

PRECIPITAÇÃO NA REGIÃO TROPICAL DA AMÉRICA DO SUL: MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO SÉCULO XX

Tainã Peres¹

Éder Maier²

RESUMO

Para identificar padrões espaço-temporais das mudanças climáticas na América do Sul analisou-se a variabilidade da precipitação em 32 estações meteorológicas e a razão isotópica do oxigênio dezoito ($\delta^{18}\text{O}$) do testemunho de gelo do Nevado Illimani-Bolívia, entre 1929-1998. As séries foram divididas em dois períodos, antes e depois de 1970, porque essa década o clima apresentou ruptura no balanço térmico. As médias mensais da precipitação tropical variam entre ~50 mm e ~450 mm e as anomalias podem atingir 100% dessas magnitudes. O desvio padrão evidencia um aumento da variabilidade após 1970 (84% das estações). O $\delta^{18}\text{O}$ apresenta maior amplitude de variação após 1970, evidenciando maiores variações do processo de evaporação/precipitação da água sobre o continente. As linhas de tendência mostram um aumento das chuvas entre 1929-1998 (81% das estações), principalmente as que se localizam nas zonas de convergência tropical. Já nas bordas dessas zonas observam-se tendências negativas da precipitação. A variabilidade na região tropical do continente pode estar associada a fatores remotos e locais como, o aumento da temperatura global e a mudança no uso da terra.

Palavras-chave: Clima; Água; Testemunho de gelo.

LA PRECIPITACIÓN EN LA REGIÓN TROPICAL DE AMÉRICA DEL SUR: CAMBIOS CLIMÁTICOS EN EL SIGLO XX

RESUMEN

Para encontrar patrones espacio-temporal de los cambios climáticos en América del Sur se analizó la variabilidad de la precipitación en 32 estaciones meteorológicas y la razón isotópica de oxígeno dieciocho ($\delta^{18}\text{O}$) del testimonio de hielo del Nevado Illimani-Bolívia, entre 1929-1998. Las series fueron divididas en dos periodos, antes y después de 1970, porque esa década el clima presentó ruptura en el balance térmico. Las medias mensuales de La

¹Geógrafa, mestranda em Geografia no Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande (PPGEO/FURG). Vereador Alberto Martins da Silva, 650, Cassino, Rio Grande-RS CEP 96206-470; E-mail: tainacperes@gmail.com.

²Doutor em Geografia, professor do Instituto de Ciências Humanas e da Informação da Universidade Federal do Rio Grande (ICHI/FURG); E-mail: edermaier@gmail.com.

precipitación variaron entre ~50 mm y 450 mm, y las anomalías pueden llegar a 100% de esas magnitudes. La desviación estándar evidencia un aumento de la variabilidad después de 1970 (84% de las estaciones). La ($\delta^{18}\text{O}$) presenta mayor amplitud de variación después de 1970, evidenciando mayores variaciones del proceso de evaporación/precipitación del agua sobre el continente. Las líneas de tendencia muestran un aumento de la precipitación entre 1929-1998 (81% de las estaciones), principalmente las que se localizan en las zonas de convergencia tropical. En las bordas de estas zonas se observan tendencias negativas de la precipitación. La variabilidad en la región tropical del continente puede estar asociado a factores remotos y locales como, al aumento de la temperatura global y al cambio en el uso del suelo.

Palabras-Claves: Clima; Agua; Testimonio de Hielo.

1. INTRODUÇÃO

No sistema ambiental do planeta Terra a água é considerada um agente controlador da vida, sendo encontrada em todos os compartimentos terrestres (litosfera, biosfera, hidrosfera, atmosfera e criosfera). As chuvas são as principais responsáveis pela distribuição da água, variando no temporal e espacialmente, de maneira que, a sua variabilidade determina diferentes volumes mensais e anuais. Apreender sobre a variabilidade espaço-temporal da precipitação é fundamental para fazer inferências sobre o clima e sobre o ciclo hidrológico.

