário realizar nenhuma alteração geométrica entre as imagens adquiridas, pois entre todas as imagens, apenas a imagem de 05/08/1994 apresentou 1 pixel de deslocamento em “y”, as demais foram consideradas precisas quanto ao posicionamento. A Tabela 6 apresenta os valores médios dos residuais dos pontos de controle utilizados na ortorretificação das imagens.

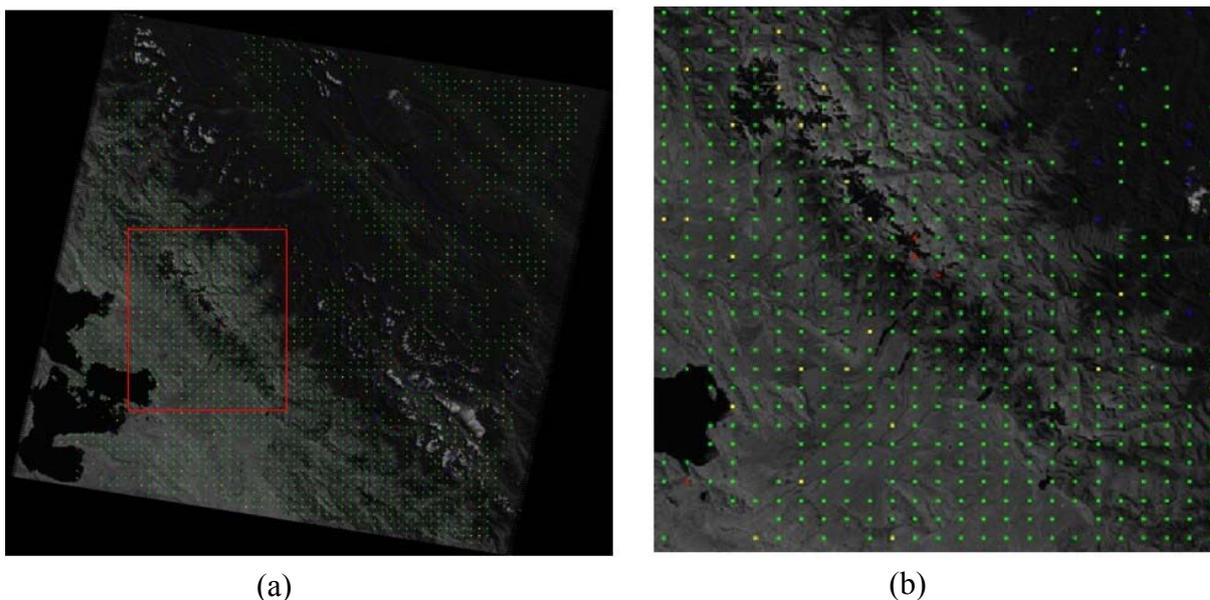


Figura 11: Pontos de controle utilizados para o georreferenciamento e ortorretificação das imagens. A figura “a” mostra a distribuição dos GCP’s utilizados na imagem de 2010. A figura “b” mostra a distribuição dos GCP’s na área da Cordilheira Real. Os pontos em verde representam um RMSE ≤ 0.5 pixel, os pontos em ciano representam um RMSE entre 0.5 e 1pixel, os pontos em azul com RMSE entre 1 e 2 pixels, os pontos em amarelo representam um RMSE entre 2 e 3 pixel, e os pontos em vermelho com RMSE > 3 pixel.

Tabela 6: Média do resíduo referente a ortorretificação das imagens Landsat TM observada nos metadados das imagens. Essa informação representa a precisão da correção geométrica, que utilizou técnicas de correlação cruzada, com base na fonte de dados do GLS 2000 como referência, pela USGS.

Data da imagem	Número de GCPs	Resíduo em y (metros)	Resíduo em x (metros)
08/07/1984	106	3,85	8,5
20/08/1988	114	16,8	46,6
05/08/1994	131	23,9	5,8
28/07/1997	130	14	46,5
03/08/1999	142	11,8	73,8
05/08/2000	135	38,9	71,1
15/07/2004	131	27,6	45,7
27/08/2008	141	22,6	16,8
30/08/2009	127	4,3	15,7
17/08/2010	151	21,2	8,4

Os pixels das imagens Landsat TM disponibilizadas pelo USGS não possuem os valores físicos dos objetos (*i.e.*, reflectância ou radiância), mas sim valores quantizados em DN. Como o estudo visa a análise de uma série temporal de dados TM, é importante que os valores de pixels a serem utilizados sejam valores físicos, uma vez que mudanças na resposta espectral estariam relacionadas somente às mudanças nas propriedades estruturais e espectrais do alvo. Assim, foi realizada uma transformação radiométrica dos valores de DN das imagens para reflectância aparente e após estes foram transformados para valores de reflectância superficial. A Reflectância Aparente, ou Reflectância ao Topo da Atmosfera (TOA), é assumida como sendo aquela captada pelo sensor, com a interferência da atmosfera sobre o sinal; já a Reflectância Superficial, é considerada como sendo a reflectância real do objeto, tendo sido aplicado uma correção atmosférica para reduzir os efeitos atmosféricos sobre a radiação captada pelo sensor.

A transformação dos pixels das imagens foi obtida seguindo os procedimentos de Chander e Markham (2003) e Chander et al. (2007), onde primeiramente foram transformados os valores para Radiância usando a equação 2.

(2)

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{255} \right) Q_{cal} + LMIN_{\lambda}$$

Onde:

L_{λ} = Radiância espectral;

$LMIN_{\lambda}$ = Radiância espectral equivalente ao nível digital mínimo;

$LMAX_{\lambda}$ = Radiância espectral equivalente ao nível digital máximo; e

Q_{CAL} = nível digital.

Os valores para essa transformação estão disponíveis no arquivo de metadados provenientes das imagens e também nos arquivos com parâmetros para calibração (*Calibration Parameter Files* - CPFs) encontrados no endereço http://landsat.usgs.gov/science_L5_cpf.php do USGS. A título de exemplo, a Tabela 7 apresenta os parâmetros utilizados para a imagem de 08/07/1984. Após a transformação dos valores para radiância, as imagens foram transformadas em reflectância aparente com o uso da equação 3.

Tabela 7: Valores encontrados nos metadados para o ano de 1984.

08/07/1984	Lmin	Lmax	Ganho	Offset	Irradiância Solar
B1	-1,520	169,000	0,66871	-1,520	1957
B2	-2,840	333,000	1,31702	-2,840	1826
B3	-1,170	264,000	1,03988	-1,170	1554
B4	-1,510	221,000	0,87259	-1,510	1036
B5	-0,370	30,200	0,11988	-0,370	215
B7	-0,150	16,500	0,06529	-0,150	80,670

(3)

$$\rho_p = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{E_{sol\lambda} \cos \theta_s}$$

P_p = Reflectância aparente;

L_{λ} = Radiância espectral ($W\ cm^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$);

d = Distância Terra-Sol em unidades astronômicas;

$E_{sol\lambda}$ = Irradiância espectral média no topo da atmosfera ($W\ cm^{-2}\ \mu m^{-1}$); e

Θ_s = ângulo zenital solar, em graus.

Nessa etapa, o parâmetro “distancia Terra-Sol”, que não consta nos metadados e nos “CPFs” Landsat, foi adquirido através de uma planilha eletrônica formulada pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), disponível no endereço http://www.srrb.noaa.gov/highlights/sunrise/NOAA_Solar_Calculations_day.xls.

A aplicação dessas duas equações resultou em uma imagem com os pixels em valores de reflectância aparente. Assim, para obtermos valores de reflectância superficial foi necessário minimizar o efeito atmosférico nas imagens. Para essa etapa, foi aplicado o método de Subtração do Pixel Escuro (DOS, sigla em inglês), proposto por Chavez (1988). Neste método, a interferência atmosférica é estimada através dos valores obtidos da imagem. O DOS é um método simples e não necessita de dados sobre as condições atmosféricas durante a aquisição da imagem.

Segundo Chavez (1988), o método DOS parte do princípio que existem alvos escuros na imagem, que podem ser observados em corpos de água profundos ou sombras topográficas, e que deveriam conter valores de reflectância muito baixos, próximos de 1 %. Assim, para realizar essa correção é necessário encontrar o valor digital mais baixo da imagem, a partir do seu histograma de frequência. Como esse método é empírico, podemos apenas estimar a interferência ocasionada pelo espalhamento atmosférico e eliminá-la. O efeito da absorção atmosférica sobre as imagens não é minimizado por esse método.

Para não superestimar a correção nas demais bandas, Chavez (1988) propôs um modelo para o cálculo nas diferentes bandas TM (Tabela 8), onde apenas o valor do pixel escolhido da banda com menor comprimento de onda (*i.e.*, Banda 1), serve como base para calcular as demais. Neste trabalho, todas as imagens demonstraram possuir uma situação atmosférica “Muito Limpa”.

Tabela 8: Limiares de Números digitais, situação atmosférica equivalente e o modelo de espalhamento relativo sugerido. Fonte: Adaptado de Chavez (1988).

DN do Pixel Escuro na Banda 1	Situação Atmosférica	Modelo de Espalhamento
< 56	Muito Limpa	λ^{-4}
De 56 a 75	Limpa	λ^{-2}
De 76 a 95	Moderada	λ^{-1}
De 96 a 115	Com Bruma	$\lambda^{-0,7}$
> 115	Com muita Bruma	$\lambda^{-0,5}$

Os valores digitais iniciais utilizados para as imagens selecionadas neste trabalho, foram escolhidos através da planilha eletrônica elaborada por Gürtler (2005), onde a autora propôs encontrar esse valor inicial a partir do cálculo do crescimento relativo (C%) da frequência de um DN com o DN seguinte, utilizando a equação 4:

(4)

$$C \%_i = 100 \times \frac{f_{i+1} - f_i}{f_i}$$

Onde:

f_i é a frequência do DN_i ;

f_{i+1} é a frequência do DN_{i+1} ;

i refere-se aos valores de níveis digitais possíveis,

Os valores iniciais encontrados para a banda 1 nas imagens, foram tabelados e posteriormente utilizados em outra planilha, elaborada por Milton (1994). Nessa planilha, que segue o modelo proposto por Chavez (1988), é possível identificar os valores a serem subtraídos das bandas posteriores do sensor TM. Como os pixels da imagem foram transformados anteriormente em valores de reflectância aparente, o modelo da planilha foi alterado, tendo como Ganho = 1 e Offset = 0. A tabela 9 mostra os valores a serem subtraídos através desse procedimento para todas as bandas das imagens selecionadas.

Tabela 9: Valores de reflectância subtraídos das imagens utilizadas no estudo, através do método DOS de correção Atmosférica. Esses valores foram obtidos através de observação do crescimento relativo do histograma de frequência na Banda 1 e calculados pra as demais bandas conforme Milton(1994).

DATA	Rmin_B1	Rmin_B2	Rmin_B3	Rmin_B4	Rmin_B5	Rmin_B7
08/07/1984	0,0493095	0,0344766	0,0213385	0,010372	0,00579009	0,00311747
20/08/1988	0,0445636	0,0260324	0,0120026	0,00494887	0,00237957	0
05/08/1994	0,0487944	0,0331928	0,0206026	0,0100143	0,00559041	0,00300996
28/07/1997	0,0418079	0,0243278	0,013274	0,00547312	0,00263164	0
03/08/1999	0,0456355	0,0270892	0,0126787	0,00933513	0,00251362	0
05/08/2000	0,0449015	0,0268213	0,0157844	0,00924281	0,00515973	0,00277808
15/07/2004	0,0475247	0,0322224	0,016602	0,00972159	0,00542701	0,00292198
27/08/2008	0,0546125	0,0269319	0,0167165	0,00812538	0,00453594	0,00244222
30/08/2009	0,0565393	0,0361089	0,0190902	0,00793148	0,00442769	0,00238394
17/08/2010	0,0565145	0,03481	0,020238	0,0121081	0,00469392	0,00252728

Após a subtração desses valores nas bandas do sensor TM, obtivemos como resultado um valor estimado da reflectância superficial. As etapas de transformação em radiância, reflectância e Subtração do Pixel Escuro, foram efetuadas através de duas rotinas criadas no *Spatial Modeler Language* do software Erdas Imagine 10. Essas rotinas, compostas de operações matemáticas, foram elaboradas de acordo com as equações apresentadas anteriormente, gerando uma nova imagem com os resultados. No método DOS, a rotina criada realizou a subtração dos valores, apresentados na tabela anterior, dos pixels das imagens de reflectância.

3.3.2. Recorte da Imagem

Como a porção norte Cordilheira Real preenche apenas uma pequena parte do total da cena da órbita 071/ponto 001 do Landsat TM, foi realizado um recorte na imagem. O tamanho reduzido torna mais rápido o processamento nas próximas etapas. A ferramenta “Subset” do software Erdas Imagine 10 foi utilizada para a realização dos recortes das imagens. Os limites norte e sul foram respectivamente as coordenadas $15^{\circ}45'S$ e $16^{\circ}20'S$, e os limites leste e oeste foram as coordenadas $68^{\circ}01'W$ e $68^{\circ}34'W$ (Figura 12).

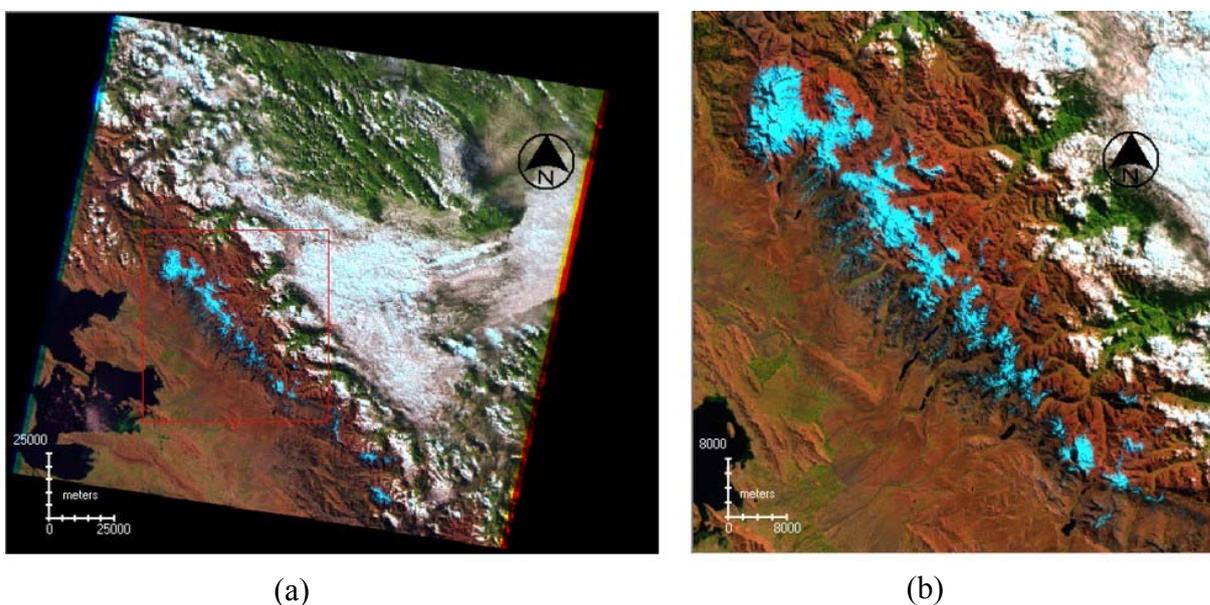


Figura 12: Ilustração dos limites Norte e Sul utilizados no recorte das imagens, exemplificado espacialmente na imagem RGB 542 de 08/07/1984. A Figura (a) representa toda a cena Landsat TM da órbita 071 e ponto 001. A Figura (b) apresenta o resultado do recorte na imagem.

3.3.3. Classificação

A classificação das áreas de geleiras seguiu o método proposto por Dozier (1989), onde o índice de Diferença Normalizada da Neve (NDSI) foi utilizado para realizar uma discriminação espectral entre neve, solo, rochas e cobertura de nuvens. O NDSI é um método de discriminação de superfícies de neve e gelo, que se assemelha ao Índice de Diferença Normalizada da Vegetação (NDVI). Esse método é baseado no decréscimo da reflectância da neve de 80-90% nos comprimentos de onda menores que $1\mu\text{m}$ para valores menores do que 10% em $1,5\mu\text{m}$.

