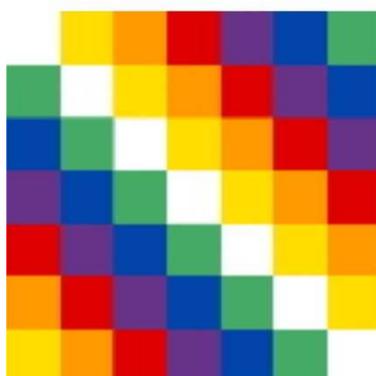




Instituto de Geociências
Departamento de Geografia



**INVENTÁRIO DAS GELEIRAS DA
CORDILHEIRA ORIENTAL, BOLÍVIA.**

1975 - 2009

Ana Maria Sanches Dorneles Ferreira de Oliveira

Porto Alegre
2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
GEO01128 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO II

**INVENTÁRIO DAS GELEIRAS DA
CORDILHEIRA ORIENTAL, BOLÍVIA.
1975 - 2009**

Ana Maria Sanches Dorneles Ferreira de Oliveira

Orientador

Prof. Ulisses Franz Bremer

Co-orientador

Prof. Luiz Felipe Velho (IFRS)

Banca examinadora

Prof. Nelson L. Sambaqui Gruber

Prof. Siclerio Ahlert (UCS)

Trabalho de Conclusão apresentado como requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Geografia.

Porto Alegre
2010

Oliveira, Ana Maria Sanches Dorneles Ferreira de
Inventário das Geleiras da Cordilheira Oriental, Bolívia.
1975 - 2009. / Ana Maria Sanches Dorneles Ferreira de Oliveira
- Porto Alegre : UFRGS, 2010.
[69 f.] il.

Trabalho de Conclusão do Curso de Geografia. –
Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de
Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2010.
Orientação: Prof. Ulisses Franz Bremer r
Co-Orientação: Prof. Luiz Felipe Velho

1. Geografia. 2. Retração Glacial. 3. Andes Bolivianos.
4. Mudanças Climáticas. 5. Bacia Amazônica. 6. High
Resolution Camera (HRC). 7. CBERS-2B. I. Título.

Catálogo na Publicação
Biblioteca Geociências - UFRGS
Renata Cristina Grun CRB10/1113

*ao camarada
Eliezer de Macedo*

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ulisses Franz Bremer, pela orientação neste trabalho, pelos materiais, pelas críticas e idéias.

Ao co-orientador, Prof. Msc. Luiz Felipe Velho, pelo ensino das ferramentas dos programas usados.

Ao doutorando Rafael Ribeiro, por emprestar as cartas topográficas, pelas indicações de artigos e pelas dicas ao longo deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Jefferson Cardia Simões, por ter possibilitado que este trabalho fosse executado com bolsa.

Ao colega Ricardo Burgo Braga pelo *abstract*.

Aos colegas do Centro Polar e Climático, pela amizade e solidariedade no trabalho: Ricardo Burgo Braga, Éder Maier, Kátia Kellen, Claudio Wilson Mendes Jr., Flávia Moraes, Rosemary Vieira e, em especial, à Ingrid Linck pela amizade que ofereceu num momento difícil.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de iniciação científica concedida.

À minha mãe, Analia, pela força e pelo incentivo em dar continuidade aos estudos.

Ao meu companheiro, Eduardo, pelo apoio e incentivo durante estes anos da graduação.

À bela e surpreendente Terra onde vivo.

Resumo

Geleiras de montanha são importantes indicadores das mudanças climáticas e reservam informações ambientais pretéritas significativas sobre a evolução do clima da Terra. As que respondem mais rapidamente a essas mudanças estão localizadas entre os trópicos. Na Bolívia, geleiras tropicais são encontradas associadas ao relevo escarpado da Cordilheira dos Andes, tendo importante papel nas culturas locais, além de sua relevância enquanto recurso hídrico. Este trabalho verificou as alterações nas áreas das geleiras bolivianas da Cordilheira Oriental (14° 37' S, 69° 14' W – 17° 4' S, 67° 13' W) entre 1975 e 2009. Cartas topográficas forneceram as áreas das geleiras em 1975 e auxiliaram na identificação das bacias de drenagem. A partir de imagens HRC/CBERS-2B, foi possível elaborar os mosaicos para a área de estudo. Com a classificação supervisionada, utilizando o método do paralelepípedo, obtiveram-se as áreas para o ano de 2009. Os resultados foram parciais porque as cenas HRC apresentam sérias limitações referentes à cobertura de nuvens e à presença de ruídos. No entanto, os dados obtidos mostram que as áreas das geleiras da Cordilheira Oriental retraíram cerca de 38,71% durante o período de observação. As variações obtidas por região são: Cordilheira Apolobamba/ região Cololo (- 24,58%); Cordilheira Real Norte/região Satuni-HuaynaPotosi (-39,66%), região Calzada-Chearoco-Chachacomani (- 5,22%) e região Nigruni-Condoriri (- 44,09%); Cordilheira Real Sul/região Hampaturi-Taquesi (-77,96%), e região Mururata (-52,38%); Cordilheira TresCruces (Quimsa Cruz)/região Choquetanga (- 50,53%) e região alta (- 25,01%). Os resultados demonstram que existem mudanças sensíveis observadas nas geleiras da Cordilheira Oriental. Eles sugerem a importância de se inventariar e monitorar estas áreas sistematicamente.

Palavras-chave: retração glacial; Andes bolivianos; mudanças climáticas; bacia amazônica; HighResolutionCamera (HRC); CBERS-2B

Abstract

Mountain glaciers are important indicators of climate change, storing significant environmental information of the Earth's climate evolution. Of these ice masses, the ones that respond most rapidly are located between the tropics. In Bolivia, tropical glaciers are found associated to the scarped terrain of the Andes Mountain Range, having a key role in local cultures, as well as being relevant as a water resource. This work verified the changes in the glacier area of the Bolivian Cordillera Oriental (14° 37' S, 69° 14' W – 17° 4' S, 67° 13' W) between 1975 and 2009. To this end, topographic maps offered the glacier extension in 1975, and also assisting in drainage basins identification. From HRC/CBERS-2B imagery it was possible to form the mosaics for the study area. With supervised classification, employing the parallelepiped method, it was possible to determine the glacier area in 2009. Results were partial, due to serious limitations related to cloud cover and the presence of noise. Nevertheless, the obtained data showed that the Cordillera Oriental glaciers area retreated approximately 38.71% during the study period. The regional variations were: Cordillera Apolobamba/Cololo region (-24.58%); Cordillera Real Norte/Satuni-Huayna Potosi region (-39.66%), Calzada-Chearoco-Chachacomani region (-5.22%) and Nigruni-Condoriri region (-44.09%); Cordillera Real Sul/Hampaturi-Taquesi region (-77.96%), Mururata region (-52.38%); Cordillera Tres Cruces (Quimsa Cruz)/Choquetanga region (-50.53%) and the high region (-25.01%). Results show that there are sensitive changes in the observed Cordillera Oriental glaciers, suggesting the importance of compiling and inventory and monitoring these areas, systematically.

Keywords: glacial retreat; Bolivian Andes; climate change; Amazonian watershed; High Resolution Camera (HRC); CBERS-2B

Sumário

Capa	i
Folha de rosto	ii
Dedicatória	iv
Agradecimentos	v
Resumo	vi
Abstract	vii
Sumário	viii
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Justificativa	3
1.4. Localização da área de estudo	3
2. AS GELEIRAS BOLIVIANAS NO CONTEXTO DA CRIOSFERA	6
2.1. A criosfera e os geosistemas	6
2.2. Origem e dinâmica das geleiras	7
2.3. Classificação das geleiras	10
2.4. A ocorrência de geleiras e calotas de gelo no mundo	11
2.5. Monitoramento global de áreas cobertas por gelo	12
3. ORIGEM E DINÂMICA DO CLIMA NA CORDILHEIRA ORIENTAL	15
3.1. Geleiras Tropicais	15
3.2. O clima da Bolívia andina	16
3.2.1. As geleiras na Bolívia	19
3.3. A circulação atmosférica e as chuvas na Bolívia	21
3.3.1. ZCIT - Zona de Convergência Intertropical	22
3.3.2. ENSO: Impactos na América dos Sul	25
	viii

4. MATERIAIS E MÉTODOS _____	27
4.1. Importância do Sensoriamento Remoto _____	27
4.2. Materiais _____	28
4.2.1. Sistemas computacionais _____	28
4.2.2. Imagens HRC do satélite CBERS-2B _____	28
4.2.3. Material Cartográfico _____	30
4.3. Métodos _____	31
4.3.1. Pré-Processamento _____	32
4.3.1.1. Seleção das cenas _____	32
4.3.1.2. Elaboração dos mosaicos _____	35
4.3.2. Processamento _____	40
4.3.3. Pós-Processamento _____	41
5.RESULTADOS E DISCUSSÕES _____	42
5.1. A Cordilheira Oriental e as mudanças ambientais _____	42
5.2. Variação parcial das geleiras da Cordilheira Oriental 1975-2009 ____	43
5.3. A retração das geleiras da Cordilheira Oriental _____	43
5.3.1. Representação gráfica da redução das geleiras da Cordilheira Oriental _____	44
5.3.2. A representatividade dos resultados _____	46
5.4. Desafios à compilação de dados a partir de imagens HRC/CBERS-2B _____	50
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS _____	53
Referências _____	55

Lista de Figuras

Figura 1.1. Crista da montanha Huayna-Potosí, Cordilheira Oriental, coberta de neve e gelo. [Foto: U.F.Bremer, fev/1999]. _____	2
Figura 1.2. Localização da Cordilheira Oriental na América do Sul. _____	4
Figura 2.1. Componentes da Criosfera e suas escalas de tempo. Adaptado de IPCC, 2007 <i>apud</i> UNEP/WGS, 2008. _____	7
Figura 2.2. Fatores que controlam o desenvolvimento das geleiras. _____	8
Figura 2.3. Elementos do balanço de massa de um manto de gelo (a) e uma geleira de vale (b), segundo SUDGEN e JOHN (1976) <i>apud</i> ROCHA-CAMPOS e SANTOS (2003). _____	9
Figura 2.4. Etapas da metamorfização da neve em gelo de geleira _____	10
Figura 2.5. Distribuição mundial das massas de gelo agrupadas em macroregiões. _____	11
Figura 3.1. Distribuição das geleiras tropicais. _____	16
Figura 3.2. Padrão da temperatura média anual (A) e padrão da precipitação anual (B).[Fonte: FAN, 2009]. _____	17
Figura 3.5. Principais rios da bacia do Amazonas. _____	23
Figura 3.6. Climogramas para as localidades de El Alto e Concepción. _____	24
Figura 3.7. Efeitos globais do fenômeno El Niño. _____	26
Figura 4.1. Comportamento espectral da água em seus diferentes estados físicos. _____	30
Figura 4.2. Fluxograma demonstrando o método desenvolvido para a obtenção das áreas da Cordilheira Oriental, Bolívia. _____	32
Figura 4.3. Cenas descartadas por apresentarem nebulosidade cobrindo as geleiras e/ou ruídos. _____	34
Figura 4.4. Recorte de cena apresentando trechos sem ruídos (azul escuro) e com ruídos (azul claro). _____	35
Figura 4.5. Mosaico elaborado a partir de cenas HRC. Cordilheira Apolobamba, região Cololo. _____	36
Figura 4.6. Mosaico elaborado a partir de cenas HRC. Cordilheira Real Norte, regiões Calzada-Chachacomani, Nigruni-Condoriri e Saltuni-HuaynaPotosí. _____	37

Figura 4.7. Mosaico elaborado a partir de cenas HRC. Cordilheira Real Sul, regiões Hampaturi-Taquesi, Mururata e Illimani. _____	38
Figura 4.8. Mosaico elaborado a partir de cenas HRC. Cordilheira TresCruces (Quimsa Cruz), região alta e Choquetanga. _____	39
Figura 4.9. Áreas de ocorrência de sombras causadas pelo relevo e a detecção de bordas constituíram um desafio a classificação. Recorte da região Calzada-Chearoco-Chachacomani. _____	41
Figura 5.1. Lagos associado a águas de degelo. Huayna-Potosí, em fevereiro de 1999[Foto:U.F.Bremer]. _____	42
Figura 5.2. Região Hampaturi-Taquesi: retração glacial 1975 – 2009. _____	47
Figura 5.3. Região Calzada: retração glacial 1975 – 2009. _____	48
Figura 5.4. Região Hamapaturi-Taquesi: Lagos resultantes da retração glacial. ____	50
Figura 5.5. Feições análogas identificadas em fotografiada geleira Chacaltaya e setor do mosaico da Cordilheira Real.[Fotografia: U.F.Bremer, Fev/1999]. _____	51
Figura 6.1. Antigo centro de aclimatação do Clube Andino Boliviano, Chacaltaya, a 5260 m de altitude. [Foto: U.F.Bremer, fevereiro de 1999]. _____	54

Lista de Tabelas

Tabela 3.1. Geleiras da Cordilheira Oriental. Dados obtidos referentes a 1975. (Jordan, 1999) _____	20
Tabela 4.1. Programas utilizados para extração e análise das informações. _____	28
Tabela 4.2. Características da Câmara de Alta Resolução - HRC. Fonte: INPE, 2010d. _____	29
Tabela 4.3. Cartas topográficas utilizadas na identificação das bacias de drenagem e feições glaciais. [JORDAN, 1990 a, b, c, d, e, f, g, h, j] _____	31
Tabela 4.4. Cenas selecionadas CBERS-2B, sensor HRC. _____	32
Tabela 5.1. Variação parcial das geleiras da Cordilheira Oriental 1975-2008/2009.	43

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A agenda ambiental chegou ao século XXI como uma das principais pautas cotidianas. Política, economia, saúde, habitação, entre outros temas têm sido abordados desde uma ótica ambiental cujas perspectivas preocupam. O aquecimento global e as mudanças climáticas ganharam as bocas e as mentes de pessoas no mundo todo, acompanhados de uma crescente crise do modelo econômico vigente e de forte degradação ambiental em escalas locais e regionais (e.g. poluição e assoreamento de cursos d'água, lixões, desmatamento, moradias em áreas de risco).

Na América do Sul uma das problemáticas que tem se destacado é a retração de geleiras que fazem parte do patrimônio cultural dos povos andinos. Em outubro de 2007 a Comunidade Andina realizou o *Clima Latino – Encuentro Internacional sobre Cambio Climático en America Latina* para discutir a necessidade de políticas públicas diante dos desafios impostos pelas alterações climáticas. Um destes desafios é construir conhecimento sobre as dinâmicas envolvidas em ambientes de geleiras de altitude como os existentes nos Andes.

Nesse sentido, o incremento de tecnologias de imageamento por sensores a bordo de satélites contribui para acelerar o escopo de conhecimentos ambientais em diferentes escalas. O estudo das áreas cobertas de gelo da superfície terrestre, cerca de 10% da terra emersa, tem sido facilitado por estas técnicas possibilitando a construção de bancos de dados coordenando diversos aspectos relevantes à dinâmica glacial (RACOVITEANU, *et al.* 2008; PAUL *et al.*, 2009). Uma pequena parte da cobertura de gelo existente atualmente está localizada na Cordilheira dos Andes armazenada em geleiras de montanha cujas dinâmicas ainda não são totalmente conhecidas.

Este trabalho visa atualizar dados sobre as extensões das geleiras da Cordilheira Oriental na Bolívia, entre as latitudes 14° 37' S e 17° 04' S, a partir da análise comparativa de dados de cartas topográficas e de imagens de satélite desse país da América do Sul. A figura 1.1 é representativa do modo como se distribuem as massas de gelo nas cristas, encostas e pequenos vales dessas montanhas.

Espera-se contribuir com os conhecimentos sobre as geleiras tropicais existentes no setor oriental da cordilheira dos Andes em território boliviano cujas águas são drenadas para o altiplano e para a bacia amazônica.

1.2. Objetivos

Este trabalho objetiva atualizar as áreas das geleiras da Cordilheira Oriental, baseando-se nas extensões em 1975 (JORDAN, 1999) e em imagens orbitais do ano de 2009.

Para que o objetivo geral seja atingido foram elaborados os seguintes objetivos específicos:

- criar planos de informação identificando geleiras e bacias de drenagem da Cordilheira Oriental a partir de cartas topográficas.
- identificar estas mesmas feições nas imagens orbitais para obtenção das extensões das geleiras.
- identificar diferenças entre as alterações nas extensões das geleiras e os fatores que concorrem para estas mudanças.



Figura 1.1. Crista da montanha Huayna-Potosí, Cordilheira Oriental, coberta de neve e gelo. [Foto: U.F.Bremer, fev/1999].

1.3. Justificativa

O gelo de geleiras contém informações sobre os climas pretéritos. O desaparecimento destas áreas equivale à inviabilização do acesso a estas informações. Além disso, o monitoramento de geleiras é parâmetro fundamental para acompanhar e prognosticar as respostas ambientais às mudanças climáticas, tais como a inserção das mesmas no ciclo hidrológico e, portanto, na disponibilidade de água para as bacias adjacentes.

Geleiras são importantes agentes geomorfológicos, contribuindo com a evolução da paisagem onde estão ou estiveram inseridas, podendo reter massas d'água por períodos que vão de anos a milhares de anos. Estudos de testemunhos de gelo têm revelado dados importantes para a recomposição de climas pretéritos e evidenciam o período de elevação da temperatura média global posterior à Revolução Industrial (SCHLÄPPI *et al.* 2010; EICHLER *et al.* 2010).

Há indícios que as atuais condições atmosféricas têm propiciado a perda de massa e volume das geleiras bolivianas, reduzindo as suas extensões (RAMÍREZ, *et al.*, 2001; RAMÍREZ, 2008). Espera-se, com este trabalho identificar setores que comprovem tal afirmação e, se possível, destacar os mais sensíveis.

1.4. Localização da área de estudo

O *Estado Plurinacional de Bolivia* é um país sul americano com 9.862.860 habitantes (IBGE, 2009) que se estende desde a bacia amazônica até a Cordilheira dos Andes, faz fronteira com Brasil, Paraguai, Argentina, Chile e Peru e não tem acesso direto ao mar. Embora esteja situado na zona tropical, podemos encontrar geleiras em seu território associadas à Cordilheira dos Andes.

As montanhas bolivianas são separadas pelo altiplano em: (i) Cordilheira Ocidental, na fronteira com o Chile, e (ii) Cordilheira Oriental, em direção à Amazônia. Parte do abastecimento de água e energia da população boliviana tem origem nas águas de degelo (AMAT y LEON, 2008; RAMÍREZ, 2008).

A Cordilheira Oriental compreende uma série de montanhas com áreas cobertas de gelo associadas ao relevo escarpado dos Andes bolivianos e que se

estende longitudinalmente entre 14° 37' S -69° 14'W e 17° 04'S - 67° 13' W. A figura 1.2 apresenta a localização dessas montanhas, no oeste boliviano. A existência de geleiras em tal latitude é determinada pelas altitudes elevadas da Cordilheira dos Andes que propiciaram a deposição de neve e sua metamorfose dando origem a geleiras de vale e de anfiteatro associadas à geomorfologia local.

Essas geleiras apresentam aspectos dinâmicos distintos das geleiras polares, pois sofrem ablação continuamente ao longo do ano (JORDAN, 1999; RAMÍREZ *et al.*, 2001; VUILLE, 2008).

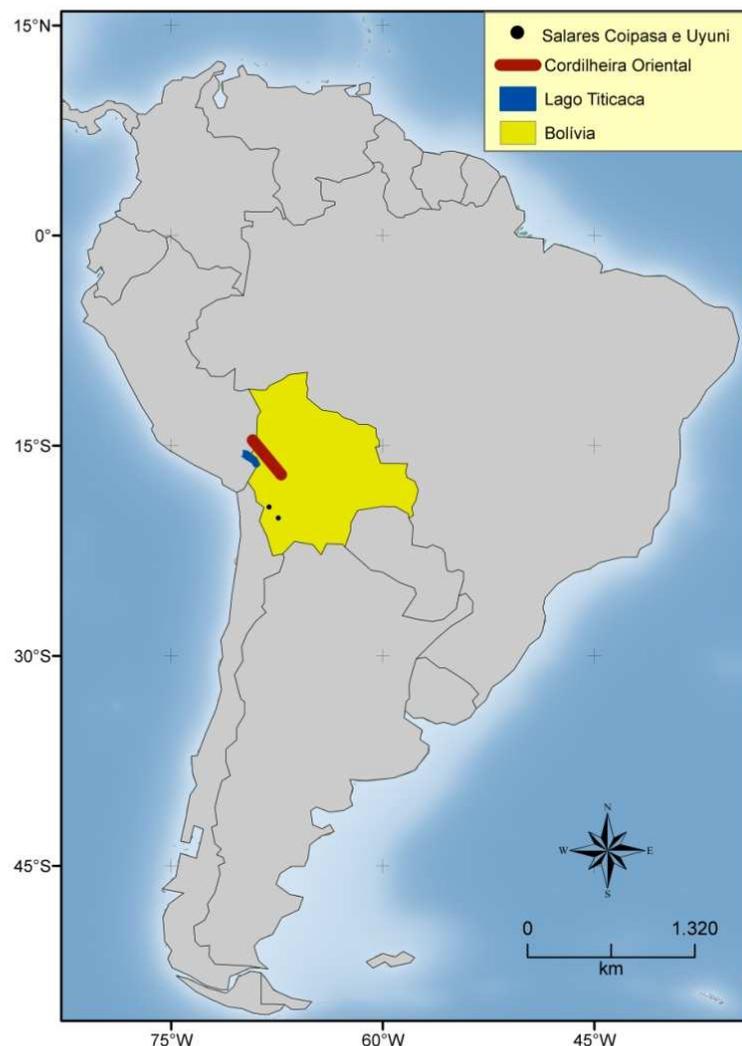


Figura 1.2. Localização da Cordilheira Oriental na América do Sul.