Além disso, registros paleoclimáticos são fontes de dados do clima pretérito e de relações com variáveis atmosféricas ou hidrológicas. As interpretações de registros glaciológicos (testemunhos de gelo) contribuíram para compreensão do clima, visto que conservam informações pretéritas sobre o balanço térmico e hídrico do planeta com alta resolução temporal (THOMPSON, 1993). Portanto, compreender as relações entre os registros glaciológicos e a distribuição espaço-temporal da precipitação é um objetivo científico complexo, devido à variabilidade espaço-temporal do ciclo hidrológico.

O clima da Terra é dinâmico e sofre alterações devido às oscilações naturais do sistema. Além disso, é possível que o somatório dos impactos ambientais negativos, de origem antrópica, altere o balanço térmico e hídrico

em uma escala planetária. Segundo Marengo (2006) o clima regional e global pode mudar com o desmatamento, queima de combustíveis fósseis e outras atividades associadas ao uso da terra, como agricultura, e construção de grandes cidades.

As atuais mudanças climáticas são atribuídas aos ciclos naturais do sistema solar e às ações de cunho antrópico (IPCC, 2014). Nesse sentido, as mudanças climáticas do ciclo hidrológico da América do Sul (AS) têm sido amplamente investigadas, mas ainda existem indagações em função da complexidade das esferas que compõem o ciclo. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo investigar a variabilidade climática da região tropical da AS, usando registros históricos da precipitação do último século e a série temporal do $\delta^{18}\text{O}$ (razão isotópica do oxigênio dezoito) do Nevado Illimani (NI), Bolívia, no período entre 1929-1998 para identificar padrões espaço-temporais de mudanças climáticas no ciclo hídrico da AS.

