

# IMPACTOS HIDROLÓGICOS NO RIO MADEIRA INFLUENCIADOS POR EVENTOS DE ENOS E ODP NAS GELEIRAS TROPICAIS ANDINAS

Nájila Souza da Rocha<sup>1</sup>, Bijeesh Kozhikkodan Veetil<sup>2</sup>, Atilio Efrain Bica Grondona<sup>3</sup>, Pâmela Suélen Käfer<sup>1</sup>, María Luján Iglesias<sup>4</sup>, Lucas Ribeiro Diaz<sup>1</sup>, Eduardo André Kaiser<sup>1</sup>, Suzianny Salazar da Silva<sup>1</sup>, e Silvia Beatriz Alves Rolim<sup>5</sup>

<sup>1</sup> UFRGS, PPG em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, RS, Brasil, najila.rocha@ufrgs.br, <sup>2</sup> UFRGS, Centro Polar e Climático, Porto Alegre, RS, Brasil <sup>3</sup>UNISINOS - Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, Brasil, <sup>4</sup> UFRGS, Instituto de Física, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil e <sup>5</sup>UFRGS, Departamento de Geociências, Porto Alegre, RS, Brasil, silvia.rolim@ufrgs.br

## RESUMO

O objetivo deste estudo é entender como o derretimento das geleiras tropicais dos Andes influenciam na disponibilidade hídrica na Bacia do rio Madeira, particularmente durante os eventos El Niño. Foram analisados, no período de 1985-2014 (30 anos), os níveis de água de um rio da bacia Amazônica abastecido (Rio Madeira) pelas geleiras e a variação da precipitação da mesma bacia. As mudanças nas geleiras foram compiladas desde 1980 a partir de dados da literatura realizados por imagens de satélite. Os resultados indicam a importância das geleiras andinas tropicais da Bolívia e do Peru na hidrologia da Bacia do rio Madeira. As análises deste rio indicaram que mesmo quando a precipitação diminuiu (Maio-Outubro) o nível do água não baixou, essa observação foi comum quando ocorreram eventos de El Niño e durante a fase positiva de ODP.

**Palavras-chave** – Bacia Amazônica, Geleiras tropicais andinas, El Niño, Oscilação Decadal do Pacífico, Derretimento das Geleiras.

## ABSTRACT

*The main objective of this study is to understand how the retreat of glaciers in the tropical Andes influences the hydrology in the Amazon Basin, particularly during El Niño events. We analysed water levels from two Brazilian rivers in the Amazon basin, of which one is glacially fed (Madeira River) and the other one (Envira River) is not, precipitation data near these two rivers were also analysed, for the 1985-2014 period (30 years). The changes in glacier surface since the early 1980s were compiled from the literature. The results indicate the importance of tropical Andean glaciers in the Eastern Cordillera of Bolivia and Peru in the hydrology of Madeira river. Analysis of the Madeira River indicated some years were associated with higher water levels even when the precipitation remained low during the corresponding season (May-October). This observation was common when El Niño events occurred during the positive phase of PDO.*

**Key words** – Amazon Basin, Tropical Andean Glaciers, El Niño-Southern Oscillation (ENSO), Pacific Decadal Oscillation (PDO), Glacier Retreat.

## 1. INTRODUÇÃO

O derretimento das geleiras, particularmente destas localizadas na região dos trópicos da América do Sul é o principal indicador das mudanças climáticas [1] [2]. Sabe-se que 2,5% da água doce mundial estão concentrados em geleiras ou regiões subterrâneas de difícil acesso, sendo as geleiras reguladoras de água doce em países com pluviosidade sazonal como Peru e Bolívia [3].

Estudos anteriores comprovam que as geleiras dos Andes sofreram um recuo sem precedentes nas últimas décadas e que tal recuo pode causar uma redução no escoamento das geleiras para as suas sub-bacias [2] [3] [4] [5].

As geleiras das cordilheiras orientais (Peru e Bolívia) estão sob a influência dos padrões de circulação atmosférica na Bacia Amazônica [3]. As variações no comportamento das precipitações tem maior influência no balanço de massa que a própria temperatura do ar e, sendo assim, eventos como El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) que causam efeito tanto na temperatura como nas precipitações influenciam no derretimento das geleiras e afetam a hidrografia das bacias próximas [2] [5] [6] [7] [8] [9].