A precipitação na Bolívia é fortemente determinada por aspectos sazonais e o período de maior deposição se dá durante o verão austral. Acredita-se que geleiras

de montanha podem fornecer informações sobre climas pretéritos auxiliando no melhor entendimento de fenômenos não sazonais como o El Niño e das mudanças climáticas atribuídas às ações antrópicas (SHLÄPPI *et al.*, 2010; EICHLER *et al.*, 2010).

2.AS GELEIRAS BOLIVIANAS NO CONTEXTO DA CRIOSFERA

2.1. A criosfera e os geosistemas

Embora a maior parte da água na Terra esteja na forma líquida, não se pode desconsiderar a parcela que está no estado sólido. Conforme Bloom (1971), a água nesse estado representa cerca de 10% da superfície emersa do globo. As características físico-químicas da água sólida são imensamente distintas das da água líquida e submetem a superfície onde se encontram a intensos retrabalhamentos. A existência de geleiras é resultado de diversos fatores que variam no espaço e no tempo, e podem ser alvo de estudos em diversas escalas, desde a reconstrução de paleoclimas até a oferta de água a populações adjacentes a áreas glaciadas.

À água em estado sólido existente na superfície do planeta chamamos Criosfera, palavra derivada do grego *kryo*, que significa frio (UNEP e WGMS, 2008). A Criosfera é parte do ciclo hidrológico e tem papel determinante nas trocas de matéria e energia do sistema climático global (Figura 2.1). Podemos afirmar que a Criosfera contém informações sobre a história do planeta e é fundamental à manutenção da vida como conhecemos hoje.

Não por acaso, uma rica diversidade ecológica é associada às águas provenientes das regiões polares. Das profundezas do oceano Austral e do Ártico partem águas ricas em sais minerais necessários ao fitoplâncton e outros organismos. Sabe-se que a maior salinidade dessas águas está relacionada ao processo de congelamento superficial das águas desses oceanos. Durante a formação da banquisa, um componente fundamental da Criosfera, os sais contidos na água são perdidos no processo de solidificação, indo enriquecer as águas profundas desses oceanos, que movimentam as correntes oceânicas num complexo sistema que conecta oceano e atmosfera.

Além disso, e não menos importante, a Criosfera cumpre papel importante como agente modelador da superfície terrestre, visíveis mesmo em áreas não glaciadas atualmente, onde pode-se perceber os resultados da atuação do gelo, como nos vales em U, nas morainas e em erráticos glaciais (ROCHA-CAMPOS e SANTOS, 2003).

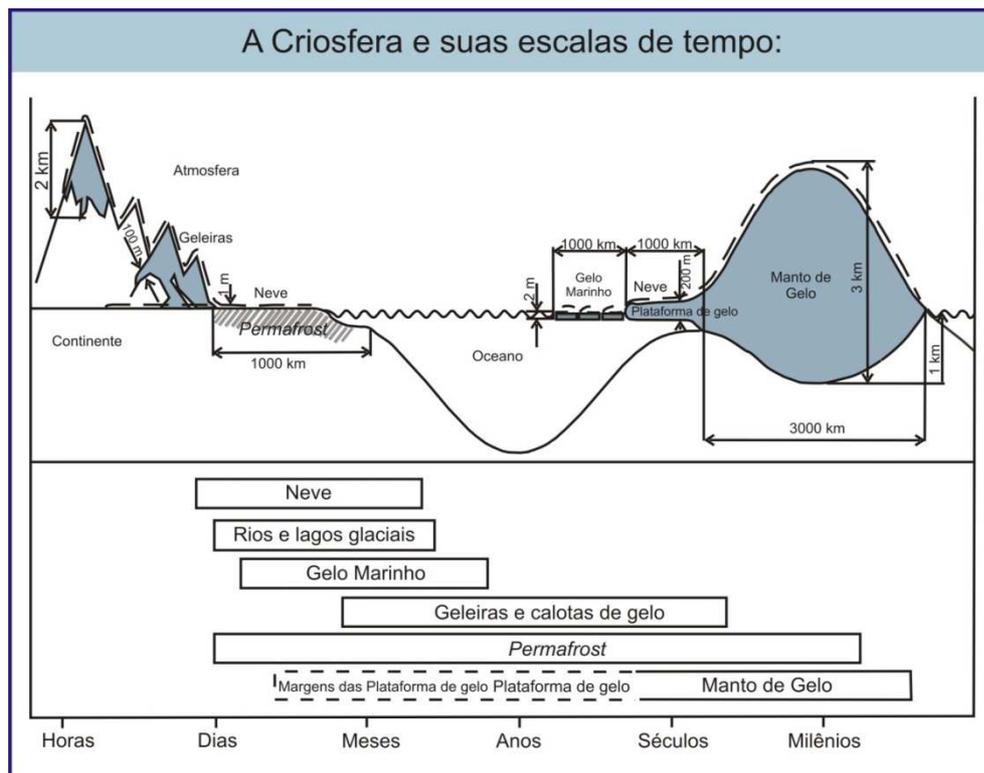


Figura 2.1. Componentes da Criosfera e suas escalas de tempo. Adaptado de IPCC, 2007 *apud* UNEP/WGS, 2008.

As geleiras associadas à Cordilheira Oriental têm características particulares, decorrentes da situação geográfica a que estão submetidas. Sendo assim, para este estudo, faz-se necessário desenvolver aspectos relevantes à Glaciologia, ciência que busca entender a Criosfera, e que serão desenvolvidos neste capítulo.

2.2. Origem e dinâmica das geleiras

Geleiras são corpos de gelo inteiramente ou largamente acomodados sobre a superfície terrestre, formados principalmente pela compactação e recristalização de neve (WALLEN, 1992). O desenvolvimento de geleiras depende da combinação de variáveis climatológicas, topográficas e geográficas (WHITE *et al.*, 1992a), como pode ser observado na figura 2.2.

Conforme o Glossário da Língua Portuguesa de Neve e Gelo, geleira é “uma massa de neve e gelo que se move continuamente por fluência, e muitas vezes por

deslizamento basal, de um ponto mais alto para um ponto mais baixo” (SIMÕES, 2004). Já BLOOM (1971) entende que “geleiras são massas de gelo impuro em movimento, ligadas ao terreno, e que se formam pelo saldo positivo da queda de neve e do congelamento da água da chuva”. Devem ser entendidas como corpos dinâmicos, a despeito da aparente imobilidade, dirigidos pela gravidade e pela resistência do material (fricção) onde estão acomodadas (WALLEN, 1992).

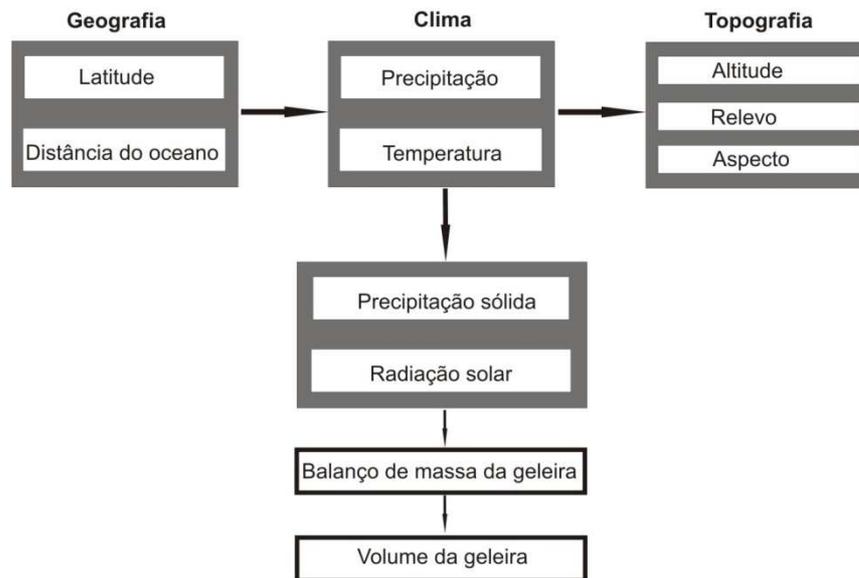


Figura 2.2. Fatores que controlam o desenvolvimento das geleiras.
[Adaptado de WHITE *et al.*, 1992].

Geleiras são importantes agentes geomorfológicos por terem capacidade de erodir as rochas adjacentes incorporando materiais que são carreados e depositados ao longo do seu percurso resultando em paisagens diversas.

A vida de uma geleira é determinada pela relação entre deposição de neve, sua conservação após um verão de permanência e a perda de massa (ablação). À diferença entre deposição e ablação dá-se o nome de balanço de massa. Podemos dividir uma geleira em zona de acumulação e zona de ablação, separada por uma linha de equilíbrio, pois neste ponto não há nem aumento nem perda de massa (Figura 2.3). O deslocamento da linha de equilíbrio em direção a cotas mais altas do terreno está associada a um balanço de massa negativo das geleiras e sua consequente retração.

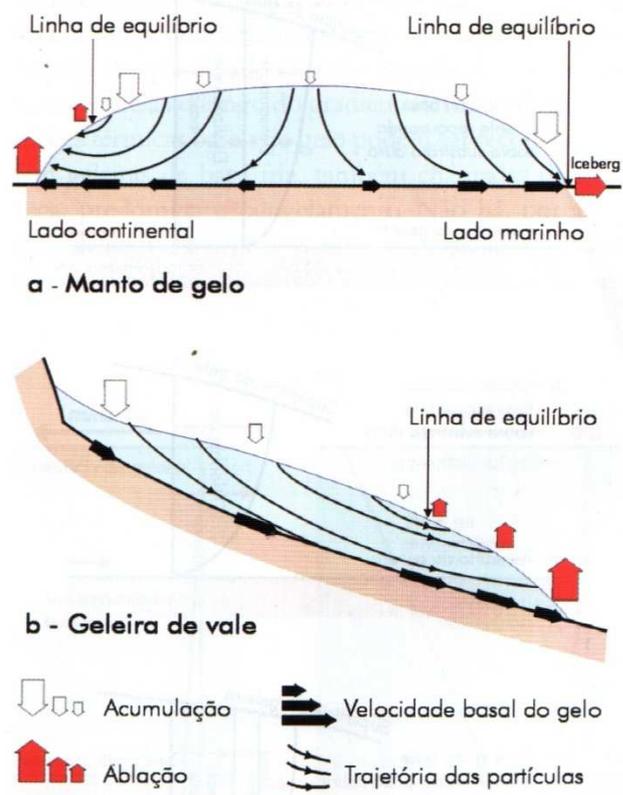


Figura 2.3. Elementos do balanço de massa de um manto de gelo (a) e uma geleira de vale (b), segundo SUDGEN e JOHN (1976) apud ROCHA-CAMPOS e SANTOS (2003).

A neve, ao se depositar, aprisiona bolhas de ar e vai compactando a neve antiga, exercendo pressão sobre a camada inferior, desta forma os cristais vão sendo metamorfizados perdendo o padrão hexagonal (Figura 2.4). Este cristal de neve alterado tende a se agregar a outros formando uma neve granular a qual chamamos *firm*. Essa é a neve que permaneceu após um período de ablação e sobre a qual um novo pacote de neve se depositará. A crescente pressão exercida pela massa acrescida dá continuidade ao processo de metamorfização compactando ainda mais o *firm* e expulsando o ar aprisionado, originando o gelo propriamente dito, e obrigando a geleira formada a fluir, por gravidade, em direção a cotas mais baixas do terreno. No entanto, esse não é um processo linear. Parte da neve pode derreter, escoando capilarmente entre o gelo e novamente recongelando. Outros materiais (*i.e.*, rochas) vão sendo incorporados à geleira e, ainda, seu fluxo pode ser acelerado pelo derretimento basal decorrente do atrito rocha-geleira e/ou

calor geotérmico, que geram uma película de água sobre a qual a geleira deslizará mais rapidamente.

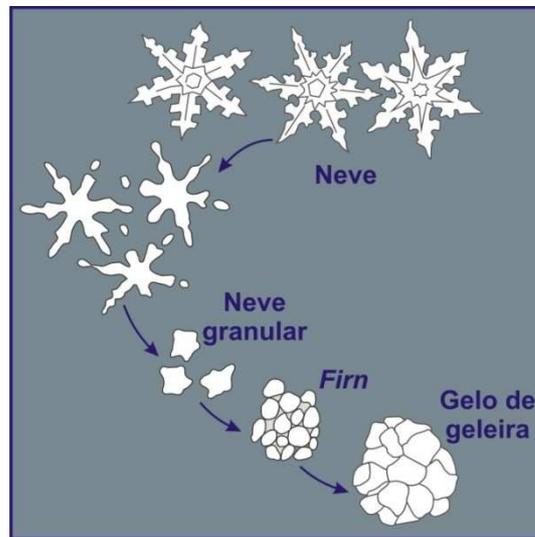


Figura 2.4. Etapas da metamorfização da neve em gelo de geleira [Adaptado de WALLEN, 1992].

2.3. Classificação das geleiras

As geleiras podem ser classificadas quanto à topografia e, levando em conta a sua extensão, são agrupadas em: (i) geleiras não confinadas pela topografia, que são os mantos de gelo (> 50000 km²) e as calotas de gelo (< 50000 km²) e (ii) geleiras confinadas pela topografia, incluindo campos de gelo (10-10000 km²), geleiras de vale (5-5000 km²) e geleiras de anfiteatro (0,5 – 10 km²). Cabe destacar que só existem dois mantos de gelo na atualidade: o manto da Antártica e o da Groenlândia (ROCHA-CAMPOS e SANTOS, 2003).

Outra classificação possível se refere ao regime térmico das geleiras, ou seja, se refere ao comportamento térmico do gelo de geleira. O gelo é mau condutor de calor e, por isso, as camadas de gelo tendem a conservar a temperatura da atmosfera quando da acumulação de neve (BLOOM, 1971). Geralmente são apontados dois tipos de geleiras: (i) geleira polar ou “fria”, cujas temperaturas estão abaixo do ponto de fusão e constituída por gelo sólido e (ii) geleira temperada ou

“morna”, cuja temperatura está muito próxima ou no ponto de fusão sob pressão. Nessa categoria se enquadram as geleiras da cordilheira Oriental.

2.4. A ocorrência de geleiras e calotas de gelo no mundo

A distribuição das geleiras e das calotas de gelo existentes na atualidade está condicionada a uma série de fatores que atuam de maneira articulada. Sugden e John (1984) e White *et al.* (1992) concordam que esses fatores são a precipitação, a temperatura, a latitude, a altitude, a distância ao oceano mais próximo, a orientação e o aspectos da vertente, já esquematizados na Figura 2.2. O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA – ou, mais usualmente conhecido como UNEP, sigla em inglês) agrupa as geleiras do planeta em 11 regiões distintas, para fins de estudo, como apresentado na figura 2.5.

Esses fatores variam em distintas escalas espaciais e temporais, favorecendo ou não a expansão das áreas cobertas de gelo. Sabe-se que essas áreas já foram mais extensas no passado e chegaram a cobrir cerca de 30% da terra emersa em episódios glaciais ocorridos nos últimos 2 milhões de anos (Bloom,1971). Alterações climáticas levarão a mudanças nas áreas cobertas por gelo, reconfigurando o ciclo hidrológico e a organização da vida no planeta.



Figura 2.5. Distribuição mundial das massas de gelo agrupadas em 11 macroregiões. [Fonte: UNEP/WGS, 2008].

Pode-se ainda associar as geleiras à sua distribuição latitudinal em geleiras polares, temperadas e tropicais. As geleiras da Cordilheira Oriental encontram-se inteiramente em faixa tropical, sendo a exposição à radiação solar um fator muito importante para as dinâmicas que aí ocorrem. São favorecidas pelas elevadas altitudes da Cordilheira dos Andes e seu relevo fortemente escarpado.

2.5. Monitoramento global de áreas cobertas por gelo

A elevação da temperatura média da atmosfera pode incrementar a ablação diminuindo e até extinguindo geleiras cujas águas, provenientes do derretimento, afetam as regiões próximas e contribuem para a elevação do nível médio dos mares. A crescente preocupação com as mudanças climáticas tem levado diversas organizações internacionais a elaborarem planos e metas para prognosticar, prevenir e construir medidas paliativas a fenômenos ambientais e populacionais decorrentes.

O mapeamento global das áreas cobertas por gelo foi proposto pela primeira vez em 1894, durante o Sexto Congresso Geológico Internacional na cidade de Zurique, com a fundação da *Comission Internationale des Glaciers*. Este foi o primeiro esforço coordenado para se conhecer e monitorar geleiras globalmente (UNEP; WGMS, 2009).

Com a finalidade de propiciar aos países avaliar e utilizar racionalmente seus recursos hídricos a *United Nations Educational Scientific and Cultural Organization* (UNESCO) propôs a Década Hidrológica Internacional (IHD), que se estendeu de 1965 até 1974 (UNESCO; IASH, 1970). O aumento das populações e o desenvolvimento industrial e da agricultura (Revolução Verde) passaram a demandar água em proporções jamais vistas anteriormente, bem como novas técnicas e conhecimentos que minimizassem a vulnerabilidade, a degradação e a escassez.

Sendo a Criosfera parte importante do Ciclo Hidrológico, o inventário e o monitoramento de geleiras passaram a ser dois pontos importantes da IHD. Na década de 1970, a UNESCO incentivou a identificação e a catalogação de geleiras por todo o mundo considerando a atualidade do conhecimento das técnicas

disponíveis até então e destacando a importância do estudo das geleiras como importante para melhor compreensão dos recursos hídricos.

A catalogação das geleiras do mundo, hoje, é realizada pelo *World Glacier Monitoring Service* (WGMS), em colaboração com a iniciativa *Global Land Ice Measurements from Space* (GLIMS), cuja base de dados está no *US National Snow and Ice Data Center* (NSIDC), Boulder, Colorado, Estados Unidos. O WGMS é um serviço da *International Association of the Cryospheric Sciences* (IACS) pertencente à *International Union of Geodesy and Geophysics* (IUGG) e à *Federation of Astronomical and Geophysical Data Analysis Services* do *International Council for Science* (ICSU) (UNEP e WGMS, 2008).

As inovações técnicas, a maior facilidade de acesso a dados obtidos por sensores remotos e a crescente preocupação com as consequências das mudanças climáticas tem facilitado o estudo das geleiras. Em 2008, durante a Oficina sobre Inventário Mundial de Geleiras, realizada na cidade chinesa de Lanzhou, surgiu como demanda a elaboração de parâmetros atualizados para elaboração de tais inventários, levando em conta o desenvolvimento das tecnologias de Sistemas de Informação Geográfica e de Sensoriamento Remoto.

“The importance of such compilations is growing in response to the need for regional to global assessments of climate-change impacts, today involving new approaches and advanced technologies.” (PAUL et al., 2009, p 119.)

Para tais inventários entende-se geleira como termo amplo, incluindo geleiras de vale, de montanha, de anfiteatro, etc. A iniciativa *GLIMS* aponta alguns parâmetros básicos para que um inventário seja aceito em seu acervo, tais como código de identificação, coordenadas, data de aquisição, área superficial, extensão, elevação mínima, elevação máxima, elevação média, declividade média, orientação principal da vertente e aspecto (PAUL et al., 2009). Parâmetros adicionais podem ser inseridos, desde que disponíveis, tornando a compilação mais detalhada. Para a obtenção de tais parâmetros é necessário que os contornos das geleiras, em formato digital, e os modelos de elevação do terreno estejam disponíveis.

Não é objetivo deste estudo adequar-se a todos esses parâmetros, visto que há limitações inerentes a trabalhos de conclusão de cursos de graduação, cujas

finalidades não têm a envergadura exigida para a contribuição em tais inventários. No entanto, pode-se, a partir de tal, delinear estratégias para que sejam elaborados planos completos de compilação e atualização de dados para as geleiras da Cordilheira Oriental.

3. ORIGEM E DINÂMICA DO CLIMA NA CORDILHEIRA ORIENTAL

3.1. Geleiras Tropicais

Geleiras são freqüentemente associadas a regiões circumpolares e polares. No entanto, a precipitação de água sólida, sua deposição e permanência também ocorrem em regiões intertropicais. Correspondem às regiões da Terra onde o sol alcança a posição zenital entre os Trópicos de Capricórnio ao sul e de Câncer ao norte (paralelos 23,5° S e N).