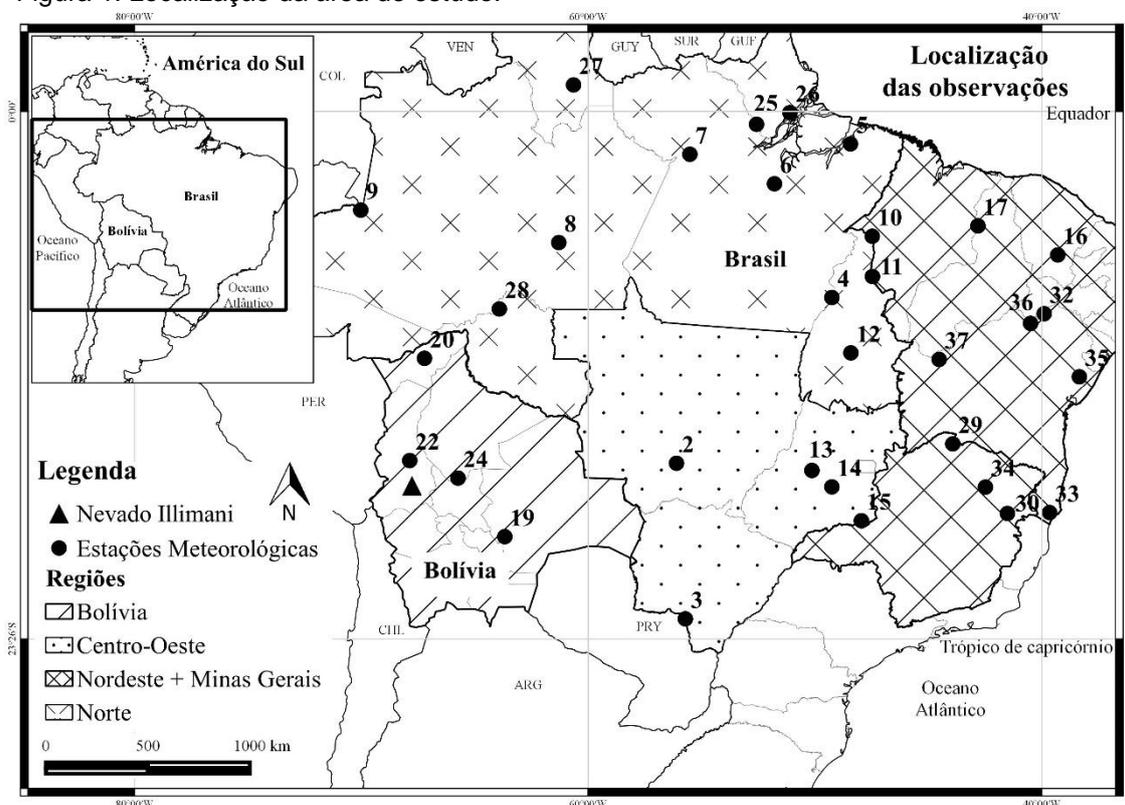
1.1 Área de estudo

A América do Sul, em função da sua vasta extensão territorial, tem distintos regimes climáticos. Adicionalmente, sua disposição bi-hemisférica, e sua uma configuração orográfica (Cordilheira dos Andes, CA), geram uma grande diversidade climática, que varia desde a extrema aridez até climas extremamente úmidos (REBOITA *et al.*, 2010).

As chuvas são consideradas uma variável climática fundamental para o equilíbrio do sistema ambiental, visto que a água é um regulador térmico e controlador da biodiversidade nos ecossistemas (PERES e MAIER, 2016). Qualquer alteração no sistema climático causa sinais e impactos nos ciclos de precipitação. Nesse sentido, a proposta concentra esforços na interpretação dos registros pluviométricos de 4 regiões do continente sul-americano: 1) Amazônia; 2) Nordeste do Brasil e Minas Gerais e3) Região Centro-oeste do Brasil; e 4) Bolívia. Para mais informações sobre as características climáticas destas regiões consulte Peres e Maier (2016). Para o estudo da precipitação na região tropical da AS para ao século XX, se selecionou e analisou de 32 estações meteorológicas (Figura 1).

Adicionalmente, na AS, na margem oriental da CA, na Bolívia, há glaciais como o NI (Figura 1), que preservam informações das condições ambientais da região tropical até o Último Máximo Glacial (RAMIREZ *et al.*, 2003). Este Nevado situa-se próximo a capital da Bolívia (La Paz) e do Lago Titica na região tropical da AS. No entanto, o $\delta^{18}\text{O}$ foi recuperado de um testemunho de gelo recuperado no Nevado Illimani (6350 m, 16°37'S, 67°46'W). A água que constitui esse glacial é oriunda do Oceano Atlântico Equatorial e Tropical, que durante o transporte compõem o processo de evaporação e precipitação sobre o continente sul-americano.

Figura 1: Localização da área de estudo.



Fonte: Base cartográfica disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

1.2 Mudanças climáticas

O clima do planeta Terra possui ciclos naturais de resfriamento e aquecimento, que são influenciados por forçantes externas e por forçantes internas. Essas características, somada aos movimentos da Terra, definem a

quantidade de radiação solar que cada região do globo está exposta, determinando diretamente as regiões com excesso e déficit de energia. Portanto, variações associadas a essas forçantes podem causar mudanças climáticas no planeta (MARENGO, 2006).

As forçantes externas estão associadas aos movimentos orbitais do planeta, tais como a precessão dos equinócios, a obliquidade da Terra e as variações na excentricidade da órbita terrestre ao redor do Sol (que compõem o Ciclo de Milankoitch). Ressalta-se que esses movimentos são cíclicos e influenciam diretamente no clima planetário, definindo as eras Glaciais e Interglaciais (MARENGO, 2006).

Além das forçantes externas, o clima terrestre sofre influências internas. As componentes - litosfera, biosfera, hidrosfera, criosfera e atmosfera - que formam o sistema ambiental são dinâmicas e possuem fluxos de massa e energia que interagem entre si e causam alterações climáticas em escala planetária. Nesse sentido, destaca-se o efeito estufa, que se formou em períodos de atividade geológica intensa que lançaram grandes volumes de gases estufas na atmosfera. Com o aumento da concentração dos gases, o ar sofre um aquecimento na baixa atmosfera, aumentando o efeito estufa e podendo refletir em mudanças no clima terrestre.

Além das fontes naturais dos gases do efeito estufa, atualmente as atividades desenvolvidas pelo homem, como as industriais, a queima de combustíveis fósseis e etc., disponibilizam gases para a atmosfera, tornando-se um fator expressivo no contexto das mudanças climáticas. Desde 1750 (Revolução Industrial) se tem registrado aumentos elevados na concentração dos gases estufa, principalmente do dióxido de carbono (CO₂) (MARENGO, 2006).