A perda de massa das geleiras é mais alta durante os eventos do El Niño, o que aumenta ainda mais quando o El Niño ocorre durante a fase quente da ODP [7]. A situação é inversa durante os eventos de La Niña em que a perda e massa é mais intensa durante as fases frias de ODP. Estudos recentes [5] mencionaram que houve um recuo das geleiras andinas influenciado pelo ENOS e instantaneamente pelo ODP com atraso de quase 8 anos.

Sobre um ponto de vista climatológico, a relação entre balanço de massa das geleiras andinas tropicais e o comportamento da circulação atmosférica e hidrológica da Bacia Amazônica é complexo.

O vapor de água atmosférico do Atlântico tropical chega às encostas andinas orientais devido à circulação atmosférica amazônica. A precipitação ocorre em forma de neve em altas altitudes. Durante o período de ablação (derretimento), as águas glaciais de degelo das vertentes orientais alcançam o Oceano Atlântico através dos rios da Bacia Amazônica. O recente encolhimento de glaciares nas cadeias montanhosas orientais do Peru e da Bolívia pode ter influência direta na hidrologia da Bacia Amazônica [10] [11].

O objetivo deste estudo é entender como o derretimento das geleiras dos Andes tropicais influenciam na disponibilidade hídrica na Bacia do rio Madeira, particularmente durante os eventos El Niño.

### 1.1. Área de Estudo

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA) a Região Hidrográfica Amazônica representa cerca de 40% do território brasileiro e possui mais de 60% de toda a disponibilidade hídrica do País [12]. Os recursos hídricos desta região apesar de abundantes, são pouco explorados e constituem um patrimônio nacional de alta relevância para a sociedade.

Neste estudo, foi considerada a Bacia Hidrográfica do Rio Madeira como representativa da região que recebe influência do derretimento das geleiras tropicais, estas localizadas no Peru e na Bolívia (Figura 1).

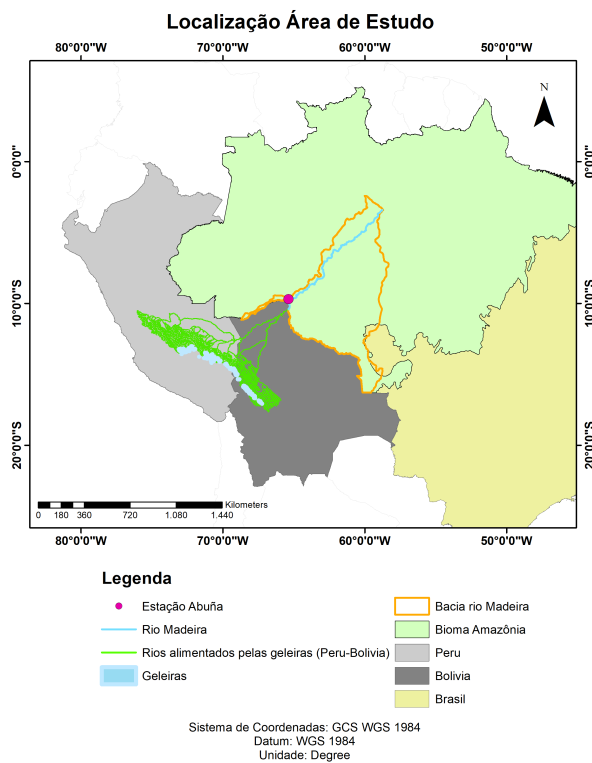


Figura 1: Localização da área e hidrologia de estudo.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo preliminar se baseou em três dados principais: as variações glaciais nas geleiras que banham o rio Madeira localizadas no Peru e na Bolívia; a variação na precipitação na bacia do Rio Madeira; e a variação no nível de água do rio Madeira. Todas essas análises levaram em conta 30 anos de mudança e eventos como El Niño e ODP.

### 2.1. Variações Glaciais no Peru e na Bolívia (1985-2015)

Dados referentes as geleiras orientais do Perú e da Bolívia foram compilados a partir de análise da literatura com objetivo de entender as tendências nas mudanças da superfície destas geleiras ao longo das cordilheiras (Tabela 1). Estes dados demonstraram a redução da área das mesmas ao longo de 30 anos de análise, foram levadas em consideração trabalhos que analisaram as mudanças principalmente por

imagens de satélite, descritos também na última coluna da (Tabela 1).

Todos os dados de satélite usados nas análises citadas anteriormente foram adquiridos durante o inverno austral (Maio-Outubro). Essa informação foi considerada nas análises posteriores.