Do ponto de vista térmico, os trópicos compreendem a parte da Terra cuja diferença entre a entrada e a saída de calor é positiva (RUDDLÖF, 1981), por isso a região tropical é dominada por altas temperaturas e elevada evaporação. Climas quentes e úmidos sustentam uma grande produtividade primária, alimentando assim a cadeia produtiva que apresenta uma grande diversidade de espécies, cuja estabilidade dinâmica ao longo do tempo geológico proporcionou uma constante evolução das mesmas.

Paisagens glaciais em baixas latitudes são encontradas no sudeste asiático, no leste africano e na América do Sul (Figura 3.1). Segundo a UNEP/WGS (2008) são as geleiras tropicais as mais sensíveis às alterações de temperatura da troposfera e a elevação do nível médio dos mares está associada à retração destas geleiras. As águas que se encontram nas reservas congeladas dos topos das cordilheiras não são influenciadas pelo efeito do empuxo, como são as geleiras marinhas. Essas, ao derreter, disponibilizam apenas 10% de sua massa. Já as geleiras de montanha ao passarem do estado sólido ao líquido impactam diretamente na elevação do mar contribuindo com 100% de sua massa.

Na América do Sul, a precipitação de neve é limitada às regiões altas dos Andes e ao extremo sul da Argentina e Chile (CERVENY, 1998). Ainda que a radiação solar seja intensa durante o ano todo, outros fatores concorrem para que geleiras sejam geradas e preservadas nas baixas latitudes. Assim como em outras regiões montanhosas do globo, o clima nos Andes é influenciado principalmente pela elevação e pela exposição solar.

Distribuição das geleiras nos trópicos

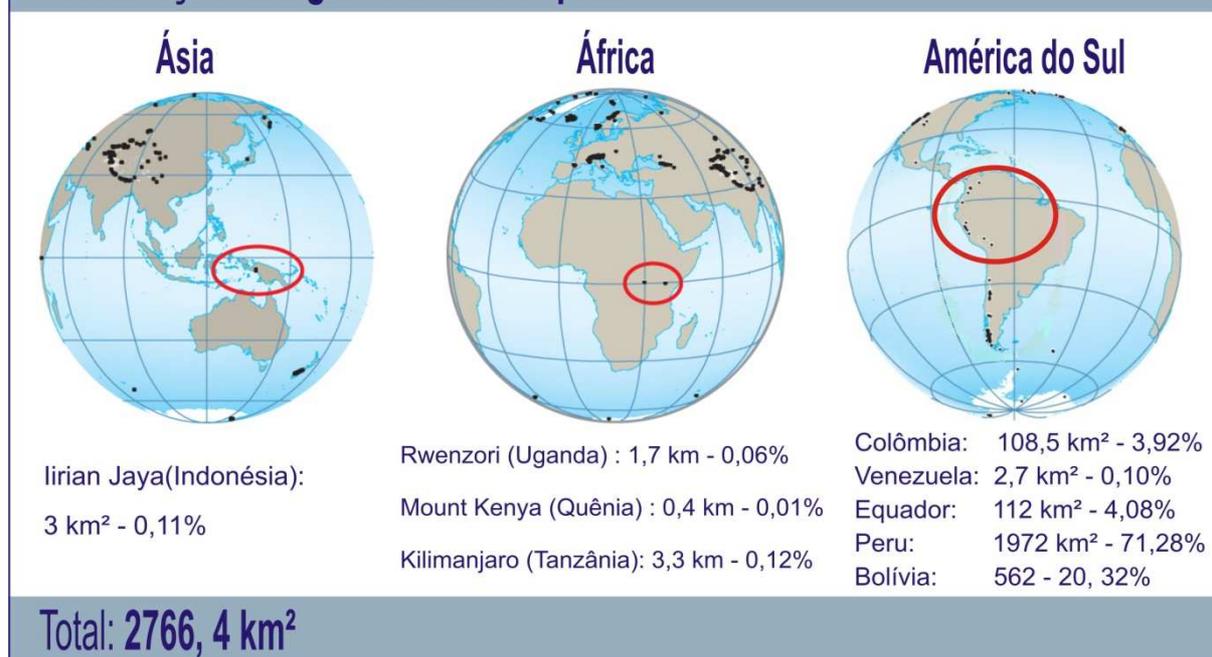


Figura 3.1. Distribuição das geleiras tropicais.

[Adaptado de UNEP/WGS, 2008 e Kaser, 1999 apud RIBEIRO, 2007].

3.2. O clima da Bolívia andina

O clima dos Andes é típico de montanha, com larga amplitude térmica diária, grande frequência de noites claras (com ausência de nuvens), nebulosidade ao amanhecer, tardes com rápido desenvolvimento de nuvens e ventos fortes sobre as montanhas, e queda da temperatura após o crepúsculo (McGregor *et al.*, 1998).

Segundo McGregor *et al.* (1998) em áreas de altas montanhas o clima é influenciado principalmente pela altitude e pela exposição, onde paisagens locais resultam em variações de pequena escala.

As altas altitudes são responsáveis pelas temperaturas amenas do altiplano e das montanhas da Bolívia. *El Alto*, por exemplo, apresenta temperatura média anual de apenas 9°C enquanto que *Concepción* apresenta uma média anual de 24°C. A situação latitudinal de ambas é semelhante, mas a diferença altitudinal fica em torno de 3000 m. Esta diferença térmica se dá porque a troposfera se aquece dos níveis mais baixos (*i.e.*, próximos da superfície terrestre) para os mais altos a partir da energia irradiada pelo solo (Figura 3.2 a).

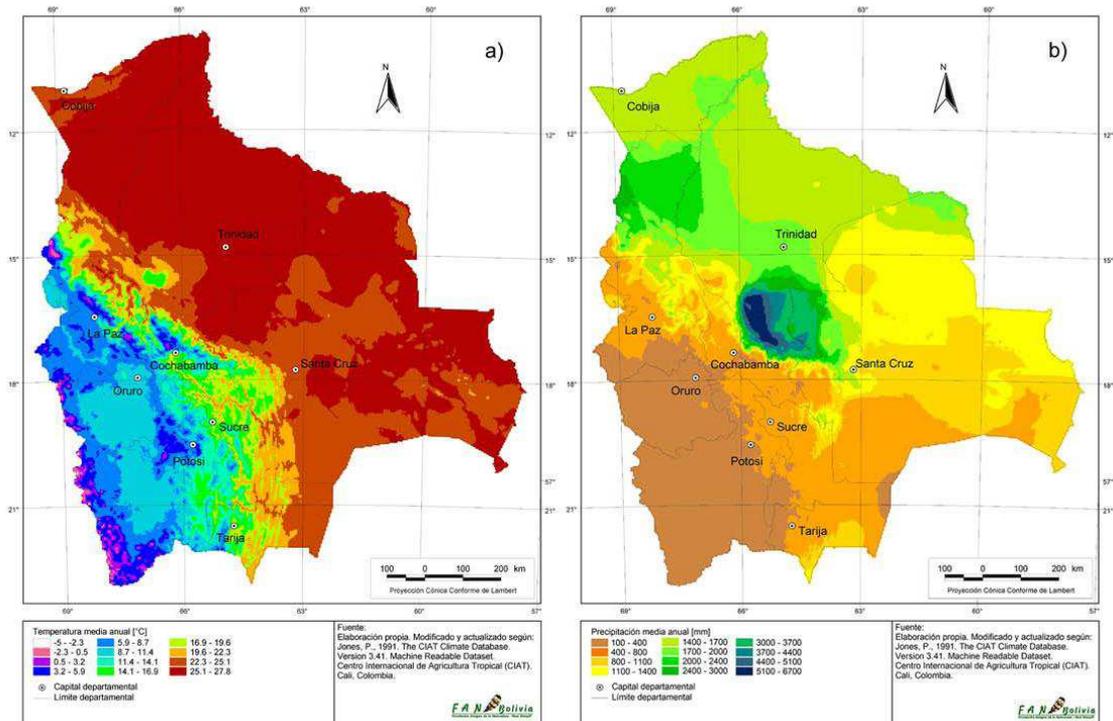


Figura 3.2. Padrão da temperatura média anual (A) e padrão da precipitação anual (B).[Fonte: FAN, 2009].

Além de afetar as temperaturas, a elevação influi na precipitação. Na maior parte dos Andes os índices pluviométricos crescem até elevações entre 1200-1500m e diminuem lentamente em direção a cotas mais altas (McGREGOR *et al.*, 1998). O altiplano andino freqüentemente recebe menos chuva que as montanhas ao seu redor por conta do efeito orográfico das mesmas, também chamado sombra de chuva (Figura 3.3). As nuvens perdem umidade através de processos adiabáticos (sem troca de energia) ao se elevarem. Dessa forma o ar que desce a vertente a sotavento é caracterizado pelo déficit de água (ventos *Fohen*).

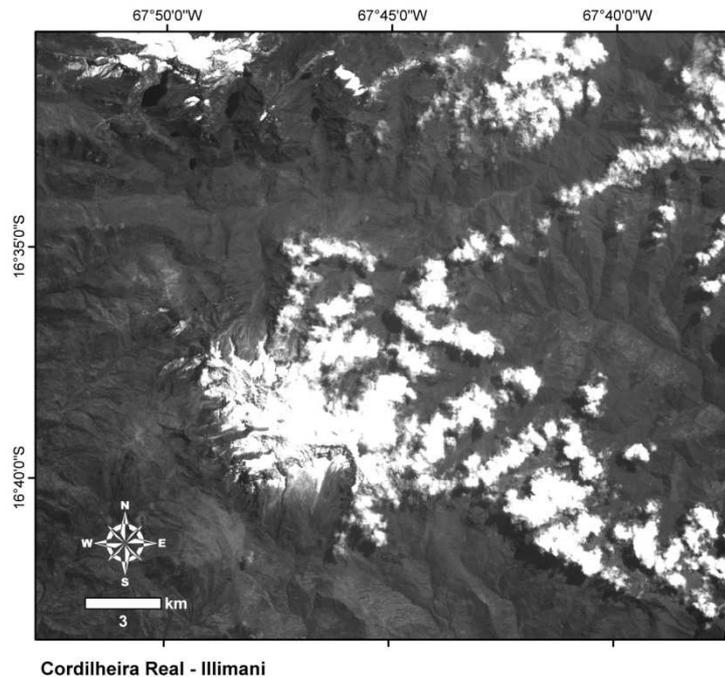


Figura 3.3. O nevado Illimani é um exemplo de barreira orográfica capaz de criar áreas de sombra de chuva.

Também a variação diurna das chuvas está relacionada com a elevação (Figura 3.2 b). Em níveis altos, onde a convecção é a causa principal das precipitações, os máximos de chuva se dão durante a tarde, mas nos vales as chuvas tendem a atingir seus máximos à noite quando os ventos de montanhas (de oeste e de leste) convergem (McGREGOR *et al.*, 1998).

A exposição da vertente é responsável pelas diferenças existentes numa mesma montanha. A orientação determina a quantidade de radiação solar incidente, que influencia na temperatura do ar, e a face que receberá maiores índices pluviométricos.

Na Cordilheira Oriental as altitudes da linha de equilíbrio das faces a leste tendem a ser mais baixas que as demais faces, por receberem maior quantidade de neve. Isso se dá por que é deste sentido que provém os ventos que trazem umidade para a região. Próximo ao Equador as altitudes da linha de neve estão por volta dos 4500 m de altitude (McGREGOR *et al.*, 1998).

Em relação à iluminação solar, as vertentes voltadas mais a sul favorecem a preservação da neve precipitada. A face abrigada do Sol apresenta gradiente de temperatura menor, favorecendo a preservação da umidade.

3.2.1. As geleiras na Bolívia

Na Bolívia, podemos encontrar geleiras em duas dorsais de montanhas: a Cordilheira Ocidental, na fronteira com o Chile, e na Cordilheira Oriental - Cordilheiras Apolobamba, Real, TresCruces e nevado Santa Cruz a leste (VUILLE *et al.* 2008), detalhadas na Tabela 3.1. As extensões máximas das geleiras da Cordilheira Oriental estão associadas à Pequena Idade do Gelo¹. Estudos no centro dos Andes apontam uma aceleração da recessão das geleiras existentes neste setor (Ramírez *et al.*, 2001).

Segundo Ramírez *et al.* (2001) a geleira Chacaltaya (16°S) desapareceria a té 2015. No entanto o colapso da única estação de esqui da Bolívia foi relatado já em 2009 (PAINTER, 2009). A figura 3.4 mostra o que restava da geleira Chacaltaya, em fevereiro de 1999. Observe o aspecto típico de geleiras da cordilheira Oriental, com acumulação predominante numa das vertentes da montanha.



Figura 3.4. Geleira Chacaltaya (lado direito), em 1999. Antiga área de prática de esqui, hoje desativada.[Foto: U.F.Bremer, fev/1999]

¹ Pequena Idade do Gelo ou Pequena Idade Glacial (*Little Ice Age*): “Um intervalo de tempo, aproximadamente entre os séculos XV e XIX, caracterizado pelo esfriamento climático e avanço das geleiras de montanhas em grande parte do mundo.” (SIMÕES, 2004).

Tabela 3.1. Geleiras da Cordilheira Oriental. Dados obtidos referentes a 1975. (Jordan, 1999)

grupo de montanhas	Latitude S	Longitude W	Área (km ²)	Geleiras			maior elevação (m)	Menor elevação (m) Término da Geleira
				Percentual	Número	Percentual		
CORDILHEIRA ORIENTAL	14°37'-17°04'	67°13'-69°14'	591.600 (35.590 no Peru)	100	1826	100	6.436	4.311
<i>Cordilheira Apolobamba</i>	14°37'-15°04'	68°58'-69°14'	220	37,2	652	36	6.059	4.311
ChaupiOrko	14°40'	69°10'	129.357	21,9	346	19	6.059	4.365
Cololo	14°50'	69°06'	43.072	7,3	135	7,5	5.774	4.311
UllaKhaya	15°00'	69°03'	47.375	8	171	9,5	5.669	4.39 0
<i>Cordilheira de Muñecas</i>	15°20'-15°38'	68°33'-68°55'	0.684	0,1	16	1	5.237	4.828
Morocollu	15°20'	68°55'	0.148	0,03	8	0,5	5.156	4.82 8
Chuchu	15°38'	68°33'	0.536	0,1	8	0,5	5.237	4.886
<i>Cordilheira Real</i>	15°45'-16°40'	67°40'-68°34'	323.603	54,7	964	53	6.436	4.420
<i>Cordilheira Real Norte</i>	15°45'-16°20'	68°01'-68°34'	262.766	44,4	784	43	6.436	4.420
Illampu-Ancohuma	15°50'	68°30'	103.099	17,4	147	8	6.436	4.438
Calzada-Chearoco-Chachacomani	16°00'	68°20'	94.072	15,9	251	14	6.127	4.676
Nigruni-Condoriri	16°08'	68°15'	40.868	6,9	241	13	5.752	4.420
Saltuni-HuaynaPotosí	16°15'	68°08'	14.504	2,5	50	3	6.088	4.804
Zongo-Cumbre-Chacaltaya	16°18'	68°05'	10.223	1,7	95	5	5.519	4.578
<i>Cordilheira Real Sul</i>	16°20'-16°40'	67°40'-67°58'	60.837	10,3	180	10	6.414	4.499
Hamapaturi-Taquesi	16°26'	67°52'	11.685	2	70	4	5.54 8	4.723
Mururata	16°30'	67°47'	17.207	2,9	75	4	5.836	4.592
Illimani	16°38'	67°44'	31.945	5,4	35	2	6.414	4.499
<i>Cordilheira TresCruces (Qimsa Cruz)</i>	16°47'-16°09'	67°22'-67°32'	45.276	7,7	177	9,5	5.760	4.708
Choquetanga	16°54'	67°22'	6.992	1,2	21	1	5.541	4.81 2
região alta de TresCruces	16°56'	67°24'	38.284	6,5	156	8,5	5.760	4.708

A Cordilheira Oriental, com elevações de até 6436 m acima do nível do mar, teve suas geleiras inventariadas em 1975, totalizando uma área de 591600 km², sendo 35590 km² no Peru, grande parte com dimensões inferiores a 0,1 km², segundo Jordan (1999).

Estas geleiras estão assentadas longitudinalmente, no sentido noroeste-sudeste, sobre a Cordilheira dos Andes por mais de 300 km. Embora as altitudes superem frequentemente os 6000 m, a pouca precipitação, que decresce a 200 mm a⁻¹ no sudoeste, limita latitudinalmente a existência de geleiras. A orografia exerce forte influência sobre a precipitação na região – o limite sul de ocorrência de geleiras coincide com as bordas dos salares do altiplano andino (JORDAN, 1999).

Geleiras tropicais estão sujeitas a variabilidades diurnas e sazonais que determinam seu balanço de massa. Nesse sentido dois fatores colaboram distintamente para a permanência da neve depositada. Primeiro, a área da própria geleira colabora com a sua preservação, já que a neve e o gelo refletem cerca de 75 a 95% da radiação solar incidente (PATCHINEELAM, 2004). Segundo, a neve recém depositada e a ocorrência frequente de nebulosidade, principalmente no verão austral, protegem a geleira.

3.3. A circulação atmosférica e as chuvas na Bolívia

A América do Sul sofre grande influência dos fenômenos oceânico-atmosféricos do Pacífico e do Atlântico. A presença dos Andes na América do Sul rompe os fluxos de ar sobre o continente produzindo dois anticiclones semipermanentes (CERVENY, 1998). Estes anticiclones somados à migração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a fatores locais resultam no padrão de precipitações sobre os Andes.

No entanto, esses padrões são perturbados por anomalias cíclicas não sazonais, onde o fenômeno ENSO – *El Niño South Oscillation* é o mais impactante na climatologia da América do Sul.

3.3.1. ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é a região onde os sistemas de ventos alísios do hemisfério sul e do hemisfério norte convergem. À ZCIT é associada a presença constante de nuvens e a alta precipitação, influenciadas pela alta temperatura da água do mar e a grande umidade na atmosfera.

A circulação atmosférica resulta da diferença de pressão que provoca o movimento das massas de ar e, junto com a circulação oceânica, representa a busca por equilíbrio térmico da Terra. Os ventos alíseos são causados pelas altas pressões atmosféricas entre a zona subtropical e a zona equatorial geradas na parte descendente da célula de Hadley. As células de Hadley dominam a atmosfera nas baixas latitudes, desde o Equador até cerca de 30°, em ambos os hemisférios (PATCHINEELAM, 2004).

A situação latitudinal dos Andes bolivianos faz com que a oscilação norte e sul da ZCIT seja um fator determinante na quantidade e distribuição das precipitações ao longo do ano hidrológico. A precipitação sobre o Altiplano resulta de uma circulação complexa correlacionando convecção, sobre a bacia Amazônica, e a orografia dos Andes (CERVENY, 1998). Convecção é o termo chave para qualquer discussão sobre a bacia Amazônica, esta área é identificada como uma de três semipermanentes centros de intensa convecção no verão austral, os outros se dão sobre a África central e a Indonésia (HASTENRATH, 1991 apud CERVENY, 1998).

O essencial do vapor precipitável se origina no Oceano Atlântico, que é amplamente reciclado por evapotranspiração na Amazônia e transportado pelos ventos alísios de leste/noroeste. Estes ventos se desviam ao longo dos Andes seguindo direção sudeste da cadeia montanhosa. Ao mesmo tempo se observa ao sul da Amazônia e sobre o Altiplano a formação de um centro de alta pressão (Alta da Bolívia) na troposfera superior desenvolvendo um fluxo térmico intenso sobre o interior do continente (ACEITUNO, 1988 apud CERVENY, 1998; SCHWERDTFEGER, 1976 apud CERVENY, 1998; CARPIO, *et al.*, 2004). O anticiclone na alta troposfera aparece inicialmente sobre a bacia Amazônica (mês de setembro), migrando para o Altiplano, onde alcança grande intensidade durante a estação chuvosa, e move-se para norte (mês de maio) (HASTENRATH, 1991 apud CERVENY, 1998). Durante o inverno esse anticiclone desaparece e a ZCIT se

move para o norte, o que coincide com uma menor disponibilidade de água na atmosfera (CARPIO *et al.*, 2004) .

Esse padrão está fortemente conectado aos processos de fluxo de calor e de umidade da bacia do rio Amazonas (Figura 3.5), e que acabam por determinar a quantidade e a sazonalidade das precipitações da Cordilheira Oriental. A precipitação decresce fortemente quanto maior for a distância da fonte de umidade amazônica.

Na região dos rios Beni e Ichilo-Mamoré (nascentes na Cordilheira Oriental) a maior parte das precipitações se dá no verão, entre dezembro e março, coincidindo com a inflexão da ZCIT para sul. Como consequência desse comportamento estacional e espacial, o vetor médio anual do fluxo de vapor d'água nos pés dos Andes tem sentido S-SW, ou seja, as massas de ar úmido ingressam na região pelo norte/noroeste (ZENG, 1999 *apud* CARPIO *et al.*, 2004).