Segundo Marengo (2006), de 1760 a 1960 os níveis de concentração desse gás aumentaram 40 partes por milhão (ppm) – de 277ppm para 317ppm, e de 1960 a 2001 o aumento foi de 54ppm – de 317ppm para 371ppm. Logo, com o aumento dos gases estufa o calor passou a ficar retido, aumentando a temperatura do planeta.

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) afirmou, em seu terceiro relatório de avaliação, que a temperatura média da atmosfera aumentou 0,6°C durante o século XX (IPCC, 2001). Segundo o IPCC (2013), os aumentos das concentrações atmosféricas de CO₂ ocorreram devido às emissões da queima dos combustíveis fósseis e às emissões líquidas pela modificação de uso da terra. No período entre 1750 e 2011, o IPCC afirma que foram emitidos pelas atividades humanas cerca de 555 GtC (1 Gigatonelada de carbono = 1 GtC = 1,015 gramas de carbono). Sendo que a maioria foi emitida por combustíveis fósseis, produção de cimento e pelas mudanças no uso da terra (IPCC, 2013).

Segundo Marengo (2006), observam-se algumas consequências das mudanças climáticas nos glaciais tropicais da AS. Esses glaciais estão perdendo massa, principalmente pelo aumento do derretimento e/ou pela diminuição da precipitação de neve nas áreas de altas altitudes. Já os ecossistemas terrestres estão adaptando-se ou colapsando frente a tais mudanças, visto que as geleiras são fontes de água líquida nas cumeadas do relevo e o aumento das temperaturas favorece a colonização da flora e fauna em altitudes mais elevadas.

1.3 Mudanças do uso da terra

As mudanças de uso da terra na AS desde o final do século XX, e especificamente em algumas regiões do Brasil, acarretam em efeitos e impactos no balanço energético e hídrico do continente. Segundo Buenafuente (2010), as mudanças oriundas de atividades humanas na ocupação e no uso da terra ocasionaram em modificações no equilíbrio dinâmico natural dos ecossistemas.

Nas áreas de fronteiras agrícolas, como na região Centro-Oeste (cerrados) e na Amazônia brasileira (floresta tropical), há acentuada degradação ambiental e, por consequência, inúmeros problemas ambientais. Até a década de 1970 tais regiões eram pouco afetadas pelas atividades antrópicas, após esse período, em função de incentivos fiscais, elas foram fortemente atingidas pela exploração humana, principalmente, para atividades

agrícolas. Os ecossistemas naturais, como a floresta e o cerrado, deram lugares a culturas de grãos com ciclo curto ou ao pastoreio. Essas mudanças de uso da terra impactam não só os solos e os cursos dos rios (ROSS, 1998), mas também o ciclo hidrológico local, regional e até da AS em função das conexões atmosféricas.

De acordo com Salazar (2010), alterar a distribuição e a estrutura da vegetação pode influenciar no clima, pois tais alterações modificam os fatores biofísicos, como o albedo superficial e a rugosidade da superfície, por exemplo. Esses fatores afetam a disponibilidade de água no clima local. Um exemplo dessa interação pode ser observado em algumas localidades da Floresta Amazônica, principalmente, no Sul e no Leste, que estão vulneráveis ao processo de savanização, isto é, modificação da floresta tropical por uma vegetação de menor porte, com capacidade de adaptação a climas mais quentes e secos.

No contexto da importância da Floresta Amazônica ressalta-se, além da biodiversidade, o papel da mesma na precipitação tanto local (processo de reciclagem da água), como para o continente sul-americano. Metade da chuva da Amazônia é atribuída a evapotranspiração das árvores. No entanto, transformar área de floresta tropical em pastagens pode afetar significativamente esse processo de reciclagem, visto que a evapotranspiração é proporcional à área foliar. Com essa modificação os índices de chuvas seriam reduzidos também nas regiões Centro-Oeste, Centro-Sul e Sul do Brasil (FEARNSIDE, 2003).

