

## HISTÓRIA CLIMÁTICA RECENTE DOS ANDES CENTRAIS BOLIVIANOS PELA ANÁLISE DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO E DE TESTEMUNHO DE GELO

Rafael da Rocha Ribeiro<sup>1</sup>

Edson Ramirez<sup>2</sup>

Jefferson Cardia Simões<sup>1</sup>

Norberto Dani<sup>1</sup>

CláudioWilson Mendes Júnior<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro Polar e Climático, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

r.ribeiro@ufrgs.br, jefferson.simoes@ufrgs.br, norberto.nadi@ufrgs.br  
geoclaudio@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Instituto de Hidráulica e Hidrología, Universidad Mayor de San Andrés, Bolívia  
eramirez@acelerate.com

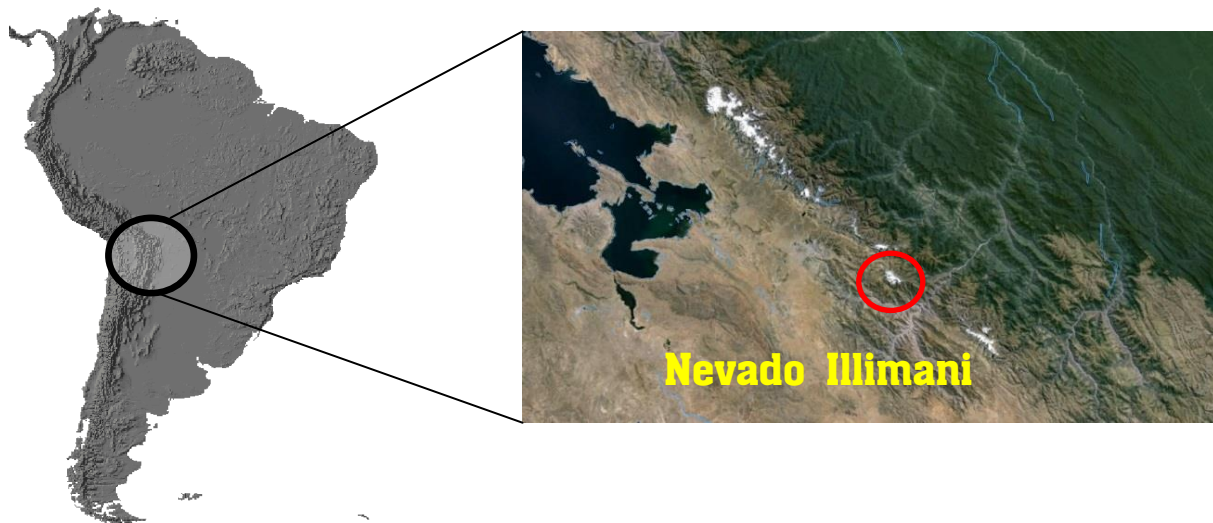
**Abstract.** This article compares two different techniques to study the environment in South America western. One of these techniques is the ice cores, which can provide evidence about past climate conditions in a particular location. The other technique is remote sensing, which by analysis of aerial photographs / satellite images from different years also informs about changes that are occurring in the environment. In this article, we compare the analysis with these two techniques in a group of glaciers located in the Andes (Nevado Illimani, Bolivia - 67°44' W and 16°38' S) between 1960 and 2009 and try to interpret these results in terms of environmental changes in this South America region. Comparison of changes in area with rates of net accumulation of Nevado Illimani identified that the period of lower glacier retreat (1963-1983) coincided with the stabilization of rates of accumulation in the ice core. After 1980, the decrease in ice core accumulation was accompanied by increased shrinkage of the glacier surface. The decreases in ice mass and the rate of net accumulation observed in this period are probably related to greater frequency and intensity of El Niño events that occurred from the late 1970s until the early 2000s.

**Palavras-chave:** remote sensing, photogrammetry, climatic change, sensoriamento remoto, fotogrametria, mudanças climáticas

### 1. Introdução

Várias razões poderiam justificar o interesse pelas geleiras andinas. Em primeiro lugar, essas geleiras são importantes indicadores de mudanças climáticas; além disso, elas desempenham um papel importante no manejo dos recursos hídricos. Atuam como reguladores do regime hidrológico em quase todas as regiões, particularmente naquelas que são submetidas a estações secas (e.g. sul do Peru e Bolívia). Nos anos em que as chuvas são escassas, a fusão do gelo permite manter um caudal mínimo de água e, assim, abastecer de água os centros urbanos, plantas de geração hidroelétrica, etc. (Marengo *et al.*, 2011).