Figura 3.5. Principais rios da bacia do Amazonas.²

A figura 3.6 apresenta os climogramas das localidades de El Alto, no altiplano andino, e de Concepción, na bacia do rio Itenez (também chamado Guaporé, é

² Os rios Madre de Dios, Beni e Mamoré têm sua origem na Cordilheira Oriental e são formadores do rio Madeira (em destaque).

afluente do rio Madeira). Embora se localizem em situação latitudinal parecida observa-se uma grande disparidade pluviométrica e térmica. El Alto está a sotavento da cordilheira sendo bastante influenciada pela orografia (sombra de chuva). Além disso, está a cerca de 200 km de distância da Amazônia (CARPIO, J.M.*et al.*, 2004). Esse efeito é atenuado pela migração da ZCIT durante o verão, quando se dão os índices mais significativos de precipitação.

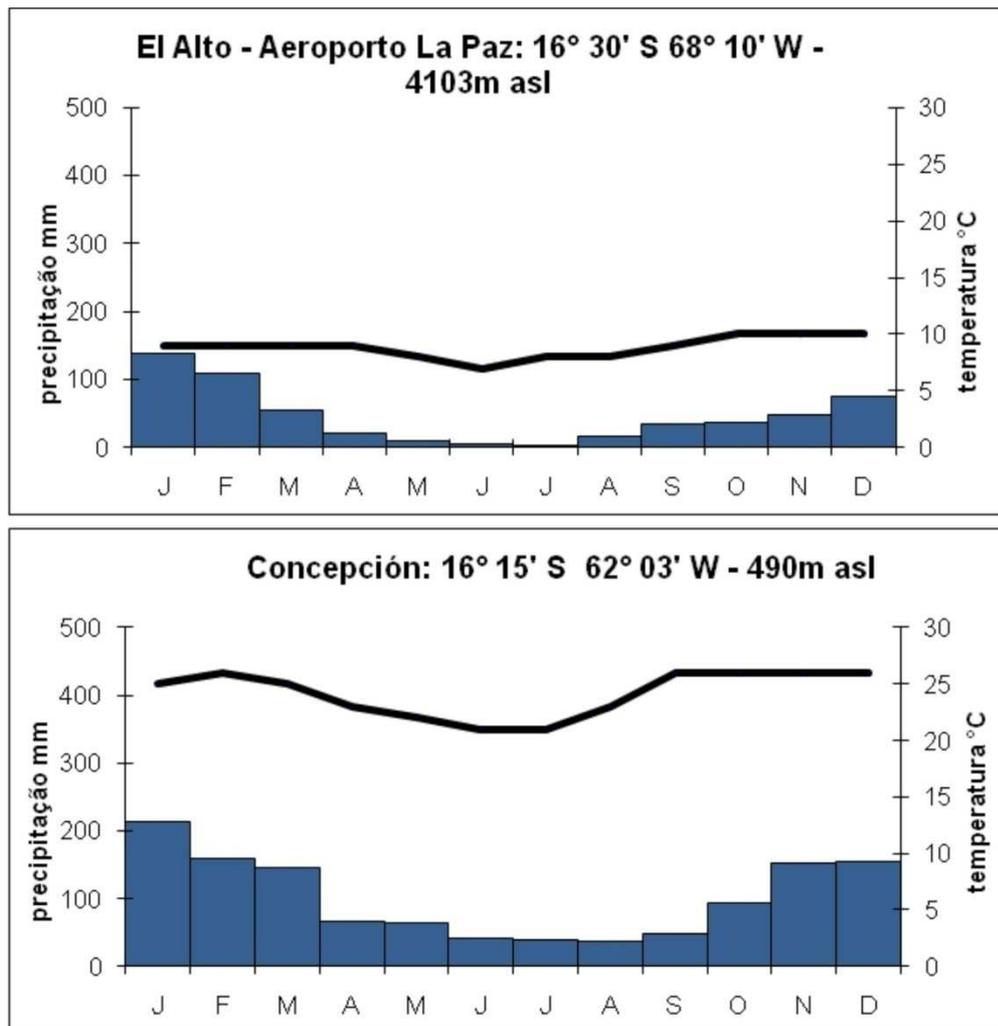


Figura 3.6. Climogramas para as localidades de El Alto e Concepción. Temperaturas e precipitações obtidas a partir de dados RUDLOFF(1981).

O núcleo de precipitação máxima se encontra aos pés da cordilheira, entre 2500 e 500 m de altitude, pois a orografia é determinante para tal registro (CARPIO *et al.*, 2004). O fluxo de vapor precipitável proveniente da Amazônia é obrigado a ascender bruscamente por causa da forte pendente da cordilheira. Há uma variação

de 4500 m em altitude numa distância horizontal de menos de 50 km, causando uma condensação em baixa altitude relativa (CARPIO, *et al.*, 2004).

3.3.2. ENSO: Impactos na América dos Sul

Pescadores peruanos chamavam El Niño à alteração oceânica que tinha início no final de dezembro de alguns anos, mas que não era sazonal. Este período coincidia com queda brusca na piscosidade do litoral peruano. O chamado El Niño – Oscilação Sul (ENSO) é o aquecimento anômalo das águas do oceano Pacífico causando o rebaixamento da termoclina no litoral do Peru e alterando o clima no mundo todo. O aquecimento se altera com períodos de intensificação da ressurgência da Corrente do Peru. Essa fase negativa da oscilação é chamada La Niña. Esses eventos se alternam a cada 3-7 anos, mas o intervalo pode mudar, variando entre 1 e 10 anos. No entanto, eventos La Niña são mais freqüentes que os eventos El Niño (QUINN *et al.*, 1987 *apud* CERVENY, 1998).

Evidências sugerem que o El Niño tem ocorrido periodicamente na região andina nos últimos 5000 anos (ROLLINS *et al.*, 1986 *apud* CERVENY, 1998; WELLS, 1990 *apud* CERVENY, 1998). Mudanças sazonais no nível de água do lago Titicaca no Altiplano foram relacionadas levemente, mas positivamente, com o Índice de Oscilação Sul (SOI) (ACEITUNO, 1988 *apud* CERVENY, 1998), indicando que o El Niño altera o ciclo hidrológico andino. Isso corresponde a pequenas acumulações de neve registradas nas amostras do testemunho de gelo coletado na calota de gelo Quelcaya no sul do Peru (14°S, 71°W, 5650 m), durante episódios de El Niño (THOMPSON *et al.*, 1985 *apud* CERVENY, 1998). As precipitações sobre o Quelcaya, em contraste com a costa peruana, têm a mesma origem das da Cordilheira Oriental: a bacia Amazônica a leste.

O clima sobre a bacia do rio Amazonas sofre influência dos eventos ENSO, e conseqüentemente o clima e o tempo na Cordilheira Oriental, conforme mostra a Figura 3.7. Cerveny (1998) relacionou períodos de baixa descarga do rio Amazonas com a fase positiva. A relação foi construída a partir de 83 anos de registros (1903 a 1985) da descarga do rio Amazonas e a associação dessa descarga à mudança no sentido leste do ramo descendente da célula de Hadley, localizada sobre o Pacífico

equatorial e a bacia amazônica durante eventos El Niño. Tais mudanças conduziriam a supressão da convecção e da precipitação.

A fase negativa do fenômeno ENSO tende a incrementar a precipitação sobre a bacia Amazônia. Estudos sugerem que durante Março e Abril, nesses anos, a calha de baixa pressão equatorial próxima e sua concomitante convecção sobre o Atlântico, tende a ser deslocada anormalmente em direção sul sobre a Amazônia, resultando em chuvas abundantes sobre a região. Essa mudança em direção sul coincide com o reforço da célula de alta pressão do Atlântico Norte e a aceleração dos alísios de norte - leste devido, em parte, a um incremento no gradiente térmico nas águas oceânicas sobre o Equador (MARENGO e HASTENRATH, 1993 *apud* CERVENY, 1998).

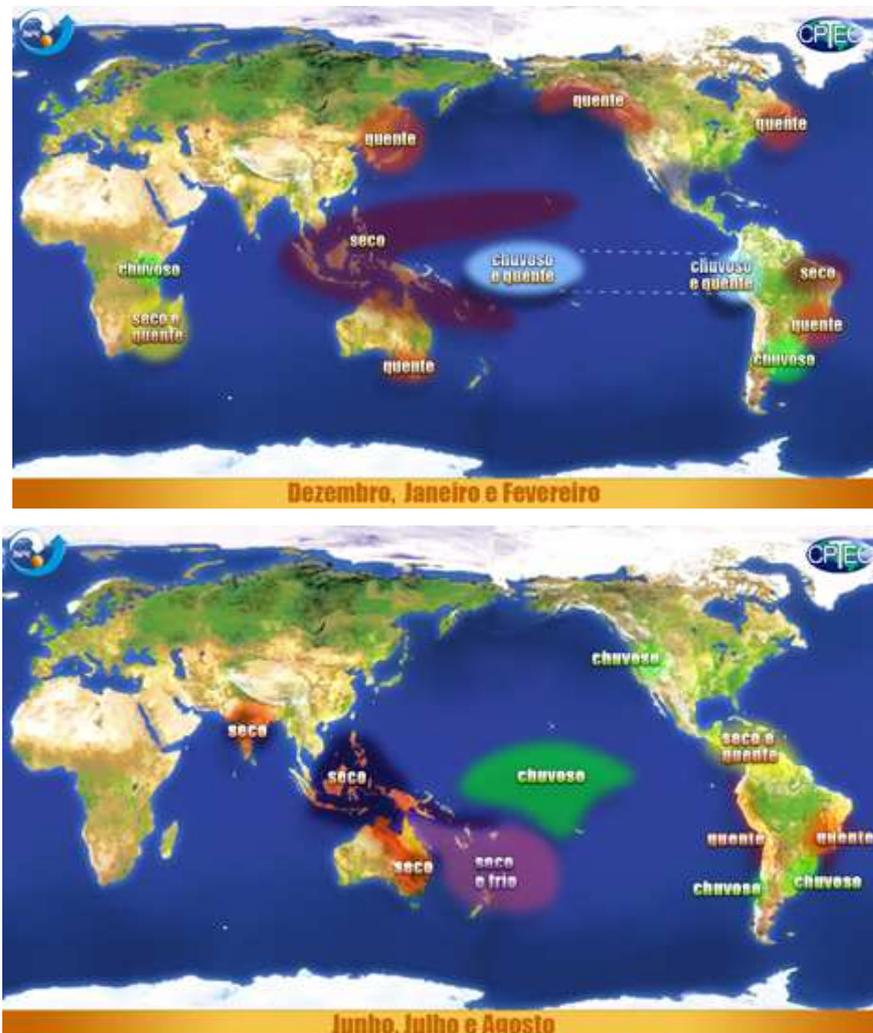


Figura 3.7. Efeitos globais do fenômeno El Niño.

Note os efeitos sobre a bacia amazônica, estes repercutem sobre a Cordilheira Oriental. [Fonte: CPTEC, 1995-2010]

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Importância do Sensoriamento Remoto

A utilização de imagens de satélite para a obtenção de dados ambientais tem contribuído para acelerar o entendimento sobre as geleiras existentes no mundo, possibilitando que informações sobre áreas remotas sejam obtidas. Neste trabalho foram utilizadas imagens obtidas pelo satélite CBERS-2B.

O Programa CBERS representa o esforço nacional em desenvolver tecnologia em Sensoriamento Remoto, cujo papel é estratégico na atual dinâmica de espaço-poder existente no planeta. A parceria com a China representa um contraponto às políticas européias, japonesas e estadunidenses que, hoje, dominam os conhecimentos em tecnologia de sensores remotos. Cabe ainda destacar que esta tecnologia vem sendo desenvolvida sem fins belicistas e que o acesso ao seu banco de dados é de domínio público. O Sensoriamento Remoto é hoje fundamental para acelerar e gerar novas políticas públicas na busca da resolução de problemas como o abastecimento de águas, a expansão das cidades, a degradação dos solos, a supressão de áreas verdes, a previsão do tempo e prognósticos de tempo e clima.

Técnicas de Sensoriamento Remoto possibilitam investigações complexas tais como a identificação morfológica e o balanço de massa de geleiras, amparadas nas respostas espectrais dos alvos disponíveis pelos sensores a bordo de satélites orbitais (WILLIAMS JR. *et al.*, 1991). Essas técnicas associadas à organização de banco de dados geoespaciais, apoiados em Sistemas de Informação Geográfica, fornecem as ferramentas necessárias ao armazenamento, organização, cruzamento de dados e geração de novas informações.

Neste capítulo, serão discutidos os materiais e métodos utilizados para a obtenção de áreas das geleiras da Cordilheira Oriental e os desafios decorrentes de tais escolhas metodológicas.

4.2. Materiais

4.2.1. Sistemas computacionais

A execução deste trabalho demandou sistemas computacionais de Processamento de Imagens e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) capazes de registrar, editar, extrair, comparar e analisar dados espaciais. Para tanto foram selecionados os programas demonstrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Programas utilizados para extração e análise das informações.

Software	Aplicação
Erdas Imagine 9.2®	- classificação digital das imagens
ENVI 4.6®	- transformação da máscara (raster) para o formato vetor.
ArcGis 9.2®	- registro e extração dos planos de informação das cartas topográficas; - mosaico de imagens de satélite - análises das áreas das geleiras extraídas das imagens orbitais.

4.2.2. Imagens HRC do satélite CBERS-2B

Para este trabalho foram selecionadas cenas da câmara pancromática de alta resolução HRC (*High Resolution Camera*) do satélite sinobrasileiro CBERS-2B (*China Brazil Earth Resources Sattelite*). Este satélite operou de setembro de 2007 a abril de 2010 e foi construído para dar continuidade ao Programa CBERS³. A bordo

³ O Programa CBERS nasceu de uma parceria inédita entre Brasil e China no setor técnico-científico espacial. Um acordo entre os países foi assinado em julho de 1988 com a finalidade de incluir estes no desenvolvimento de tecnologia de satélites para melhor monitorar seus imensos territórios. Esta parceria envolve o INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e a CAST – Academia Chinesa de Ciências Espaciais. Este acordo possibilitou o lançamento dos satélites CBERS-1 e CBERS-2. A renovação da parceria em 2002 deu continuidade ao programa e prevê o lançamento dos satélites CBERS-3 e CBERS-4. O satélite CBERS-2B não estava previsto, mas foi

dessa plataforma estavam os sensores WFI (*Wide Field Imager*), CCD (*CoupleChargedDevice*) e HRC. A órbita do CBERS é heliossíncrona, com altitude de 778 km, perfazendo aproximadamente 14 revoluções por dia. Nessa órbita, o satélite cruza o Equador sempre na mesma hora local permitindo assim que se tenham condições muito próximas de iluminação solar para a comparação multitemporal de imagens (INPE, 2010d).

A câmera HRC operava numa única faixa espectral, cobrindo o espectro visível e parte do infravermelho próximo (0,50 – 0,80 μm), permitindo a observação com grande detalhamento dos objetos da superfície já que realizava o imageamento em faixas de 27 km de largura e resolução espacial de 2,7 m (INPE, 2010b). As imagens foram adquiridas gratuitamente junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais entre maio e julho de 2010.

Tabela 4.2. Características da Câmara de Alta Resolução - HRC. Fonte: INPE, 2010d.

Banda espectral	0,50 – 0,80 μm (pancromática)
Campo de visada	2,1°
Resolução espacial	2,7 x 2,7 m
Largura da faixa imageada	27 km (nadir)
Resolução Temporal	130 dias na operação proposta
Resolução radiométrica	8 bits

A resolução espectral do sensor HRC não permite diferenciarmos neve e nuvem, dado que ambas têm alta refletância nesse intervalo de comprimentos de onda como se pode observar no gráfico sobre o comportamento espectral da água (Figura 4.1). No entanto, a resposta espectral da neve, do gelo limpo, do gelo sujo, do *firm* e da água saturada no gelo não é a mesma. Outros trabalhos utilizando sensores com maior resolução espectral são aplicados a estudos glaciológicos. Estudos utilizando imagens LANDSAT (WILLIAMS JR. *et al.*, 1991), e ASTER são

construído visando a não interrupção de informações aos usuários do programa, algumas alterações foram realizadas em relação aos primeiros projetos, uma delas foi a inserção do sensor HRC. Transmitiu informações entre setembro de 2007 e março de 2010 gerando cerca de 400 mil imagens do mundo todo durante seu funcionamento. (INPE, 2010c)

indicados pelo GLIMS (Capítulo 2) para a elaboração de inventários. Esses sensores apresentam maior número de bandas, possibilitando maiores diferenciações morfológicas e da dinâmica glacial. Entretanto as resoluções espaciais do sensor TM e da câmara VNIR do ASTER, 30 e 15 m, respectivamente, excluem geleiras de pequenas dimensões, caso da grande maioria das que ocorrem na Bolívia. (RIBEIRO *et al.* 2010).

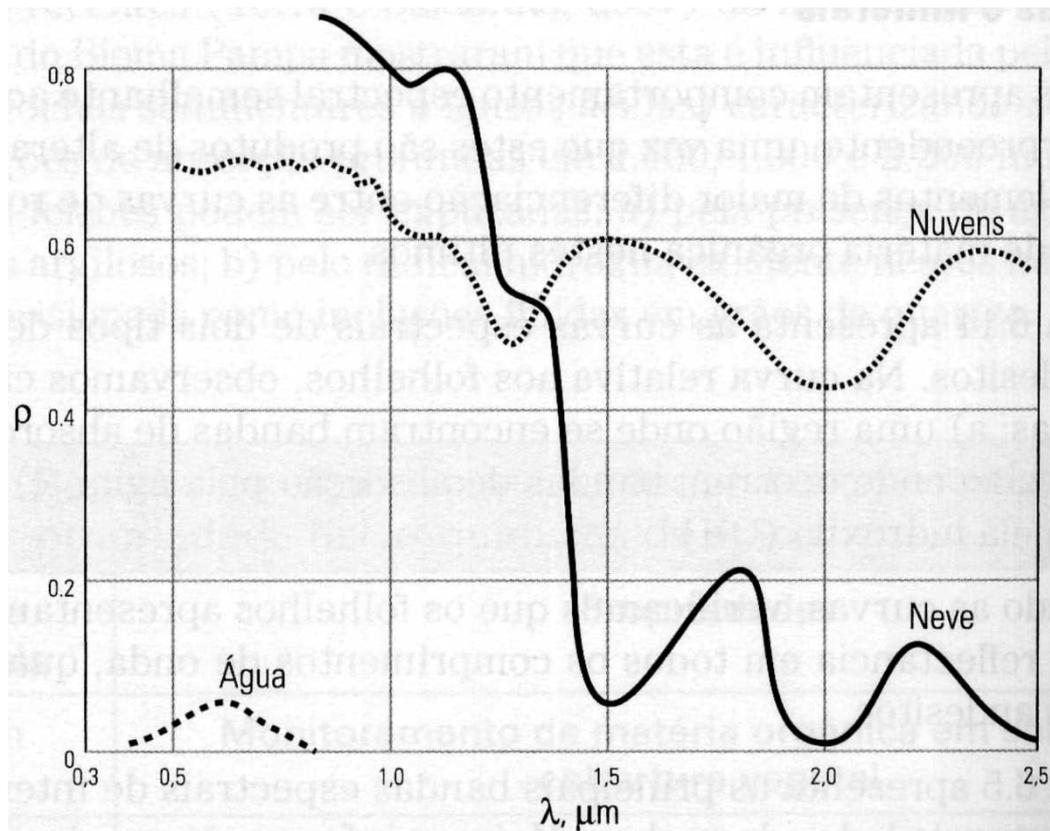


Figura 4.1. Comportamento espectral da água em seus diferentes estados físicos. [Fonte: Brokeret al., 1985 apud NOVO, E.M.L. de M., 2008].

4.2.3. Material Cartográfico

Foram utilizadas cartas topográficas elaboradas a partir de fotografias aéreas (JORDAN, 1999). Estas fotos foram obtidas do vôo *M. Hurd* entre julho e agosto de 1975 com escala média de aproximadamente 1:70000. Foi realizada a triangulação sobre a base de pontos de controle da rede de medição oficial da Bolívia. A identificação das feições geomorfológicas também foi verificada em campo nos anos

de 1975, 1977, 1978-1980 e 1980-1981 resultando na produção e divulgação de cartas na escala 1:70000 para a Cordilheira Oriental. Essas cartas embasam o presente estudo. (Tabela 4.3).