1.4 Testemunho de Gelo do Nevado Illimani

Os testemunhos de gelo são adquiridos através das perfurações verticais em geleiras e mantos de gelo. As análises físicas e químicas do testemunho e da água como, por exemplo, a análise da composição isotópica do oxigênio dezoito, podem fornecer informações históricas do sistema ambiental planetário ou regional. No entanto, eles são considerados os melhores registros da variação climática, pois preservam informações sobre o balanço térmico-hídrico com alta resolução temporal (THOMPSON, 1993).

Nessa conjuntura, o estudo concentra-se na interpretação da série temporal da razão isotópica do oxigênio dezoito ($\delta^{18}\text{O}$), a qual foi obtida a partir da extração e análise do testemunho de gelo do Nevado Illimani, localizado na Bolívia (BO). Esse testemunho preserva informações das condições ambientais da região tropical da AS até o Último Máximo Glacial (cerca de 18 mil anos antes do presente), de maneira que, os primeiros 50 m foram formados por precipitações ocorridas no último século (XX) (RAMIREZ *et al.*, 2003). Segundo Vimeus *et al.* (2005), a série temporal do $\delta^{18}\text{O}$ do Nevado Illimani guarda informações pretéritas do ciclo hidrológico, porque a neve que precipita nessa geleira é evaporada no Oceano Atlântico e recicla-se sobre a América do Sul.

A água é composta por hidrogênio e oxigênio, os quais possuem diferentes massas atômicas. A massa atômica do oxigênio pode conter 16 ou 18 daltons. Em ambientes de baixa e média latitude a razão entre o número de moléculas de O^{16} e O^{18} está relacionada ao ciclo hidrológico, sendo que as massas de água que evaporam dos oceanos possuem uma razão isotópica maior do que as que reciclam sobre os continentes (DANSGAARD, 1954). Adicionalmente, a reciclagem da água pode compor 50% da precipitação no interior do continente sul-americano (NÓBREGA *et al.*, 2005). Cada processo de evaporação e precipitação da água sobre o continente diminui a razão isotópica do oxigênio em cerca de 3 per mil (‰) (DANSGAARD, 1964). Para mais informações sobre o processo de reciclagem da água sobre o continente sul-americano e a variabilidade do $\delta^{18}\text{O}$ consulte Peres e Maier (2016).

2 METODOLOGIA

Para caracterizar a variabilidade climática da região tropical da AS, bem como, para explorar evidências das mudanças climáticas, especialmente às originadas pelas alterações ambientais do último século, utilizaram-se séries temporais da precipitação e da razão isotópica do oxigênio dezoito. Foram selecionadas 32 séries de precipitação de estações meteorológicas distribuídas na região tropical da América do Sul, e a série temporal do $\delta^{18}\text{O}$ do Nevado Illimani (6350 m, 16°37'S, 67°46'W) que se situa próximo a capital da Bolívia (La Paz) e do Lago Titica (Figura 1).

2.1 Aquisição e tratamento dos dados

Informações detalhadas sobre as etapas de aquisição e tratamento de dados podem ser encontrados em Peres e Maier (2016). De forma sucinta, descreve-se o tratamento dos dados utilizados nesse estudo.

Os totais mensais da precipitação foram coletados em 32 estações meteorológicas distribuídas ao longo da região tropical do continente sul-americano (Figura 1). Os dados foram disponibilizados gratuitamente pela Agência Nacional de Águas – ANA (Brasil) e pelo Serviço Nacional de Meteorologia e Hidrologia (Bolívia). Utilizou-se, nas análises, anomalias da precipitação, as quais são obtidas pela subtração da média mensal das amostras. Essa subtração retira o ciclo sazonal e maximiza os efeitos das perturbações do ciclo da precipitação.

Séries históricas de precipitação podem conter falhas, isto é, dados faltantes. Com intuito de completar tais séries, integraram-se bases de dados modelados disponibilizados gratuitamente pela Universidade de Delaware. Essa base compila observações da rede global de climatologia histórica e interpola esses dados em uma grade de 0,5° de latitude e longitude (MATSUURA E WILLMOTT, 2012). Essa normal climatológica é usada quando não há dados observados em uma série temporal. Já a carência de dados observados em grandes áreas é suprida pela interpolação (WILLMOTT *et al.*, 1985). Essa metodologia, utilizada pela Universidade de *Delaware*, gera uma das melhores estimativas da precipitação sobre a AS, sendo aceito uma confiabilidade de 95%, quando comparado com as observações.