### 2.2. Mudanças na Precipitação da bacia hidrográfica e no nível de água do Rio Madeira

A segunda análise realizada é referente ao nível de água e a precipitação da bacia do rio Madeira (estação: Abuña, 9,13°S; 65,36°W) (Figura 1). Esses dados foram obtidos da Agência Nacional da Água (ANA). Apesar das inúmeras falhas existentes no banco de dados, foi possível entender o comportamento dessas variáveis desde 1985-2014 e as mudanças que vem ocorrendo em função das mudanças climáticas (Figura 2).

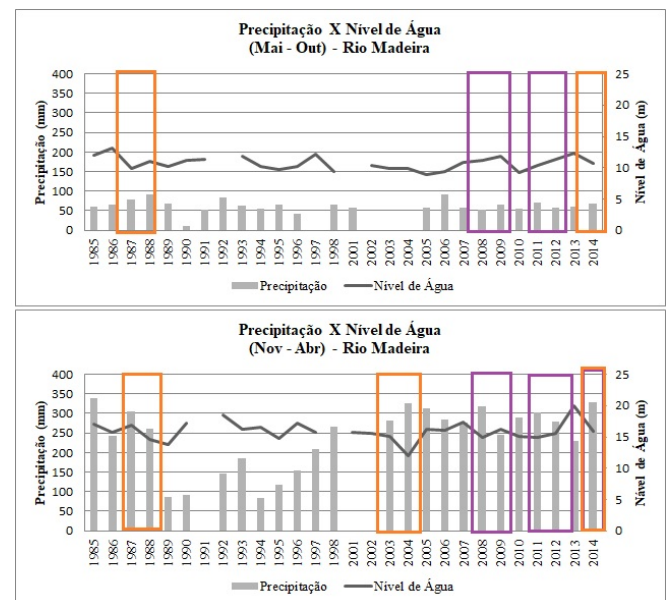


Figura 2: Compilação das variáveis de precipitação e nível de água do rio Madeira (1985-2014)

Nos gráficos da Figura 2 estão indicados em laranja os anos de El Niño (ENOS) durante a fase quente de ODP e os blocos em roxo indicam os anos de El Niño em fase fria de ODP.

Foi realizada também uma análise espaço-temporal da precipitação em todo a bacia do rio Madeira para entender os efeitos das mudanças climáticas no comportamento da precipitação da mesma. Os dados de 15 estações pluviométricas foram interpolados com o uso do algoritmo IDW (Inverse-Distance-Weighted) (IDW).

## 3. RESULTADOS

A análise temporal do nível de água do rio Madeira possibilitou identificar um comportamento diferenciado nos meses de Maio à Outubro, comparado aos meses de Novembro à Abril. De Maio à Outubro o rio possui níveis mais baixos de água, em média 10,7m e desvio padrão 1,09m, enquanto de Novembro à Abril os níveis chegam à 19,97m no ano de 2013/2014 e uma média de 15, 94m

País	Cordilheira	Área de região de geleiras (km <sup>2</sup> )							Mudanças na área de geleiras (%)	Ref
		1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015		
Perú	Huaguruncho	17,71	14,88	12,91	11,35	9,18	8,91	8,83	50,14	[13]
	Huaytapallana	28,79	25,53	22,20	19,99	17,15	16,59	16,65	42,16	[13]
	Vilcabamba	68,09	65,03	62,19	59,44	55,07	52,35	47,60	29,65	[13]
	Urubamba	38,06	34,53	31,04	29,82	25,11	19,65	16,48	56,69	[13]
	Vilcanota	44,8	-	33,2	-	27,10	-	25,2	43,75	[11]
	Carabaya	39,6		29,2		22,4	15,89	15,2	61,61	[14]
Bolívia	Apolobamba	172,3		113,4				85,9	50,14	[15]
	Real	315,2		235,3				159,1	49,52	[15]
	Tres Cruces	41,8	-	33,1	27,4	-	-	21,52	48,51	[15]

**Tabela 1: Compilação dos dados de mudanças nas geleiras andinas tropicais do Perú e da Bolívia (1985-2015)**

(1,57m de desvio padrão). Ao analisar a série temporal de precipitação, no mesmo período, percebemos que a maior quantidade de precipitação se concentra de Novembro à Abril com máxima de 338,6 mm e mínimas de 91,05mm. Enquanto que nos meses de Maio à Outubro a máxima é de 91,23mm e a mínima chega a 10,48mm (média de 63,61mm). As altas precipitações não favorecem o derretimento das geleiras, principalmente os anos de La Niña, em 2004 e 2008 há uma queda no nível de água do rio mesmo com a precipitação passando dos 300mm. Sendo assim, os níveis de água do rio são mais altos neste período (Nov-Apr) em função da variação na precipitação e não em função do derretimento das geleiras.