Tabela 4.3. Cartas topográficas utilizadas na identificação das bacias de drenagem e feições glaciais. [JORDAN, 1990 a, b, c, d, e, f, g, h, j]

CORDILHEIRA ORIENTAL (JORDAN, ...)		
Carta	<i>Distribution of Glaciers and Neoglacial Moraines in the...</i>	Região
4	<i>Cordillera Apolobamba</i>	<i>Chaupi Orco Region</i>
5	<i>Cordillera Apolobamba</i>	<i>Cololo Region</i>
6	<i>Cordillera Apolobamba</i>	<i>Ulla Kaya Region</i>
7	<i>Cordillera de Muñecas</i>	<i>Morocollu Region</i>
		<i>Chuchu Region</i>
8	<i>Cordillera Real</i>	<i>Illampu-Ancohumá Region</i>
9	<i>Cordillera Real</i>	<i>Calzada-Chearoco-Chachacomani Region</i>
10	<i>Cordillera Real</i>	<i>Nigruni-Condoriri</i>
11	<i>Cordillera Real</i>	<i>Saltuni-Huayna Potosi Region</i>
12		<i>Zongo-Cumbre-Chacaltaya Region</i>
13	<i>Cordillera Real</i>	<i>Hampaturi-Taquesi Region</i>
14		<i>Mururata Region</i>
15	<i>Cordillera Real</i>	<i>Illimani Region</i>
16	<i>Cordillera Tres Cruces (Qimsa Cruz)</i>	<i>Choquetanga Region</i>
		<i>Santa Vera Cruz Region</i>

4.3. Métodos

Imagens de satélite têm inúmeros usos. Porém, a riqueza de informações que contêm está diretamente ligada às suas resoluções (espacial, espectral, temporal e radiométrica), e aos fins para os quais estão sendo utilizadas. Para que tais sejam atingidos empregam-se técnicas de processamento digital, cujas ferramentas servem para facilitar a identificação e a extração das informações contidas nas imagens (CRÓSTA, 1992). Uma das funções mais comuns no processamento de imagens é a de distinguir e identificar alvos. Neste trabalho, o alvo de interesse são as áreas cobertas por gelo. Para isso foi aplicada a classificação supervisionada nas imagens. O desenvolvimento do trabalho pode ser visualizado na Figura 4.2.

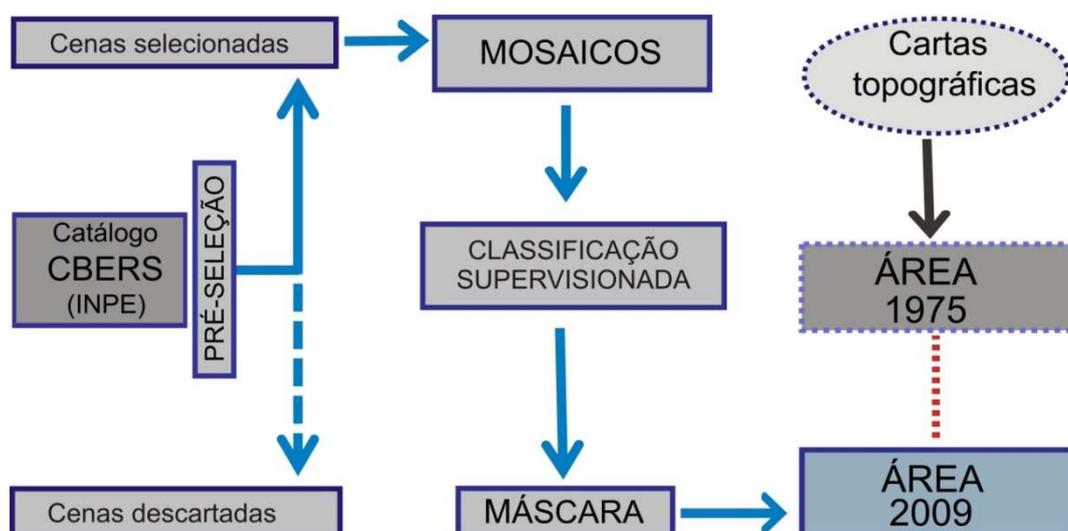


Figura 4.2. Fluxograma demonstrando o método desenvolvido para a obtenção das áreas da Cordilheira Oriental, Bolívia.

4.3.1. Pré-Processamento

4.3.1.1. Seleção das cenas

Buscou-se, ao selecionar as cenas, atender a cobertura da área de estudo e ao período de menor incidência de nebulosidade, entre os meses de maio e outubro (Capítulo 3), para as geleiras da Cordilheira Oriental. No entanto, para que toda a área fosse coberta, foram incluídas cenas fora do período considerado ideal onde a probabilidade de ocorrência de nuvens é mínima. Algumas dessas atenderam aos objetivos deste estudo já que as nuvens presentes não comprometiam a visualização das áreas cobertas por gelo.

Tabela 4.4. Cenas selecionadas CBERS-2B, sensor HRC.

órbita	ponto	data	cobertura de nuvens %			
			Q1	Q2	Q3	Q4
180-E	116-4	23/4/2008	70	80	50	50
180-E	116-5	1/9/2009	0	0	0	0
180-D	116-4	31/8/2008	10	10	10	10
180-D	116-5	31/8/2008	10	10	0	0
179-A	117-1	25/4/2009	70	90	50	90
179-A	117-2	9/9/2009	30	80	30	90

179-B	117-1	30/3/2009	70	90	80	80
179-B	117-2	30/3/2009	70	70	40	60
179-C	117-4	13/7/2008	10	10	0	0
179-E	118-1	3/10/2009	0	0	0	0
179-E	118-2	3/10/2009	10	10	10	10
178-A	118-1	25/5/2008	20	10	0	0
178-A	118-2	25/5/2008	0	0	0	0
178-A	118-3	25/5/2008	0	0	0	0
178-B	118-3	28/4/2009	40	90	10	50
178-B	118-4	28/4/2009	0	10	0	0
178-C	118-4	16/7/2008	10	10	10	0
178-C	118-5	16/7/2008	0	2	0	0
178-D	118-4	11/8/2008	20	20	10	10
178-D	118-5	11/8/2008	0	0	0	0
178-E	118-5	6/9/2008	40	40	30	40
178-D	119-1	11/8/2008	0	0	0	0
178-E	119-1	6/9/2008	30	30	10	10
177-B	119-2	28/5/2008	30	50	0	10
177-C	119-3	28/5/2008	0	0	0	0

Além da nebulosidade, decorrente da localização tropical das geleiras estudadas, outra dificuldade apresentada pelo catálogo tem relação com o próprio sensor. Algumas imagens apresentaram faixas onde dados não foram coletados e ruídos. Dentre estas, algumas tiveram de ser descartadas, pois não era possível reprocessá-las. Esses ruídos referem-se a imagens que apresentam uma estreita faixa escura dividindo as cenas. “Isso se deve a um movimento indesejado do satélite, que causa ausência de dados” (INPE, 2010) em setores das imagens.

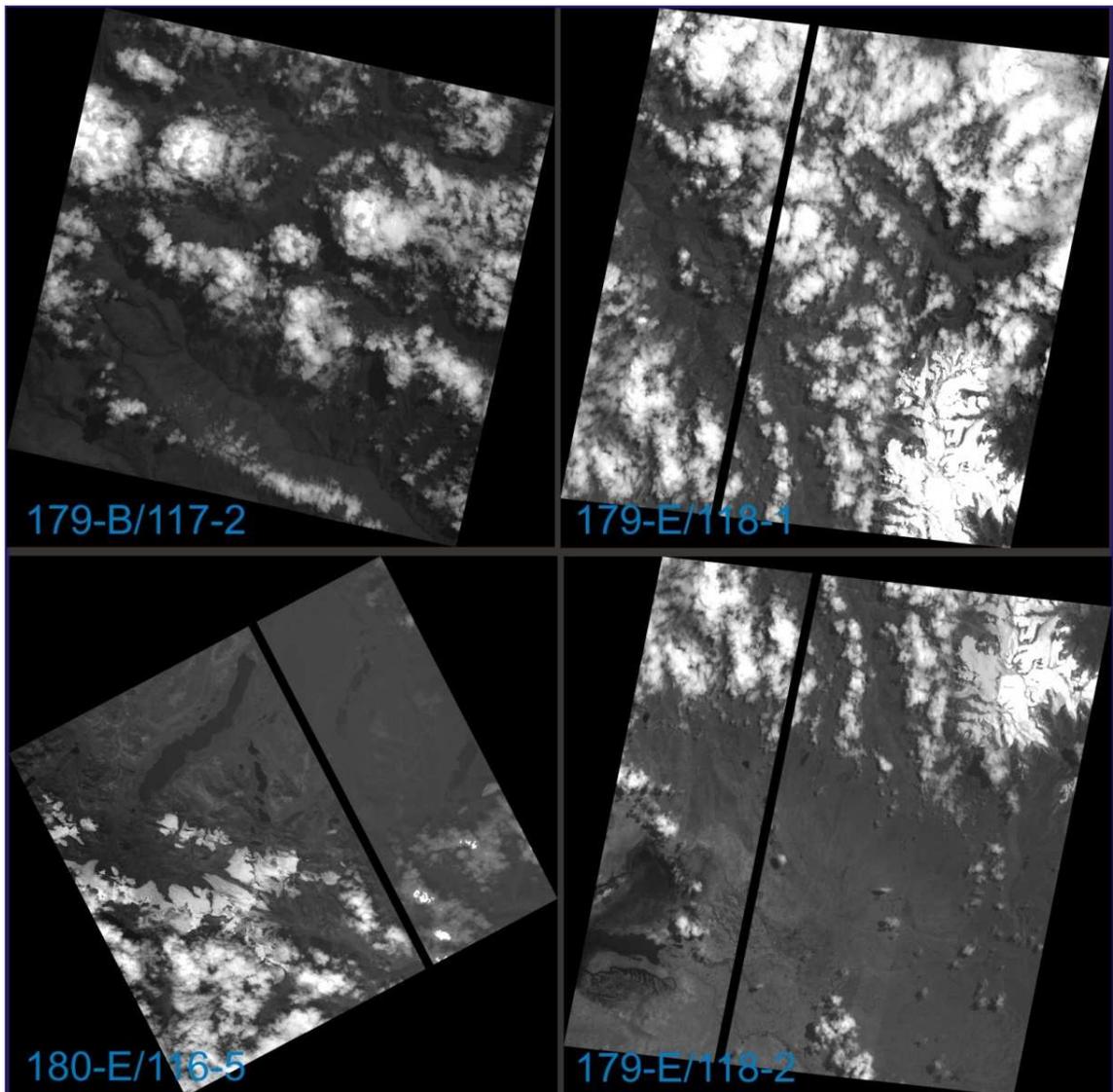


Figura 4.3. Cenas descartadas por apresentarem nebulosidade cobrindo as geleiras e/ou ruídos.

Carvalho *et al.* (2009), ao desenvolverem estudo para a determinação da resolução efetiva da câmara HRC, demonstraram que áreas das imagens com aparência de borrachamento estão relacionadas com a diferença na resolução espacial no sentido *cross-track* no *across-track*(Figura 4.4) . Os ruídos representaram limitações e desafios para a elaboração do plano metodológico deste trabalho.

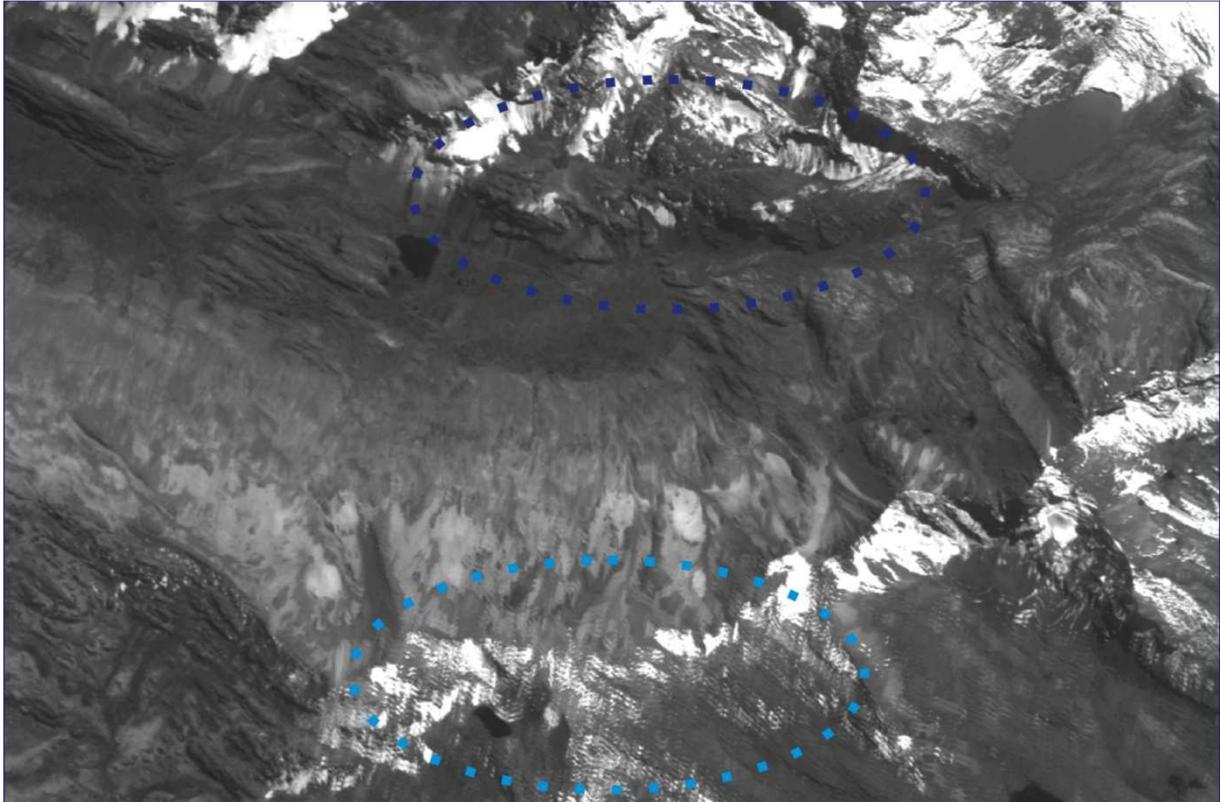


Figura 4.4. Recorte de cena apresentando trechos sem ruídos (azul escuro) e com ruídos (azul claro).

4.3.1.2. Elaboração dos mosaicos

Quando as cenas HRC/CBERS-2B são obtidas junto ao catálogo CBERS (INPE, 2010a) o valor nominal do pixel é de 2,5 m, entretanto o sensor adquire a imagem com o valor de 2,7 m. A fim de evitar deformações optou-se por manter o tamanho do pixel da imagem fornecida pelo catálogo.

A resolução espacial das imagens HRC/CBERS-2B permite a visualização de geleiras com extensões pequenas, menores que 0,5 km². No entanto para que toda a área em estudo fosse coberta foram selecionadas muitas cenas que tiveram que ser agrupadas dando origem a novas imagens formadas por cenas diversas (mosaico). O INPE fornece as cenas já registradas e com rede de coordenadas e *datum* definidos. Todavia, as cenas tiveram que ser novamente registradas para a elaboração do mosaico. Isto se deve ao problema de coleta das informações quando da troca de órbita, já discutido no item anterior. Além disso, algumas cenas

continham referências distintas das usadas neste trabalho (coordenadas UTM, datum WGS-84, zona 19 S).

Utilizando as ferramentas do SIG ArcGis 9.2 para o registro definição do sistema de coordenadas das imagens (*georreferencing*), e da caixa de ferramentas (ArcToolBox) foram elaborados mosaicos referentes as cordilheiras em estudo. Nas Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 podemos verificar os mosaicos elaborados associados as regiões de ocorrência de geleiras da Cordilheira Oriental.

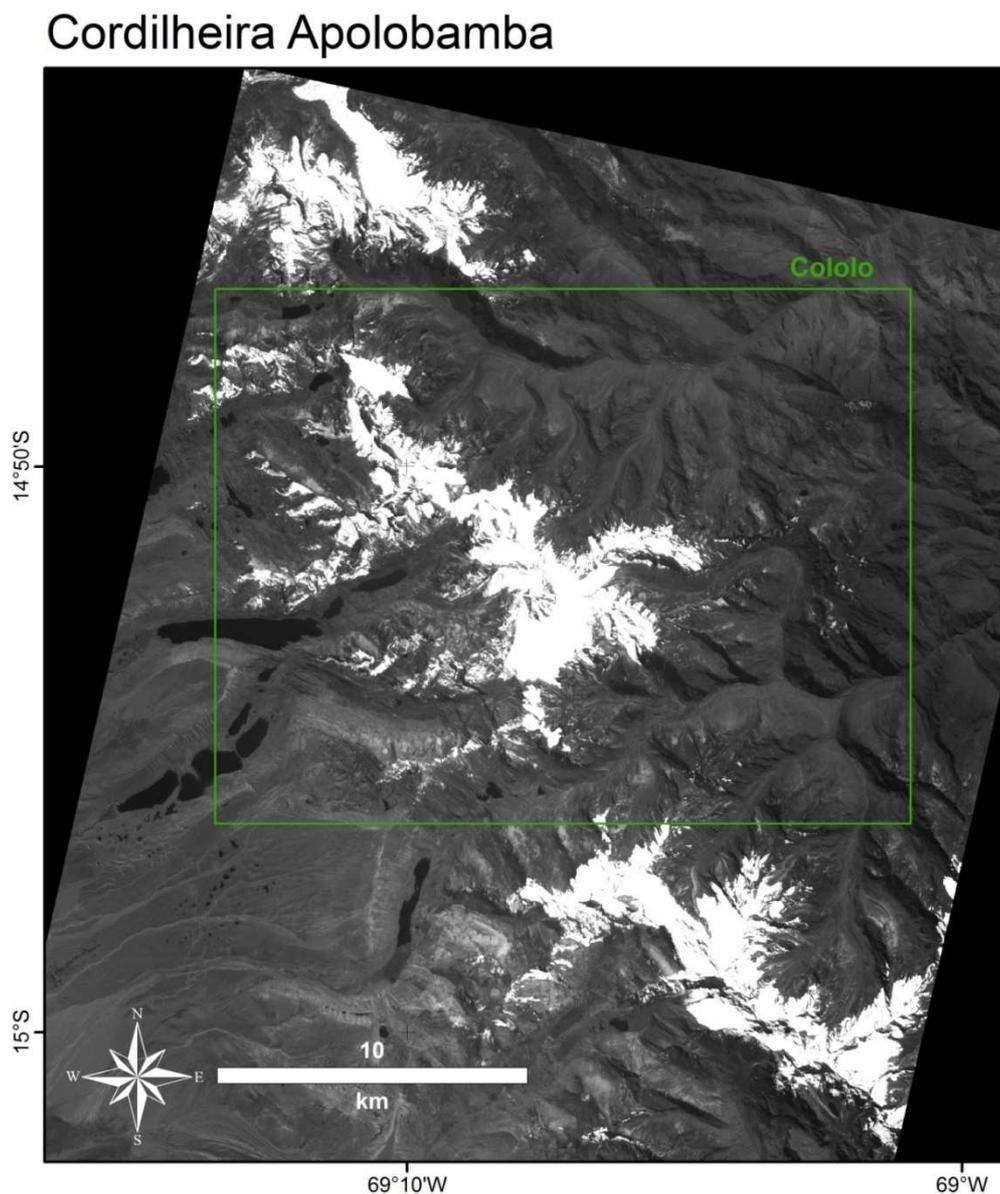


Figura 4.5. Mosaico elaborado a partir de cenas HRC. Cordilheira Apolobamba, região Cololo.

Cordilheira Real Norte

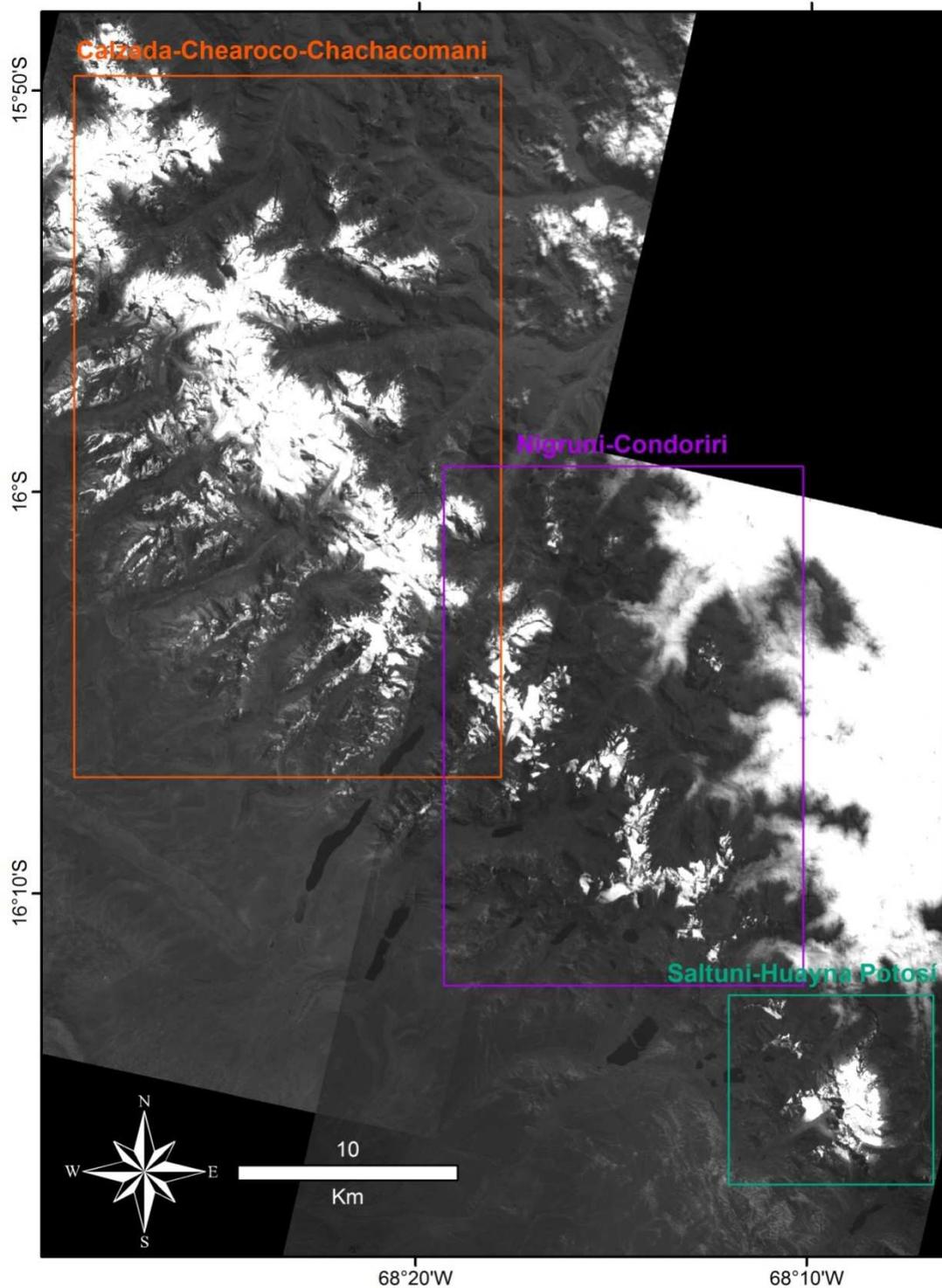


Figura 4.6. Mosaico elaborado a partir de cenas HRC. Cordilheira Real Norte, regiões Calzada-Chachacomani, Nigruni-Condoriri e Saltuni-Huayna Potosí.