O testemunho de gelo do Nevado Illimani foi extraído em junho de 1999 por uma equipe franco-suíça, a qual acondicionou e transportou as amostras até o Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) na França. Esse testemunho possui 136,7 m de comprimento. Nesse estudo foram usados dados dos primeiros 50 m do testemunho de gelo, os quais são oriundos do acúmulo de neve precipitada entre o período 1929–1998.

Para mensurar o $\delta^{18}\text{O}$, esse testemunho foi fragmentado em secções de 7 cm e derretido. Essa água foi analisada em um espectrômetro de massa de

razões isotópicas. A fragmentação originou, em média, uma amostra para 1,1 mês, ou seja, a resolução temporal do mesmo é considerada mensal (RAMIREZ et al., 2003).

A mensuração dessa variável ($\delta^{18}\text{O}$) é representada em partes por mil (‰), visto que a variação das razões entre oxigênio 16 e 18 é pequena, conforme a Equação 1:

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\frac{(\text{}^{18}\text{O}/\text{}^{16}\text{O})_{\text{amostra}}}{(\text{}^{18}\text{O}/\text{}^{16}\text{O})_{\text{padrão}}} - 1 \right] * 1000 \quad (\text{Equação 1})$$

onde padrão é uma amostra arbitrária que contém porcentagem de isótopos estáveis semelhantes a composição média do oceano (CRAIG, 1961b). Essa razão resulta em valores negativos, porque as amostras empobrecidas de O^{18} são relativizadas com uma amostra de referência (Equação 1).

2.2 Técnicas Estatísticas

As análises estatísticas dividiram-se em duas fases: 1º) caracterização das séries temporais utilizando estatística descritiva; e 2º) análise da linha de tendência. Todos os procedimentos estatísticos foram realizados no programa MatLab.

2.2.1 Caracterização das séries temporais utilizando estatística descritiva

As análises empregando estatística descritiva foram realizadas nas anomalias das séries históricas de precipitação e na série do $\delta^{18}\text{O}$. Tais análises compreenderam a mensuração da média (μ), para descrever de forma resumida os dados analisados, e do desvio padrão (S), o qual indica a variação das anomalias da precipitação, conforme as Equações 2 e 3, respectivamente (TOLEDO E OVALLE, 1992).

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i \quad (\text{Equação 2})$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |A_i - \mu|^2} \quad (\text{Equação 3})$$

em que A é o valor absoluto da amostra e N é o número de observações.

Esse procedimento fragmentou cada série em duas partes, sendo uma referente ao período entre 1929 a 1970 e outra entre 1970 a 1998, visto que em uma análise visual prévia das variáveis estudadas, identificaram-se diferentes ciclos e amplitudes de variação, bem como Tavares (2007) mostra um aumento do aquecimento nos dois hemisférios após a década de 70.

2.2.2 Linha de tendência

A linha de tendência por regressão linear (Equação 4) foi utilizada para mensurar a distribuição temporal da precipitação no período entre 1929 e 1998. Mostrando o comportamento de acréscimo ou decréscimo da precipitação, fazendo uma generalização do comportamento dos ciclos temporais que influenciam nos máximos e mínimos do conjunto de dados observado. Essa linha contém uma equação de 1º grau, onde o fator de multiplicação é positivo ou negativo, indicando aumento ou diminuição da precipitação (Eq. 2), respectivamente. O fator de multiplicação (p_1) indica se a linha possui uma tendência positiva ou negativa, enquanto que o fator de adição (p_2) se refere a quantos mm diminuíram ou aumentaram no ciclo de precipitação.

