

**DETERMINAÇÃO DE MORAINAS DE RETRAÇÃO NA CORDILHEIRA TRES CRUCES,  
BOLÍVIA**

Rafael Ribeiro\* e  
Jefferson Cárdua Simões\*\*

**Resumo:**

Os processos glaciais deixam importantes "registros" de sua atuação, tanto na modificação das formas do relevo previamente existentes como na deposição de material sedimentar. Muitas geleiras localizam-se em áreas remotas, o que torna as medidas no terreno muito caras e de grande dificuldade logística. Uma alternativa a esses métodos é a integração de dados obtidos em campo com dados de sensoriamento remoto. Nosso estudo propõe levantar por técnicas de sensoriamento remoto uma área piloto (cordilheira Tres Cruces) da cobertura de gelo boliviana (67°22' - 67°32'W e 16°47' - 16°09'S). A presença de morainas de retração, em todas as bacias delimitadas deixa claro que durante o Holoceno as geleiras da cordilheira Tres Cruces ocuparam áreas mais amplas do que no presente. Os controles climáticos são também claramente identificados ao examinar-se a altitude da frente da geleira de orientação leste-norte (c5250), cerca de 100-270 m mais elevada do que as geleiras de orientação oeste-sul. Este padrão provavelmente está relacionado com a diferente exposição solar das vertentes. A ocorrência de morainas terminais, abaixo dos 4.500 m de altitude na Cordilheira Oriental, ou 3.500 m na Cordilheira Ocidental, indica a extensão de antigas geleiras durante a Pequena Idade do Gelo (1200 - 1800 A.C).

**Palavras-chave:** Cbers, geleiras tropicais, sensoriamento remoto, Andes, Bolívia

**Abstract:**

Glacial forms and sediments record glacier past activities, by analyzing such records it is possible to reconstruct glacier maximum extend glaciations. However, most of the glaciers are located in the Polar Regions and mountains areas, where field work is restricted by logistical constraints. An alternative solution for such studies is to integrate field and remotely sensed datasets. Our study proposes the use of cartographic and satellite data for identification of frontal moraines and glacier inventory in a test area located in Cordillera Tres Cruces, Bolivia (67°22' - 67°32'W e 16°47' - 16°09'S). The existence of retreat moraines in all studied glacial basins indicates that glaciers of the Cordillera Tres Cruces have occupied a broader area during the Holocene. Climatic and topographic controls are clearly identified by looking at the differences in altitude of fronts from glaciers located respectively in opposite sides of the mountain range. This characteristic is probably related to the different solar exposition of the glacier basins. The presence of terminal moraines below 4.500 m of altitude in the Cordillera Oriental, or below 3.500 m in the Cordillera Ocidental, former glaciers extend during the Little Ice Age (1200 - 1800 A.D.).

**Keywords:** Cbers, tropical glaciers, remote sensing, Andes, Bolivia

\*Centro Polar e Climático - CPC. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9.500, prédio 43136, salas 208 e 210. Porto Alegre - Rio Grande do Sul - Bairro: Agronomia CEP: 91501-970

\*\*Laboratório de Monitoramento da Criosfera, Depto de Geografia Instituto de Ciências Humanas e da Informação, Universidade Federal do Rio Grande Av. Itália, km 8 CEP 96201-900 Rio Grande - RS - Brasil

## INTRODUÇÃO

De maneira geral, durante o século XX, as geleiras perderam parte de suas massas. Projeções do Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC, 2007) indicam, que mantidos os atuais índices de emissão de gases estufa, a temperatura média da Terra irá aumentar entre 1,5 e 5,8° nos próximos 90 anos, aumentando o derretimento das geleiras e conseqüentemente o nível médio dos mares (entre 18 e 59 cm), causando prejuízos econômicos na ordem de bilhões de dólares, refletido na alteração dos sistemas produtivos. Estes últimos sendo influenciados por: secas severas, inundações, tormentas, migração de doenças, modificações no regime hídrico, etc. (TITUS *et al.*, 1991; IPCC, 2007). No mundo todo mais de 3 bilhões de pessoas depende direta ou indiretamente da água que flui das montanhas para sobreviver, sendo que, muitas vezes sua importância transcende a área onde estão localizadas, fornecendo água para os rios localizados nas áreas mais baixas (IPCC, 2007).

Nas áreas tropicais, geleiras existem na América do Sul (entre a Bolívia e a Venezuela). Os Andes têm aproximadamente 99% daquelas situadas nos trópicos (KASER, 1999). Dos 2.500 km<sup>2</sup> de massa glacial tropical na América do Sul, 70% estão no Peru, 20% na Bolívia e 4% no Equador e Colômbia. Alguns estudos indicam que essas geleiras são afetadas pela variabilidade climática regional, especialmente durante as fases positivas dos eventos ENOS (El Niño-Oscilação do Sul), apresentando importante retração nesses períodos (FRANCOU, 2004). Finalmente, essas geleiras constituem as cabeceiras de vários rios formadores da bacia do rio Amazonas, e regulam sazonalmente a vazão na parte superior dos mesmos.

A crescente redução dessas reservas de água doce causa grande preocupação, não só quanto à futura disponibilidade dos recursos hídricos, mas como isso poderá afetar as bacias hidrográficas

alimentadas pelo escoamento das águas de degelo (por exemplo, a do Amazonas, cujas áreas mais elevadas são "alimentadas" diretamente pela fusão das massas glaciais andinas). Conforme MEIER (2002), a intensificação nos índices de escoamento afeta diretamente os componentes do balanço hídrico regional.

Atualmente, variações nas posições frontais das frentes das geleiras dos Andes tropicais são investigadas em pequenas áreas por métodos topográficos e aerofotogramétricos (WGMS, 2009). Entretanto, um amplo inventário glacial, como o proposto pelo projeto *Global Land Ice Measurements from Space* (GLIMS), ainda não foi aplicado para esta área. Esse projeto provê, na rede mundial de computadores, um banco de dados geoespaciais com diversas informações sobre a geleira, obtidas a partir de imagens satelitais dos sensores *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) e *Landsat*.

Este estudo investiga por técnicas de sensoriamento remoto uma área piloto (Cordilheira Tres Cruces, figura 1) da cobertura de gelo boliviana (67°22' - 67°32'W e 16°47' - 16°09'S). A origem de sua massa glacial dá-se pela queda direta de neve, ou pelo transporte de cristais de gelo trazidos pela ação eólica. Ambos os fatores dependem tanto da quantidade de precipitação de neve, quanto da orientação das geleiras com relação à direção das massas de ar úmidas e direção dos ventos dominantes. Também são examinadas as antigas posições frontais de algumas morainas dessa cordilheira, além da construção de um inventário glacial, como proposto pelo projeto *Global Land Ice Measurements from Space* (GLIMS), por meio da análise de imagens satelitais e dados cartográficos. Utiliza o satélite *China-Brazil Earth-Resources Satellite* (CBERS) como uma alternativa aos sensores empregados pelo GLIMS, no monitoramento das massas glaciais tropicais, correspondentes as nascentes do rio Amazonas.