Essa classificação pode ser realizada utilizando apenas duas bandas do sensor TM, a partir da razão mostrada na equação 5:

$$NDSI = \frac{TM2 - TM5}{TM2 + TM5} \quad (5)$$

onde TM2 e TM5 correspondem respectivamente as bandas 2 (verde) e 5 (infravermelho médio) do sensor TM.

Os valores resultantes do NDSI variam entre -1 e 1 (Figura 13). Assim, para encontrarmos um valor de limiar para classificação, foi necessário testar os valores e avaliar os resultados juntamente com uma composição colorida. Diversos estudos glaciológicos utilizaram o NDSI ao longo dos últimos anos. Dozier (1989) utilizou o limiar de 0,4 como sendo menor valor referente a ocorrência de neve e gelo, para separar dos demais alvos (*i.e.*, solo, rochas e cobertura de nuvens), Silvério *et al.* (2004) utilizaram os valores maiores do que 0,52 e 0,4 para mapear a cobertura de gelo da Cordilheira Branca no Peru no período de 1987 a 1996, e também Choi *et al.* (2004) utilizaram um limiar de 0,7 na detecção de nuvens em áreas de geleiras. A neve assume normalmente os valores maiores do que 0,4 (Dozier, 1989; Hall *et al.*, 1995), entretanto estudos recentes sugerem que o limiar ótimo pode variar sazonalmente (Rees, 2006).

Após diversos testes e comparações com as imagens utilizadas no estudo, verificou-se que o limiar de 0,4 é o que melhor distingue as áreas cobertas por neve e gelo das demais feições da imagem. Assim, todos os valores de NDSI maiores ou iguais a 0,4 representam neve ou gelo. A Figura 14 mostra a imagem NDSI de 1984 e diferentes produtos a partir da decisão de um limiar, onde a Figura 14 “d” mostra que o uso do limiar de 0,7 subestima a

superfície de neve e gelo e na Figura 14 “f” o limiar de 0,2 superestima a superfície total de neve gelo.

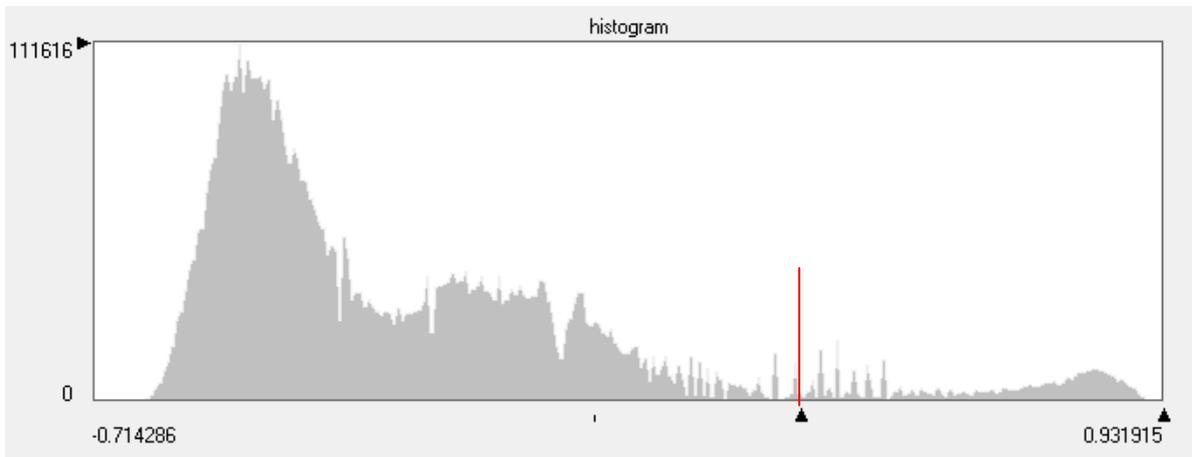


Figura 13: Histograma de frequência da imagem NDSI de 08/07/1984. A linha vermelha representa o limiar de 0,4, utilizado na classificação das áreas de neve e gelo das imagens Landsat TM. Os pixels que possuem valores acima desse limiar representam a superfície de neve e gelo na imagem.

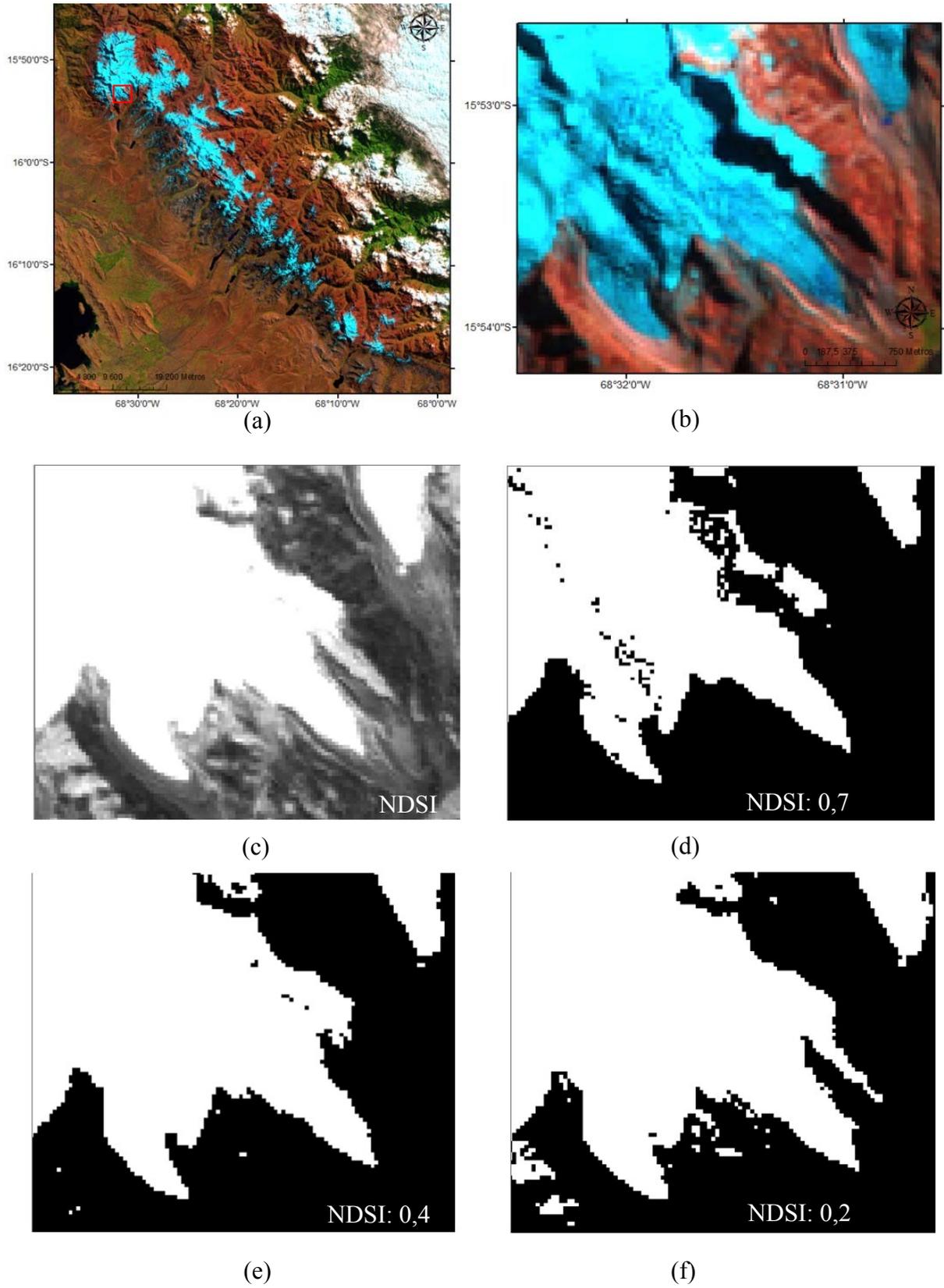


Figura 14: Diferenças entre limiares de NDSI. A figura (a) mostra o recorte da imagem com composição RGB 542 de 08/07/1984. A figura (b) representa a imagem ampliada na frente de uma geleira no monte

Ancohumá, que foi utilizada como área teste para a escolha do limiar de NDSI para a classificação. A figura (c) mostra o resultado NDSI sem limiar, com valores de pixel entre -1 e 1. A figura (d) mostra o resultado com limiar de NDSI, onde os pixels com valores maiores do que 0,7 (em branco) representam a superfície de neve e gelo, apresentando uma área subestimada em relação ao que é observado na figura (b). A figura (e) mostra o melhor resultado observado entre os limiares testados, onde os valores superiores a 0,4 (em branco) representam a superfície de neve e gelo. A figura (f) mostra o resultado do limiar NSDI onde os valores superiores a 0,2 (em branco) representam a superfície de neve e gelo, apresentando uma área superestimada em relação ao que é observado na figura (b).

Porém, com a utilização do limiar na imagem do NDSI, as áreas compostas por lagos de degelo também foram incluídas na classe “gelo ou neve” (Figura 15). Para que as áreas de geleiras não fossem superestimadas, observou-se a necessidade de exclusão dessas áreas. Diversas alternativas foram testadas, como o uso da Banda 4, um limiar de declividade (considerando a superfície plana dos lagos), e o Índice Normalizado de Água (NDWI).

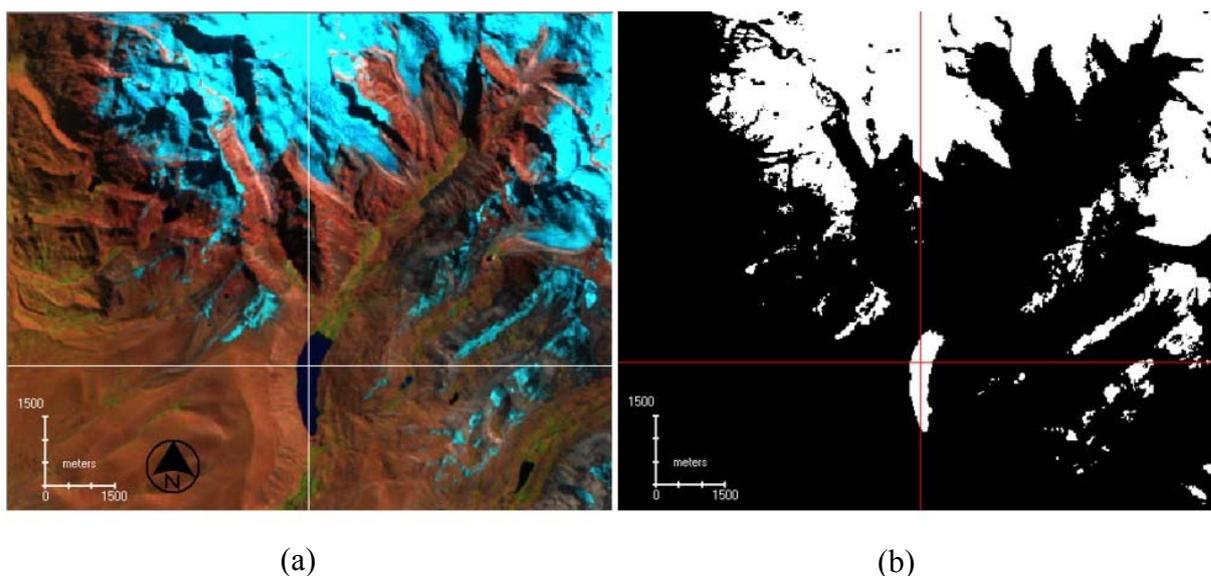


Figura 15: Exemplo de lago glacial encontrado na classificação com limiar de 0,4 no NDSI. A figura (a) apresenta um subset de composição colorida RGB542 da imagem Landsat TM adquirida em 08/07/1984. A figura (b) apresenta, na cor branca, os valores maiores ou iguais a 0,4 de NDSI calculado com a imagem a, classificados como gelo e neve. Através dessa visualização é possível verificar que os lagos foram incluídos na classificação.

O uso da Banda 4, apesar de ter um bom resultado na identificação dos lagos através de limiares na reflectância, ocasionou a eliminação de algumas áreas de geleiras que estavam parcialmente na sombra. Um limiar na imagem de declividade, gerada através do modelo de

elevação ASTER GDEM, não foi satisfatório para identificação dos lagos, pois devido ao pequeno tamanho dos lagos, a resolução espacial do modelo (*i.e.*, 30 metros), e a irregularidade da topografia do local, não foi possível distinguir essas áreas. O Índice Normalizado da Água foi o que apresentou melhor resultado para a classificação dos lagos.

O NDWI, proposto inicialmente por McFeeters (1996), é um método desenvolvido para delinear e realçar os corpos d'água, através da radiação refletida da região do infravermelho próximo e do verde. Esse índice é calculado pela equação 6:

(6)

$$NDWI = \frac{TM2 - TM4}{TM2 + TM4}$$

onde TM2 e TM4 correspondem respectivamente as bandas 2 (verde) e 4 (infravermelho próximo) do sensor Landsat TM.

O valor do limiar NDWI para delinear as feições de água, assim como no caso da classificação das áreas de neve e gelo, foi escolhido através de testes. O limiar que apresentou melhor resultado foi o de 0,25, ou seja, os valores iguais ou maiores do que 0,25 representaram bem os lagos na imagem (Figura 16), porém alguns pequenos agrupamentos de pixels foram encontrados nas bordas e no interior de alguns dos lagos. Como esses pixels possuem baixo valor de reflectância na banda 4, diferente das áreas de sombra que impediram anteriormente o uso da mesma, foi possível eliminá-los com um limiar de 0,04 na banda 4 (Figura 17).

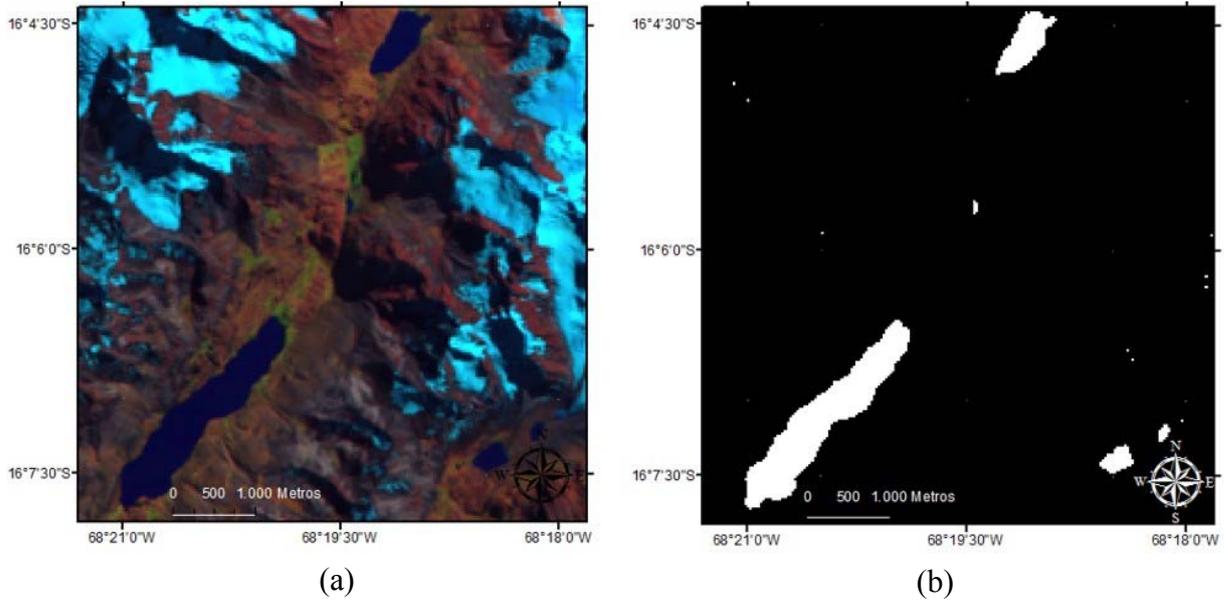


Figura 16: Teste com o limiar de 0,25 no NDWI da imagem de 1984. A figura (a) mostra os lagos glaciais existentes próximos a áreas de geleiras na composição colorida RGB 542. A figura (b) exemplifica o limiar de 0,25 na imagem NDWI, mostrando em branco (valores \Rightarrow 0,25) a área referente aos lagos.