Apesar disto, a análise comparativa dos níveis de água do rio e da precipitação, identificou que os níveis de água de abril à outubro não variam em função da precipitação. Em 2006/2007, a precipitação atingiu a sua máxima e o nível de água teve uma queda (9,23m) em relação aos anos anteriores. Já em 1996/1997, a precipitação foi de 42,46mm e o nível do rio subiu para 12,09m. Com as baixas precipitações, as geleiras tendem a derreter mais rápido, e o nível do rio Madeira tende a subir de Maio a Outubro. Esse comportamento é observado nos anos de El Niño 1986 e 1988, 1997, 2003, 2006 e de 2011 à 2013.

Desta forma, é possível inferir que a precipitação não é fator determinante nos meses de Maio à Outubro, pois os níveis de água do rio não variam com as precipitações, ao contrário de 2011 à 2013 onde é possível observar uma suba nos níveis de água e uma queda nas precipitações. Essas análises corroboram com a hipótese de influência das geleiras na bacia do Rio Madeira.

Em relação ao comportamento da precipitação na bacia do Rio Madeira, a análise espaço-temporal resultou que

durante as estações de seca (Maio-Outubro) a diminuição da precipitação foi maior nos últimos anos (em torno de 20%) em comparação com as estações mais chuvosas (Nov-Abril) (Figura 3. De acordo com o IPCC ([16]), a frequência nas chuvas tende a reduzir durante as estações de inverno em função das mudanças climáticas.

Este é um estudo preliminar que, por sua importância científica, deve ser melhorado com o estudo de outras variáveis e análises ambientais e climatológicas.

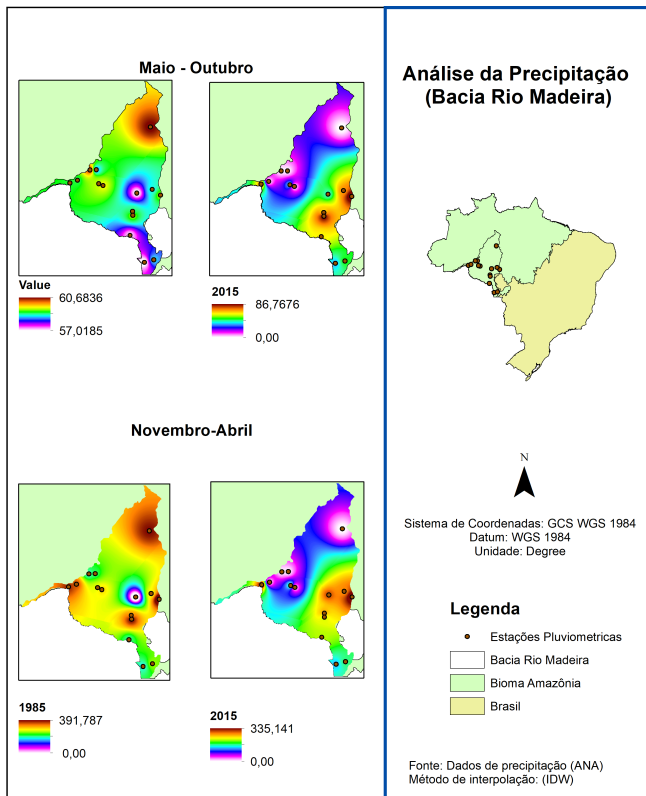
#### 4. DISCUSSÃO

Este é um estudo pioneiro que possui algumas fragilidades, pois dados ambientais e climatológicos são de acesso limitado ou não estão disponíveis para análise ou há muitas falhas na série temporal. Porém, acredita-se que uso de geotecnologias e sensoriamento remoto pode contribuir para um aperfeiçoamento de aquisição de dados mais recentes e que podem servir para corroborar com os resultados deste estudo.

As observações dos dados compilados das geleiras do Peru e da Bolívia demonstraram um comportamento similar, uma diminuição da área total e um certo encolhimento à leste das cordilheiras. Além disso, estudos anteriores relatam sobre a rapidez com que esses eventos vem ocorrendo [2] [17] em relação ao derretimento ao lado oeste da cordilheira.

Alguns fatores favorecem a diminuição das geleiras andinas do oeste, mesmo com o alto grau de umidade que é enviado pelos fluxos atmosféricos da Amazônia. Segundo Bradley e colaboradores [18] [19] em climas mais quentes, a precipitação em baixas altitudes tende a ser em forma de chuva ao invés de neve, o que favorece mais o derretimento





**Figura 3: Análise espaço-temporal da precipitação na bacia do Rio Madeira (1985-2015)**

das geleiras com a redução do albedo.