O objetivo deste estudo é determinar, por técnicas de fotogrametria digital, as variações de extensão das geleiras do *Nevado Illimani*, Bolívia (67°44'W e 16°38'S) (figura 1) entre 1963 e 2009. Os resultados são então comparados com as taxas de acumulação líquida, obtidas do testemunho de gelo extraído dessa massa de gelo (Ramirez *et al.*, 2003). Assim, tentamos propor uma interpretação da história ambiental recente (últimos 46 anos) para essa região, baseado no estudo de dados obtidos por sensores remotos e testemunhos de gelo.



**FIGURA 1** – Localização do Nevado Illimani, no contexto da América do Sul.

## 2. Área de estudo

A área de estudo abrange o *Nevado Illimani*, Bolívia ( $67^{\circ}44'$  W e  $16^{\circ}38'$  S), situado no centro-leste dos Andes bolivianos (cordilheira Real). Essa montanha possui aproximadamente 10 km de comprimento, 4 km de largura e alguns picos com mais de 6.000 m de altitude (*e.g.*, *Pico del Indio*, *Pico Layco Kkollu*). Está a cerca de 50 km ao sul da cidade de La Paz e 180 km do lago Titicaca. O *Nevado Illimani* é um dos mais velhos corpos plutônicos terciários do setor mais ao leste da cordilheira, seu aspecto é consequência da intrusão que formou essa montanha e a forte erosão causada pelo rio La Paz e seus tributários (Jordan, 1991). Nesta região, a precipitação ocorre, principalmente, durante o verão austral (80% da precipitação anual), pela advecção de massas de ar úmidas majoritariamente provenientes da bacia Amazônica (Vuille *et al.*, 2003). Já na estação seca, que corresponde ao inverno austral (entre junho e agosto), predominam os ventos de norte e noroeste. Eventos de precipitação extratropical durante os períodos secos são atribuídos às massas de ar frio originadas da região antártica, vindas através da Argentina. Vuille (1999) mostrou que nas estações chuvosas, durante eventos de *El Niño*, os Andes bolivianos apresentam anomalias negativas de precipitação; o oposto é verdade para anos de *La Niña*, onde a precipitação tende a ser acima da média.

A redução da precipitação durante *El Niños* atrasa a formação do pacote de neve e resulta em superfície de geleiras “expostas” à radiação solar, o que torna mais intenso o processo de ablação. Segundo Francou *et al.* (2003), o balanço de massa das geleiras dos Andes Centrais bolivianos são fortemente controlados pelo fenômeno *El Niño* – Oscilação Sul (ENOS), onde durante a fase positiva (*El Niño*) pode resultar uma diminuição entre 10 e 30% da precipitações e, também, uma maior frequência de períodos secos durante o verão (a temperatura normalmente apresenta um aumento médio entre 1 e 3 °C na fase positiva). Nesses períodos pode ocorrer a elevação da altitude da linha de equilíbrio (ALE); já durante a fase negativa (*La Niña*), ao contrário, ocorre uma diminuição de sua elevação. Entre 1970 e 2000, esta região apresentou um aquecimento médio da atmosfera de 0,34 °C por década (Vuille *et al.*, 2003). Estes mesmos autores não identificaram qualquer tendência geral para a precipitação.