$$y = p_1 * X + p_2 \quad (\text{Equação 4})$$

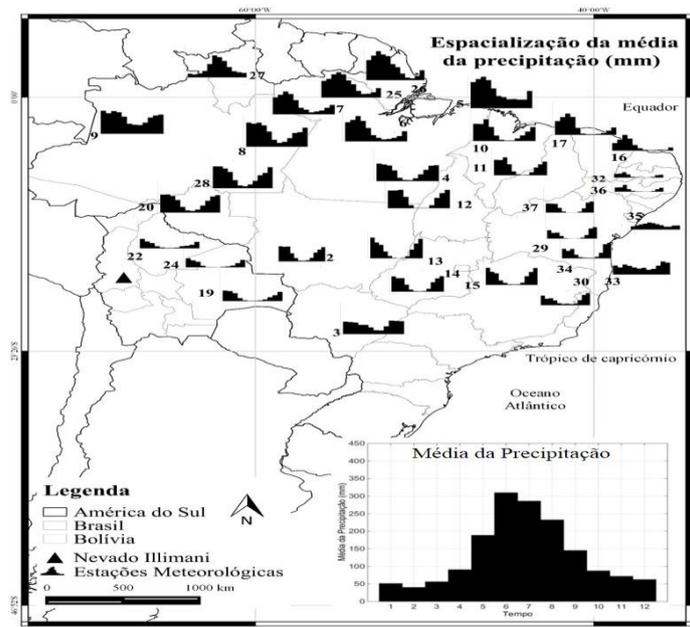
onde p_1 é o fator de multiplicação e p_2 o fator de adição.

3 RESULTADOS e DISCUSSÃO

3.1 Análise e caracterização das séries temporais de precipitação

Os resultados das análises e a caracterização das séries de precipitação e do $\delta^{18}\text{O}$ evidenciaram que as médias mensais da precipitação tropical podem variar, em toda região de estudo, entre ~50 mm e ~450 mm, sendo que as anomalias podem atingir 100% dessas magnitudes. As médias mensais da precipitação ao longo dos 70 anos estudados podem ser observadas na Figura 2.

Figura 2: Espacialização das médias de precipitação.



Fonte: Base cartográfica disponibilizada pelo IBGE.

Na Figura 2 torna-se possível observar que existem diferentes regiões de precipitação ao longo da região tropical da AS. Nota-se que o ciclo de precipitação, na região Amazônica do Brasil, é marcado por verões (austral) chuvosos e invernos (austral) secos (Figura 2), sendo que a menor média mensal atinge cerca de 50 mm, e a maior média atinge cerca de 450 mm. Nessa região há uma estação localizada no hemisfério Norte (estação número 27), portanto, a mesma apresenta os maiores valores médios nos meses do inverno austral, enquanto que os menos índices concentram-se no verão austral.

A média mensal da precipitação no Nordeste brasileiro ao longo dos 70 anos estudados tem a máxima no mês de março (verão austral) com aproximados 250 mm. No entanto, algumas estações, dessa região, chegam a atingir totais mensais de pluviosidade próximos a 300 mm, bem como inferiores a 50 mm (Figura 2). Nota-se que o ciclo de precipitação, é marcado por 6 meses de chuvas concentradas e outros 6 meses com déficit de umidade, com estação seca natural nos meses de julho a dezembro (Figura 2).

No Centro-Oeste do Brasil torna-se possível visualizar que o ciclo sazonal da precipitação possui dois períodos, sendo um ciclo chuvoso (com nove meses) e um ciclo seco (com 3 meses). Portanto, o ciclo de precipitação está relacionado ao início das chuvas na primavera, com verões chuvosos e o

final do ciclo no outono. A média mensal máxima de chuvas totaliza em torno de 350 mm. No entanto, a média mínima concentra-se em torno de valores inferiores a 100 mm. Ao comparar a variabilidade da precipitação no Centro-Oeste brasileiro com a Amazônia e o Nordeste, é o Centro-Oeste que apresenta a melhor distribuição temporal das chuvas. Mesmo com influências remotas na precipitação, as chuvas monçônicas do verão austral mantêm o abastecimento hídrico dos sistemas ambientais.

Na Bolívia existe uma variação espacial da precipitação associada ao relevo, onde nas áreas mais baixas, que correspondem as porções amazônicas, observa-se os maiores volumes médios mensais da precipitação, que podem atingir valores próximos a ~250 mm (Figura 2). Já nas áreas mais altas, que correspondem ao Altiplano da Cordilheira central do Andes, são registradas médias mensais inferiores a 150 mm, sendo que o ciclo sazonal é marcado por um período chuvoso e outro seco, no qual a precipitação mensal é muito próxima de zero (Figura 2).