Cordilheira Real Sul

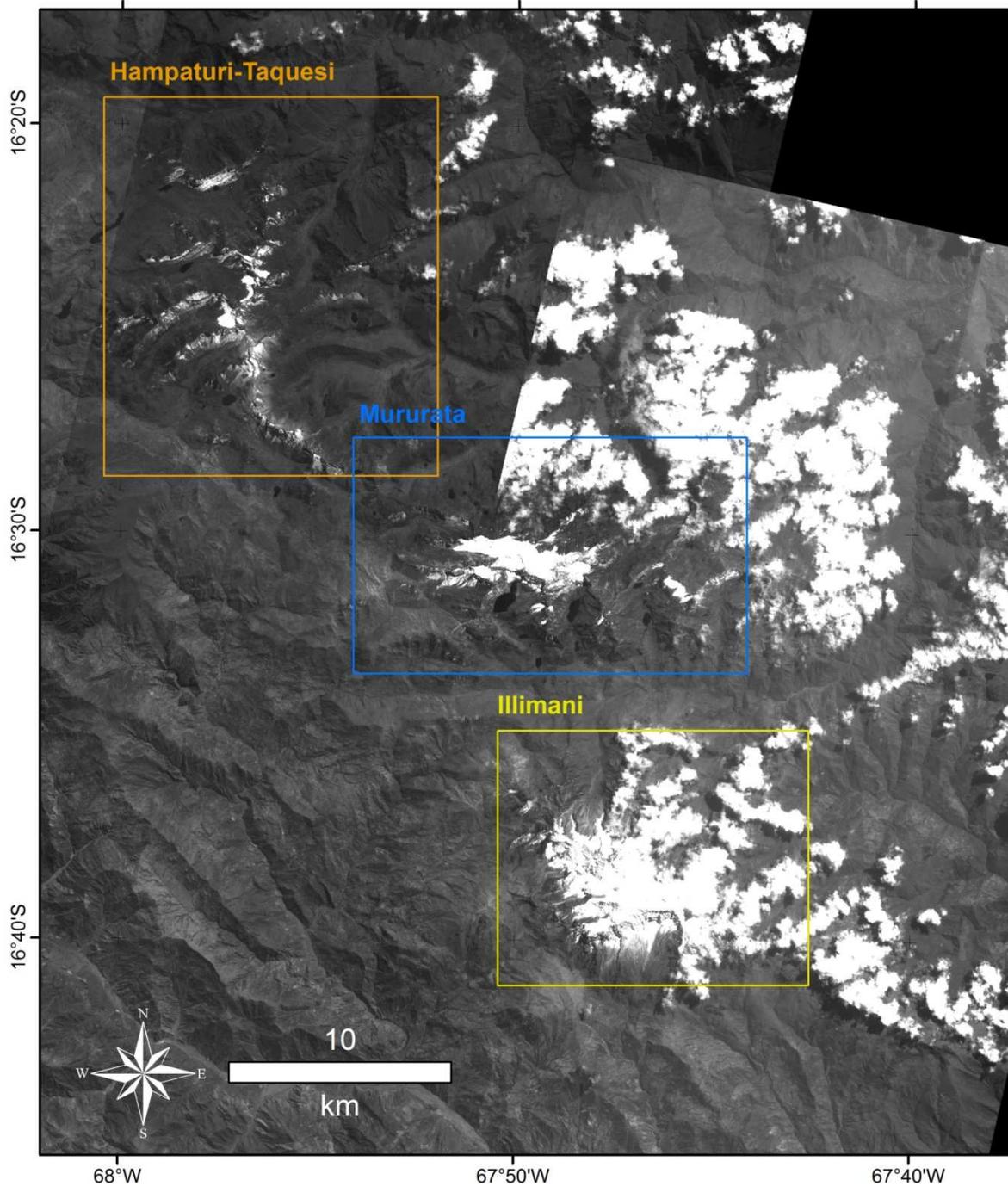


Figura 4.7. Mosaico elaborado a partir de cenas HRC. Cordilheira Real Sul, regiões Hampaturi-Taquesi, Mururata e Illimani.

Cordilheira Tres Cruces (Quimsa Cruz)

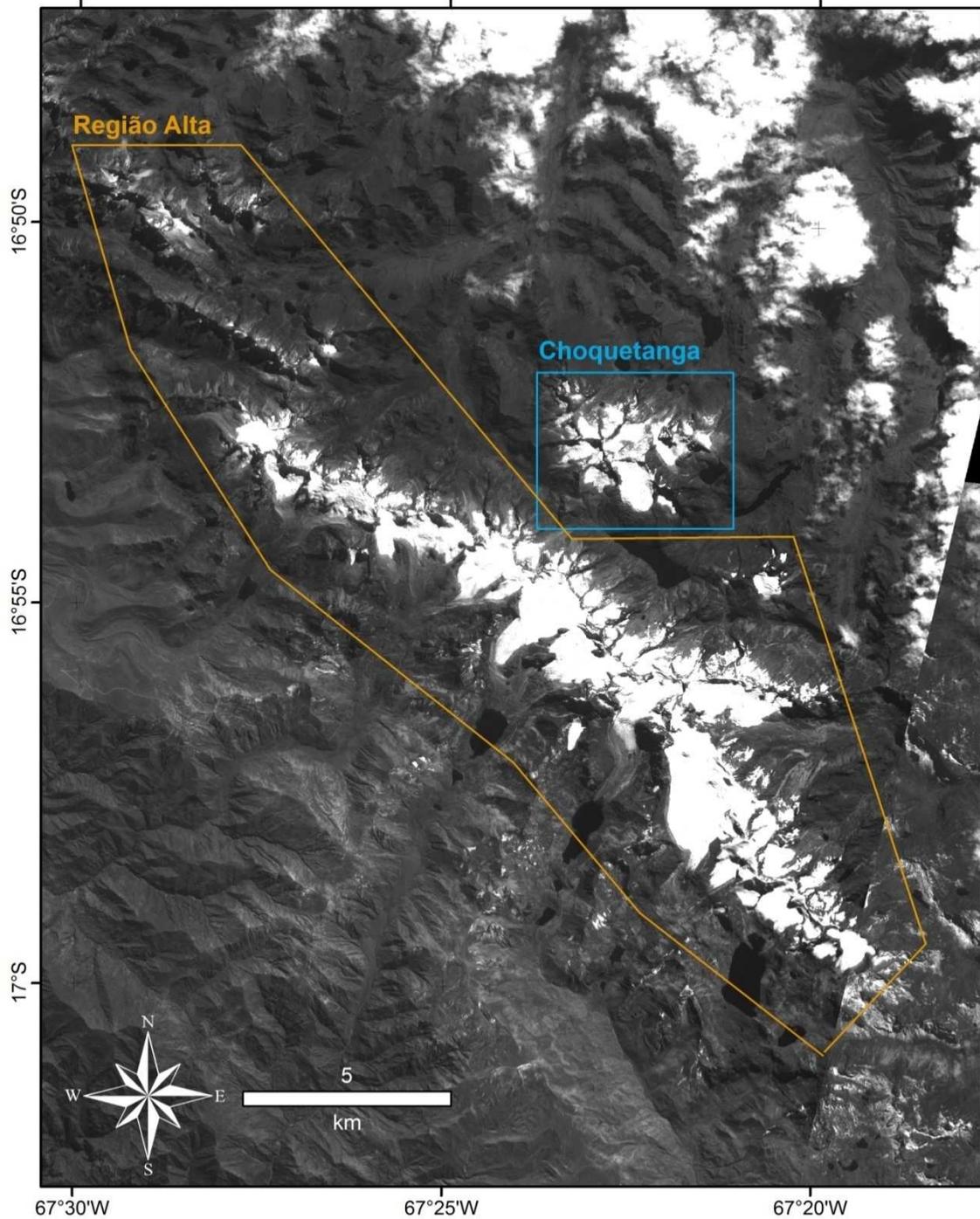


Figura 4.8. Mosaico elaborado a partir de cenas HRC. Cordilheira TresCruces (Quimsa Cruz), região alta e Choquetanga.

4.3.2. Processamento

A partir do mosaico foi obtida uma máscara correspondente às áreas cobertas por gelo, foi utilizada uma classificação supervisionada através do método do paralelepípedo utilizando ferramentas do Erdas Imagine 9.2. A elaboração da máscara se deu através da coleta de uma amostra sugerida ao programa de processamento de imagens. Desta forma, o próprio *software* define o intervalo de pixels a serem amostrados.

O método do paralelepípedo considera uma área no espaço de atributos ao redor do conjunto de treinamento. Essa área tem a forma de um quadrado ou de um paralelepípedo definido pelo DN (sigla em inglês para número digital) máximo e mínimo da amostra (CRÓSTA, 1992). Neste método os limites de decisão da classe são os lados do paralelepípedo, assim pixels cujo valor estão fora da amostra podem ser agrupados dentro da classe mesmo não pertencendo à mesma (ver Figura 4.9).

Assumindo-se que cada pixel pertence a uma determinada classe (geleira) pode-se associar valores de reflectância e propriedades observáveis dos alvos na definição da classe. Assim, a máscara resultante pode ser refinada e, então, convertida do formato *raster* para o formato vetor utilizando ferramentas do ENVI 4.6. Assim, as áreas atualizadas das geleiras foram extraídas do vetor.

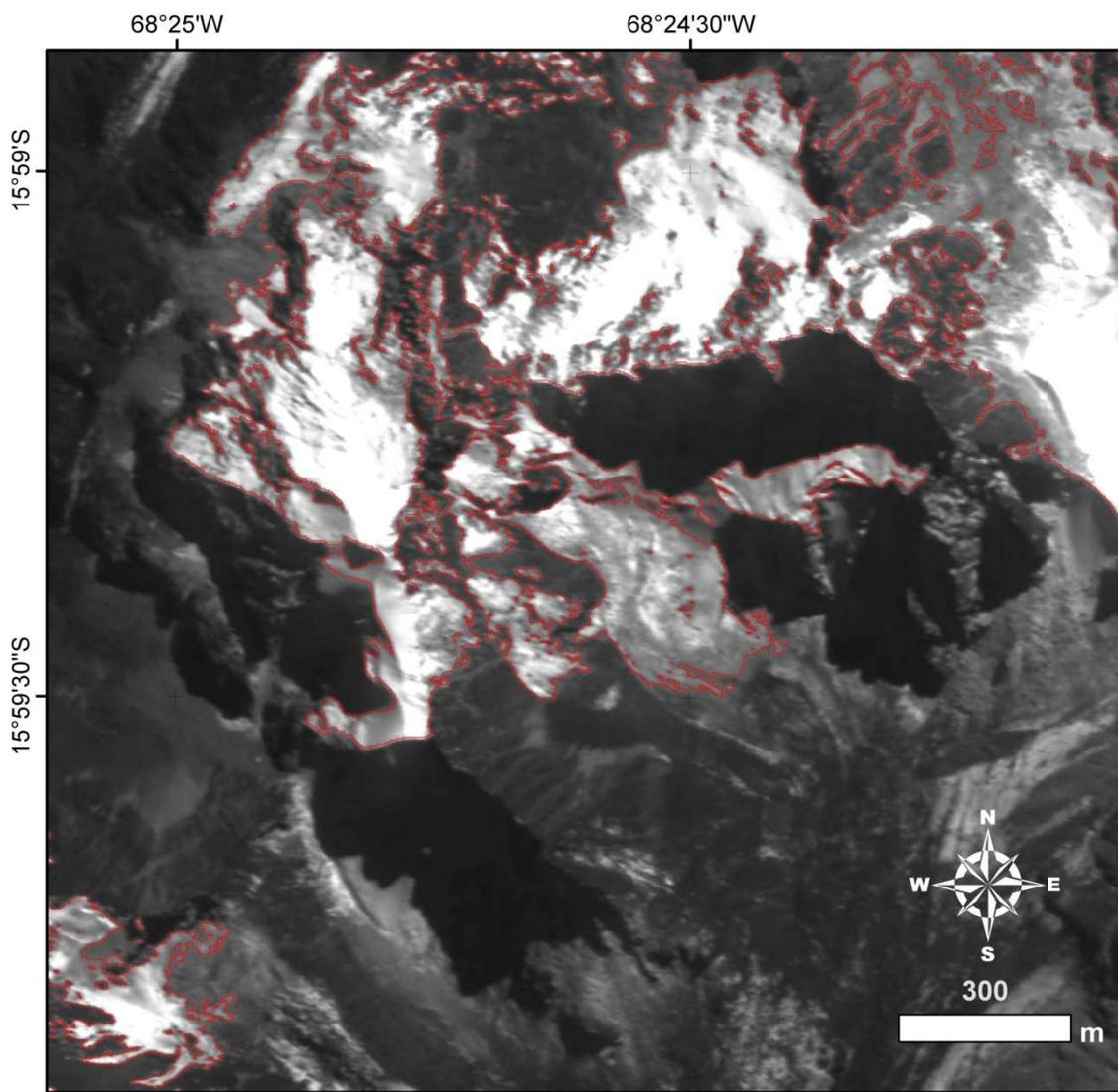


Figura 4.9. Áreas de ocorrência de sombras causadas pelo relevo e a detecção de bordas constituíram um desafio a classificação. Recorte da região Calzada-Chearoco-Chachacomani.

4.3.3. Pós-Processamento

A partir das áreas obtidas foram gerados gráficos comparativos com a situação existente em 1975, que são discutidos no Capítulo 5.

5.RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. A Cordilheira Oriental e as mudanças ambientais

As geleiras da Cordilheira Oriental são dependentes das condições climáticas da Amazônia, pois alterações na distribuição de umidade nesse bioma trazem conseqüências para a precipitação de neve sobre a cordilheira. A redução das precipitações somadas à elevação da temperatura na troposfera acelera a perda de massa destas geleiras. A elevação da linha de equilíbrio em direção a cotas mais altas, o aumento na vazão dos cursos d'água, originados nos glaciares, e a redução na superfície das geleiras são as respostas mais claras dessas massas de gelo às alterações climáticas.

A redução das áreas cobertas de gelo na Cordilheira Oriental parecem ter começado após a Pequena Idade do Gelo, mas é no final do século XX que percebemos as maiores retrações. A retração destas geleiras deixaram (e ainda deixam) lagos (Figura 5.1) e sedimentos que registram suas antigas extensões.

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos a partir da metodologia utilizada e os desafios decorrentes.



Figura 5.1. Lagos associado a águas de degelo. Huayna-Potosí, em fevereiro de 1999[Foto:U.F.Bremer].

5.2. Variação parcial das geleiras da Cordilheira Oriental 1975-2009

As áreas referentes a2009 foram obtidas a partir da classificação supervisionada de imagens do sensor HRC/CBERS-2B. Os resultados foram obtidos para as regiões Cololo, Calzada-Chearoco-Chachacomani, NigruniCondoriri, Saltuni-HuaynaPotosí, Hampaturi-Taquesi, Mururata, Choquetanga e região alta de TresCruces (Tabela 5.1). As perdas em área desde 1975 mostram uma retração acentuada nos últimos trinta e nove anos, com média de 38,71%, o que corrobora com o quadro geral de mudanças climáticas e com a preocupação dos povos andinos sobretudo acerca dos recursos hídricos do altiplano.

Tabela 5.1. Variação parcial das geleiras da Cordilheira Oriental 1975-2008/2009.

Variação parcial das geleiras da Cordilheira Oriental 1975 - 2009			
	Área km ²		Redução %
	1975	2009	
<i>Cordilheira Apolobamba</i>			
Cololo	43,072	32,486	-24,58
<i>Cordilheira Real Norte</i>			
Calzada-Chearoco-Chachacomani	94,072	89,16	-5,22
Nigruni-Condoriri	40,868	22,848	-44,09
Saltuni-HuaynaPotosí	14,504	8,748	-39,66
<i>Cordilheira Real Sul</i>			
Hampaturi-Taquesi	11,685	2,575	-77,96
Mururata	17,207	8,193	-52,38
<i>Cordilheira TresCruces (Quimsa Cruz)</i>	45,276	32,167	-28,95
Choquetanga	6,992	3,459	-50,53
região alta de TresCruces	38,284	28,708	-25,01

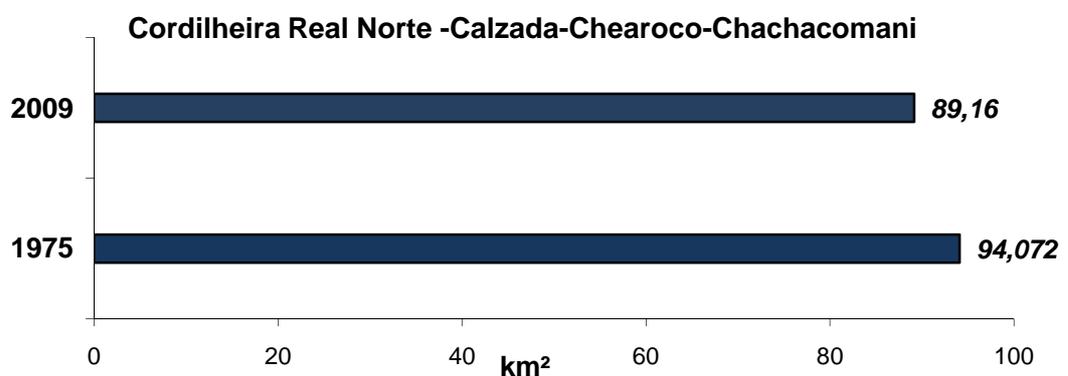
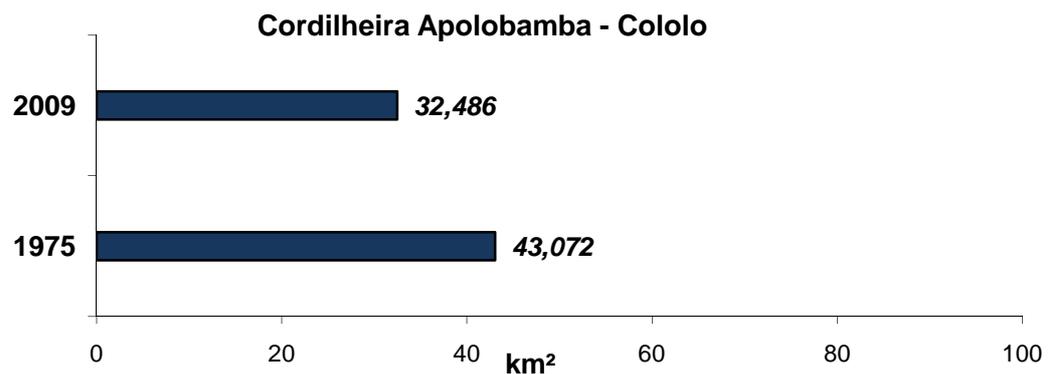
5.3. A retração das geleiras da Cordilheira Oriental