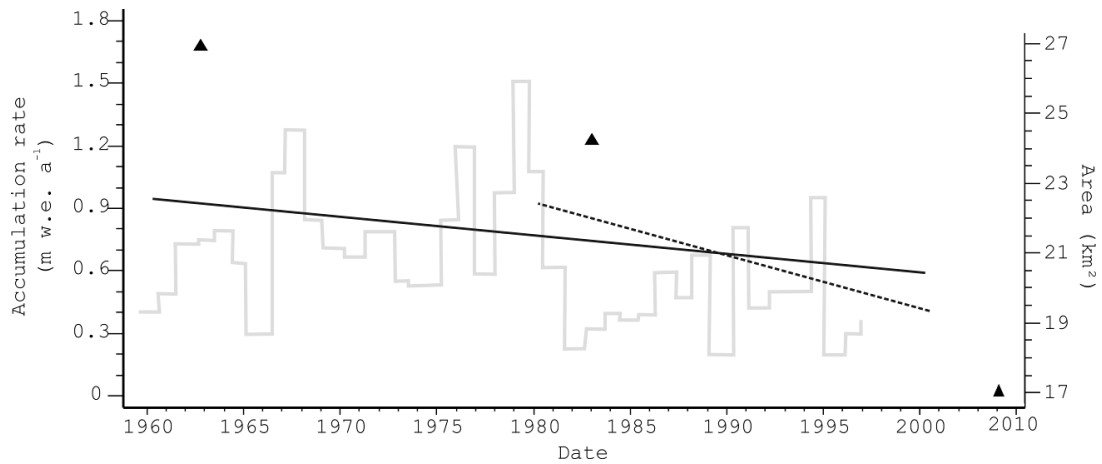
### 3. Dados e métodos

A metodologia para quantificar as variações da extensão (cálculo de área) das geleiras do *Nevado Illimani* nos últimos 46 anos (1963–2009) compreende o uso de fotografias aéreas e imagens satelitais para a elaboração de um Sistema de Informação Geográfica (SIG). A mesma é dividida em 2 etapas: (1) a determinação das variações espaciais das geleiras; e (2) a comparação entre as taxas de acumulação líquida de um testemunho de gelo com as variações de área quantificadas a partir destas imagens. Na primeira etapa, para o período compreendido entre 1963 e 1983, foram utilizadas fotografias aéreas obtidas junto ao Serviço Nacional de Aviação da Bolívia (SNA). Essas fotografias foram digitalizadas com uma resolução espacial de 14  $\mu\text{m}$ . No ano de 2010, foi realizado um trabalho de campo para a orientação externa dessas fotos. Nesta etapa, foi utilizado um par de *Differential Global Positioning System* (DGPS) da marca *Ashtech – Zmax/ L2*, onde foram buscados pontos de controle no terreno. A restituição fotogramétrica foi realizada usando o *Leica Photogrammetry System* (LPS), com um restituidor sistema *Planar 3D*. Para o período 1983 – 2009, foram utilizadas três imagens do *Advanced Land Observation Satellite* (ALOS), obtidos pelo sensor *Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping* (PRISM). Esse sensor possui três sistemas ópticos independentes, importantes para a produção de pares estereoscópicos com a capacidade de obter dados no nadir e em visadas laterais de 24° (<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/prism.htm>). Os mesmos pontos de controle aplicados na etapa anterior foram identificados e utilizados nas imagens PRISM para o georreferenciamento das imagens, a geração de um Modelo Digital de Elevação (MDE) e o uso deste modelo para a ortorretificação destas imagens.