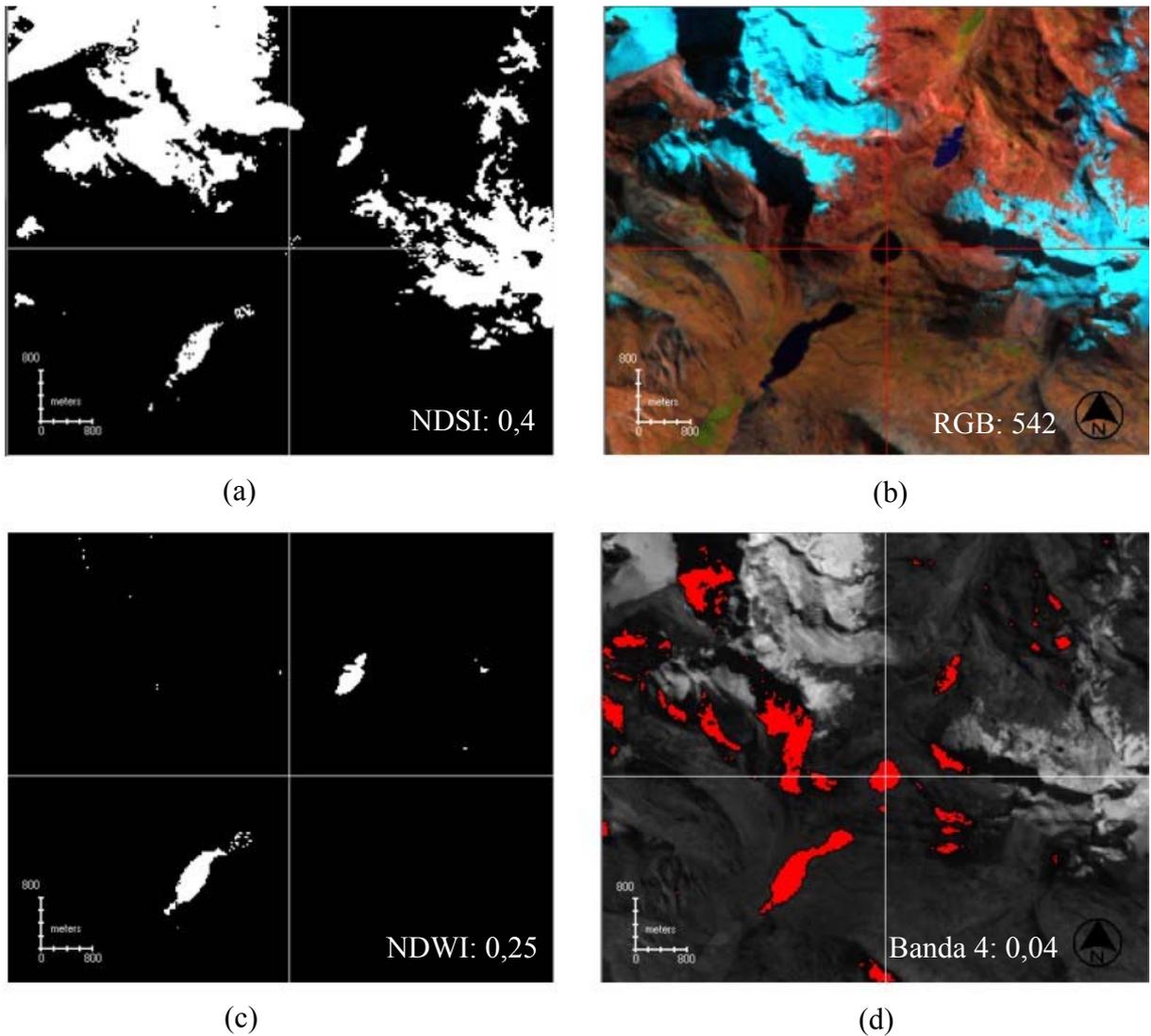


Figura 17: Exemplo de áreas com a necessidade de múltiplos critérios para a classificação. A figura (a) mostra o resultado de NDSI onde áreas correspondentes a lagos estão incluídas, conforme é visível na figura RGB 542 ampliada (b). A figura (c) mostra que o NDWI não reconhece essas áreas como lagos, sendo necessário adicionar outro critério para a remoção. A figura (d) apresenta a reflectância menor que 0,04 na banda 4 (em vermelho), cobrindo as áreas classificadas pelo NDSI e rejeitadas pelo NDWI.

A classificação das imagens, assim como a transformação radiométrica, foi realizada através de uma rotina adaptada ao software Erdas Imagine 10. Nessa rotina, o produto resulta de uma classificação multicritérios, contornando os problemas referentes a inclusão de lagos glaciais pelo NDSI, de acordo com a descrição relatadas acima.

3.3.4. Pós-Classificação

A partir da análise dos resultados da classificação, foram identificados pequenos agrupamentos de pixels que não pertenciam aos aglomerados correspondentes das geleiras. Essas feições foram identificadas visualmente como insignificantes áreas de ocorrência de precipitação de neve ou a áreas de “gelo morto”.

Esses agrupamentos, ou “ilhas” de pixels foram eliminados através de modelos estatísticos próprios do software Erdas Imagine 10. A ferramenta *Clump*, foi utilizada para agrupar os conjuntos de pixels, e a ferramenta *Eliminate* filtrou e eliminou os agrupamento menores do que 5 pixels ou 4500 m².

3.4. Delimitação das Bacias Glaciais

Com a classificação das imagens, é possível extrair as informações referentes ao total de área de gelo e neve de cada imagem. Porém, informações sobre geleiras específicas da área somente podem ser extraídas através da identificação dos divisores de drenagem glacial. Como um inventário com a demarcação das geleiras da Cordilheira Real ainda não está disponível, se fez necessária a identificação dos limites dessas geleiras.

Para auxiliar na delimitação, foram utilizadas, além de uma imagem RGB 542 adquirida em 08/07/1984, curvas de nível de 50 metros geradas com o ASTER GDEM, além do próprio ASTER GDEM no formato raster. A delimitação foi realizada manualmente na escala de 1:50.000, com a utilização do software ArcGIS 10 (Figura 18). Todas as bacias de drenagem das montanhas, onde foi observada a ocorrência de neve nas imagens adquiridas, foram incluídas na digitalização. Ao final dessa etapa foram delimitados 991 polígonos correspondentes a possíveis bacias de drenagens glaciais.

Como o objetivo dessa etapa é criar máscaras para a extração das informações referentes a cada geleira dos arquivos de imagens classificadas, foi atribuído um número identificador (ID) para cada polígono gerado. Assim, após a intersecção da máscara com os arquivos gerados da classificação, cada geleira possuirá o mesmo ID nos seus atributos, mesmo em polígonos gerados por diferentes imagens, o que facilita a análise e identificação das geleiras.

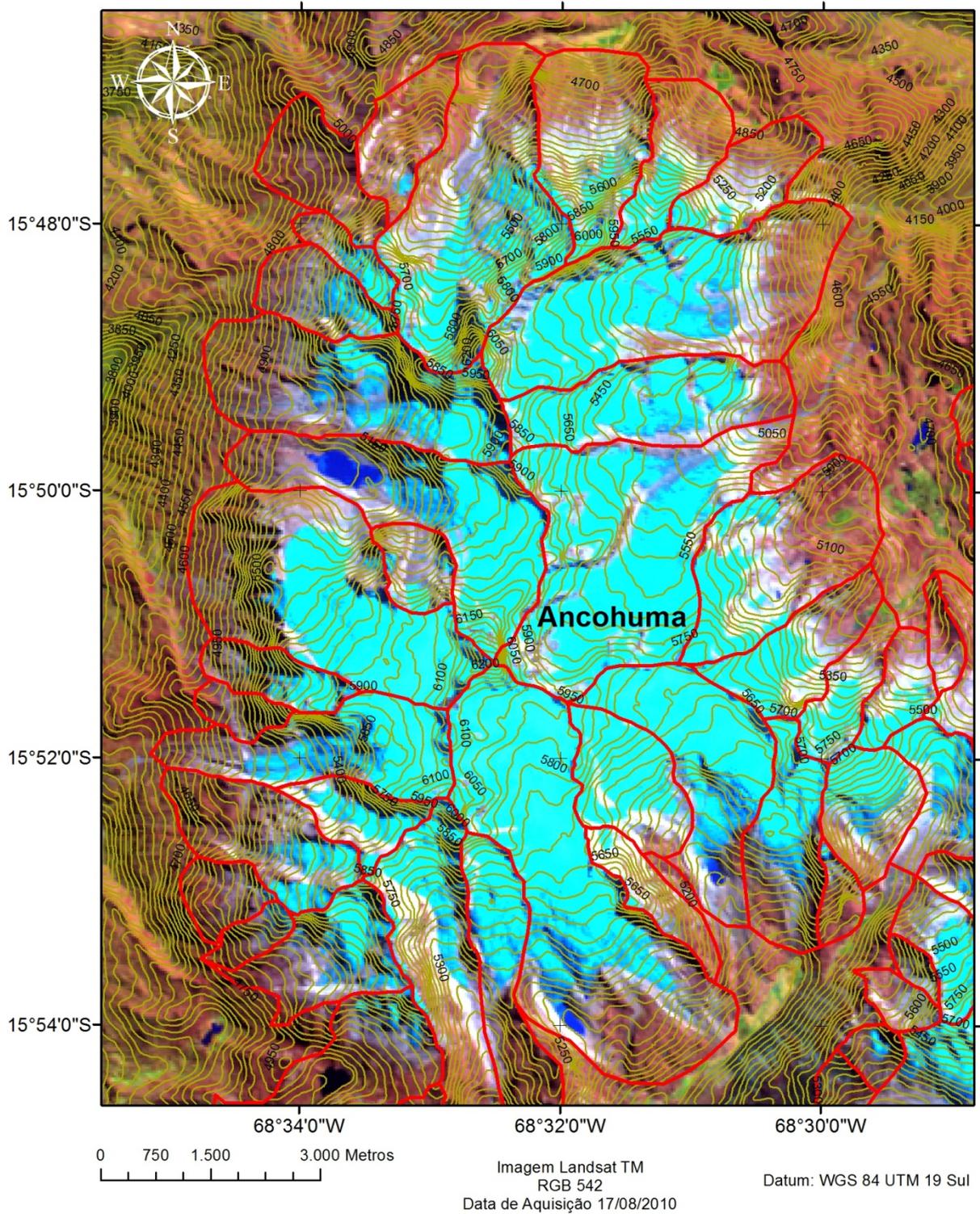


Figura 18: Amostra da delimitação manual das bacias de drenagem (linhas em vermelho) com o auxílio das curvas de nível (linhas em 50 metros de equidistância) geradas a partir do modelo de elevação ASTER GDEM sobre a imagem RGB 542 de 08/07/1984.

3.5. Verificação da consistência dos resultados

O NDSI classifica áreas cobertas por neve e gelo. Assim, nem todas as áreas classificadas representam necessariamente uma geleira. Uma precipitação de neve anterior à aquisição da imagem pode superestimar a quantidade de geleiras e sua área. Na primeira análise dos resultados, verificou-se que diversos polígonos resultantes da classificação possuíam uma frequência irregular ao longo do tempo analisado (Figura 19). Optou-se, então, por fazer uma análise de frequência para identificar e eliminar polígonos que não possuíssem características temporais regulares.

Após a análise da frequência de ocorrência dos polígonos resultantes do método descrito acima (Figura 20), aqueles com apenas uma frequência foram eliminados. Já com relação a polígonos com duas ocorrências, foram preservados apenas aqueles que existiram em 1984 e 1988. Com relação àqueles que possuíam três, quatro ou cinco ocorrências foram excluídos todos que não possuíam uma sequência de ocorrência na série temporal de imagens. Ao final, restaram 513 polígonos considerados como área de geleiras para a porção norte da Cordilheira Real.

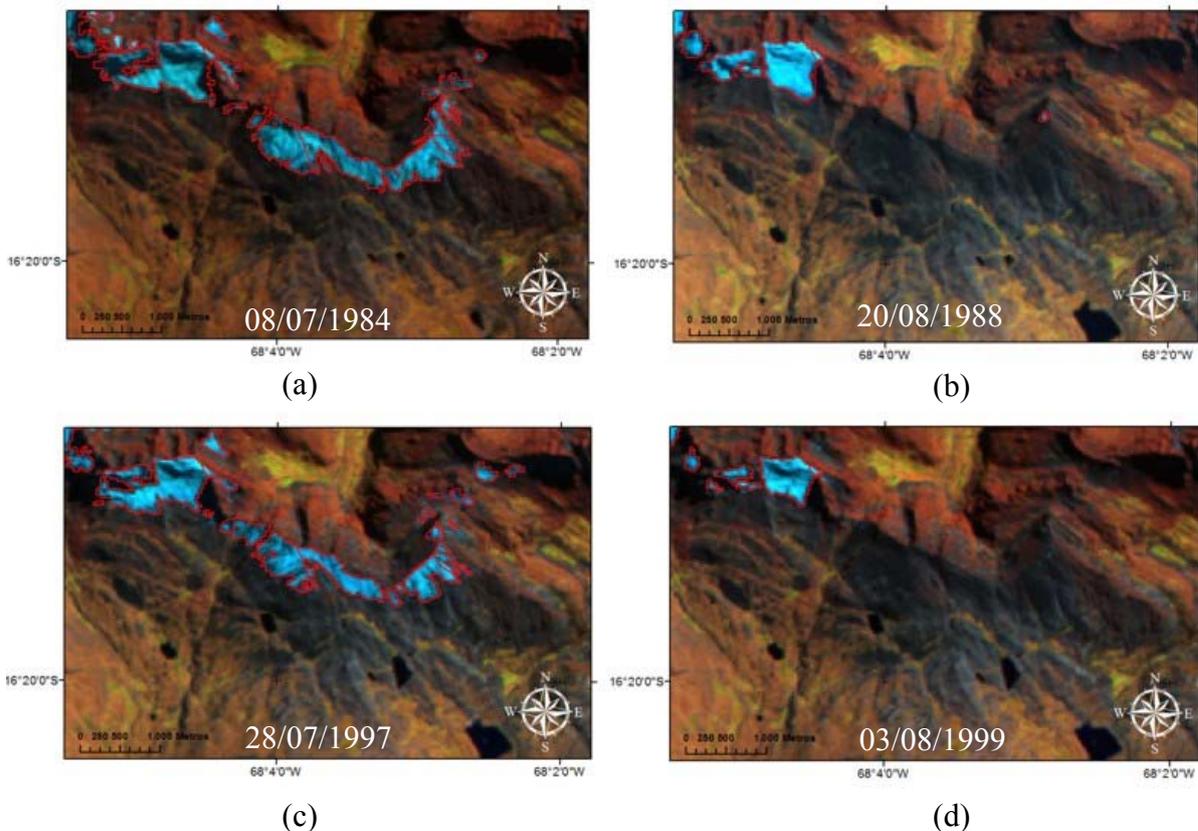


Figura 19: Exemplo de áreas onde os polígonos resultantes (linhas em vermelho) possuem uma frequência irregular ao longo do tempo. Na figura (a), representa a imagem mais antiga da série e apresenta polígonos em uma grande área na encosta sul da montanha. A figura (b) apresenta uma área pequena

classificada. A figura (c), que foi adquirida posteriormente a (b), apresenta novamente uma grande quantidade de polígonos classificados. A figura (d) não apresenta os mesmos polígonos, assim como a figura (b). Assim como é mostrado nesse exemplo, podemos deduzir que pelo curto prazo de tempo, os polígonos irregulares foram ocasionados por precipitação de neve, não caracterizando uma geleira.