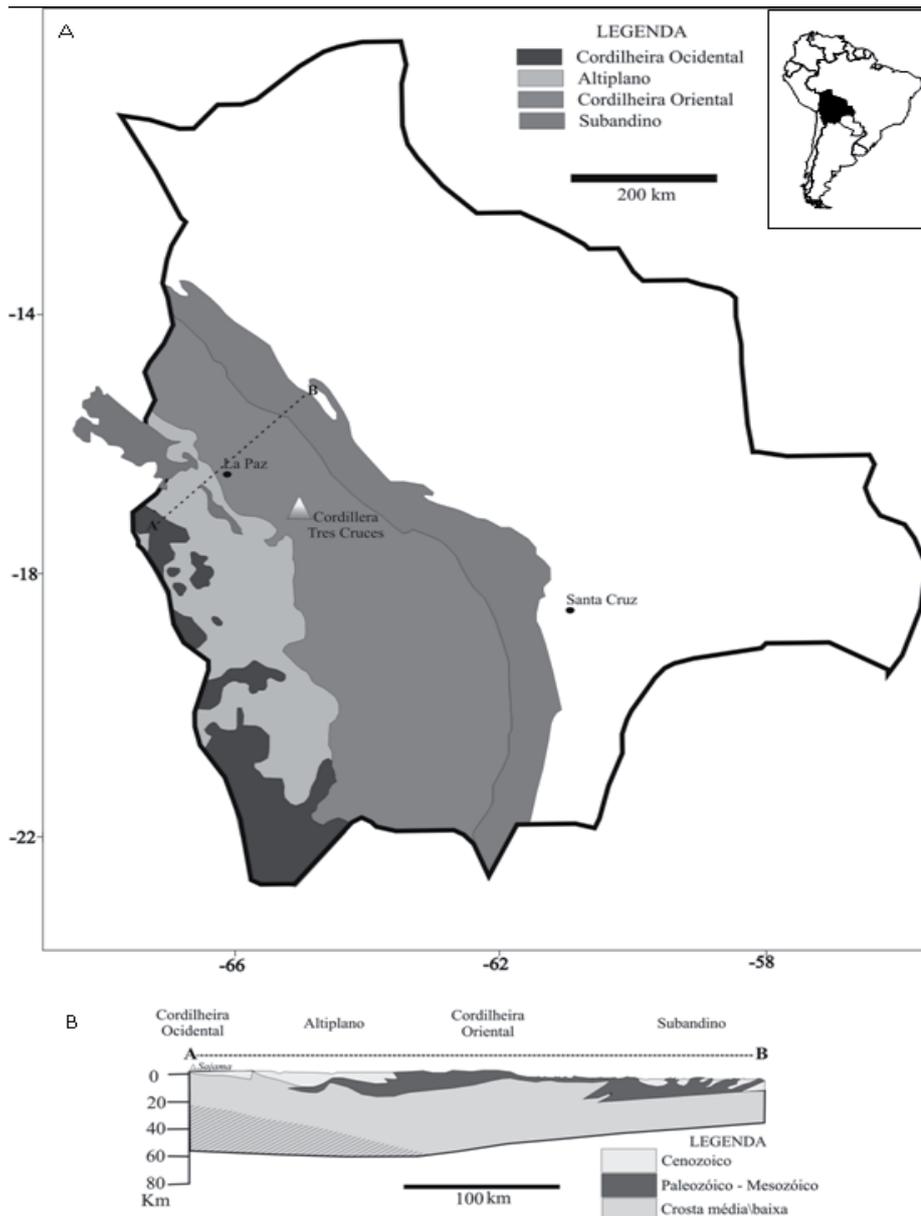


FIGURA 1 : Localização da Cordilheira Tres Cruces e as principais províncias estruturais dos Andes bolivianos (A), a linha branca indica a localização do perfil geológico (B). (Fonte: Montes de Oca, 1995; Cordani *et al.*, 2000).

### ÁREA DE ESTUDO

Na Bolívia as geleiras estão restritas às cotas altimétricas mais elevadas. No sul do país (entre 23°S e 32°S) a altitude da linha de equilíbrio é muito alta para as geleiras se desenvolverem. Portanto, não ocorre acumulação líquida da neve ao longo do ano, mesmo a 5.000 m de altitude. As massas de gelo se desenvolvem apenas sobre alguns cones vulcânicos, acima dos 6.000 m.

As duas principais cadeias de

montanhas que abrigam massas de gelo bolivianas são: A) Cordilheira Ocidental, que é formada por vulcões extintos com geleiras de cratera e pequenos cumes isolados cobertos por gelo; B) Cordilheira Oriental, com aproximadamente 600 km<sup>2</sup> de geleiras. A Cordilheira Oriental pode ser dividida em 5 partes: Apolobamba (14°37' " 15°04'S e 68°58' " 69°14' W); Real (15°45' - 16°40' S e 67°40' " 68°34'W), Muñecas (15°20' - 15°38' S e 68°33' - 68°55' W); Tres Cruces (16°47' - 16°09' S e 67°22' - 67°32'W) e Nevado Santa Vera Cruz (17°03' - 17°04'S e 67°13' - 67°14' W) (figura 2).

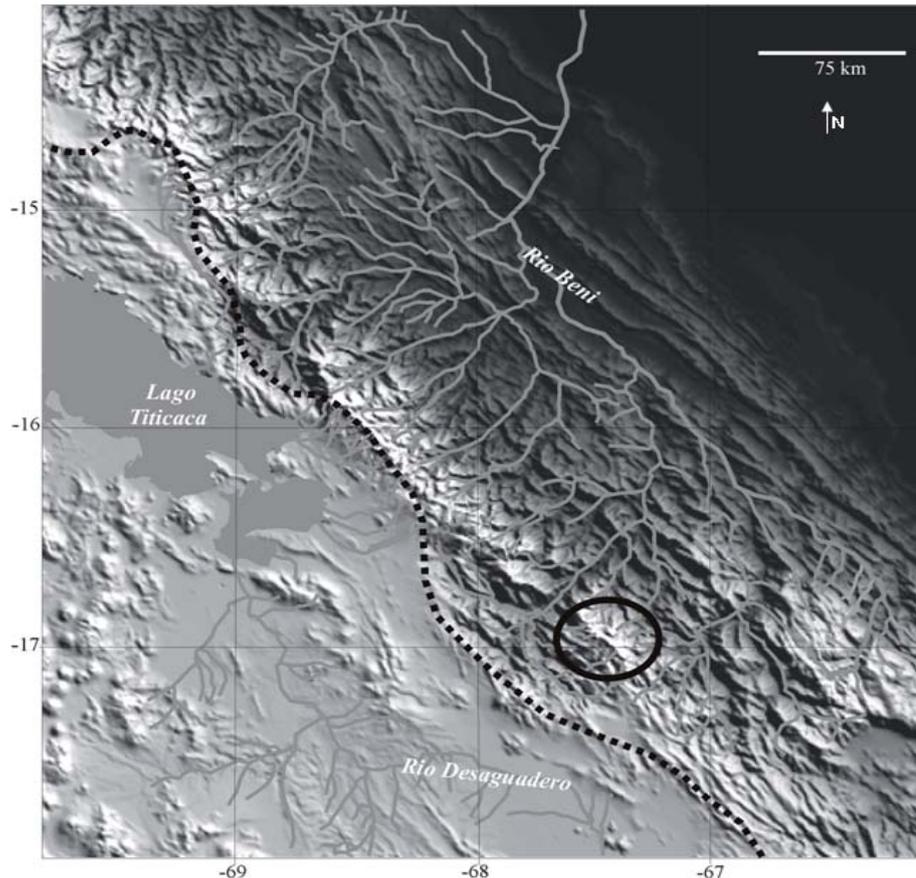


Figura 2 : A cordilheira Oriental da Bolívia; a linha pontilhada divide o sistema hidrográfico amazônico (para leste), do sistema Altiplano (para oeste) (Jordan, 1991), a cordilheira Tres Cruces está indicada pelo círculo preto.

## RETRAÇÃO DAS GELEIRAS DURANTE OS ÚLTIMOS QUATRO SÉCULOS

Durante o período máximo da última Idade do Gelo (cerca de 18.000 anos antes do presente), a cobertura glacial da região era muito maior do que no presente, incluindo um grande número de montanhas e vulcões. Numerosos grupos de morainas destacam-se na morfologia atual da Cordilheira Oriental. RABATEL (2005), pela liquienométrica em 13 sítios nessa cordilheira, a partir do vale de Ichu Kota (o sítio mais ao norte, ~16°S) e a Cordilheira Tres Cruces (mais ao Sul, ~17°S), encontrou resposta homogênea das geleiras às flutuações climáticas recentes, desde a sua fase máxima na Pequena Idade do Gelo<sup>1</sup> (*Little Ice Age*, ao redor de 1.660 D.C. para a Bolívia), até o final do século XX. Ele identificou 10 grupos de morainas (figura 3), começando por aquelas mais afastadas das frentes atuais (que atestam a extensão máxima

das geleiras durante a Pequena Idade do Gelo), até as mais próximas das suas frentes, sendo respectivamente numeradas de 1 (mais antiga) até 10 (mais recente).