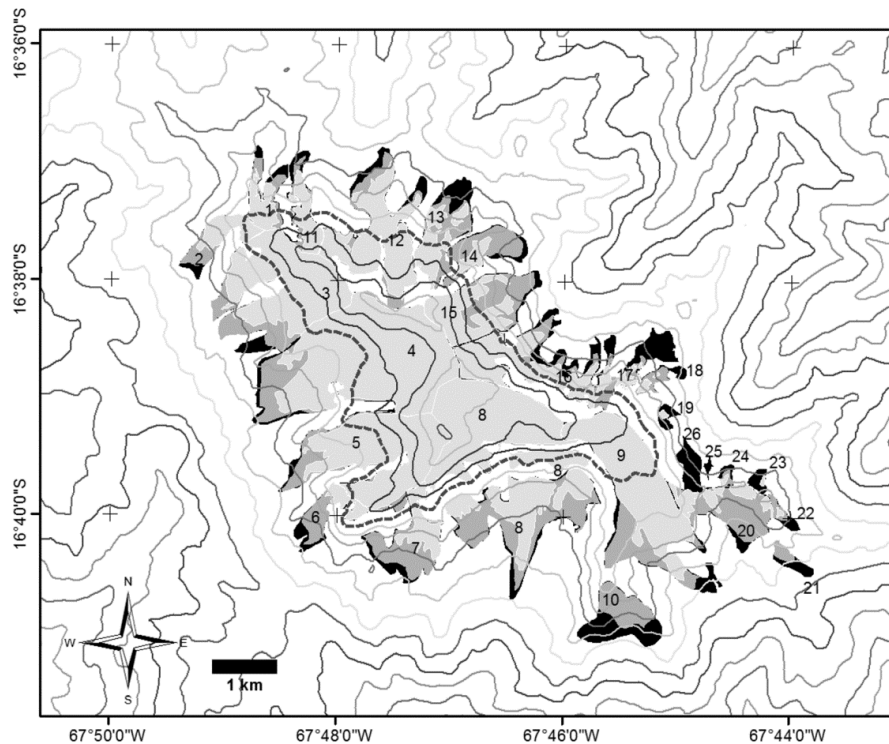
### 4. Resultados e conclusões

A história climática recente dos Andes Centrais boliviano foi estudada com dados do testemunho de gelo (taxas de acumulação anual líquida) e de sensoriamento remoto (variação na extensão de massas de gelo) do *Nevado Illimani* (figuras 2 e 3 ). Foi identificada uma perda total de área de 9,49  $\text{km}^2$ , a partir de 1963 até 2009: isso representou uma diminuição de 35% de sua área. Essa redução foi menor entre 1963 e 1983 (12%). Essa redução de área foi constante até 2009 (26 anos), com uma perda de 26%. Um testemunho de gelo obtido nesse mesmo sítio apresentou uma acumulação anual líquida média de 0,76 m em equivalente d'água e uma tendência de queda para o período 1960–1999. Quando separamos a tendência da taxa de acumulação em dois períodos (1960–1981 e 1981–1999): o primeiro apresenta uma situação de estabilidade (média de 0,92 m a<sup>-1</sup> em equivalente d'água); já o segundo, uma diminuição na tendência (média de 0,56 m a<sup>-1</sup> em equivalente d'água). A comparação das variações de área com as taxas de acumulação líquida do *Nevado Illimani* possibilitou identificar que o período de menor retração das geleiras (1963–1983) coincidiu com a estabilização das taxas de acumulação no testemunho de gelo. Após 1980, a diminuição da acumulação no testemunho de gelo é acompanhada pela intensificação da retração superficial da geleira. As reduções da massa de gelo e da taxa de acumulação líquida observadas nesse período provavelmente estão relacionadas com a maior frequência e intensidade dos eventos *El Niño* que ocorreram do final dos anos 1970 até o início dos anos 2000, uma vez que tais eventos ocasionaram aumento da temperatura do ar e

diminuição das nuvens sobre os Andes Centrais.



**FIGURA 2** – Variações nas taxas de acumulação líquida do *Nevado Illimani*, determinada a partir de um testemunho de gelo (obtido a 6.350 m a.s.l), com relação à perda de superfície glacial definida por este estudo. Os triângulos pretos indicam a área glacial e a linha cinza, a taxa de acumulação. A linha contínua preta descreve a tendência da taxa de acumulação do Illimani a partir de 1960 a 1998 ( $0.92 \text{ m a}^{-1}$ ), enquanto que a linha tracejada marca a mesma tendência a partir de 1983 para 1998 ( $0.56 \text{ m a}^{-1}$ ).



**FIGURA 3** – Variações das áreas das geleiras do *Nevado Illimani* entre 1963 –2009, os números identificam as geleiras estudadas. Em preto a extensão das geleiras em 1963; em cinza escuro o ano de 1983 e em cinza claro o ano de 2009. A equidistância das curvas de nível é de 100 m e a linha pontilhada identifica a cota altimétrica de 5600 m.

## Referências bibliográficas

Francou, B.; Vuille, M.; Wagnon, P.; Mendoza, J.; Sicart, J.E. Tropical climate change recorded by a glacier of the central Andes during the last decades of the 20th century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, doi: 10.1029/2002JD00295, 2003.

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. Stuttgart, 1991, 365p.

Marengo, J. A.; Pabón, J. D.; Díaz, A., Rosas, G.; Ávalos, G.; Montealegre, E.; Villacis, M.; Solman, S.; Rojas, M. Climate Change: Evidence and Future Scenarios for the Andean Region. In: Herzog, S. K., Martínez, R., Jørgensen, P. M., Tiessen, H (Eds.). **Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes**. Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), 2011, 348 p.

Ramirez, E.; Hoffmann, G.; Taupin, J. D.; Francou, B.; Ribstein, P.; Caillon, N.; Ferron, F. A.; Landais, A.; Petit, J. R.; Pouyaud, B.; Schotterer, U.; Simões, J. C.; Stievenard, M. A new Andean deep ice core from Nevado Illimani (6350 m), Bolivia. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 212, p. 337–350. 2003.

Vuille, M. Atmospheric circulation over the Bolivian altiplano during dry and wet periods and extreme phases of the southern oscillation. **International Journal of Climatology** v, 19, p.1579–1600, 1999.

Vuille, M.; Bradley, R.S.; Werner, M.; Keimig, F. 20th century climate change in the tropical Andes: observations and model results. **Climate Change**, v. 59, p. 75–99, 2003.