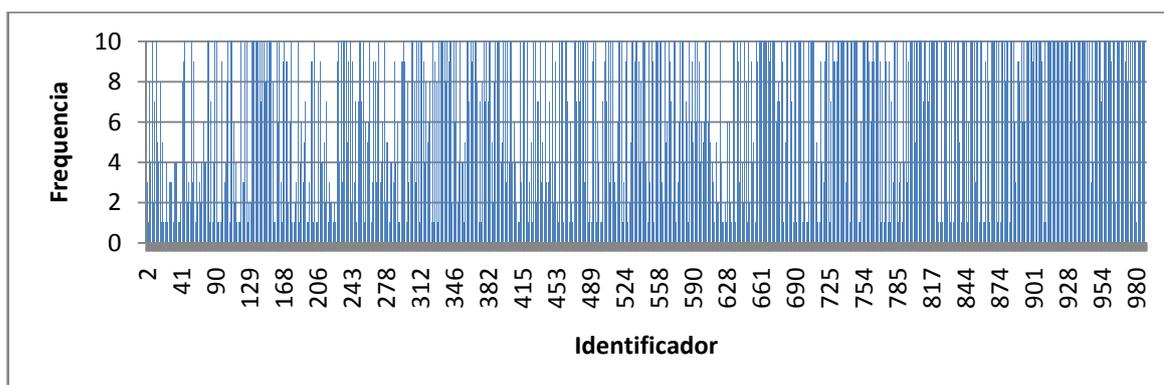


Figura 20: Gráfico de frequência mostrando o número de ocorrências de polígonos de neve ou gelo nas 991 bacias de drenagem delimitadas manualmente a porção Norte da Cordilheira Real, nas 10 imagens adquiridas para o estudo. A análise de frequência foi utilizada para analisar e excluir possíveis polígonos referentes a precipitações de neve, aprimorando o resultado de número de geleiras.

Após essa etapa, uma nova mascara foi criada com os 567 polígonos. Esses polígonos foram interseccionados com os *shapefiles* resultantes da classificação das 10 imagens, gerando os limites das geleiras da porção Norte da Cordilheira Real para cada imagem.

3.6. Banco de Dados Topográfico e SIG

O banco de dados com informações topográficas das geleiras foi estruturado de acordo com Paul *et. al.* (2009), pois esse autor recomenda que sejam armazenados alguns parâmetros básicos, para padronizar os inventários de geleiras com o GLIMS e o WGI. Os parâmetros utilizados foram os seguintes: área total, elevação mínima, elevação máxima, elevação média, orientação média, orientação principal, declividade mínima, declividade máxima, média da declividade, data dos dados originais e coordenadas geográficas da geleira.

Essas informações foram extraídas do ASTER GDEM, com auxílio da ferramenta “*Zonal Statistics as table*” do software ArcGIS 10. Cada análise gerou uma tabela, que foi indexada pelo ID aos atributos do arquivo com os limites das geleiras (Figura 21). Para cada data de aquisição das imagens de satélite foi criado um arquivo com os limites das geleiras naquela ocasião e os parâmetros morfométricos correspondentes. Ao final desse processo, as

tabelas de atributos dos resultados foram exportadas para o formato *.xml e organizados em uma planilha eletrônica, a qual foi utilizada para a elaboração dos gráficos e tabelas utilizados na discussão.

FID	Shape	Área	MIN ELEV	MAX ELEV	MEAN ELEV	ASPECT	MAJORITY	MEAN ASPECT	SLOPE MIN	SLOPE MAX	SLOPE MEAN	Ano	Coord x	Coord y
0	Polygon	0,219166	5067	5310	5179,4058	8	193,35797	0,468773	42,783276	19,52681	1984	-68,129379	-16,354962	
1	Polygon	0,12468	5122	5315	5189,0225	8	218,30635	1,656938	40,995922	20,91222	1984	-68,133735	-16,351023	
2	Polygon	0,231513	5047	5341	5187,2109	5	148,66057	1,048115	54,72089	18,923466	1984	-68,126012	-16,353139	
3	Polygon	0,019387	5191	5244	5224,75	7	215,728	1,689733	43,990997	24,289923	1984	-68,139136	-16,35089	
4	Polygon	0,284944	5035	5345	5198,4829	5	135,68631	0	46,861115	14,340987	1984	-68,123338	-16,347689	
5	Polygon	0,294495	5080	5323	5192,0947	6	164,52687	2,64995	44,138317	22,216215	1984	-68,11742	-16,344079	
6	Polygon	0,074259	5237	5344	5303,3374	8	247,7603	1,048115	60,243118	24,611071	1984	-68,12873	-16,348314	
7	Polygon	0,028997	5229	5308	5260,5142	8	251,32385	1,988082	42,553814	23,337606	1984	-68,117459	-16,341552	
8	Polygon	0,112807	5044	5328	5183,126	5	136,73877	1,784498	53,039444	27,569031	1984	-68,112	-16,339071	
9	Polygon	0,04167	5185	5296	5254,7778	5	175,31985	0,331476	55,028152	20,52606	1984	-68,113455	-16,338739	
10	Polygon	0,0198	5182	5207	5197,2729	6	194,87375	2,411786	48,036472	20,396464	1984	-68,125315	-16,331108	
11	Polygon	0,069042	4871	4939	4904,9106	8	179,94435	0,468773	63,878689	27,536446	1984	-68,048788	-16,316181	
12	Polygon	0,107861	4776	4913	4850,7373	4	108,37811	1,406069	52,591759	24,136168	1984	-68,046309	-16,315532	
13	Polygon	0,101285	4919	5192	5048,7236	6	163,92874	2,319094	44,828033	18,711	1984	-68,104315	-16,310577	
14	Polygon	0,062556	4814	5083	4921,7119	5	128,55962	0,331476	50,747852	30,494799	1984	-68,072899	-16,310845	
15	Polygon	0,294997	4849	5235	5003,0669	6	172,08334	0	55,006977	17,527412	1984	-68,083993	-16,311175	
16	Polygon	0,025043	4769	4922	4838,7915	7	226,31937	2,670543	59,017586	34,554688	1984	-68,015145	-16,309388	
17	Polygon	0,472169	4773	5197	4937,7363	6	188,42578	1,048115	47,860695	22,121759	1984	-68,076579	-16,311699	
18	Polygon	0,0279	4659	4779	4720,6802	8	241,24744	1,406069	57,288387	30,775087	1984	-67,986696	-16,308387	
19	Polygon	0,0981	4626	5006	4754,1309	6	193,5656	1,048115	64,694221	30,401848	1984	-68,009262	-16,309505	
20	Polygon	0,051762	4870	5239	5091,3394	9	222,32556	2,731384	78,081161	30,209586	1984	-68,086096	-16,306911	
21	Polygon	1,07017	4776	5302	5015,562	5	165,5966	0,468773	62,165688	22,034266	1984	-68,095874	-16,304933	
22	Polygon	0,752151	4917	5299	5094,9521	7	220,79933	0,662931	50,002342	19,669436	1984	-68,107613	-16,303009	
23	Polygon	0,276589	4908	5246	5051,0684	7	240,54614	3,98511	52,804241	26,428459	1984	-68,114877	-16,29764	
24	Polygon	0,0855	5012	5164	5088,4268	6	175,48088	0,741171	30,704918	13,489582	1984	-68,170677	-16,295464	
25	Polygon	0,562167	4812	5307	5005,6855	3	84,447884	1,194995	58,287796	27,597254	1984	-68,094667	-16,298417	
26	Polygon	0,228936	4974	5257	5115,0801	3	96,624039	2,522846	53,978333	26,674541	1984	-68,095556	-16,294434	
27	Polygon	0,28538	5044	5410	5203,0474	5	121,52081	0,741171	45,919651	22,153109	1984	-68,141926	-16,287375	
28	Polygon	0,173571	5026	5200	5090,3979	2	69,782944	2,522846	45,232288	20,819269	1984	-68,111981	-16,293378	
29	Polygon	0,165213	4964	5178	5088,8394	9	191,35794	2,342612	49,559479	26,458143	1984	-68,117384	-16,292358	

Figura 21: Tabela de atributos referentes à classificação da imagem de 1984. As informações de elevação, orientação e declividade foram adquiridas através da extração e processamento do Aster GDEM com o software ArcGIS 10.

3.7. Considerações sobre possíveis erros sistemáticos inerentes ao método

Os resultados obtidos através da metodologia proposta no item 3 possuem erros de natureza geométrica, radiométrica e meteorológica. Abaixo será avaliada a precisão da metodologia utilizada.

Os erros de natureza radiométrica são resultantes da mistura espectral no IFOV do sensor. De acordo com Moreira (2011), o IFOV corresponde a área sobre o terreno que é “vista”, ou imageada, pelo sistema sensor a uma dada altitude, num dado instante de tempo. Porém, a dimensão do pixel da imagem não necessariamente está relacionada ao IFOV. No sensor Landsat TM, de acordo com os dados encontrados nos CPFs, o IFOV angular corresponde a 42.5 μ rad, tanto na direção transversal a trajetória do satélite, como na direção do movimento. Portanto, o sinal é reamostrado de 29,96 para 30 metros, após convertido em valores discretos e transmitido pelo sensor.

Assim, os pixels localizados entre dois alvos distintos continuam sendo pixels que contêm uma mistura de energia refletida pelos dois alvos. Para esses pixels, a radiância refletida será representada pelos alvos dominantes (Moreira, 2011). No caso deste estudo, em

que o alvo de interesse possui elevado albedo, este pode influenciar no valor médio registrado no pixel de alvos vizinhos, ocorrendo assim, uma tendência de superestimar a área de neve e gelo.

Os erros de natureza geométrica são comuns em análises multitemporais, onde o corregristo entre as imagens possui um erro grande. As imagens deste estudo foram processadas com o nível LT1, possuindo pontos de controle gerados do GLS 2005, pela USGS. De acordo com Gutman *et. al.*(2008), os dados foram processados com o mais alto nível de precisão para a época, com uma precisão de aproximadamente 30 m de erro médio quadrático (RMSE) em relação ao produto GLS2000. As imagens deste estudo apresentaram, visualmente, um ótimo co-registro, apenas a imagem de 1994 mostrou um deslocamento de aproximadamente 1 pixel (30 metros) em relação as outras imagens.

Os erros de natureza meteorológica são outros fatores que podem influenciar na área estimada de neve e gelo resultante da classificação, pois a ocorrência de precipitações de neve em datas anteriores a aquisição das imagens, pode fazer com que ocorra neve remanescente em locais que não correspondem a superfície das geleiras. Caso ocorra, poderá influenciar de modo que superestime a área classificada.

4. Resultados e Discussão

Após o processamento e a análises dos dados gerados a partir das dez imagens adquiridas da área de estudo no período entre 1984 a 2010, os resultados finais obtidos conforme a metodologia descrita no item 3, serão apresentados e discutidos a seguir.

4.1. Variações em área e no número de geleiras

Os gráficos referentes aos resultados da análise de área foram baseados na tabela 10. Essa tabela foi elaborada através dos dados armazenados no banco de dados SIG, elaborado de acordo com a etapa apresentada no item 3.6, e organizadas por classes de área. Cada classe apresenta as frequências de geleiras (N), a área total e o percentual do total, para todas as imagens utilizadas no estudo.

A figura 22 apresenta as variações em área das geleiras da porção norte da Cordilheira Real. A área das geleiras apresentou um declínio considerável entre as imagens analisadas de 1984 e 2010. Embora esse declínio não se apresente de forma linear, aproximadamente 150,67 km² ou 49,12% de área correspondente as geleiras, não possuíram ocorrência na imagem de 2010.

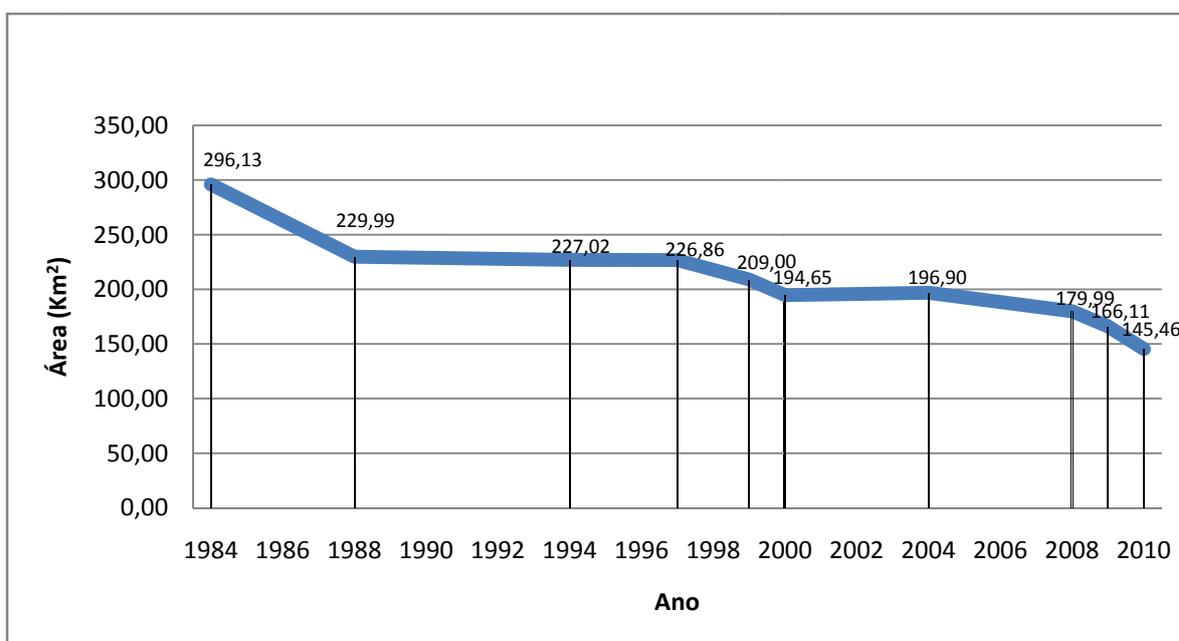


Figura 22: Gráfico de área total de superfície coberta por neve e gelo das geleiras da porção Norte da Cordilheira Real, resultante da análise das imagens Landsat TM. O gráfico considera a área total de neve e gelo classificada nas imagens, e apresenta uma queda ao longo do tempo.

Tabela 10: Número de geleiras (N), área total e percentual do total. Esta tabela resume os dados obtidos através da análise de áreas cobertas por neve e gelo nas imagens Landsat TM. Os dados foram organizados por intervalo de área para retratar melhor as variações de acordo com o seu tamanho. Verificou-se que o maior número de geleiras encontra-se no intervalo de área entre 0,01 km² e 0,5 km², porém a classe que representa o maior percentual de área total da superfície da Cordilheira está entre 1 km² e 3 km². Foram observadas poucas geleiras maiores que 5 km², na imagem de 1984 foram encontradas 4 geleiras, porém em 2010 apenas 3 geleiras foram relatadas com essa área.

Intervalo de Área (km ²)	Anos																													
	1984			1988			1994			1997			1999			2000			2004			2008			2009			2010		
	N	Área Total	%																											
<0,01	6	0,044999	0,02	57	0,310898	0,14	60	0,303365	0,13	35	0,218839	0,10	45	0,256771	0,12	52	0,278884	0,14	35	0,172994	0,09	38	0,190998	0,11	50	0,238196	0,14	29	0,128081	0,09
0,01 - 0,5	342	66,145236	22,3	332	50,101877	21,8	325	50,861086	22,4	352	55,481427	24,5	320	49,641791	23,8	294	47,600206	24,5	278	46,813785	23,8	273	42,555097	23,6	244	37,601652	22,6	209	31,667458	21,8
0,5 - 1,0	91	63,278326	21,4	66	44,385971	19,3	67	46,236449	20,4	64	43,160715	19,0	56	37,933942	18,2	45	32,264947	16,6	47	33,787813	17,2	43	30,037254	16,7	42	29,062195	17,5	35	24,640751	16,9
1,0 - 3,0	56	88,53129	29,9	45	76,42354	33,2	42	74,16431	32,7	43	73,35491	32,3	40	67,71925	32,4	37	64,97928	33,4	37	63,1748	32,1	34	59,01166	32,8	31	55,50468	33,4	30	55,7521	38,3
3,0 - 5,0	14	50,141	16,9	10	36,77026	16,0	9	33,67163	14,8	9	33,14847	14,6	9	32,29187	15,5	8	28,67635	14,7	9	31,83326	16,2	8	27,65	15,4	7	23,82191	14,3	4	13,91774	9,6
5,0 - 10,0	4	27,99304	9,5	3	21,99959	9,6	3	21,78431	9,6	3	21,49547	9,5	3	21,15701	10,1	3	20,84685	10,7	3	21,12219	10,7	3	20,54409	11,4	3	19,88493	12,0	3	19,35088	13,3
Total geral	513	296,13	100	513	229,99	100	506	227,02	100	506	226,86	100	473	209,00	100	439	194,65	100	409	196,90	100	399	179,99	100	377	166,11	100	310	145,46	100

Na figura 23, observamos que a maior variação de área de neve e gelo ocorreu durante o período entre 1984 e 1988, quando 22,34 % da área total foi perdida. Apenas na imagem do ano de 2004 ocorreu um aumento da área total de geleiras (1,16 %) em relação à imagem anterior. Esse aumento detectado pode ter sido provocado por uma precipitação anterior à aquisição da imagem. Nos anos de 1994 e 1997, a área manteve-se praticamente estável. A média percentual geral de perda de área total de geleiras observado entre as imagens é de 4,91%.