Nesse mesmo estudo foi possível identificar as morainas que se desenvolveram durante o máximo da Pequena Idade do Gelo e praticamente permaneceram nessa posição até a metade do século XVIII. Entre 1730 e 1740, deu-se início à retração contínua das geleiras que persiste até os dias atuais. Segundo esses estudos paleoclimáticos, no período da máxima extensão das geleiras, o total de precipitação anual era 20 a 30% maior do que o atual, e a temperatura do ar era aproximadamente 0,4 a 0,6 °C mais baixa. A partir da metade do século XVIII, o recuo glacial esteve associado à queda na precipitação. No final do século XIX e início do XX, a retração glacial acelerou-se, sendo relacionada a numerosos e intensos eventos *El Niño*.

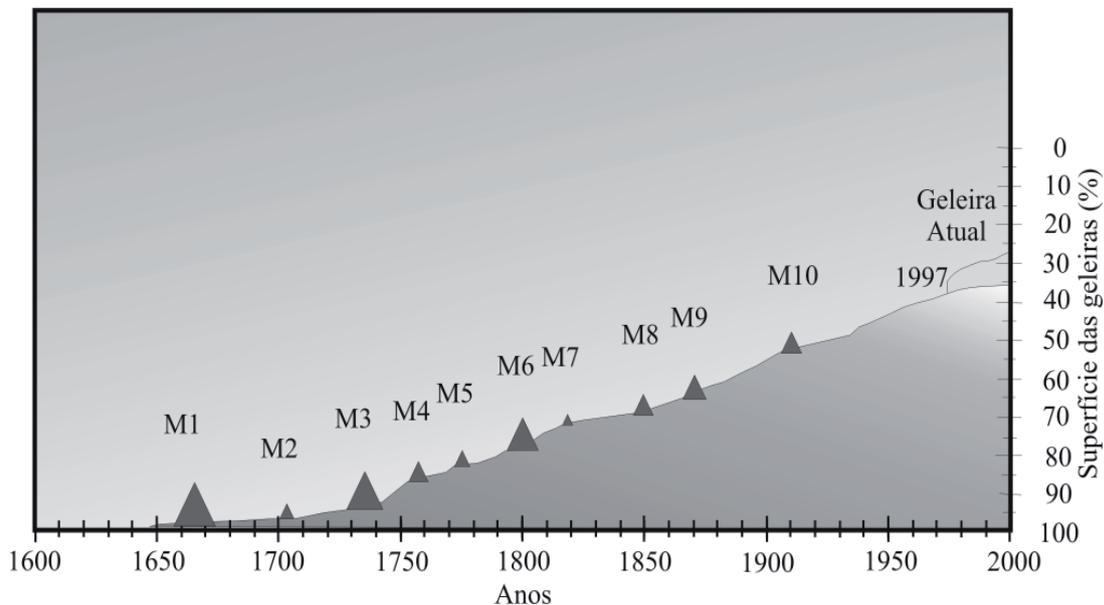


Figura 3 : Esquema morfoestratigráfico representando as 10 principais morainas identificadas na Cordilheira Oriental e cuja formação iniciou na Pequena Idade do Gelo (M 1, a mais antiga), (Fonte: Rabatel, 2005).

## DADOS UTILIZADOS

### **Base de dados digitais : China-Brazil Earth-Resources Satellite**

O programa *China-Brazil Earth-Resources Satellite* (CBERS) nasceu da parceria entre o Brasil e a China no segmento de tecnologia científica espacial. O lançamento do satélite CBERS-2 ocorreu em 21 de outubro de 2003, transportando três sensores: uma Câmera Imageadora de Alta

Resolução (*Hight Resolution CCD Camera*); o Imageador por Varredura de Média Resolução (*Infra – Red Multispectral Scanner*) e a Câmera Imageadora de Amplo Campo de Visada (*Wide Field Imager*). Sua órbita é hélio-síncrona a uma altitude de 778 km e faz cerca de 14 revoluções por dia, conseguindo obter a cobertura completa da Terra a cada 26 dias. No nosso estudo foi empregada uma imagem desse satélite, do sensor CCD (tabela 1), adquirida em 19 de maio de 2004, e disponibilizada gratuitamente pelo INPE (<http://www.dgi.inpe.br/>).

<b>Câmera</b>	<b>Banda/Nome</b>	<b>Intervalo Espectral (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Resolução Espacial (m)</b>	<b>Largura da faixa imageada (km)</b>
<b>CCD</b>	2	0,52 – 0,59 $\mu\text{m}$	20	113
	3	0,63 – 0,69 $\mu\text{m}$	20	113
	4	0,77 – 0,89 $\mu\text{m}$	20	113

TABELA 1 : Características das bandas do satélite CBERS-2 utilizadas no estudo.

### **Base de dados cartográficos**

As informações topográficas foram obtidas do mapa *Verbreitung Von Gletschern und neuzeitlichen Moränen in der Cordillera Tres Cruces (Quimsa Cruz) (Ostkordillere)* escala 1:70.000 , projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), produzido pelo Instituto de Fotogrametria e Engenharia de Levantamentos e pelo Instituto de Geografia da Universidade de Hanover, e publicado em JORDAN (1991), sendo este baseado em pontos de controle adquiridos em 1975 pelo Instituto

Geográfico Militar (IGM) da Bolívia.

### **MÉTODOS E INSTRUMENTOS DE ANÁLISE**

Existem 156 geleiras na Cordilheira Tres Cruces (JORDAN, 1998), das quais optou-se por analisar somente sete geleiras, localizadas em vertentes de diferentes exposições e, portanto, em condições climáticas diversas. Outro critério importante foi a extensão das massas de gelo, pois, devido à resolução espacial do satélite CBERS-2 (20 m), geleiras muito pequenas seriam de difícil delimitação.

Usando imagens satelitais, juntamente com informações topográficas obtidas de um mapa da cordilheira Tres Cruces, foi possível integrar esses dados em um Sistema de Informações Geográficas (SIG). O objetivo foi desenvolver um banco de

dados que possibilitasse a quantificação da variação de altitude, das morainas de algumas geleiras da cordilheira Tres Cruces. A figura 4 apresenta o fluxograma com as etapas de processamento e análise dos produtos obtidos.

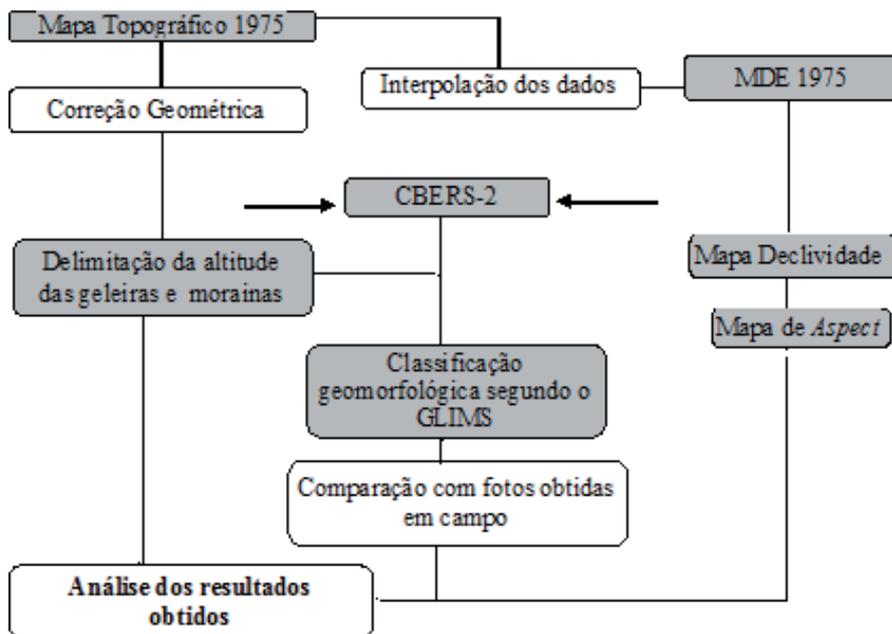


FIGURA 4 : Fluxograma com as etapas de processamento e de análise dos produtos obtidos.