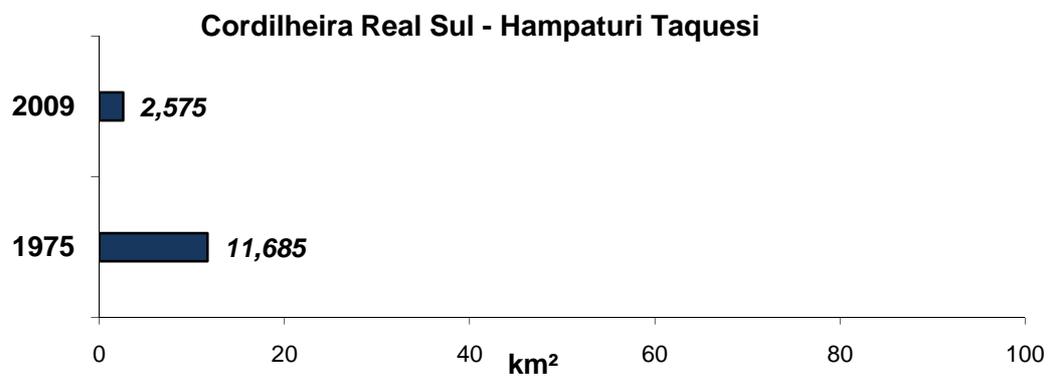
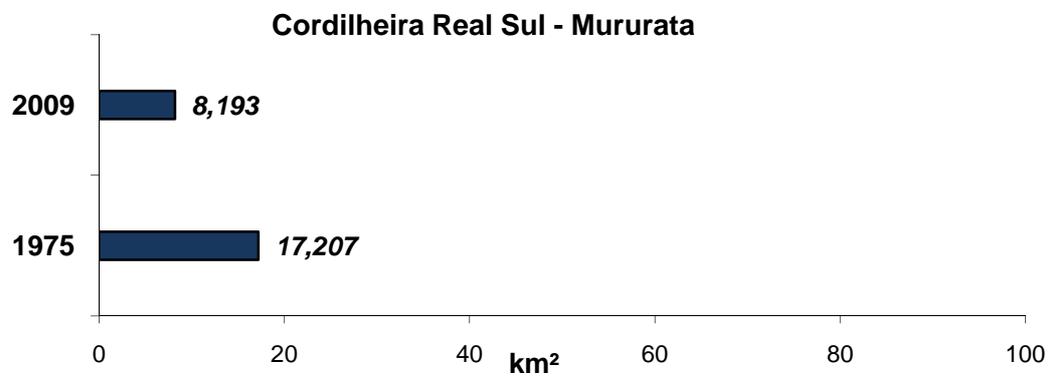
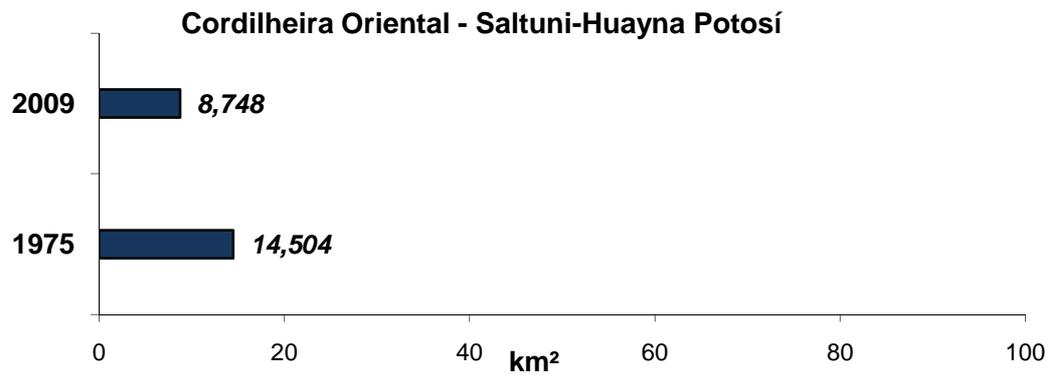
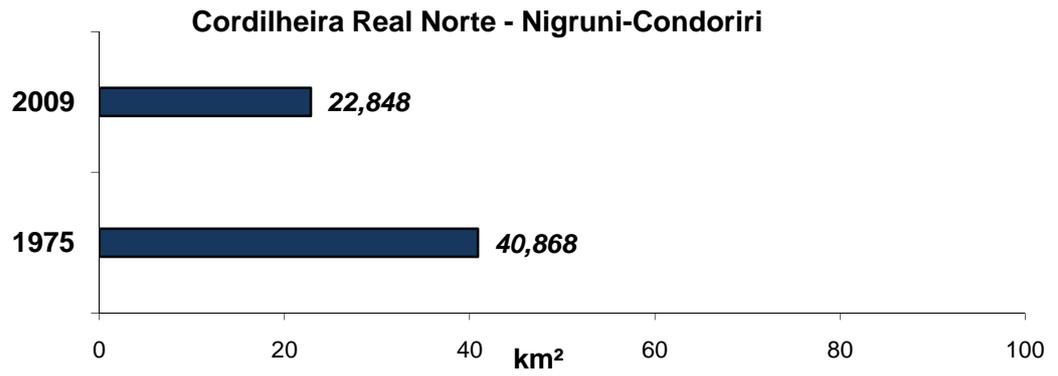
A atualização das áreas das geleiras da Cordilheira Oriental é necessária ao melhor entendimento da resposta desta região às mudanças do clima. A superfície das geleiras contribui com a sua própria manutenção já que o elevado albedo da neve (42 - 95% de reflectância) e do gelo (20 - 40% de reflectância) é responsável

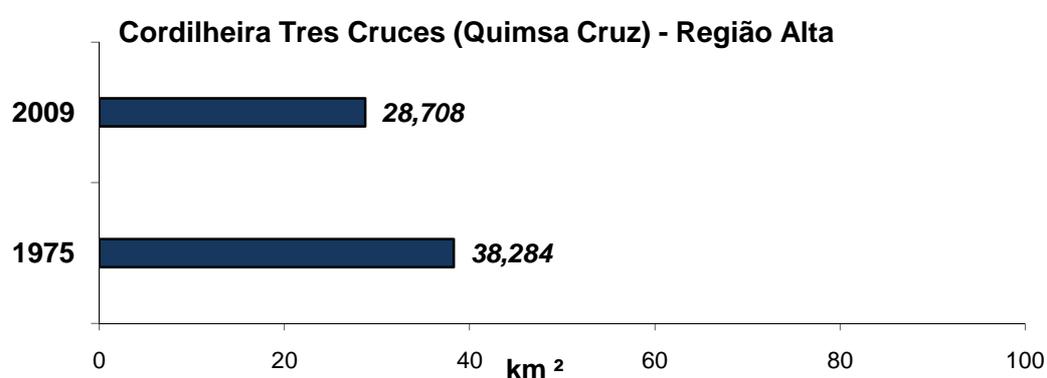
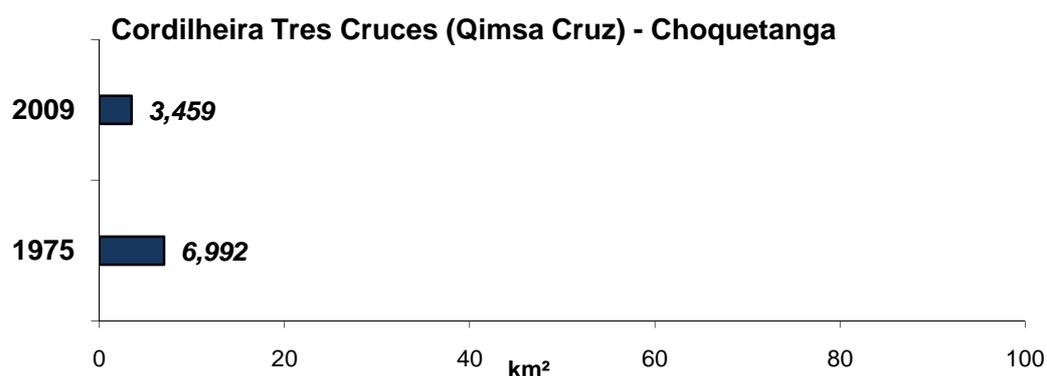
pela grande refletividade da radiação de ondas curtas incidentes (WHITE *et al.*, 1992). Essas ondas aquecem a superfície que por sua vez aquece a atmosfera que a circunda irradiando ondas de maior comprimento de onda. Variações nas áreas de geleiras representam alterações da temperatura atmosférica e/ou do padrão de chuvas, por isso são dados valiosos no monitoramento dessas regiões.

A retração das geleiras da Cordilheira Oriental foi verificada e corrobora com os estudos de RAMÍREZ *et al.* (2001) que apontavam o possível desaparecimento das pequenas geleiras. Foram as geleiras com as menores dimensões as que apresentaram as maiores retrações no período 1975 – 2009.

5.3.1. Representação gráfica da redução das geleiras da Cordilheira Oriental





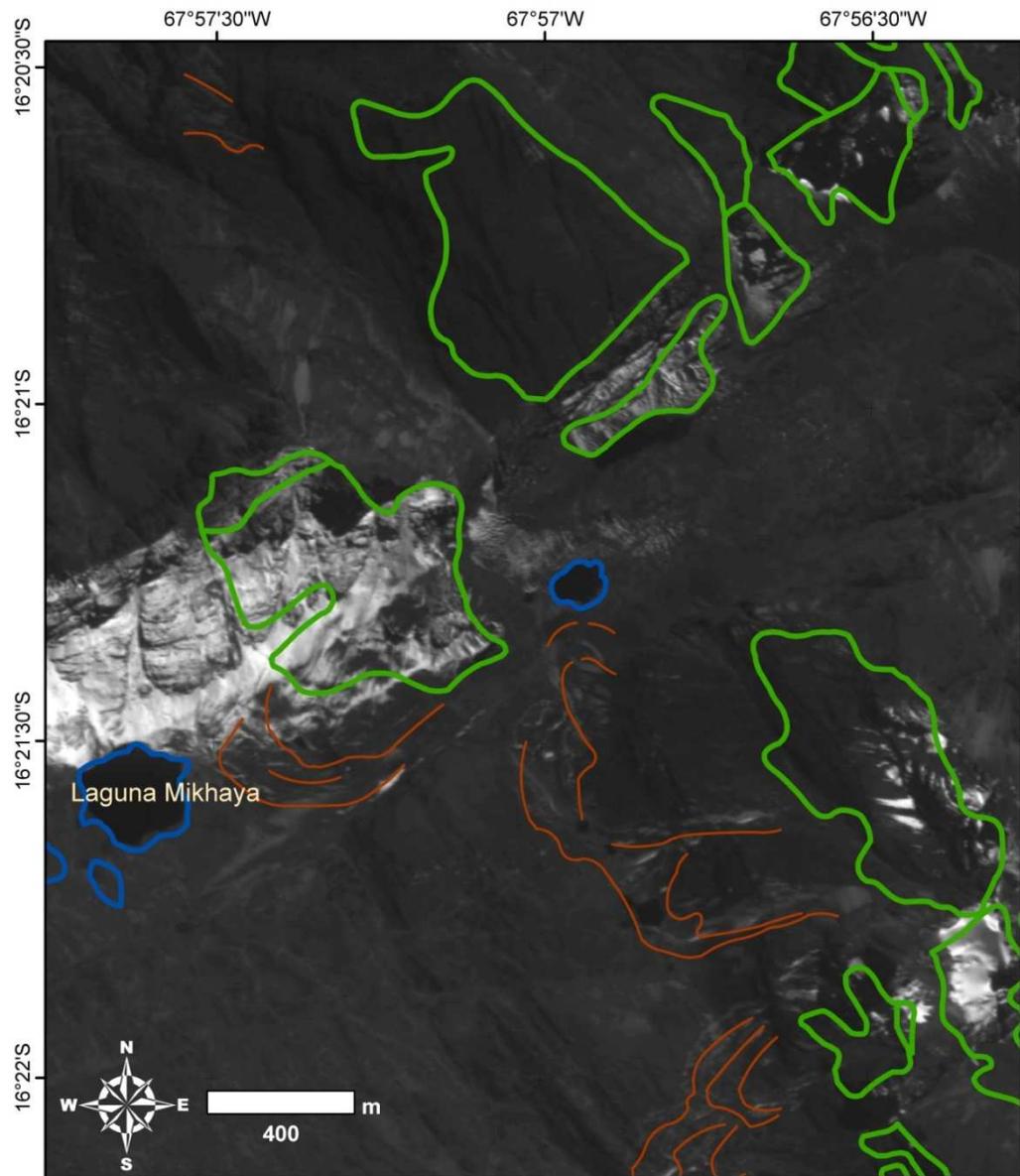


5.3.2. A representatividade dos resultados

As áreas foram obtidas a partir da regionalização proposta por JORDAN (1990a...j) e por ele utilizadas para a obtenção dos dados referentes a 1975. Estes critérios foram orientados pelas cartas topográficas, já que não houve verificação em campo. A extensão da área de estudo demandaria recursos e tempo não compatíveis com trabalhos de conclusão de curso para a correta identificação de pontos a serem verificados em campo. Cabe destacar que as áreas representam grupos de geleiras associados às bacias de drenagem e às montanhas onde estão inseridas.

Outro aspecto não discutido neste trabalho refere-se ao erro inerente a verificações indiretas oriundas de dados de Sensoriamento Remoto. O erro sugere um padrão estatístico em relação ao resultado e reforça a veracidade do trabalho. No entanto, não foi identificado nenhum método de obtenção de erro compatível

com esta metodologia. Considerando a alta resolução espacial das imagens HRC, acredita-se que a ocorrência de erros não compromete os resultados obtidos.



Região Hampaturi-Taquesi : retração glacial 1975 - 2009

-  posições das morenas antes do século XX
-  lagos
-  geleira em 1975

Figura 5.2. Região Hampaturi-Taquesi: retração glacial 1975 – 2009⁴.

⁴ Jordan (1999) identificou nas cartas topográficas as morainas referentes a períodos anteriores ao século XX, referentes à Pequena Idade do Gelo. Nota-se que a retração das

A retração das frentes glaciais contribui com o aumento da vazão dos cursos d'água a que dão origem e, em alguns casos, dão origem a novos lagos (lagos periglaciais e proglaciais) (Figuras 5.3 e 5.4).

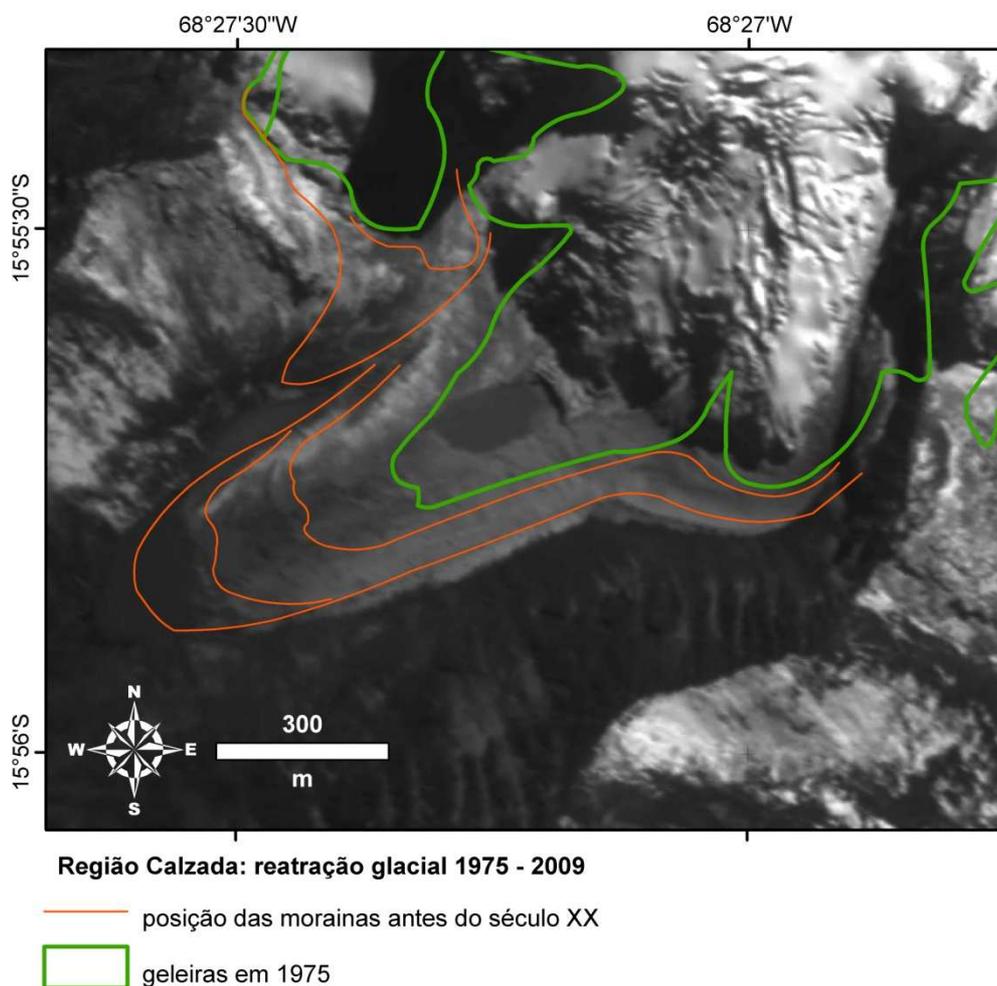


Figura 5.3. Região Calzada: retração glacial 1975 – 2009.

As linhas de morainas refere-se ao período posterior a Pequena Idade do Gelo (*LIA*) e anterior ao século XX, demonstra a tendência de retração após este período de arrefecimento e que se acelerou no final do século XX.

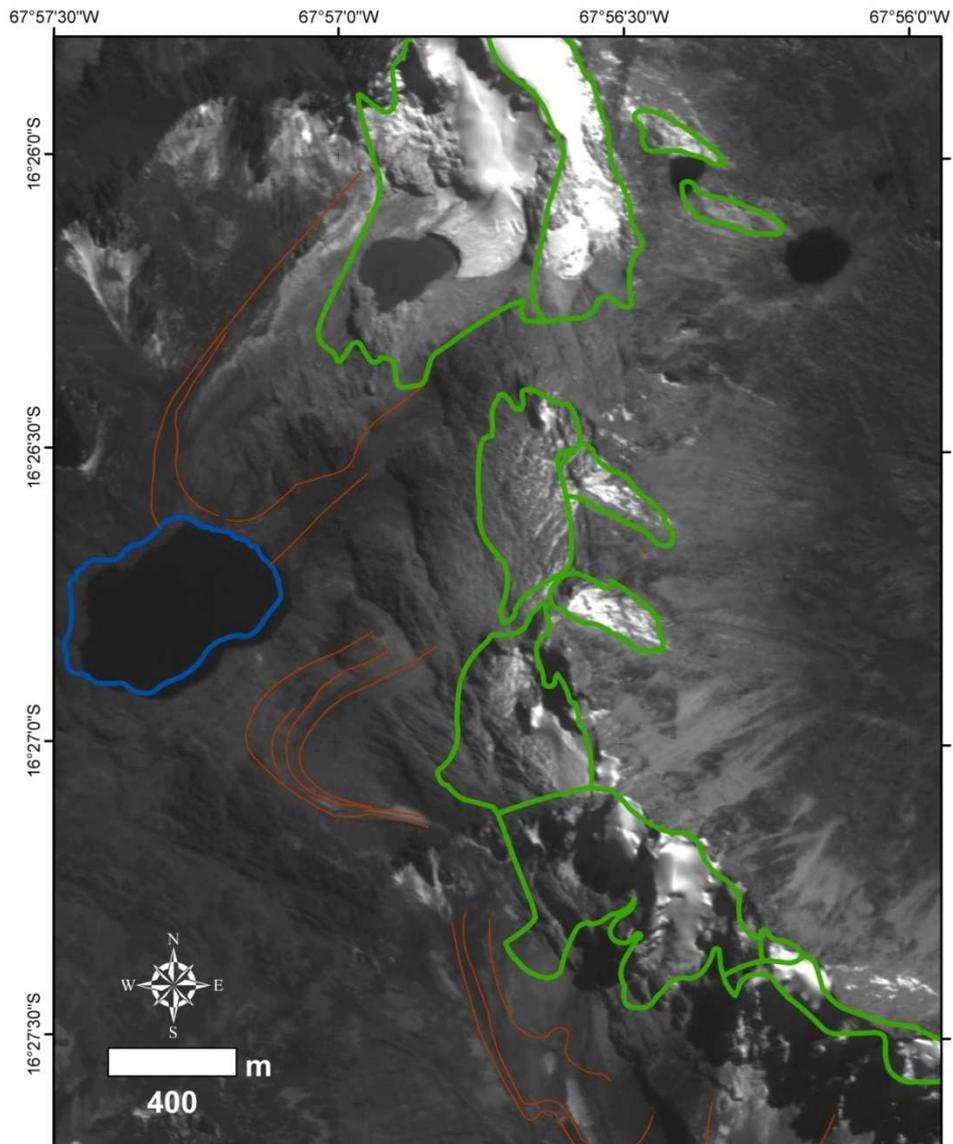
Ramírez (2008) aponta que esta perda de massa das geleiras leva a um desequilíbrio das bacias hidrográficas. A curto prazo há incremento dos cursos

geleiras da Cordilheira Oriental vem retraindo desde este período. Mas é durante o século XX que esta tendência se torna mais severa levando algumas destas a desaparecerem.

d'água. Porém, cessada a fonte, a tendência é haver um déficit nas vazões. Este mesmo autor destaca que a pergunta fundamental referente aos recursos hídricos para a região andina está no impacto das mudanças climáticas sobre as chuvas da região.