Os resultados obtidos da variação de área da porção Norte da Cordilheira Real apresentam semelhança com outras geleiras dos Andes, como as geleiras da Cordilheira Tres Cruces, também na Bolívia, onde o estudo de Ribeiro (2007) detectou redução média de 18 % no período entre 1975 a 2004, ou da Cordilheira Branca, no Peru, onde Silvério *et al.* (2004) identificaram uma retração de 15% (121 km²) num período de 25 anos (1970-1996).

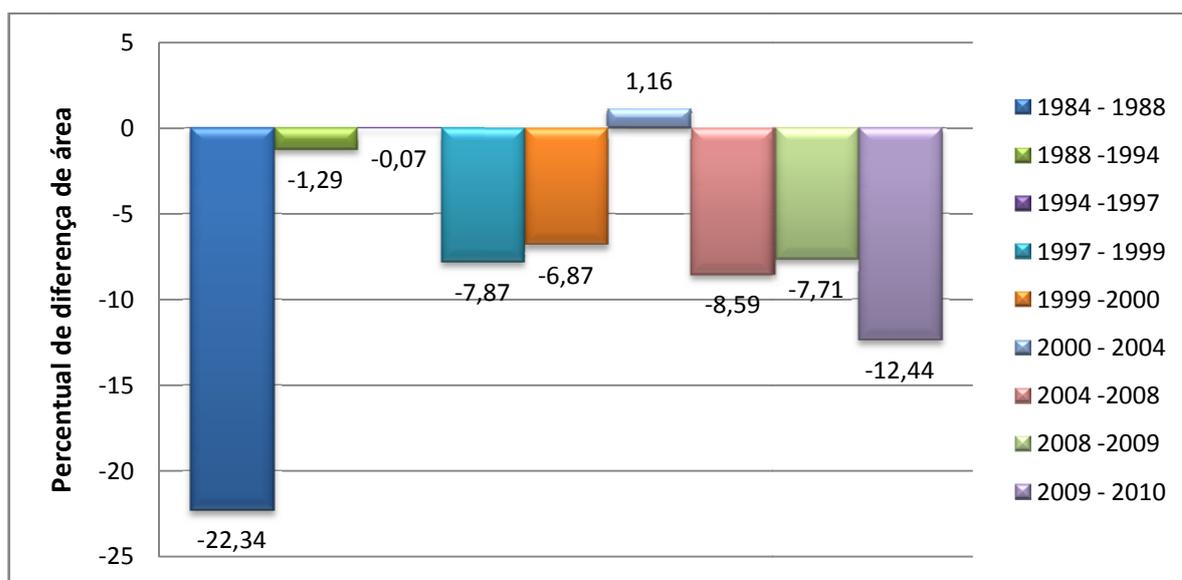


Figura 23: Gráfico do percentual da diferença de área total de gelo e neve, analisadas entre as imagens da porção Norte da Cordilheira Real, em relação à imagem anterior. O gráfico mostra o percentual de perda ou ganho de área. Destaque para o grande percentual de área perdida entre as imagens de 1984 e 1988, e também para a redução de área entre 2009 e 2010, que em um período menor perdeu 12,4 % de sua área total.

O número total de geleiras identificadas no estudo está representado na Figura 24. Assim como foi observado com a área total, o número de geleiras também apresentou declínio ao longo da série temporal. No período estudado (1984 – 2010), foi observado uma queda no número de geleiras, 203 a menos do que a imagem de 1984, representando uma redução de 39,57% no número total de geleiras durante o período do estudo. Na Figura 25, está

representado a diferença no número de geleiras em relação a imagem subsequente, onde destaca-se o desaparecimento de 67 geleiras entre o ano de 2009 e 2010.

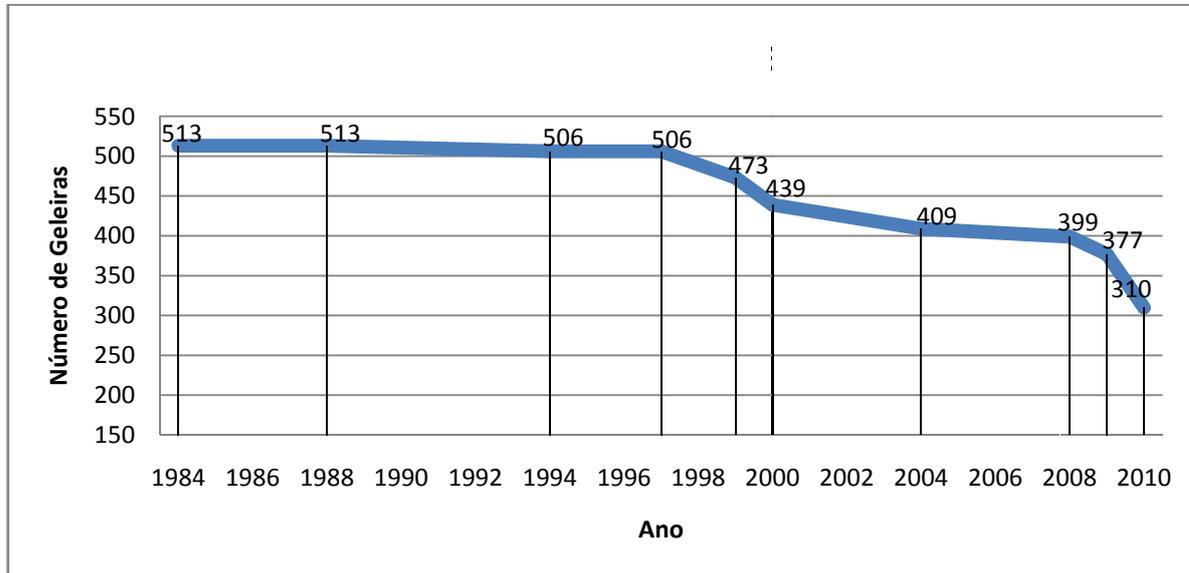


Figura 24: Gráfico representando o número de geleiras da porção Norte da Cordilheira Real, identificadas em cada imagem neste trabalho. O gráfico mostra a evolução do número de geleiras através da série temporal, onde se pode notar uma tendência de sua redução.

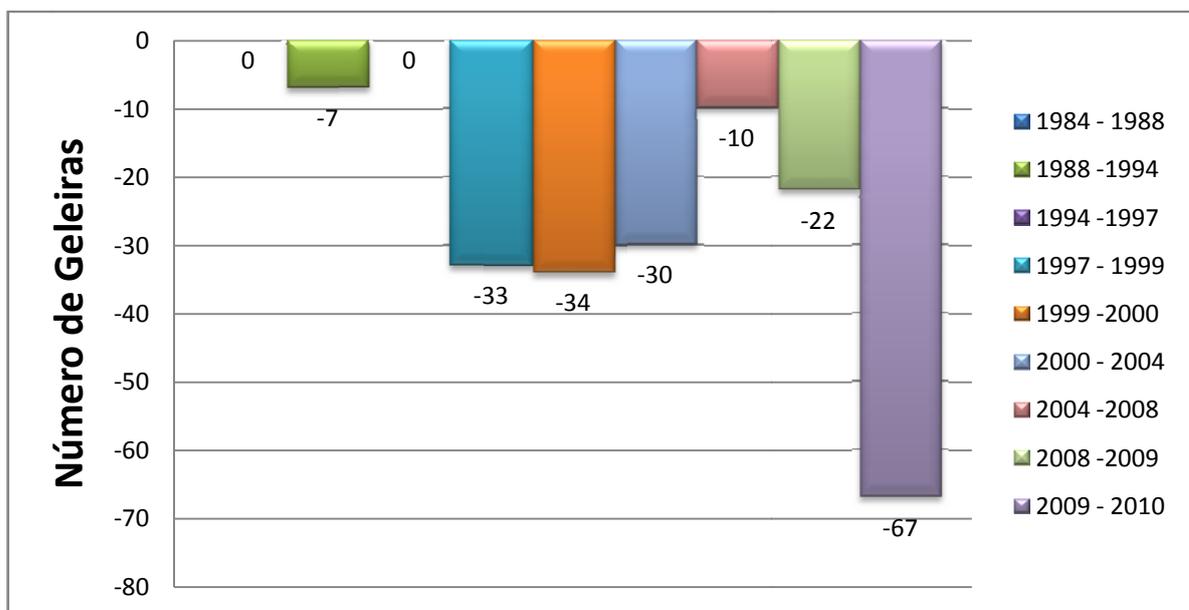


Figura 25: Gráfico da diferença no número de geleiras nas imagens analisadas no estudo. O gráfico destaca os dados obtidos entre os anos 2009 e 2010, onde o resultado mostrou o desaparecimento de 67 geleiras. Entre 1999 e 2000, foi observada a segunda maior diferença no número de geleiras.

Os resultados referentes à análise da área das geleiras, com os dados classificados por intervalos de área, mostraram que a maior representatividade está concentrada no intervalo com geleiras entre 1 e 3 km² de área (Figura 26). A redução da área total das classes foi observado ao longo da série temporal, porém a figura 27 mostra que o percentual de cada classe não apresentou um queda considerável na série.

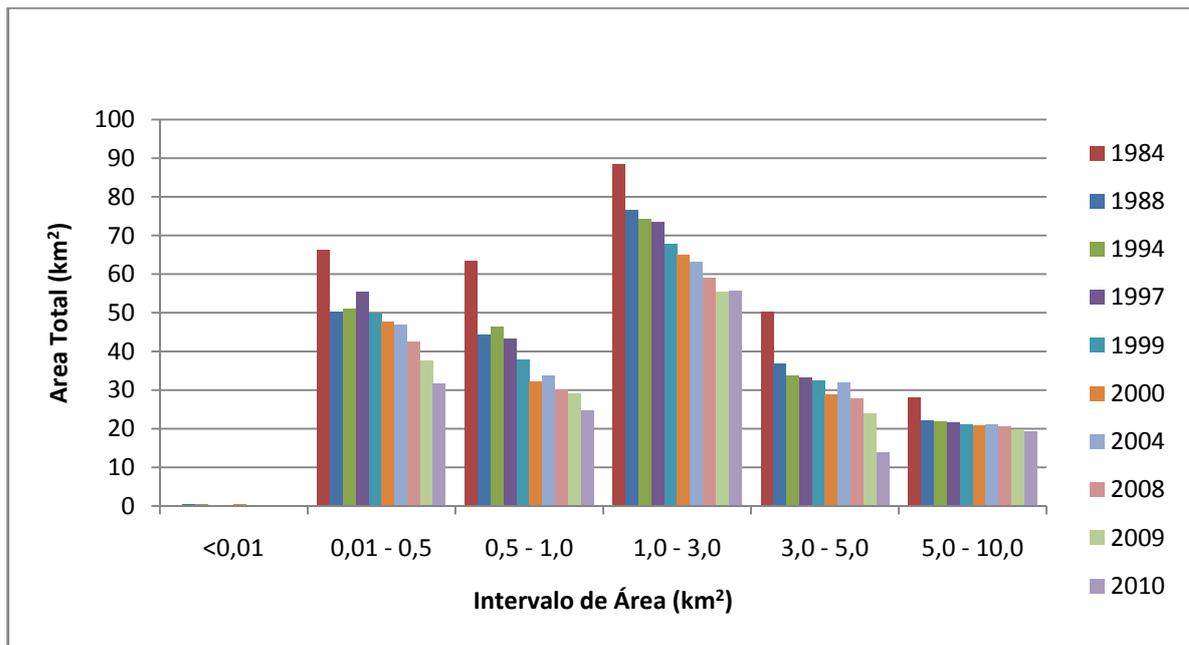


Figura 26: Área total por intervalos de tamanhos das geleiras. O gráfico mostra o total de área (y) para cada intervalo de classe (x) nas imagens analisadas. Esse gráfico destaca a redução generalizada de área com a evolução do tempo em todas as classes de área. A classe que possui maior área superficial é a que abrange geleiras entre 1 e 3 km². As geleiras com área menor que 0,01 Km² não têm representatividade no total da cordilheira.

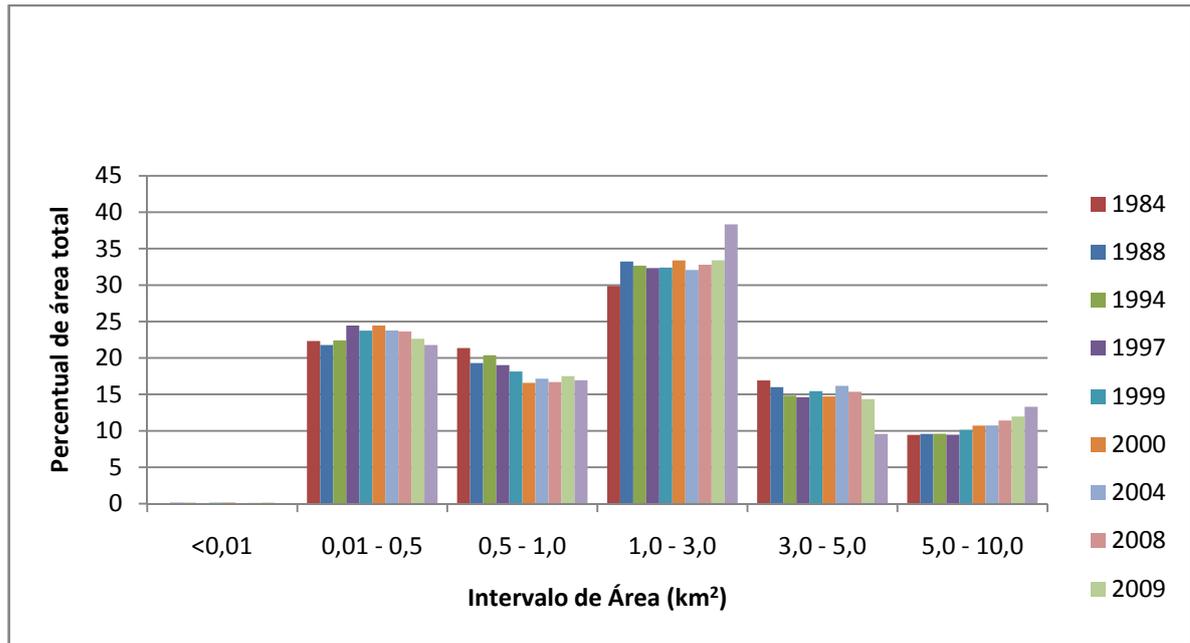


Figura 27: Percentual da área total em cada classe com relação a área da cordilheira nas imagens. Nesse gráfico podemos visualizar que na série temporal, o percentual de representatividade de cada classe no total de área da cordilheira não está sendo consideravelmente afetado com a evolução da série, ou seja, a redução de área está ocorrendo de forma uniforme para todos os tamanhos de geleiras da cordilheira. Uma exceção foram as geleiras maiores do que 5 km², que apresentaram um baixo crescimento.

Embora a maior porção de área das imagens analisadas esteja concentrada entre as geleiras de 1 a 3 km², a classe entre 0,01 e 0,5 km² teve a maior quantidade de geleiras na cordilheira, conforme mostra a figura 28. Assim, como observado em todas as imagens, a cordilheira é composta em sua maioria por geleiras menores que 0,5 km². Na imagem adquirida no ano de 1984, essa classe representou 67,84 % das massas de gelo; já na imagem de 2010 foram estimados 76,77 % do total de geleiras na porção Norte da Cordilheira Real.