#### ***Classificação das geleiras de acordo com as classes morfológicas utilizadas pelo Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS)***

Atualmente, variações nas posições frontais das frentes das geleiras dos Andes bolivianos são investigadas em pequenas áreas (*por ex.*, geleiras Zongo, 16,25°S, 68,17°W; Charquinni, 16,17°S, 68,09° W; e Chacaltaya, 16,35°S, 68,12°W, por métodos topográficos e aerofotogramétricos tradicionais (WGMS, 2009). Entretanto, um amplo inventário glacial, como o proposto pelo projeto GLIMS, ainda não foi aplicado para essa área. Esse projeto disponibiliza, na rede mundial de

computadores, um banco de dados geoespaciais com diversas informações sobre as geleiras do planeta, obtidas a partir de imagens satelitais ([www.glims.org](http://www.glims.org)).

A metodologia proposta pelo GLIMS baseia-se na observação de 9 parâmetros que descrevem as geleiras em termos morfológicos e dinâmicos (*i.g.*, recuo/avanço da frente), além da presença de morainas (atuais ou pretéritas). Neste estudo utilizamos somente 5 desses parâmetros, pois não consideramos as informações referentes à dinâmica glacial). A tabela 2 apresenta os parâmetros utilizados nesta classificação, os critérios

empregados são descritos detalhadamente em Rau *et al.*, 2004.

#### ***Geração de modelos digitais de elevação a partir de dados cartográficos***

A partir de pontos com cotas no mapa topográfico de 1975, estabelecidos por métodos aerofotogramétricos tradicionais (aerotriangulação), foi possível gerar um Modelo Digital de Elevação (MDE) com 20 metros de resolução. Usando o *software* Arc-Info™ 8.0.1, foram testados dois métodos de interpolação (com o objetivo de escolher o melhor) *Triangulated Irregular Network* e TOPOGRID. Para verificar cada modelo resultante, foram usados pontos de controle não empregados nos processos de interpolação, sendo

que o MDE elaborado pelo TOPOGRID resultou nos menores erros verticais (média de  $\pm 6$  m).

#### ***Delimitação das bacias de drenagem***

A delimitação precisa dos limites das geleiras e morainas foi obtida pela integração das informações do mapa topográfico com os MDEs (figura 5). No entanto, várias vezes a parte frontal da geleira estava coberta por sedimentos, resultando em uma resposta espectral similar ao terreno do entorno, mascarando, assim, a sua extensão real. As áreas claramente identificadas foram digitalizadas manualmente sobre as imagens. Já nas áreas em que existiam dúvidas, as geleiras eram comparadas com a fotografia aérea (figura 6) e só então delimitadas.

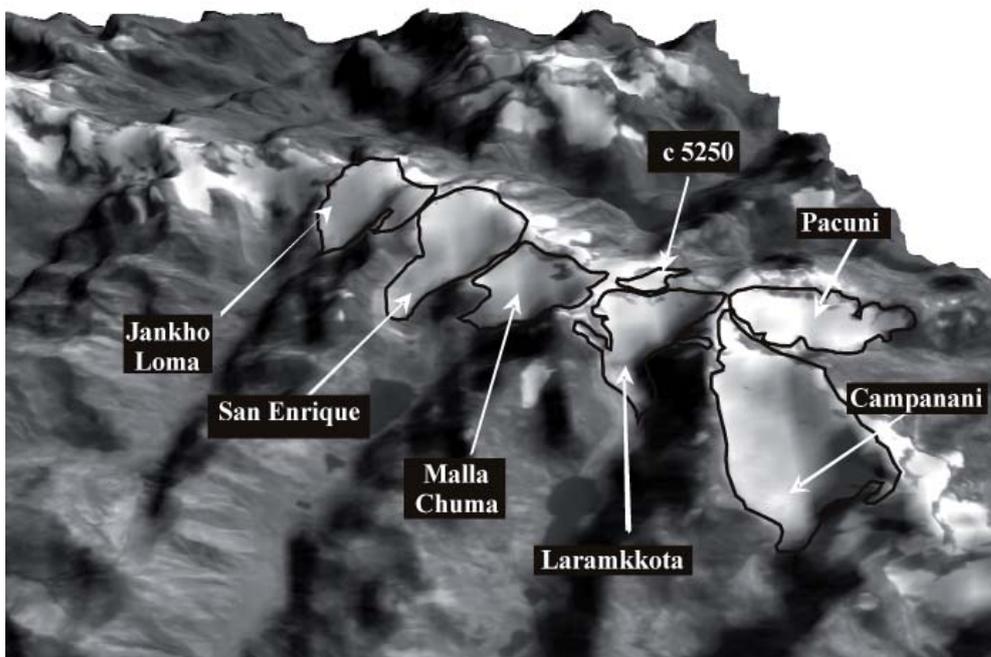


FIGURA 5 : Visada sudeste da Cordilheira Tres Cruces, a imagem CBERS-2 (4,3,2) está sobreposta ao MDE/ASTER. Em tons de cinza os limites das geleiras analisadas.

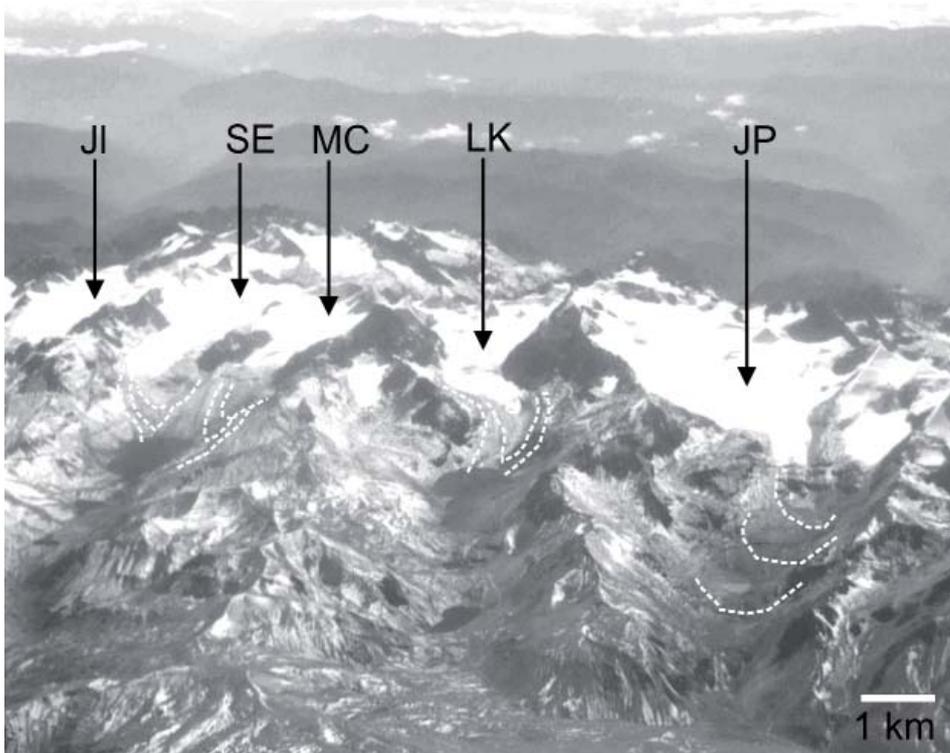


Figura 6: Fotografia aérea oblíqua do sudoeste da Cordilheira Tres Cruces. No destaque as geleiras analisadas que são visualizadas nesta tomada (JL = Jonkho Loma, SE = San Enrique, MC = Malla Chuma, LK = Laramkkota, JP = Jacha Pacuni, CN = Campanani), as linhas pontilhadas indicam algumas morainas identificadas. Foto obtida por Sarah Griffin em Junho de 2004.