Outro fator que favorece esse evento é a altitude, as geleiras à leste das cordilheiras são localizadas em altitudes mais baixas que a maioria das geleiras a oeste, e baixas altitudes associadas a um clima mais quente favorece o derretimento mais rápido que em altitudes maiores [1]

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo piloto demonstram que, mesmo com a análise de apenas duas variáveis e sem considerar dados de mudanças de uso do solo, de temperatura do ar e de evapotranspiração, o nível de água do Rio Madeira é dependente do derretimento sazonal das geleiras orientais das cordilheiras dos Andes do Peru e da Bolívia. Nos períodos de Maio a Outubro essa dependência é mais visível durante o período de ENOS E ODP. Sendo assim, neste período o nível de água não tem correlação com a precipitação da bacia, diferente do que ocorre de Novembro a Abril. As próximas análises utilizarão dados de SR para criação de cenários futuros levando em consideração as possíveis mudanças climáticas.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] KASER, G.; OSMASTON, H. Tropical glaciers. *Cambridge University Press*.
- [2] VEETTIL, B. et al. Glacier monitoring and glacier-climate interactions on the tropical andes: A review. *Journal of South American Earth Sciences*, v.77, p. 218–246, 2017.
- [3] VUILLE, M. et al. Climate change and tropical andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, v.89, p. 79–96, 2008.
- [4] RABATEL, A. et al. Current state of glaciers in the tropical andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, v.7, p. pp.81–102, 2013.
- [5] VUILLE, M. et al. Rapid decline of snow and ice in the tropical andes – impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, v.176, p. pp.195–213, 2018.
- [6] ARNAUD, Y. et al. El niño-southern oscillation (enso) influence on a sajana volcano glacier (bolivia) from 1963 to 1998 as seen from landsat data and aerial photography. *Journal of Geophysical Research*, v.106, p. 773–784, 2001.
- [7] VEETTIL, B. et al. Combined influence of enso and pdo on northern andean glaciers: a case study on the cotopaxi ice-covered volcano. *Ecuador. Climate Dynamics*, v.43, p. 3439–3448, 2014.
- [8] MAUSSION, F. et al. Enso influence on surface energy and mass balance at shallap glacier, cordillera blanca, peru. *The Cryosphere*, v.9, p. pp.1663–1683, 2015.
- [9] MERNILD, S. et al. Mass loss and imbalance of glaciers along the andes cordillera to the sub-antarctic islands. *Global and Planetary Change*, v. 133, p. pp.109–119, 2015.
- [10] RIBEIRO, R.; SIMÕES, J.; RAMIREZ, E. The amazon glaciers. *Godone D (ed.) Glacier Evolution in a Changing World*, v. 1, p. 61–76, 2017.
- [11] VEETTIL, B.; SOUZA, S. Study of 40-year glacier retreat in the northern region of the cordillera vilcanota, peru, using satellite images: preliminary results. *Remote Sensing Letters*, v.8, p. 78–85, 2017.
- [12] MMA, M. d. M. A. Caderno da região hidrográfica amazônica. *Secretaria de Recursos Hídricos*, p. 124p.
- [13] B.K., V. et al. Regional climate forcing and topographic influence on glacier shrinkage: eastern cordilleras of peru. *International Journal of Climatology*.
- [14] B.K., V. et al. Decadal evolution of glaciers and glacial lakes in the apolobamba-carabaya region, tropical andes (bolivia-peru). *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, v.99, p. 193–206, 2017.
- [15] B.K., V. et al. Glacier monitoring in the eastern mountain ranges of bolivia from 1975-2016 using satellite data (landsat and sentinel-2). *Environmental Earth Sciences*, v.77, p. 452, 2018.
- [16] IPCC. Intergovernmental panel on climate change. *cambios climáticos 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. contribución del grupo de trabajo al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático*. p. 34, 2014.
- [17] BREMER, U. V. B.; SOUZA S.F., M. E.; SIMÕES, J. Influence of enso and pdo on mountain glaciers in the outer tropics: case studies in bolivia. *Theoretical and Applied Climatology*, v.125, p. 752–768, 2016.
- [18] BRADLEY, R. et al. Threats to water supply in the tropical andes. *Science*, v.312, p. 1755–1756, 2006.
- [19] BRADLEY, R. et al. Recent changes in freezing level heights in the tropics with implications for the deglaciation of high mountain regions. *Geophysical Research Letters*, L17701, p. 36, 2009.