De acordo com Francou *et al.*, (2000), aproximadamente 80 % das geleiras da Cordilheira Real tem a sua área menor do que 0,5 km². Essa informação se aproxima dos resultados encontrados nesse estudo, conforme é observado na tabela 11, pois o total das geleiras encontradas nas classes entre 0,01 a 0,5 km² e abaixo de 0,01 km², ficam entre 70 e 80% do total de geleiras da Cordilheira, durante todo o período de tempo analisado nesse trabalho.

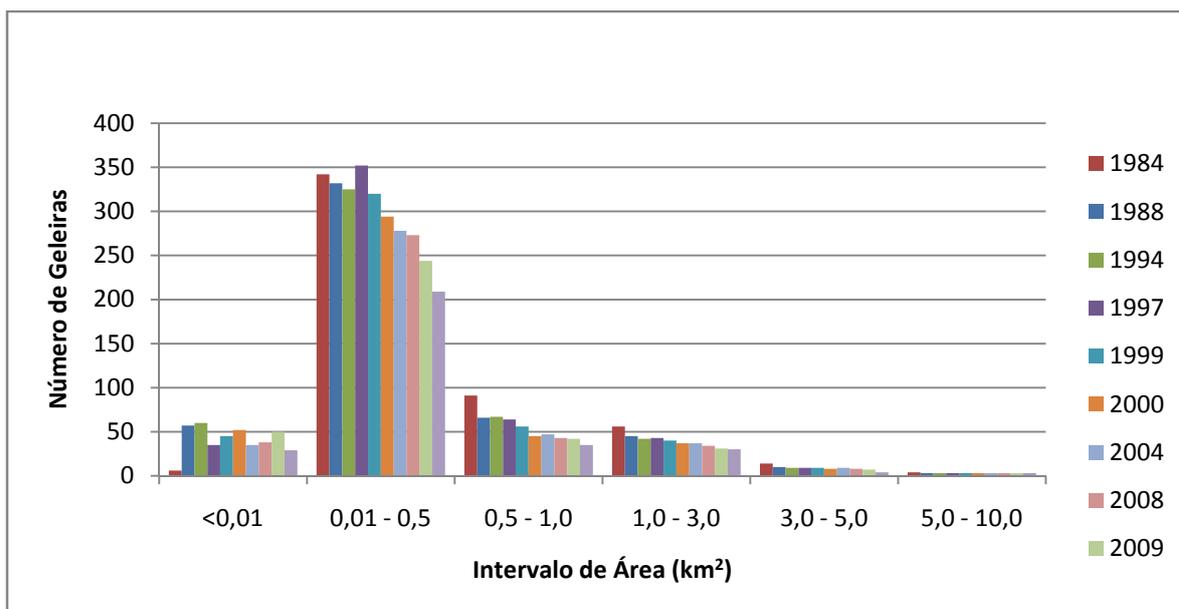


Figura 28: Número de Geleiras por intervalo de área. O gráfico mostra uma concentração maior de geleiras na classe entre 0,01 e 0,5 km² e uma menor concentração de geleiras na classe entre 5 e 10 km². Pode-se verificar também uma redução no número de geleiras com a evolução da série temporal. Apenas nas geleiras menores do que 0,01 km² não é observado um padrão de redução.

Tabela 11: Número de geleiras e sua representatividade no total da cordilheira. Esses dados representam uma amostra de cinco imagens, escolhidos para exemplificar o percentual de cada classe no total de geleiras analisadas nessa dissertação.

Km ²	1984		1994		1999		2008		2010	
	Geleiras	%								
< 0,01	6	1,17	60	11,86	45	9,51	38	9,52	29	9,35
0,01 - 0,5	342	66,67	325	64,23	320	67,65	273	68,42	209	67,42
0,5 - 1	91	17,74	67	13,24	56	11,84	43	10,78	35	11,29
1 - 3	56	10,92	42	8,30	40	8,46	34	8,52	30	9,68
3 - 5	14	2,73	9	1,78	9	1,90	8	2,01	4	1,29
> 5	4	0,78	3	0,59	3	0,63	3	0,75	3	0,97

Na Cordilheira Real, estudos relatam a rápida retração e o desaparecimento de geleiras de pequeno porte. O caso com maior destaque é a geleira Chacaltaya, que perdeu 62 % de sua massa entre 1940 e 1983 (0,22 km²) e cujo tamanho restante em 1998 foi de apenas 0,01 % do total de 1940 (Francou *et al.*, 2000), e em 2009 teve o seu desaparecimento noticiado². Outras

² BBC em http://www.bbc.co.uk/mundo/ciencia_tecnologia/2009/08/090806_1453_bolivia_glaciar_lp.shtml

geleiras da Bolívia, Equador e Peru possuem dados semelhantes, como é apresentado no estudo de Vuille *et al.*, (2008), onde as observações de área e comprimento de dez geleiras são apresentadas na figura 29. Ramirez *et. al.* (2001), analisou a geleira Chacaltaya no período entre 1940 e 1998, através de técnicas de fotogrametria, e também encontrou um declínio na área e volume dessa geleira com a evolução temporal (Tabela 12). Os dados dessa dissertação referentes a geleira Chacaltaya (Tabela 13), apresentaram semelhança com os dados de Ramirez *et. al.* (2001) e também com os dados de Vuille *et al.*, (2008), juntamente com os resultados sobre a geleira Zongo, porém não foram exatos provavelmente devido a diferença na escala e na metodologia aplicada.

Tabela 12: Variações em área e volume da geleira Chacaltaya de 1860 a 1998. Fonte: Ramirez et. al., (2001).

Ano	Área 10^6 m^2	Volume 10^6 m^3
“1860”	0.527	29.95
1940	0.223	5.264
1963	0.195	4.086
1983	0.141	1.987
1992	0.104	1.114
1993	0.102	1.095
1994	0.095	0.985
1995	0.091	0.854
1996	0.082	0.689
1997	0.080	0.634
1998	0.060	0.374

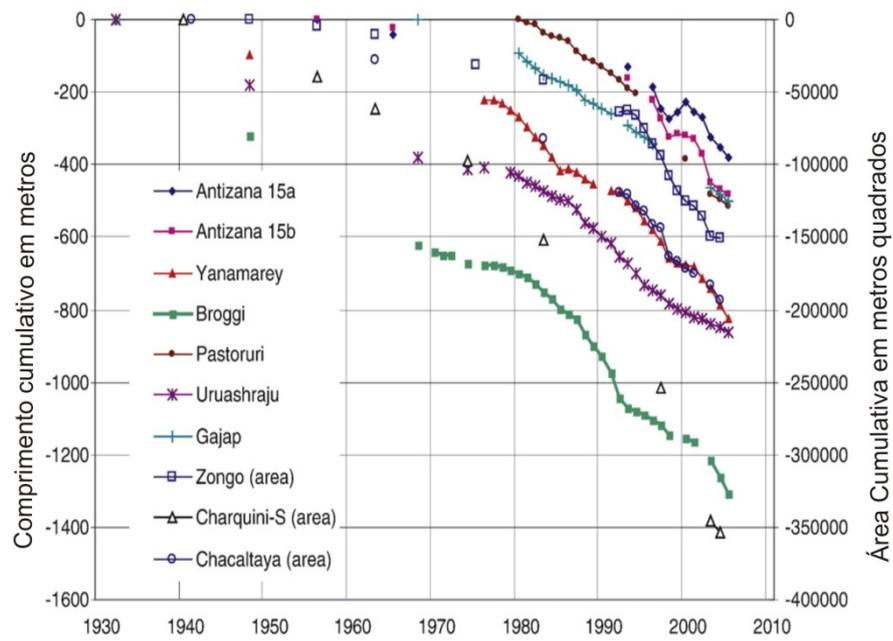


Figura 29: Mudanças no comprimento e área superficial de dez geleiras tropicais andinas, situadas no Equador (Antizana 15a and 15b), Peru (Yanamarey, Broggi, Pastoruri, Uruashraju, Gajap) e Bolívia Zongo, Charquini, Chacaltaya) entre 1930 e 2005. Fonte: Vuille et al., (2008).

Tabela 13: Resultados referentes às geleiras de Chacaltaya e Zongo, obtidos neste estudo. A variação na área da geleira Chacaltaya mostra um declínio através da série temporal até o seu desaparecimento em 2009. A geleira Zongo também apresenta uma redução na área ao longo do tempo. Esses dados foram apresentados para mostrar a semelhança dos resultados referentes as geleiras pertencentes a porção norte da Cordilheira Real, com dados de outros estudos mencionados no texto.

<i>Ano</i>	<i>Área Km²</i>	
	Chacaltaya	Zongo
1984	0,219	3,251
1988	0,168	2,917
1994	0,137	2,826
1997	0,138	2,788
1999	0,081	2,699
2000	0,07	2,638
2004	0,045	2,657
2008	0,024	2,52
2009	-	2,409
2010	-	2,146

As variações de área nas geleiras da Cordilheira Real apresentaram comportamento semelhante aos dados publicados pelo *United Nations Environment Programme* (UNEP), referentes às variações nas frentes para a América do Sul. De acordo com o WGMS (2008), as geleiras da América do Sul apresentaram um retrocesso generalizado desde o máximo de extensão na Pequena Idade Glacial, com maior intensidade nas últimas décadas. A figura 30 exemplifica quatro estágios de variações na frente de duas geleiras do monte Ancohuma.

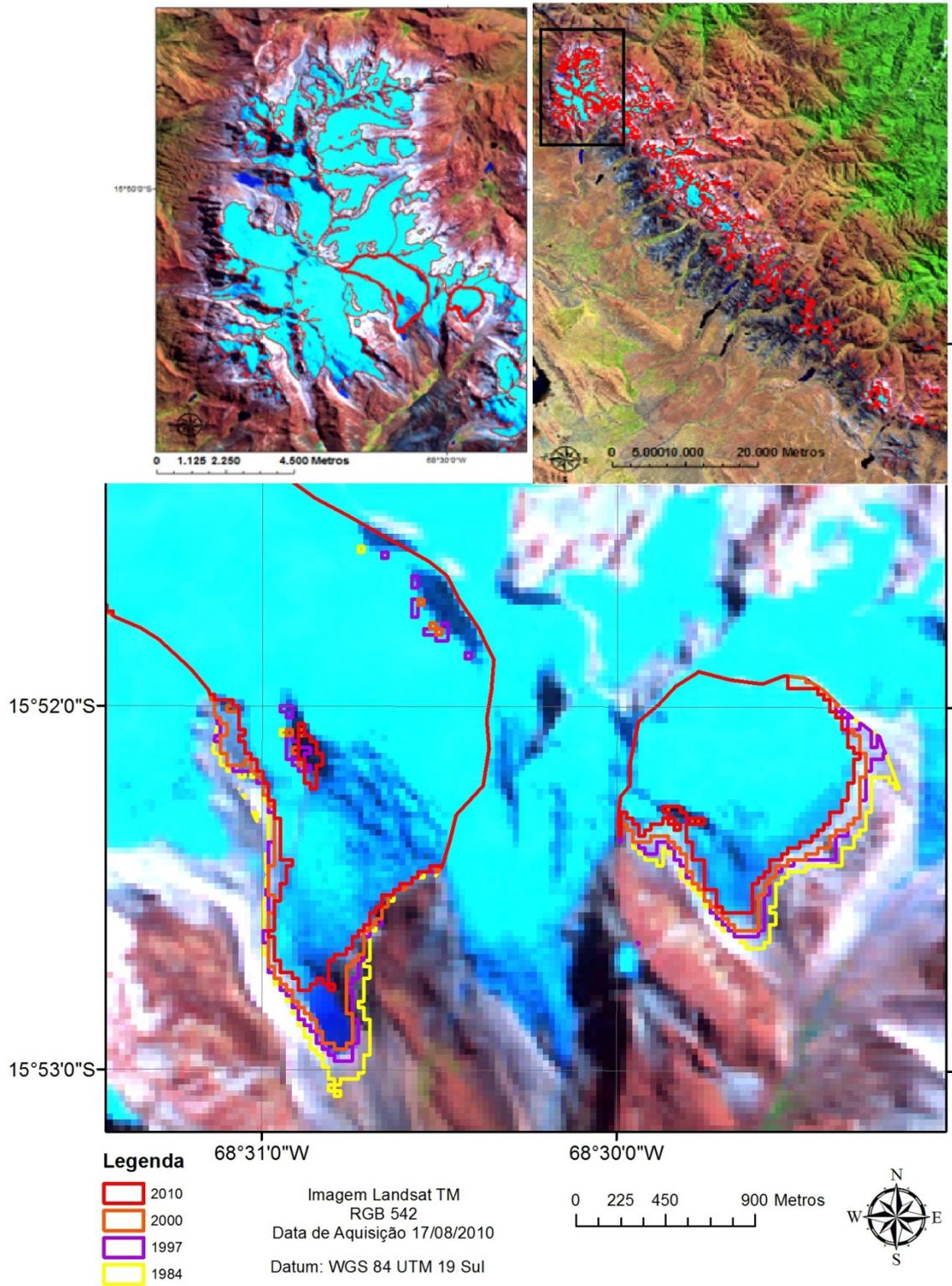


Figura 30: Exemplo de variações nas frentes de duas geleiras situadas no Monte Ancuhuma. A linha amarela corresponde aos limites frontais referentes ao ano de 1984, a linha roxa corresponde aos limites de 1997, a linha laranja corresponde ao limite de 2000 e a linha vermelha corresponde ao limite de 2010.

4.2. Variações na elevação das geleiras

Para a análise de elevação das geleiras, foram extraídas do ASTER GDEM, para cada geleira, as informações de elevação mínima, máxima e média em todas as datas analisadas. Os resultados podem ser observados através das figuras 30, 31 e 32.

A figura 31 representa as mínimas elevações entre as classes de área, mostrando que a menor elevação mínima está na classe entre 0,01 e 0,5 km². Observou-se também que ao longo da série temporal, está ocorrendo um aumento na elevação mínima das geleiras, em praticamente todos os intervalos de classe. Com destaque para a elevação acentuada a partir da imagem de 2000, no intervalo entre 3 e 5 km². A geleira com a menor elevação mínima foi registrada para o ano de 1984, com 4.335 metros de elevação e possuía uma área de 0,24 km².

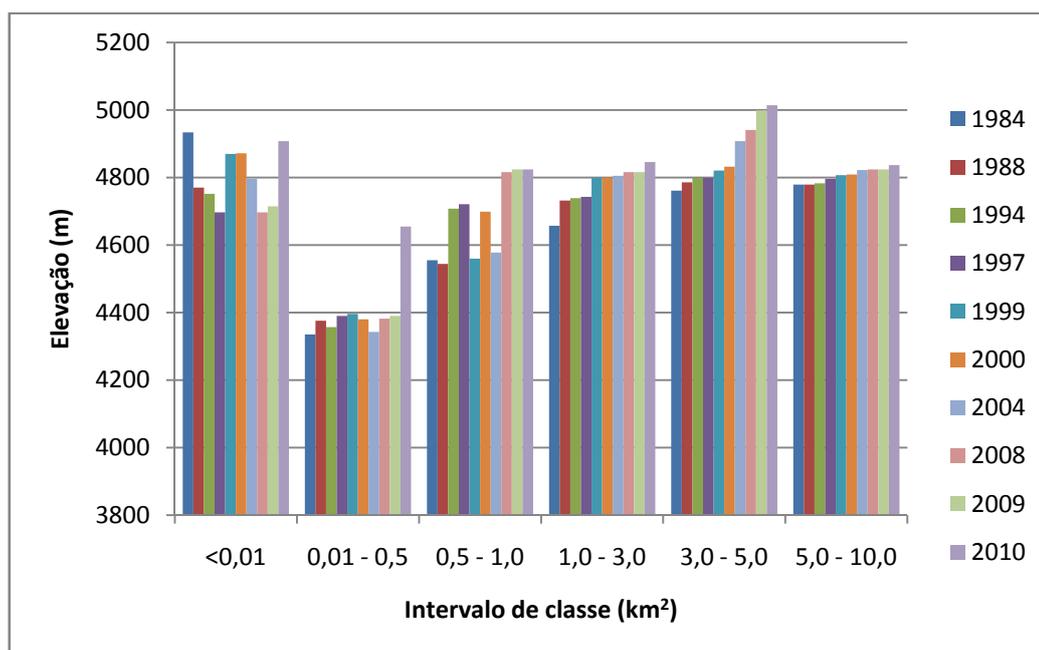


Figura 31: Gráfico de elevação mínima das geleiras. O gráfico mostra a menor elevação onde ocorre uma geleira em cada classe analisada. Observa-se uma tendência de aumento da menor elevação ao longo do tempo em praticamente todas as classes analisadas. Nas classes de maior área isso pode representar uma retração na frente da geleira, já nas classes de menor área, podem representar uma retração na frente das geleiras ou até mesmo o desaparecimento das geleiras de menor altitude. Esses dados representam que as geleiras estão ocorrendo em áreas cada vez mais altas na cordilheira.