## RESULTADOS : MORFOLOGIA E VARIAÇÕES DAS GELEIRAS.

Devido às mesmas características topográficas, onde as linhas de crista da cordilheira determinam as paredes dos vales e confinam a massa glacial, praticamente todas geleiras analisadas são "geleiras de vale". As bacias glaciais são bem nítidas e facilmente identificadas nas imagens satelitais, pois os numerosos picos montanhosos (normalmente acima de 5.500 metros de altitude) que circundam a área analisada comportam-se como verdadeiros divisores entre as geleiras (*por ex.*, Nevado Atoroma, Cordilheira San Enrique, Cordilheira Bengala,

Cordilheira San Pedro, Cordilheira Sofia, Gigante Grande e Don Luis, figuras 7, 8, 9, 10 e 11).

Os controles climáticos e topográficos são claramente identificados ao comparar a altitude da frente da geleira de orientação leste-norte (*por ex.*, geleira c5250), cerca de 100-270 m mais elevada do que as geleiras de orientação oeste-sul (figura 12). Essa característica estaria relacionada à diferente exposição solar das vertentes. Durante a manhã as nuvens ainda se encontram em altitudes baixas, expondo as geleiras de orientação leste-norte à radiação direta do sol. Já no período da tarde, a nebulosidade estaria em sua posição mais elevada

na troposfera, absorvendo grande parte da radiação, deixando as vertentes de orientação oeste-sul mais abrigadas (JORDAN, 1985). A presença de morainas de retração, em todas as bacias delimitadas, deixa claro que durante a Pequena Idade do Gelo as geleiras da cordilheira Tres Cruces ocuparam áreas mais amplas do que no presente.

#### ***Geleira Jankho Loma***

Esta geleira é a nascente mais elevada do rio Atoroma Chuma, um dos afluentes do rio Araca. É uma geleira de vale (figura 7, tabela 2), com uma superfície de 1,59 km<sup>2</sup>, formada por duas línguas, ambas de orientação sul-oeste. Essas surgiram pela fragmentação que ocorreu na língua principal decorrente do derretimento durante a década de 1990. Os pontos mais e menos elevados estão a 5.594 m e 4.964 m de altitude, respectivamente. As morainas de retração, a 4.661 m de altitude, indicam a máxima extensão durante a Pequena Idade do Gelo, aproximadamente 303 m abaixo da altitude da frente de gelo observada nos dias atuais, sua bacia possui forma simples e sem

#### ***Geleira San Enrique***

Tendo orientação sul-oeste, esta geleira de vale (figura 7 e tabela 2) com 2,16 km<sup>2</sup> de área, tem altitudes máximas e mínimas de 5.642 m e 5.053 m, respectivamente. Suas águas de degelo, juntamente com as da geleira ao lado (Malla Chuma), formam a lagoa Octa Kkota. Esta é a nascente do rio Malla. Durante a Pequena Idade do Gelo a altitude do término era 4.715 m, aproximadamente 338 m mais baixa do que no Presente.

#### ***Geleira Malla Chuma***

Esta geleira de vale (figura 7 e tabela 2), localizada na face sul-oeste da cordilheira Tres Cruces, possui altitude máxima e mínima de 5.632 m (cordilheira Bengela) e 5.093 m respectivamente. Assim como a geleira San Enrique, suas águas de degelo acumulam-se na lagoa Octa Kkota. As morainas terminais indicam a máxima extensão desta massa glacial em 4.741 m altitude durante a Pequena Idade do Gelo, cerca de 352 m mais baixa do que a posição atual.

#### ***Geleira Laramkkota***

Sua bacia possui forma composta (figura 8 e tabela 2) por ter dois "braços" que se unem à língua principal. A análise de seu perfil topográfico (figura 12.b) indica uma grande irregularidade subglacial na parte central, gerando uma grande tensão longitudinal na geleira e, por consequência, dando origem às fendas transversais na direção do fluxo. Possui superfície de 1,83 km<sup>2</sup>, com as elevações máximas e mínimas entre 5.713 m (cordilheira Sofia) e 5.037 m, respectivamente. Durante a Pequena Idade do Gelo sua frente atingiu a altitude de 4.835 m. A geleira está na face sul-oeste da cordilheira, onde suas águas de degelo dão origem à lagoa Laramkkota, pertencendo à bacia hidrográfica do rio Yaco.

#### ***Geleira Campanani***

Com 4,00 km<sup>2</sup>, é a geleira com maior área na cordilheira Tres Cruces. Assim como a San Enrique, a geleira Campanani também apresenta na sua parte frontal um pequeno lago originado pelo processo de retração glacial. Na imagem CBERS-2 (figura 10 e tabela 2) pode-se observar nítidas morainas terminais, as quais atestam sua máxima extensão durante a Pequena Idade do Gelo a 4.805 m de altitude, cerca de 308 m mais baixa do que a posição atual (5.113 m). Diferentemente das demais geleiras analisadas, a Campanani pode ser considerada um campo de gelo, pois a massa glacial não é confinada pelas paredes do vale, porém a cobertura glacial não é espessa o suficiente para cobrir montanhas e formar uma calota (Simões,

#### ***Geleira Jacha Pacuni***

Suas águas de degelo são as nascentes do rio Khatu. Este é um dos afluentes do rio Colquiri. Ocupando uma área de acumulação na face leste (2,23 km<sup>2</sup>), esta geleira de vale, de orientação sul-leste possui forma composta, tendo as elevações máximas e mínimas em 5.665 e 5.039 m respectivamente (figura 9 e tabela 2). De acordo com as morainas de retração, durante a Pequena Idade do Gelo, a frente atingiu 4.794 m (245 m mais baixa que no presente).

### Geleira c5250

Nas figuras 12 a e 12 b é possível constatar que as vertentes leste-norte apresentam pendentes um pouco mais acentuadas que o lado oposto (oeste-sul), tornando disponível uma menor

área para a acumulação de neve, podendo aumentar, também, a velocidade da retração. A geleira c5250 tem suas elevações máximas e mínimas em 5.632 m e 5.050 m, respectivamente. Durante a Pequena Idade do Gelo suas morainas de retração indicam que ela avançou até 4.796 m de altitude (Tabela 2).

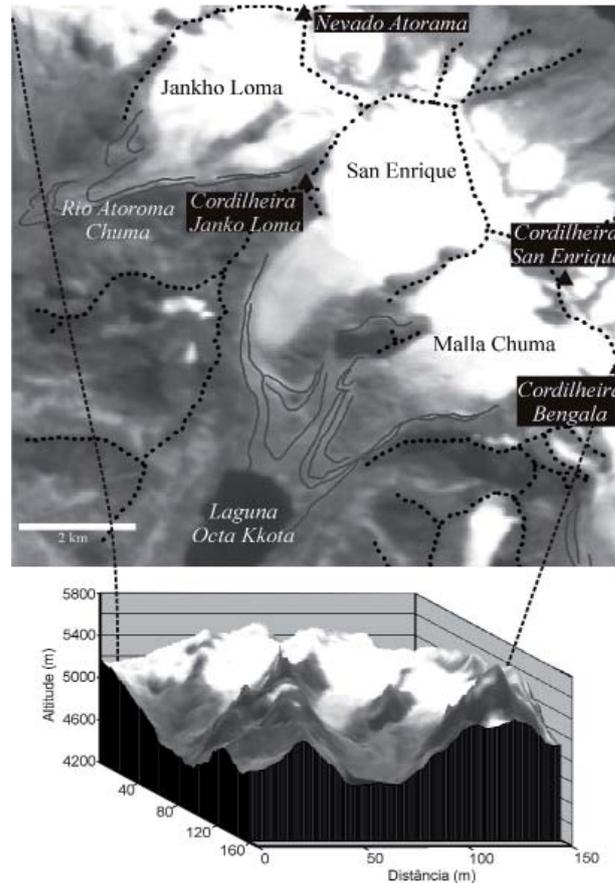


FIGURA 7 : Imagem CBERS-2 (4, 3, 2) das geleiras Jankho Loma, San Enrique e Malla Chuma. Acima, na imagem CBERS-2 (4, 3, 2), as linhas cinzas indicam a posição das morainas, e as linhas pretas pontilhadas marcam as cristas que circundam as bacias glaciais; abaixo, o MDE sobreposto à imagem CBERS.