Não apenas as geleiras são fontes de água. A neve que permanece apenas poucos meses também contribui para a recarga dos cursos d'água e por isso tem papel fundamental na manutenção destes e das geleiras. As precipitações estão conectadas com o ciclo hidrológico da bacia amazônica e as geleiras da Cordilheira Oriental podem ser fonte de informações valiosas sobre variações do clima sobre essa vasta região úmida e, portanto, sobre as bacias hidrográficas a que dá origem.

Observando as imagens orbitais utilizadas, verifica-se que as geleiras que drenam em direção ao altiplano são as que mais retraíram. As bacias Tuni e Condoriri (água potável) e Zongo e Taquesi (geração de energia elétrica), por exemplo, são importantes para as cidades de El Alto e La Paz, afetando mais de 1 milhão de pessoas (RAMÍREZ, 2008). A região de Nigruni-Condoriri perdeu cerca de 44% da sua área desde 1975, sendo o setor Condoriri mais sensível por estar na face oeste da cadeia montanhosa. A maior frequência de eventos El Niño e o aumento da temperatura global podem afetar essas regiões, cujas águas dependem das geleiras e da neve precipitada. Entender a dinâmica glacial da região e modernizar as estruturas de distribuição de água e energia são os desafios dos povos andinos. Entender a conexão dessa região com a Amazônia e com os fenômenos oceânicos-atmosféricos constituem vasto e necessário campo de pesquisa a ser explorado nos próximos anos.



Região de Hamapaturi-Taquesi: Lagos resultantes da retração glacial

- posições das morainas antes do século XX
- laguna Jachcha Khasiri
- geleiras em 1975

Figura 5.4. Região Hamapaturi-Taquesi: Lagos resultantes da retração glacial.

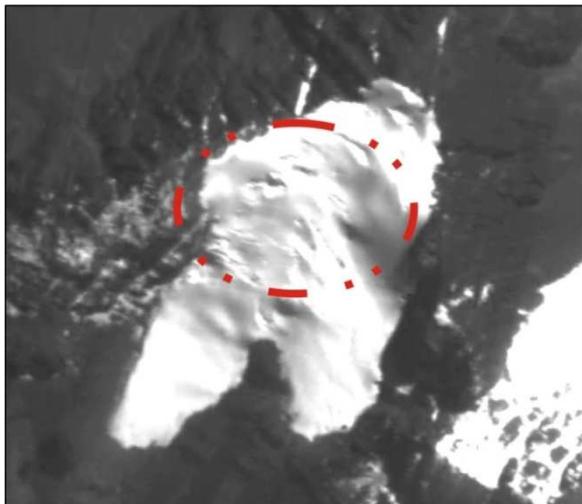
5.4. Desafios à compilação de dados a partir de imagens HRC/CBERS-2B

O Programa CBERS representa um esforço nacional, em parceria com os chineses, de desenvolver tecnologia para satélites de monitoramento ambiental (ver Capítulo 4). No entanto, o nível de excelência de programas como o LANDSAT não

foram ainda alcançados. Problemas relacionados à câmara HRC do CBERS-2B foram enfrentados durante a execução deste estudo.

A limitação do catálogo em fornecer imagens completas, sem presença de ruídos e a constante nebulosidade sobre a área de estudo prejudicaram os resultados possíveis de serem obtidos a partir da metodologia. Além disso, a classificação supervisionada aplicada a imagens pancromáticas apresentou alguns desafios ao se definir o intervalo de amostragem e o resultado destas na verificação das bordas das geleiras. Esta opção metodológica resultou na necessidade de trabalho manual de revisão de bordas e de exclusão de áreas identificadas visualmente como não geleiras. As cartas topográficas foram de grande valia para essa etapa do trabalho já que não houveram verificações em campo. Feições tais como morainas e fraturas nas geleiras foram identificadas nas imagens demonstrando ser possível outros tipos de trabalhos a partir de cenas HRC.

a)



b)



Figura 5.5. Feições análogas identificadas em fotografada geleira Chacaltaya e setor do mosaico da Cordilheira Real.⁵[Fotografia: U.F.Bremer, Fev/1999].

Embora tenham sido verificadas limitações ao uso de cenas HRC os resultados obtidos evidenciam aspectos positivos da parceria sino-brasileira. As

⁵ A região correspondente a esta geleira não consta no mosaico por corresponder a cena com presença de ruídos.

imagens sem ruídos sugerem que estudos morfológicos poderiam ser desenvolvidos construindo estudos sobre fácies e balanço de massa para as geleiras bolivianas se associadas a outros tipos de dados para as geleiras (Figura 5.5).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As geleiras de montanha são indicadoras de alterações climáticas. Este trabalho buscou atualizar dados sobre as extensões das áreas desta cordilheira baseando-se no esforço de se inventariar áreas glaciadas de todo o mundo pela iniciativa GLIMS e motivada pela incipiência deste tipo de trabalho na América do Sul.

A obtenção das áreas das geleiras é um dos critérios solicitados pelo GLIMS para a realização de inventários. Alterações na superfície das geleiras de montanha demonstram o estado geral destas, já que quanto menor for sua superfície mais exposta estará a geleira ao aquecimento diferencial da área circundante. Este foi o critério abordado neste estudo e cujos métodos e resultados estão expostos no presente trabalho. A partir de cenas HRC/CBERS-2B foram atualizadas as áreas para as regiões identificadas em 1975 demonstrando o estado atual dessas geleiras.

A retração verificada para a Cordilheira Oriental foi de cerca de 38,71%, já que não foi possível obter dados para toda a área de estudo. Este resultado é significativo, uma vez que as geleiras de montanhas são indicadoras térmicas do planeta e dos desafios decorrentes das alterações no ciclo hidrológico, sobretudo para a população do altiplano. A perda de áreas cobertas por neve e gelo na Bolívia se mostrou muito acelerada a partir de 1975 e não existem perspectivas de reversão do quadro climático em curso. Algumas já desapareceram, tal como a Chacaltaya (Figura 6.1), e outras podem não mais existir em poucos anos, tais como as da região Hampaturi-Taquesi que em 1975 apresentavam uma área de 11,685 km² e onde hoje restam apenas 2,575 km².

Este trabalho não poderá ter continuidade utilizando os mesmos tipos de dados já que o CBERS-2B não transmite mais informações e, segundo o INPE (2010), a câmara HRC não será incluída nos próximos satélites previstos (CBERS-3 e CBERS-4). Possivelmente problemas relacionados à instabilidade na órbita do satélite ainda não foram possíveis de serem resolvidos.

Os resultados demonstram que existem mudanças sensíveis observadas nas geleiras da Cordilheira Oriental, que sugerem a importância de se inventariar e monitorar essas áreas sistematicamente para que se obtenha o máximo de informações atuais e pretéritas, bem como suas conseqüências sobre o ciclo

hidrológico, sobre a biodiversidade e sobre as populações, tendo em vista o papel dinâmico da Criosfera. Necessita-se da correta individualização das geleiras, a determinação da linha de equilíbrio, o correto balanço de massa, entre outros dados indicados pelo GLIMS, para que esta importante área seja melhor conhecida. Nas geleiras da Cordilheira Oriental podem estar informações sobre a história da Terra, sobretudo da região Amazônica e sobre o fenômeno El Niño.



Figura 6.1. Antigo centro de aclimação do Clube Andino Boliviano, Chacaltaya, a 5260 m de altitude. [Foto: U.F.Bremer, fevereiro de 1999].

Referências

- AMAT Y LEON, C. (Coordenação). 2010. **El cambio climático no tiene fronteras: Impacto del cambio climático en la Comunidad Andina**. Lima: Secretaría General de La Comunidad Andina, 2008. Disponível em: <http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/livro/libro_cambioclimatico1.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2010.
- BLOOM, A.L. Gêlo sobre a Terra. 1971. In: BLOOM, A. L. **A Superfície da Terra**. São Paulo: Edgard Blucher. p. 154-175.
- CARPIO, J.M.; FORONDA, E.D.; CONDORI, E. 2004. **Balance hídrico microregional de Bolivia, primeros resultados**. Congresso de Ingeniería Civil. Disponível em: <http://www.senamhi.gov.bo/hidrologia/publicaciones/primeros_resultados.pdf>. Acesso em: 12.06.2010.
- CARVALHO, L.A.S. de; STRAUSS, C.; FONSECA, L.M.G. 2009. **Deteminação da resolução espacial efetiva da câmara HRC-CBERS-2B pelo método de espalhamento de borda**. Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. INPE. Pp. 1975-1982. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.13.17.41/doc/19751982.pdf>>. Acesso em: 26/09/2010.
- CERVENY, R.S. 1998. Present Climates of South America. In: HOBBS, J.E.; LINDSAY, J.A.; BRIDGMAN, H.A. **Climates of the southern continents: present, past and future**. London: John Wiley & Sons. P 107-135.
- CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. 1995-2010. **El Niño**. Efeitos globais. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 15/11/2010.
- CRÓSTA, A.P. 1992. **Processamento digital de imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas, SP: IG/UNICAMP.170 p.
- EICHLER, A.; WYLER, B.; MARTMA, T.; ISAKSSON, E.; SCHWIKOWSKI, M. 2010. First results from a new Svalbard ice core. **Anual Report 2009**. Bern: Paul ScherrerInstitut, Labor für Radio-und Umweltchemie. P 40.
- FAN - Fundação Amigos de la Naturaleza. 2009? **Padrão de precipitação e temperatura na Bolívia**. Disponível em: <http://www.fan-bo.org> . Acesso em: 04/10/2009.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2007. **Órbita do CBERS-1, 2 e 2B**. Disponível em:<<http://www.cbbers.inpe.br/?content=orbita1e2e2b>>. Acesso em: 26/08/2010.
- INPE. 2010a. **Catálogo de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. Disponível em:<<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: 15/07/2010.

INPE. 2010b. **Informações sobre a Câmara Pancromática de Alta Resolução - HRC do CBERS-2B**. Disponível em:<<http://www.dgi.inpe.br/CDSR>>. Acesso em: 26/08/2010.

INPE. 2010c. **CBERS – Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres**. Disponível em:<<http://www.cbbers.inpe.br/>>. Acesso em: 26/08/2010.

INPE. 2010d. **As câmaras dos satélites CBERS-1, 2 e 2B**. Disponível em: <http://www.cbbers.inpe.br/pt/programas/cbbers1-2_cameras.htm>. Acesso em: 26/08/2010.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2010?.**IBGE.PAÍSES@**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/paisesat/main.php>>. Acesso em: 21 jun. 2010.

JORDAN, E. 1990a. Verbreitung von Gletschern und neuzeitlichen Möränen in der Cordillera Apolobamba/ChaupiOrco Region (Ostkordillere). Karte 4. In: **Die Gletscher der bolivianischen Anden**. Erdwissenschaftliche Bd. 23. Stuttgart: Franz Steiner Verlag Stuttgart.

JORDAN, E. 1990b. Verbreitung von Gletschern und neuzeitlichen Möränen in der Cordillera Apolobamba/Cololo (Ostkordillere). Region. Karte 5. In: **Die Gletscher der bolivianischen Anden**. Erdwissenschaftliche Bd. 23. Stuttgart: Franz Steiner Verlag Stuttgart.

JORDAN, E. 1990c. Verbreitung von Gletschern und neuzeitlichen Möränen in der Cordillera de Muñecas (Ostkordillere).. Karte 7. In: **Die Gletscher der bolivianischen Anden**. Erdwissenschaftliche Bd. 23. Stuttgart: Franz Steiner Verlag Stuttgart.

JORDAN, E. 1990d. Verbreitung von Gletschern und neuzeitlichen Möränen in der Cordillera Real/Illampu-Ancohuma Region (Ostkordillere). Karte 8. In: **Die Gletscher der bolivianischen Anden**. Erdwissenschaftliche Bd. 23. Stuttgart: Franz Steiner Verlag Stuttgart.

JORDAN, E. 1990e. Verbreitung von Gletschern und neuzeitlichen Möränen in der Cordillera Real/Calzada-Chearoco-Chachacomani Region (Ostkordillere). Karte 9. In: **Die Gletscher der bolivianischen Anden**. Erdwissenschaftliche Bd. 23. Stuttgart: Franz Steiner Verlag Stuttgart.

JORDAN, E. 1990f. Verbreitung von Gletschern und neuzeitlichen Möränen in der Cordillera Real/Nigruni-Condoriri Region (Ostkordillere). Karte 10. In: **Die Gletscher der bolivianischen Anden**. Erdwissenschaftliche Bd. 23. Stuttgart: Franz Steiner Verlag Stuttgart.

JORDAN, E. 1990g. Verbreitung von Gletschern und neuzeitlichen Möränen in der Cordillera Real (Ostkordillere). Saltuni-Huayna Potosi Region. Karte 11. Zongo-Cumbre-Chacaltaya Region. Karte 12. In: **Die Gletscher der bolivianischen Anden**. Erdwissenschaftliche Bd. 23. Stuttgart: Franz Steiner Verlag Stuttgart.

JORDAN, E. 1990h. Verbreitung von Gletschern und neuzeitlichen Möränen in der Cordillera Real (Ostkordillere). Hampaturi-Taquesi Region. Karte 13. Mururata Region. Karte 14. In: **Die Gletscher der bolivianischen Anden**. Erdwissenschaftliche Bd. 23. Stuttgart: Franz Steiner Verlag Stuttgart.

JORDAN, E. 1990i. Verbreitung von Gletschern und neuzeitlichen Möränen in der Cordillera Real/Illimani Region (Ostkordillere). Karte 15. In: **Die Gletscher der bolivianischen Anden**. Erdwissenschaftliche Bd. 23. Stuttgart: Franz Steiner Verlag Stuttgart.

JORDAN, E. 1990j. Verbreitung von Gletschern und neuzeitlichen Möränen in der Cordillera Tres Cruces (Quimsa Cruz) (Ostkordillere). Karte 16. In: **Die Gletscher der bolivianischen Anden**. Erdwissenschaftliche Bd. 23. Stuttgart: Franz Steiner Verlag Stuttgart.

JORDAN, E. 1999. GLACIERS OF BOLIVIA. In: WILLIAMS JUNIOR, R.S.; FERRIGNO, J.G. **SATELLITE IMAGE ATLAS OF GLACIERS OF THE WORLD: GLACIERS OF SOUTH AMERICA**. Washington: United States Government Printing Office, p. 01-02. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/prof/p1386i/bolivia/intro.html>> . Acesso em: 15/04/2010.

KARMANN, I. 2003. Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA, Wilson; TOLEDO, Maria Cristina Motta de; FAIRCHILD, Thomas Rich. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos. Cap. 11, p. 113-138.

NOVO, E.M.L.M. 2008. Comportamento Espectral de Alvos. In: NOVO, Evelyn M. L. de Moraes. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Blucher. Cap. 6, p. 217-252.

McGREGOR, G.R.; NIEUWOLT, S. 1998. Chapter 11. Tropical Climates. In: MCGREGOR, G.R.; NIEUWOLT, S. **Tropical Climatology**. Na introduction to the climates of the low latitudes. London: John Wiley & Sons. P 216-267.

PATCHINEELAM, S.M. Circulação Oceânica. In: NETO, José Antônio Baptista; PONZI, Vera Regina Abelin; SICHEL, Suzana Eleonora (Organizadores). **Introdução à Oceanografia Física**. Editora Interciência: Rio de Janeiro, 2004. P 153-174

PAUL, F.; BARRY, R.G.; COGLEY, J.G.; FREY, H.; HAEBERLI, W.; OHMURA, A.; OMMANNEY, C.S.L.; RAUP, B.; RIVERA, A.; ZEMP, M. 2009. Recommendations for the compilation of glacier inventory data from digital sources. **Annals of Glaciology**, v. 53, n. 50, p.119-126.

PAUL, F.; ANDREASSEN, L.M. 2009. A new glacier inventory for the Svartisen region, Norway, from Landsat ETM+ data: challenges and change assessment. **Journal of Glaciology**, v. 55, n. 192, p.119-126.

RACOVITEANU, A. E.; PAUL, F.; RAUP, B.; KHALSA, S.J.S.; ARMSTRONG, R. 2009. Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space: results of the 2008 Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) workshop, Boulder, Colorado, USA. **Annals of Glaciology**, v. 53, n. 50, p.53-69.

RAMÍREZ, E. 2008. Impactos del cambio climático y gestión del agua sobre la disponibilidad de recursos hídricos para las ciudades de La Paz y El Alto. **Revista Virtual REDESMA**. Vol. 2. pp. 50-61. La Paz: CEBEM-REDESMA. Disponível em: <<http://www.ibcperu.org/doc/isis/9568.pdf>>. Acesso em: 20/11/2010.

RAMÍREZ, E.; FRANCOU, B.; RIBSTEIN, P.; DESCLOITRES, R. G.; MENDOZA, J.; GALLAIRE, R.; POUYAUD, B.; JORDAN, E. 2001. Small glaciers disappearing in the tropical Andes: a case-study in Bolivia: Glaciar Chacaltaya (16° S). **Journal Of Glaciology**, 47, (157), pp.187-194.

RIBEIRO, R.; ARIGONY-NETO, J.; BREMER, U.F.; SIMÕES, J.C.; RAMÍREZ, E. 2010. Potential of CBERS-2B High Resolution Camera (HRC) in snowcover identification. In: ARENAS, César David López; CADENA, Jair Ramírez (Compiladores). **Glaciares, nieves y hielos de América Latina. Cambio Climático y amenazas**. Instituto Colombiano de Geología y Minería: Bogotá. Pp. 165-169.

RIBEIRO, R.R. 2007. **DETERMINAÇÃO DAS VARIAÇÕES DAS GELEIRAS DA CORDILHEIRA TRES CRUCES (BOLÍVIA) ENTRE 1975-2004 PELA ANÁLISE DE IMAGENS DIGITAIS E DADOS CARTOGRÁFICOS**. UFRGS: Porto Alegre. 106 pp.

ROCHA-CAMPOS, A.C.; SANTOS, P.R. dos. 2003. Ação Geológica do Gelo. In: TEIXEIRA, Wilson; TOLEDO, Maria Cristina Motta de; FAIRCHILD, Thomas Rich. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos. Cap. 11, p. 215-246.

RUDLOFF, W. 1981. The climates of the earth. In: RUDLOFF, W. **World Climates with tables of climatic data and practical suggestions**. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft. P 81-93.

SHLÄPPI, M.; CASASSA, G.; RIVERA, A.; GYSEL, M.; SCHWIKOWSKI. 2010. Black carbon concentration in PIO XI ice core, Southern Patagônia ice field. **Annual Report 2009**. Bern: Paul Scherrer Institut, Labor für Radio-und Umweltchemie. P 40.

SIMÕES, J.C. 2004. Glossário da língua portuguesa da neve, do gelo e termos correlatos. **Pesquisa Antártica Brasileira: Brazilian Antarctic Research**. Rio de Janeiro: Pesquisa Antártica Brasileira. pp. 119-154. (4). Disponível em: <<ftp://ftp.cnpq.br/pub/doc/proantar/pab-12.pdf>>. Acesso em: 14 jul. 2009.

SUGDEN, D.E.; JOHN, B.S. 1984. **Glaciers and Landscape: A geomorphological approach**. London: Edward Arnold, pp: 81-128.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME; WGMS – WORLD GLACIER MONITORING SERVICE. 2008. **Global glacier changes: facts and figures**. Genebra: UNEP. Disponível em: <<http://www.grid.unep.ch/glaciers>>. Acesso em: 20 maio 2009.

UNESCO - UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION; IASH – INTERNATIONAL ASSOCIATION OF SCIENTIFIC HYDROLOGY. 1970. **Perennial ice and snow masses**. A guide for compilation and assemblage of data for a world inventory. Paris: Imprimerie-Reliure Mame. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0008/000847/084729eo.pdf>>. Acesso em: 07/07/2010.

VUILLE, M.; FRANCOU, B.; WAGNON, P.; IRMGARD, J.; KASER, G.; MARK, B.G.; BRADLEY, R.S. 2008. Climate change and the tropical Andean glaciers: Past, present and future. **Earth-ScienceReviews**, 89, p 79-96. Disponível em: <http://www.geography.osu.edu/faculty/bmark/2008%20ESR%20Vuille_etal.pdf>. Acesso em 23/06/2010.

WALLEN, R.N. 1992. The work of ice in the Hydrologic Cycle. **Introduction to Physical Geography**. Wm. C. Brown Publishers. pp: 424-447.

WHITE, I.D.; MOTTERSHEAD, D.N.; HARRISON, S.J. 1992a. **The atmosphere and the Earth's surface**. Environmental systems, an introductory text. Second Edition. Ed. Chapman & Hall. Oxford. pp: 202-211.

WHITE, I.D.; MOTTERSHEAD, D.N.; HARRISON, S.J. 1992b. **The glacial system. Environmental systems, an introductory text**. Second Edition. Ed. Chapman & Hall. Oxford. 324-343.

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

ZENG, N. 1999. Seasonal cycle and interannual variability in the Amazon hydrologic cycle. **Journal of Geophysical Research**, 104, (D8): 9097-9106.