O resultados de elevação máxima (Figura 32) mostram que as geleiras com os maiores valores de elevação pertencem ao intervalo de classes com área superior a 3 km². Já os menores valores para a elevação máxima estão presentes na classe com área < 0,01 km². Além disso, podem ser observadas poucas variações entre as elevações máximas de cada classe ao longo do tempo.

Os resultados de elevação média das geleiras (Figura 33) mostram que a elevação média de ocorrência das geleiras está aumentando ao longo do tempo, para todas as classes de geleiras analisadas. Além disso, podemos observar que, com exceção da classe com área menor que 0,01 km², quanto maior a classe de intervalo de área, maior é a média de elevação observada, ou seja, quanto maior o tamanho da geleiras, maior é a média de elevação.

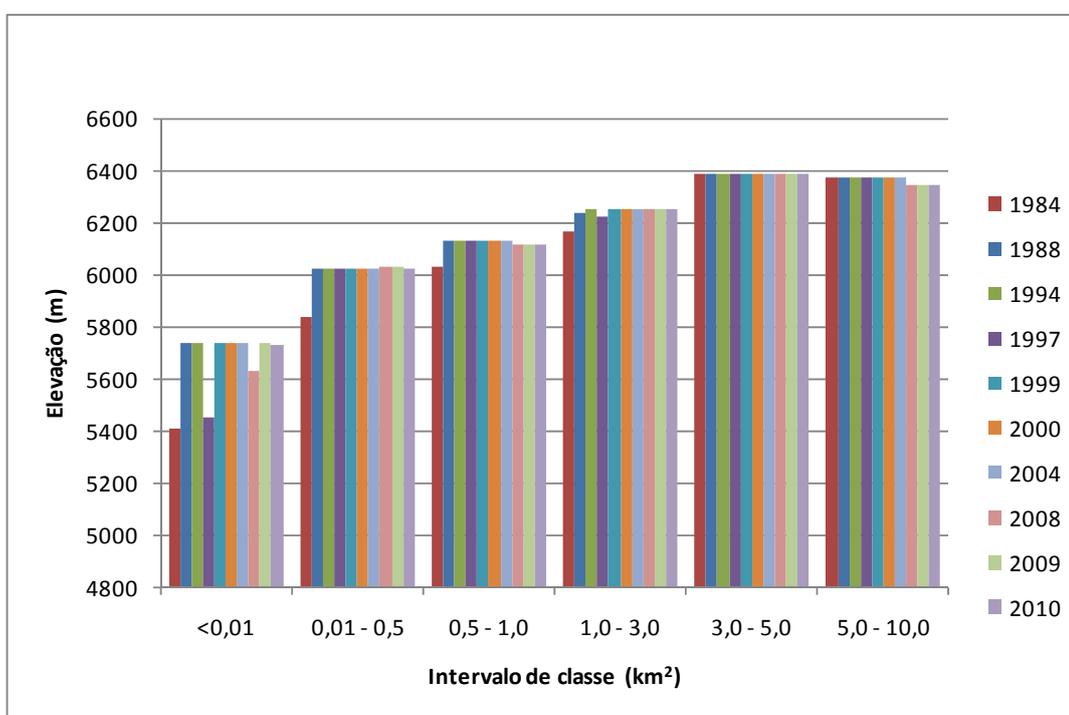


Figura 32: Gráfico de elevação máxima das geleiras. O gráfico mostra que as geleiras com maior área podem ocorrer com uma elevação máxima maior com relação as geleiras de menor área. Os dados não apresentaram grandes alterações ao longo da série temporal.

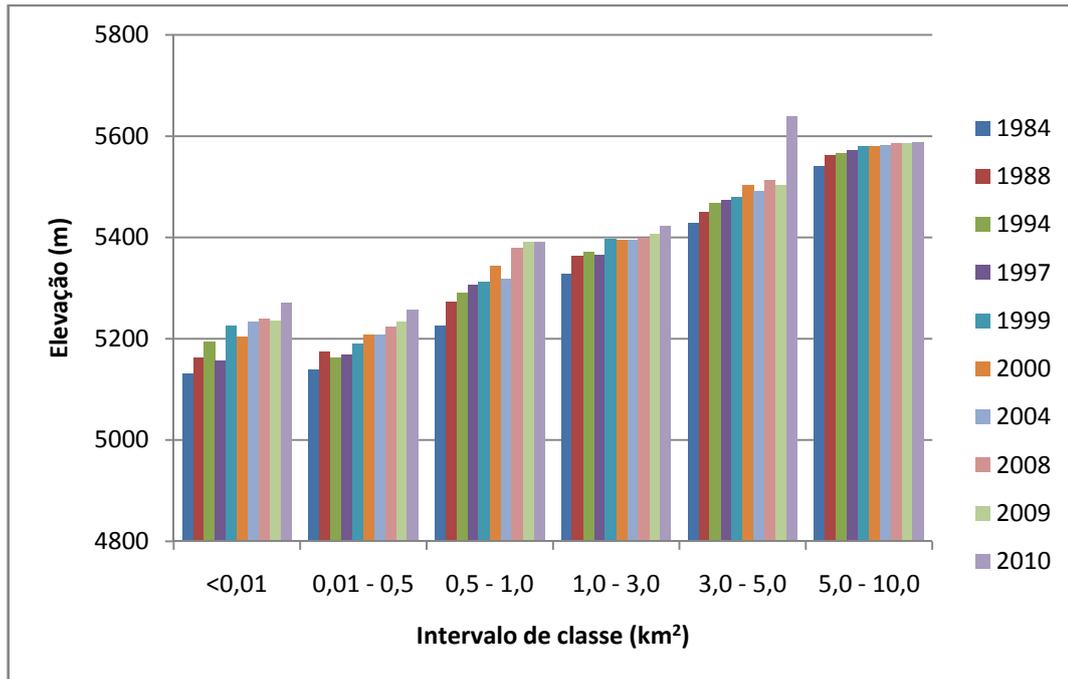


Figura 33: Média de elevação das geleiras. O gráfico mostra que a elevação média das geleiras está crescendo ao longo do tempo analisado. As classes com maior área possuem uma média de elevação maior em relação às de menor tamanho. Esses resultados evidenciam que as geleiras da Cordilheira Real estão cada vez mais restritas a cota altimétricas elevadas.

As análises de elevação obtidas nesse trabalho, corroboram com dados obtidos por estudos em áreas de geleiras tropicais (Rabatel et al., 2006; Ribeiro, 2007), onde as variações mostraram uma tendência de crescimento em altitude da linha média das geleiras.

4.3. Variações nas geleiras de acordo com a sua orientação

A análise de orientação foi obtida através da informação de orientação de vertentes ou aspecto gerada a partir do ASTER GDEM sobre a área de cada geleira. A classe majoritária desses valores foi definida para essa análise, pois a média poderia não representar fielmente a direção da orientação da geleira.

A principal orientação das geleiras, apresentada na Figura 34, mostra uma menor quantidade de geleiras orientadas para o setor Norte, e uma maior frequência de orientações majoritárias para o setor Sul e Sudeste, em todas as imagens analisadas. Porém, esses setores com a maior frequência de geleiras, Sul e Sudeste, também foram os mais reduzidos, comparados com a série temporal de outros setores.

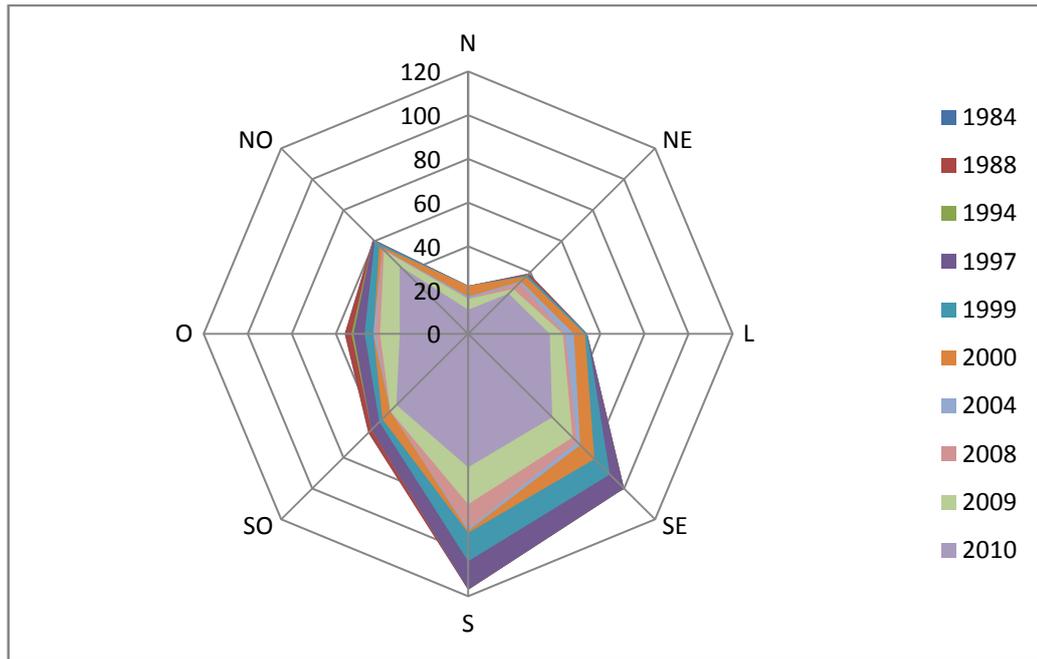


Figura 34: Gráfico do número de geleiras por classe de orientação, representando a distribuição das geleiras da porção Norte da Cordilheira Real. As geleiras estão em sua maioria, voltadas para o sul. Embora todas as orientações terem reduzido o número de geleiras, o sul foi a orientação que mais teve geleiras ao longo do período de estudo.

Em relação à área total de geleiras para cada classe de orientação, os resultados obtidos (Figura 35) mostraram que houve uma redução maior nos setores Sudeste, Sul e Sudoeste. Embora esses setores tenham tido maior perda de área, continuam possuindo as maiores área. O setor Norte teve menor variação, porém possui menor área de geleiras.

Os dados de orientação mostram uma área muito maior de geleiras para setor Sul em relação ao Norte. Esse fato provavelmente está associado às condições de irradiação solar, pois a cordilheira está orientada de Noroeste para Sudeste e devido ao seu relevo ocorrerem principalmente geleiras de vale em sua área. Assim, o ângulo de exposição à radiação solar altera as condições de ablação para geleiras com diferentes características de orientação.

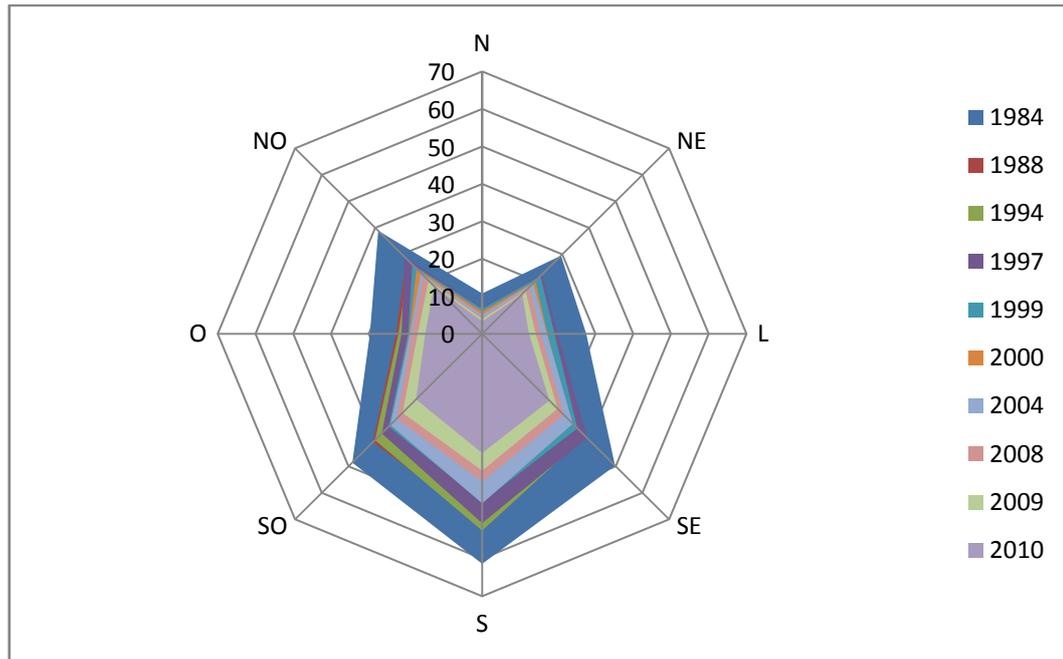


Figura 35: Gráfico de área das geleiras da Cordilheira Real (km²) por orientação das geleiras. Os setores Sul, Sudeste e Sudoeste mantêm a maior área de geleiras ao longo da série temporal. Porém, estão sofrendo retração com mais intensidade que outros setores. O setor Norte possui menor área e menor variação na área ao longo da série.

4.4. Relações entre a elevação mínima e a orientação das geleiras

Os resultados obtidos através da análise da orientação de ocorrência das geleiras com menor elevação, tiveram como intenção identificar em quais setores as geleiras tiveram maior variação quanto a sua menor altitude. De acordo com a figura 36, é possível notar o aumento da elevação com o tempo. As menores elevações foram encontradas no setor Sudeste, embora observado 4.655 metros de altitude na imagem de 2010, a elevação aumentou consideravelmente em relação a imagem de 2009, onde foram observados 4.390 metros. Conforme os resultados obtidos, o limite para a existência de geleiras é mais elevado no setor Norte, pois a menor elevação registrada para a imagem de 2010 é de 4989 metros, sendo que na imagem de 1984 eram 4.887 metros a menor elevação com a presença de geleira nesse setor.

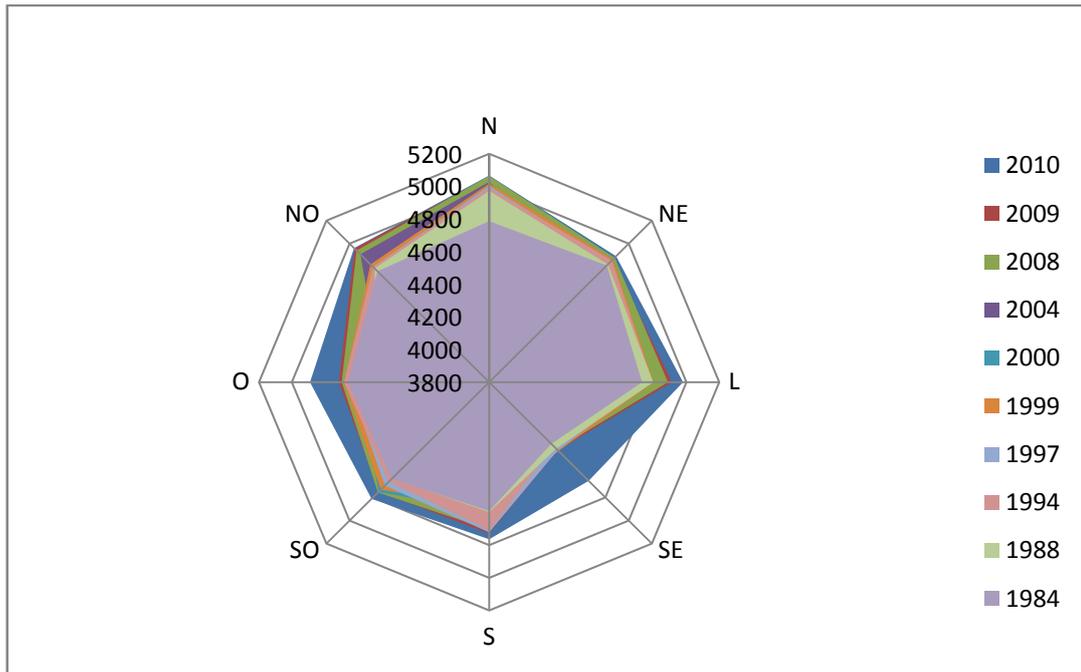


Figura 36: Gráfico de elevação mínima das geleiras por orientação. As variações em elevação mínima mostram um aumento gradual em todos os setores. Na Cordilheira Real, a ocorrência de geleiras está cada vez mais restrita a elevações maiores para os setores Norte, leste e Noroeste. O setor Sudeste é o que possui geleiras com menores elevações, seguida do setor Sul. As maiores variações ocorrem entre as imagens de 2009 e 2010, principalmente nos setores Sudeste e Oeste.