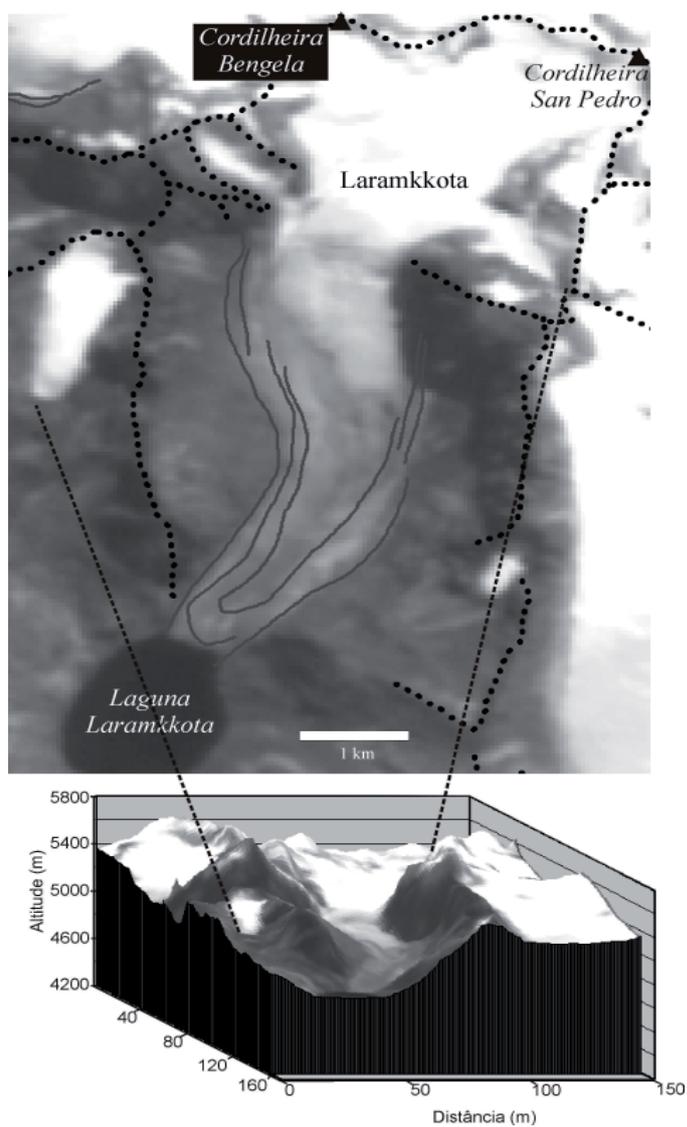


FIGURA 8 : Imagem CBERS-2 (4, 3, 2) da geleira Laramkkota. Acima, na imagem CBERS-2 (4, 3, 2), as linhas indicam a posição das morainas, e as linhas pretas pontilhadas marcam as cristas que circundam as bacias glaciais; abaixo, o MDE sobreposto à imagem CBERS.

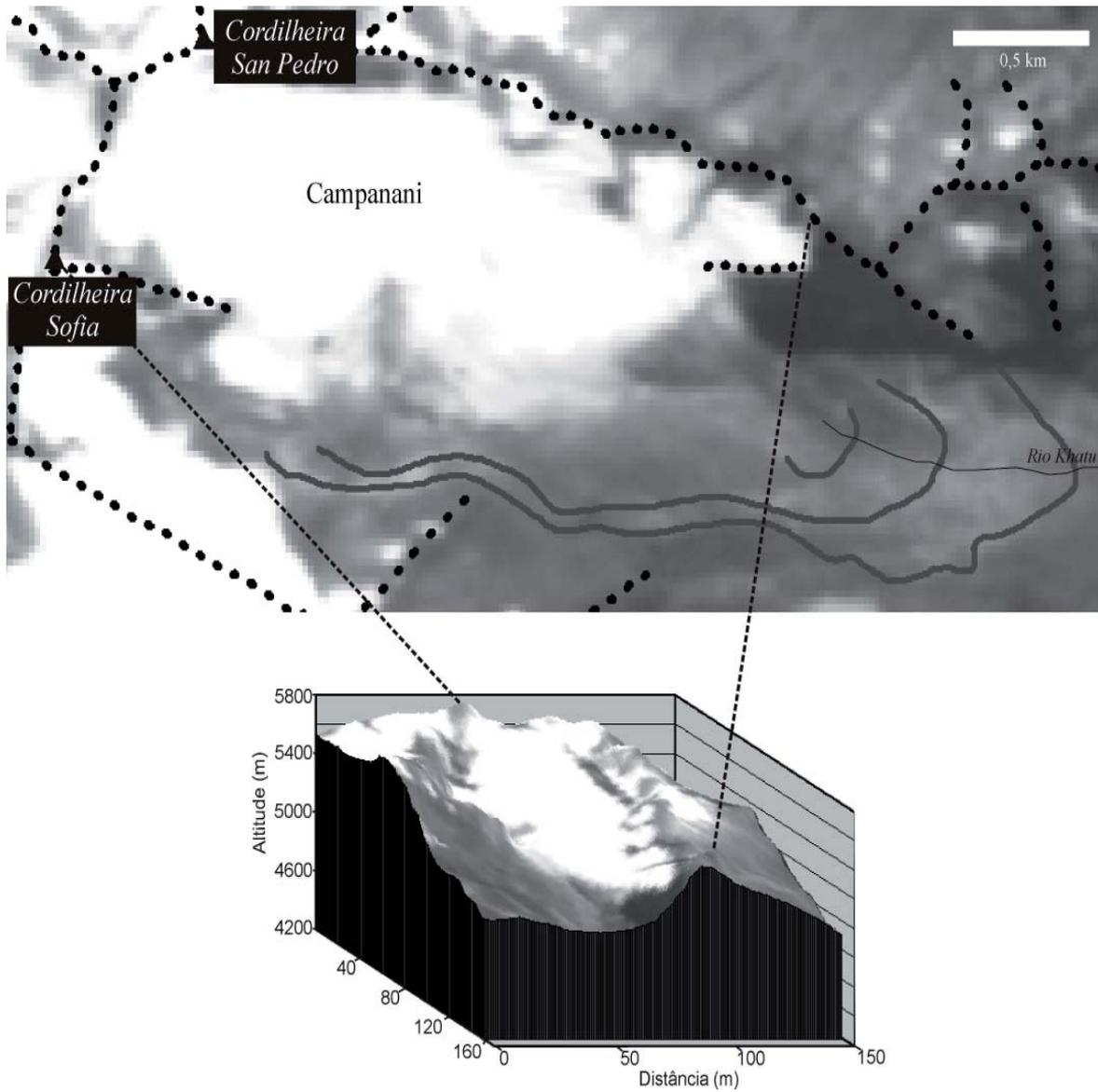


FIGURA 9 : Imagem CBERS-2 (4, 3, 2) da geleira Campanani. Acima, na imagem CBERS-2 (4, 3, 2), as linhas cinzas indicam a posição das morainas, e as linhas pretas pontilhadas marcam as cristas que circundam as bacias glaciais; abaixo, o MDE sobreposto à imagem CBERS.

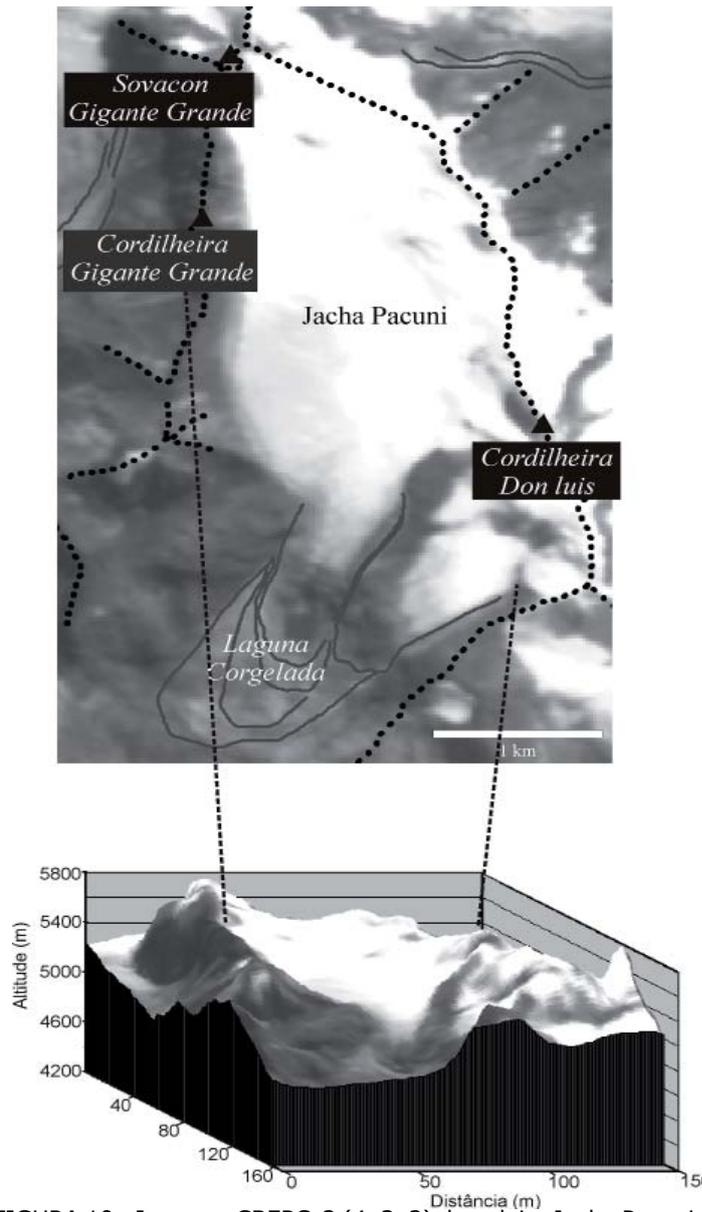


FIGURA 10 : Imagem CBERS-2 (4, 3, 2) da geleira Jacha Pacuni. Acima, na imagem CBERS-2 (4, 3, 2), as linhas cinzas indicam a posição das morainas, e as linhas pretas pontilhadas marcam as cristas que circundam as bacias de glaciais; abaixo, o MDE sobreposto à imagem CBERS.

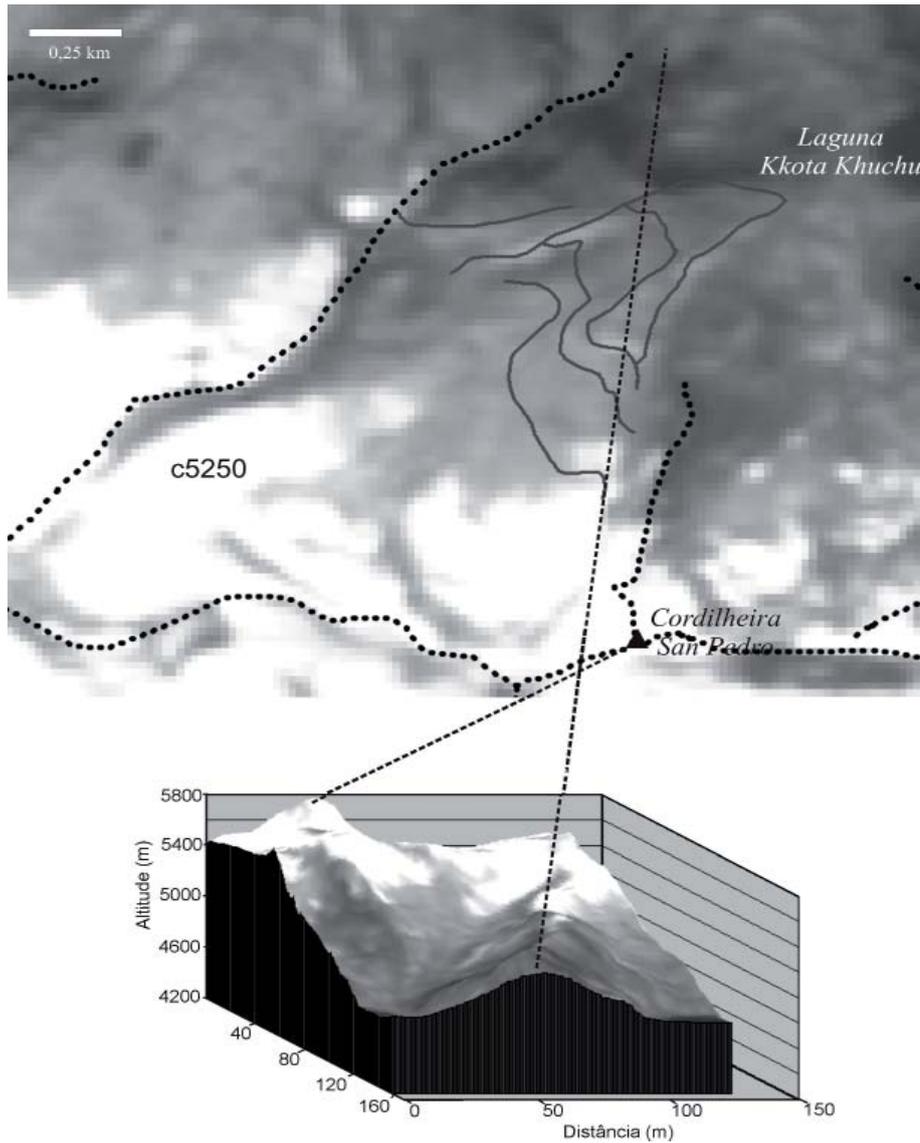


FIGURA 11 : Imagem CBERS-2 (4, 3, 2) da geleira c 5250. Acima, na imagem CBERS-2 (4, 3, 2), as linhas cinzas indicam a posição das morainas, e as linhas pretas marcam as cristas que circundam as bacias glaciais; abaixo, o MDE sobreposto à imagem CBERS, a visada foi realizada de norte para o sul.