As variações referentes à orientação mostraram que os setores Sul e Sudeste apresentaram resultados opostos aos do setor Norte em diversas observações. Esse fato, que ocorreu nas análises de área, elevação, número de geleiras sempre que comparadas com a orientação, está relacionado com a exposição das geleiras a radiação solar. Assim devido à orientação da Cordilheira e ao relevo acentuado, essas geleiras possuem características diferentes quanto ao processo de ablação.

5. Conclusões

Neste estudo, foram gerados dados sobre as variações nas geleiras da porção norte da Cordilheira Real, para o período entre 1984 e 2010. Esses dados incluem a frequência, área, elevação e orientação das geleiras, adquiridas através da classificação das áreas de neve e gelo em imagens Landsat TM e com o auxílio do modelo de elevação ASTER GDEM.

A metodologia proposta para o processamento das imagens de Sensoriamento Remoto mostrou-se eficaz para o estudo. Tanto a transformação dos dados para reflectância superficial, quanto as rotinas elaboradas para a classificação das imagens Landsat TM, foram consideradas eficientes e geraram bons resultados.

Porém, a utilização do Índice Normalizado de Neve e Gelo (NDSI) como único critério de classificação, não foi considerada satisfatória na delimitação das feições de Neve e Gelo da cordilheira. O limiar que resultou na melhor opção para distinguir a neve e o gelo nas imagens também incluiu os lagos de degelo em seus resultados. Assim, foram utilizados os dados da banda TM4 e o Índice Normalizado da Água (NDWI), para a elaboração de uma classificação multicritérios, com a intenção de aprimorar os resultados do NDSI.

A partir da delimitação das bacias glaciais realizada, foi possível estimar e analisar as variações multitemporais em cada geleira da porção Norte da Cordilheira Real, pois com a intersecção dos vetores resultantes da classificação com os dados delimitados manualmente, foram gerados os limites para cada geleira da Cordilheira.

O Sistema de Informações Geográficas criado para gerenciar os dados e realizar as análises foi fundamental para a conclusão deste estudo. Os resultados gerados através da extração dos dados com o modelo de elevação e o gerenciamento do banco de dados foram a base da análise dos resultados do estudo. As análises focaram na quantificação das variações nas geleiras da Cordilheira Real entre 1984 e 2010. Assim, as geleiras foram analisadas quanto a sua frequência, área, elevação mínima, elevação máxima, média de elevação e orientação. As informações sobre a declividade foram incluídas no banco de dados, porém, como não mostraram variação, não foram incluídas nessa análise.

Os principais resultados encontrados através da metodologia proposta revelaram que na série temporal das imagens adquiridas, a área total e a quantidade de geleiras da parte Norte da Cordilheira Real, apresentaram declínio gradual. No total, a superfície de geleiras apresentou uma redução de 49,12 % entre o período 1984 e 2010, enquanto o número de geleiras sofreu uma queda de 39,57 % nesse mesmo período. Embora esse declínio não tenha

ocorrido de forma linear, todos os intervalos de tempo entre as imagens, com exceção do período entre 1994 e 1997, sofreram perda de área total.

De acordo com os resultados obtidos nas análises com as geleiras agrupadas em intervalos de classe de área, observou-se que a Cordilheira estudada é dominada por geleiras com área entre 0,01 e 0,5 km², porém a maior porção da área total concentra-se na classe das geleiras entre 3 e 5 km². Os resultados obtidos mostraram que a elevação mínima e a elevação média de cada uma das classes de geleiras aumentaram. Assim, as geleiras estão sendo restritas a altitudes cada vez maiores. Na imagem de 2010, a menor elevação registrada para uma geleira na cordilheira era de 4.655 metros, o que equivale a 320 metros acima da menor elevação encontrada no estudo, no ano de 1984. Quanto à análise das orientações, as maiores freqüências e áreas observadas ocorreram no setor Sul e Sudeste. Porém, esses setores também apresentaram a maior quantidade de perdas de área e no número total de geleiras ao longo do período de tempo analisado. As ocorrências de geleiras a menores elevações também foram registradas para os setores Sul e Sudeste.

Em suma, o monitoramento dessas massas de neve e gelo através do sensoriamento remoto mostrou-se satisfatório, pois mesmo sem a necessidade de trabalho de campo na área de estudo, pôde-se quantificar as variações dessas estruturas ao longo dos anos. Além disso, essas variações revelaram algumas características comuns a outras massas de gelo ao redor do planeta. Assim, os resultados deste estudo nos alertam ainda mais sobre as conseqüências dessas variações para os povos que habitam o altiplano dos Andes centrais, a curto e longo prazo, com a perda gradativa das massas de gelo andinas.

Bibliografia

ARIGONY-NETO, J.; SAURER, H.; JANA, R.; RAU, F.; SIMOES, J.C.; GOBMANN, H. Monitoring snow parameters on the Antarctic Peninsula using satellite data: a new methodological approach. **EARSel eProceedings**, v.1, n.5, p.100-110. 2006.

ARIGONY-NETO, J.; SAURER, H.; SIMÕES, J.C.; RAU, F.; JAÑA, R.; VOGT, S.; GOSSMANN, H.: Spatial and temporal changes in dry-snow line altitude on the Antarctic Peninsula. **Climatic Change**: v. 94 p.19–33. 2009.

ARMSTRONG, R., B. RAUP, SJS KHALSA, R. BARRY, J. KARGEL, C. HELM, E H. KIEFFER. **GLIMS glacier database**. Boulder, Colorado E.U.A.: National Snow and Ice Data Center. 2005.

ASTER GDEM Validation Team, **ASTER Global DEM Validation: Summary Report**. Prepared by METI/ERSDAC; NASA/LPDAAC; USGS/EROS; In cooperation with NGA and Other Collaborators. 2009.

CHANDER, G., MARKHAM, B. L.; Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration. Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 41, no. 11, November 2003.

CHANDER, G., MARKHAM, B. L., & BARSİ, J. A. (2007). Revised Landsat-5 Thematic Mapper Radiometric Calibration. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, 4, 490–494. 2007.

CHAVEZ, J. P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**. New York, v.24, p. 459-479, 1988.

CHOI, H. and R. BINDSCHADLER. Cloud Detection in Landsat Imagery of Ice Sheets Using Shadow Matching Technique and Automatic Normalized Difference Snow Index Threshold Value. **Remote Sensing of Environment**, 91, 237 –242. 2004.

CROSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Ed. Ver. – Campinas, SP: IG/UNICAMP, 1992.

DEGRASSI, C.; **Snow and ice cover changes in the glaciers of the cordillera real (Bolivia) 1987-2001: a remote sensing study**. Thesis of Masters of Arts in Geography. Appalachian State University. 2004.

DOZIER, J.; SCHNEIDER, S. R. e MCGINNIS, D. F. Jr. Effect of grain size and snowpack water equivalence on visible and near-infrared satellite observations of snow. **Water Resources Research**, 17(4):1213–1221. 1981.

DYURGEROV, M. e MEIER, M. F. Glaciers and the study of climate and sea level change. In: Bamber, J. L. e Payne, A. J. (ed.). **Mass balance of the Cryosphere: observations and modelling of contemporary and future changes**. Cambridge, Cambridge University Press, 579–622. 2004.

DOZIER, J. Spectral signature of Alpine snow cover from Landsat Thematic Mapper. **Remote Sensing of Environment**, 28, 9–22. 1989.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Produtos Agrícolas. Landsat - Land Remote Sensing Satellite. Disponível em: <http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/landsat.htm>. Acesso em Setembro de 2011.

EZPINOZA, M.; **Análise multitemporal do sector sul do Nevado Huascarán, Peru, utilizando imagens do sensor TM**. Monografia de Especialização. INPE 2007.

FRANCOU, B.; RAMIREZ, E.; CÁCERES, B. AND MENDOZA, J.; Glacier Evolution in the Tropical Andes during the Last Decades of the 20th Century: Chacaltaya, Bolivia, and Antizana, Ecuador. **A Journal of the Human Environment, Ambio** Vol. 29 No. 7, Nov. 2000.

FRANCOU, B., M. VUILLE, P. WAGNON, J. MENDOZA, AND J.-E. SICART. Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia, 16_S. **Journal Geophysical Research**, Vol. 108(0), XXXX, doi:10.1029/2002JD002959, 2003.

FUSSELL, J., RUNDQUIST, D. and J. A. HARRINGTON, “On Defining Remote Sensing.” **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 52(9): 1507-1511. 1986.

GONZALEZ, R.C. & WOODS, R.E. **Processamento de imagens digitais**. Tradução Roberto Marcondes Cesar Junior, Luciano da Fontoura Costa – São Paulo: Ed. Blucher, 509 p. 2000.

GÜRTLER, S.; EPIPHANIO, J.C.N.; LUIZ, A.J.B.L.; FORMAGGIO, A.R.; **Planilha Eletrônica para o Cálculo de Reflectância em Imagens TM e ETM+ Landsat**. Revista Brasileira de Cartografia, No 57/02, 2005.

GUTMAN, G., BYRNES, R., MASEK, J., COVINGTON, S., JUSTICE, C., FRANKS, S., AND R. HEADLEY. Towards monitoring land cover and land-use changes at a global scale: The Global Land Survey 2005, **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 74, 6-10, 2008.

HALL, D.K. e MARTINEC, J. Remote Sensing of ice and snow. Londres, Champman, 189 p. HASTENRATH, S. 1967. Observations on the snowline in the Peruvian Andes. **Journal of Glaciology**, 6:541–550. 1985.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Características orbitais do Satélite Landsat**. Disponível em www.dgi.inpe.br/html/landsat.htm. Acesso em novembro de 2009.

IPCC. **Climate Change 2007: The Physical Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, 996 p. 2007.

JENSEN, J. R., **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em recursos Terrestres**; tradução José Carlos Neves Epiphanyo (coordenador)...[et. al]. São José dos Campos, SP : Parenteses, 2009.

JORDAN, E., Glaciers of Bolívia. In: WILLIAMS, R., Jr. e FERRIGNO, J. (ed.) **Satellite image atlas of glaciers of the world: U.S. Geological Survey Professional Paper 1386-I-5 (Glaciers of South America)**, 206 p.1998.

KASER, G. A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. **Global and Planetary Change**, 22:93–03. 1999.

McFEETERS S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. Int. **Journal of Remote Sensing**, 17(7): 1425–1432. 1996.

MENDES JÚNIOR, C. W. **Monitoramento da Zona Superficial de Neve Úmida da Península Antártica pelo uso de dados dos sensores SMMR e SSM/I**. Tese de Doutorado em Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011.

MENZIES, J. **Modern Glacial Environments: Processes, Dynamics and Sediments**. Oxford, Butterworth-Heinemann Ltd, 621 p. 1995.

MILTON, E.J.,. Teaching atmospheric correction using a spreadsheet. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 60, 751-754. 1994.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e metodologias de Aplicação**. 4ª ed. Viçosa, UFV, 320p. 2011.

NOVO, EVELYN M. L. DE MORAES. **Sensoriamento Remoto : Principios e Aplicações**. 4ª ed. São Paulo : Editora Blucher, 388p. 2010.

PATERSON, W. **The Physics of Glaciers**. Oxford, Pergamon / Elsevier Science, 480p. 1994

PAUL, F.; BARRY, R.G.; COGLEY, J.G.; FREY, H.; HAEBERLI, W.; OHMURA, A.; OMMANNEY, C.S.L. ; RAUP, B. ; RIVERA, A.; ZEMP, M. Recommendations for the compilation of glacier inventory data from digital sources. **Annals of Glaciology** 50(53) 2009.

RABATEL, A., MACHACA, A., FRANCOU, B., JOMELLI, V. Glacier recession on Cerro Charquini (16°S), Bolivia since the maximum of the Little Ice Age (17th century). **Journal of Glaciology** 52 (176), 110–118. 2006.

RAMIREZ, E.; FRANCOU, B.; RIBSTEIN, P.; DESCLOITRES, M.; GUÉRIN, R.; MENDOZA, J.; GALLAIRE, R.; POUYAUD, B.; JORDAN, E. Small glaciers disappearing in the tropical Andes: a case study in Bolivia: Glaciar Chalcataya (16° S). **Journal of Glaciology**, Vol. 47, N°157. 2001

RAMIREZ, E.; BERGER, T. e RAMALLO, C. Impact of climatic change on the water resource availability in the Bolivian Cordillera, a case study: The Zongo and Tuni catchments. In: *Cambio Climático - Organizando la Ciencia para la Cordillera Americana - CONCORD*, 2006, Mendoza. Resúmenes – **Simposio sobre Cambio Climático: Organizando la Ciencia para la Cordillera Americana**, 1: 87–87. 2006.

RAU, F., BRAUN, M., FRIEDRICH, M., WEBER, F., GOßMANN, H. Radar glacier zones and their boundaries as indicators of glacier mass balance and climatic variability. In: **Proceedings of EARSeL-SIG:317-327**. 2000.

REES, W.G. **Physical Principles of Remote Sensing**. 2^a ed. Cambridge: Cambridge University Press.343p. 2001.

REES, W. G. **Remote Sensing of Snow and Ice**. Boca Raton: Taylor & Francis, 284 p. 2006.

RIBEIRO, R.; **Determinação das variações das geleiras da cordilheira Três Cruces (Bolívia) entre 1975-2004 pela análise de imagens digitais e dados cartográficos**. Dissertação de Mestrado em geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2007.

RICHARDS, J. A. E JIA, X. **Remote Sensing Digital Image Analysis : an introduction**. Springer, New York, 4th ed. edition. 2005.

SICART, J. E.; RIBSTEIN, P. ;CHAZARIN, J. P. and E. BERTHIER, Solid precipitation on a tropical glacier in Bolivia measured with an ultrasonic depth gauge. **Water Resources Research**., 38(10), 1189, 2002.

SILVÉRIO, W., JAQUET, J. Glacial cover mapping (1987-1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. **Remote Sensing of Environment**, 28. 2004.

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

SMITH J. A., SELTZER G.O., RODBELL D.T., Klein A.G., Regional Synthesis of Last Glacial Maximum Snowlines in the Tropical Andes, South America. **Quaternary International** 138–139 (2005) 145–167. 2005.

USGS - U. S. GEOLOGICAL SURVEY, Landsat **Missions: levels of Processing**. Disponível em: http://landsat.usgs.gov/descriptions_for_the_levels_of_processing.php. Acesso em Setembro de 2011.

VUILLE, M., FRANCOU, B., WAGNON, P., JUEN, I., KASER, G., MARK, B. G., AND BRADLEY, R. S., Climate change and tropical Andean glaciers: Past, Present and Future. **Earth Science Reviews**, 89, 79–96. 2008.

WGMS. **Global Glacier Changes: Facts and Figures**. ed. Zemp, M., I. Roer, A. Ka“a“b, M. Hoelzle, F. Paul and W. Haeberli. United Nations Environment Programme, World Glacier Monitoring Service, Zürich. 2008.

WILLIAMS, R. S., Jr., HALL, D. K. e BENSON, C. S. Analysis of glacier facies using satellite techniques. **Journal of Glaciology**, 37 (125): 120–128. 1991.