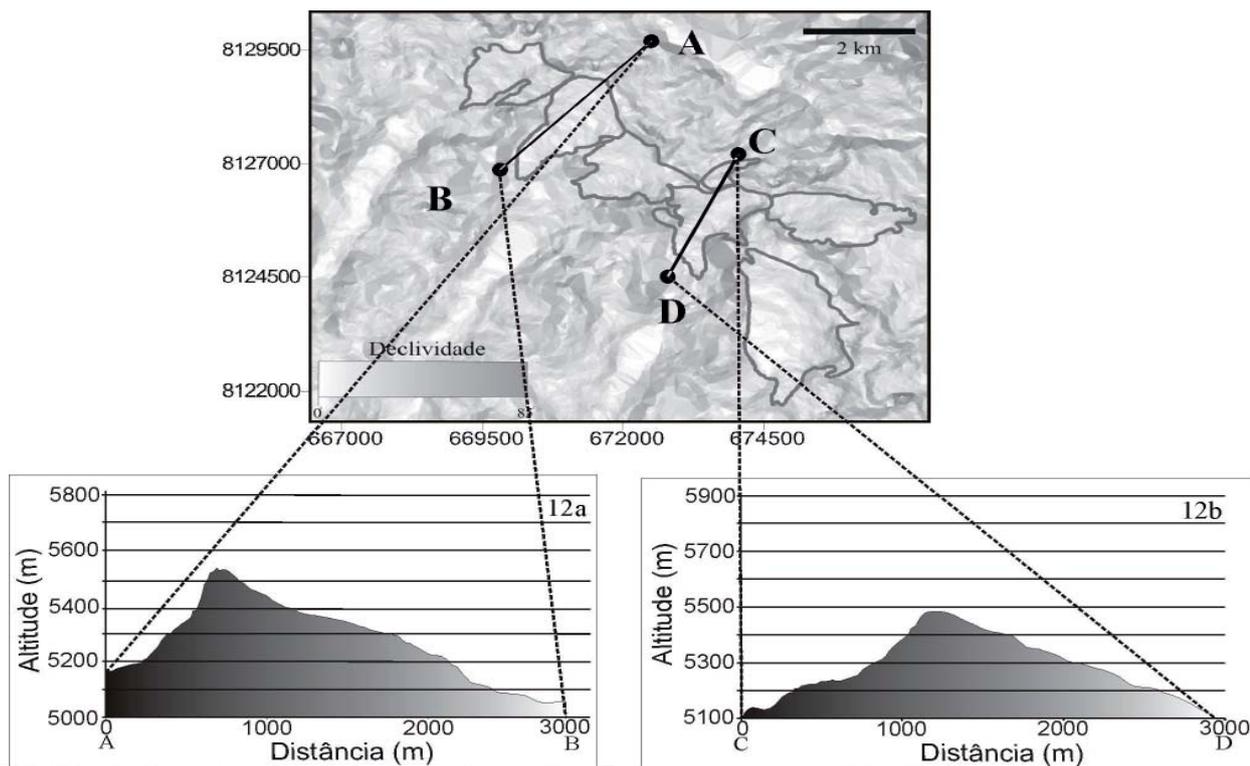


FIGURA 12: Mapa de declividade da Cordilheira Tres Cruces baseado no MDE/ASTER. As linhas pretas indicam os perfis topográficos apresentados nas figuras 12a e 12b.

Geleira	Jankho Loma	Jacha Pacuni	San Enrique	Malla Chuma	Laramkkota	Campanani	c5250
Classificação Primária	vale	vale	vale	vale	vvale	Campo de gelo	vale
Forma	Bacia simples	Bacia composta	Bacia simples	Bacia simples	Bacia composta	Bacia simples	Bacia composta
Característica Frontal	Coalescente	Normal	Normal	Normal ou mista	Normal	Normal	Normal
Característica Longitudinal	Regular	Regular	Regular	Regular	Cascadeada	Regular	Regular
Tipo de Moraina	Lateral e terminal						

TABELA 2 : Classificação morfológica de acordo com as características do *Global Land Ice Measurements from Space* (Rau *et al.*, 2004).

## CONCLUSÃO

Na análise geomorfológica da cordilheira, a presença de morainas de retração, em todas as bacias delimitadas, deixa claro que durante a Pequena Idade do Gelo as geleiras da cordilheira Tres Cruces ocuparam áreas mais amplas do que no presente (estendendo-se entre 245 a 352 m abaixo da altitude das frentes atuais). Os controles climáticos são também claramente identificados ao examinar-se a altitude da frente da geleira de orientação leste-norte (c5250), cerca de 100–270 m mais elevada do que as geleiras de orientação oeste-sul. Esta característica provavelmente está relacionada, à diferente exposição solar das vertentes. Em média as morainas terminais encontram-se a 308 m abaixo da altitude da frente de gelo observada nos dias atuais. Assim como os demais produtos gerados para o projeto internacional GLIMS, os dados resultantes do estudo servem como linha de base para futuros estudos das mudanças glaciais nas geleiras da Cordilheira Tres Cruces. Nesse contexto, dados satelitais de alta resolução espacial (2,7 m) obtidos pelo sensor HRC (*High Resolution Camera*) do satélite CBERS-2B poderão ser utilizados para a análise das pequenas geleiras não consideradas neste trabalho.

### Agradecimentos:

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que financiou este estudo por meio do projeto N° 4905287/2007-0; "Variações climáticas e mudanças nas geleiras formadoras das cabeceiras da bacia de drenagem do rio Madeira". Programa Sul-Americano de Apoio às Atividades de Cooperação em Ciência e Tecnologia (PROSUL).

### Autor colaborador:

Jorge Arigony-Neto

## Bibliografia

CORDANI, U.G.; TEIXEIRA, W.; SINARI, C.C.G.; BASEI, A.S. Crustal Evolution of the South American Platform. In: CORDANI, U.G.; MILANI, E.J.; THOMAZ FILHO, D. e CAMPOS, A. (ed.). Tectonic Evolution of South America. 31 Int. Geol. Congr., Rio de Janeiro, 2000, p. 19–40.

DGI/INPE - Divisão de geração de Imagens/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Consultado em maio de 2009.

FRANCOU, B.; VUILLE, M.; FAVIER, V E CACERES, B. New evidence for an ENSO impact on low latitude glaciers: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28'S. *Journal of Geophysical Research*, 109, 2004, D18106, doi:10.1029/2003JD004484.

GLIMS - Global Land Ice Measurement from Space. Disponível em: <<http://www.glims.org>>. Consultado em maio de 2009.

IPCC. Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007, 989p.

JORDAN, E. Recent glacier distribution and present climate in the Central Andes of South América: *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glacialgeologie*, 21, 1985, 213–224.

JORDAN, E. Die Gletscher der Bolivianischen Anden. Eine photogrammetrisch — kartographische Bestandsaufnahme der Gletscher Boliviens als Grundlage für Klimatische Deutungen und Potential für die wirtschaftliche Nutzung. Franz Steiner Verlag. Tese (doutorado). Stuttgart, 1991, 365p.

JORDAN, E. Glaciers of Bolivia. In: WILLIAMS, R., Jr. e FERRIGNO, J. (ed.) Satellite Image Atlas of Glaciers of the World: U.S. Geological Survey Professional Paper 1386-I-5 (Glaciers of South America), 1998, 206p.

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

MEIER, M. F.; DYURGEROV, M. How Alaska affects the world. *Science*, 297, 2002, 350-351.

MONTES DE OCA, I. Geography and climate of Bolívia. *Bulletin de L'Institut Français D'Etudes Andines*, 24 (3), 1995, 357-368.

RABATEL, A. Chronologie et interprétation paléoclimatique des fluctuations des glaciers dans les Andes de Bolivie (16°S) depuis le maximum du Petit Age Glaciaire (17ème siècle). Tese (doutorado). Grenoble, 2005, 196p.

RAU, F.; MAUZ, F.; VOGT, S.; KHALSA, S. J. S.; RAUP, B. Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual Glacier Classification Guidance for the GLIMS Glacier Inventory. GLIMS Regional Center 'Antarctic Peninsula'. Alemanha, Institut für Physische Geographie, Freiburg, 2004, 36 p.

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

TITUS, J.G.; PARK, R.; LEATHERMAN, S.; WEGGEL, R.; GREENE, M.; MAUSEL, P.; TREEHAN, M.; BROWN, C.; YOHE, G. Greenhouse effect and sea level rise: the cost of holding back the sea. *Coastal Management*, 19 (3), 1991, 171-204.

WGMS, The World Glacier Inventory. World Glacier Monitoring System. Disponível em: <<http://www.geo.unizh.ch/wgms/mbb/mb04/sum04.html>> Consultado em maio de 2009.

Trabalho enviado em fevereiro de 2010  
Trabalho aceito em agosto de 2010