A ocorrência de anomalias negativas e positivas, associada a sazonalidade das precipitações pode agravar os impactos ambientais causados pela ocorrência de secas ou chuvas acima da média, visto que uma seca no período chuvoso pode gerar até 18 meses com chuvas escassas, pois são contabilizados os meses da estação seca anteriores a ocorrência da seca anômala e os meses da estação seca posteriores a seca anômala. De forma inversa pode ocorrer com as chuvas acima da média, pois se ela ocorre no final da estação chuvosa ou na estação seca, as precipitações anômalas podem ultrapassar a resiliência ambiental, visto que o ecossistema já está saturado de água pela estação chuvosa, assim o sistema terá baixa capacidade de absorver as anomalias positivas da precipitação.

As anomalias no ciclo das chuvas ou no volume podem ser oriundas de forçantes remotas, como o fenômeno El Niño Oscilação-Sul (ENOS), o qual altera a evaporação e transporte da umidade na região tropical da AS. Ou ainda por fatores locais como, o processo de evaporação- precipitação da água continental. Nesse contexto, a variação do $\delta^{18}\text{O}$ pode evidenciar se os fatores locais que controlam o processo de evaporação- precipitação também estão

sendo alterados ao longo do tempo e contribuindo para as variações das precipitações.

A magnitude do $\delta^{18}\text{O}$ indica o número de processos de evaporação e precipitação da água entre o Oceano Atlântico e o Nevado Illimini, sendo que as maiores razões ($\delta^{18}\text{O} \approx -12$) estão relacionados a períodos de intensificação do transporte da umidade para o interior de continente e as menores razões ($\delta^{18}\text{O} \approx -22$) indicam que a água evaporada no oceano passou por vários ciclos de reciclagem (aproximadamente 7 ciclos).

Os resultados referentes ao desvio padrão dos dados observados evidenciam a variabilidade da precipitação ao longo dos 70 anos estudados (Tabela 1). As mudanças climáticas e ambientais no último século causam sinais de alterações nos registros da temperatura e precipitações (TAVARES, 2007). Nesse contexto, as análises das séries de precipitação e do $\delta^{18}\text{O}$ são apresentadas de forma fracionada (em duas partes), sendo elas de 1929- 1970 e de 1970-1998.

Após a década de 70 acontece a intensificação das mudanças de uso do solo, principalmente nas regiões da Amazônia e Centro-Oeste do Brasil (ROSS, 1998), bem como, intensificam-se as mudanças climáticas globais, elevando os níveis de temperatura e alterando os regimes climáticos da precipitação na região tropical da AS. As análises apresentadas anteriormente evidenciam tais alterações, as quais se encontram descritas nos principais livros textos citados.

Ao analisar as diferenças do desvio padrão dos períodos anterior e posterior a 1970 (Tabela 1), observa-se que no primeiro período existia um menor desvio padrão, o que indica uma maior certeza de ocorrência do volume mensal. Já após 1970, constata-se um desvio padrão maior (em 84% das estações), evidenciando uma maior variação das taxas anômalas da precipitação. Conseqüentemente, ocorreu uma diminuição da certeza da ocorrência do padrão sazonal das chuvas.

Um índice de desvio padrão maior (Tabela 1) está relacionado ou a chuvas acima da média (ou secas) intensas ou ainda que essas anomalias podem se prolongar por várias estações sazonais (eventos extremos). Além

disso, Marengo (2006) também afirma que existe uma maior ocorrência de eventos extremos. Essas perturbações geram estresse hídrico e podem desequilibrar a vida dos ecossistemas.

A variação do desvio padrão do $\delta^{18}\text{O}$ (Tabela 1), evidencia maior variabilidade do fracionamento isotópico no período após 1970, corroborando com os resultados obtidos a partir das análises das séries da precipitação.

Tabela 1: Valores de desvio padrão encontrados e a diferença entres os períodos estudados.

Regiões	Nº Estação	Desvio Padrão			Diferença
		1929-1998	1929-1970	1970-1998	
Região Amazônica	4	83,5	75,3	92,2	16,9
	5	75,9	70,8	81,2	10,3
	6	78,8	69,6	85,3	15,6
	7	75	73,1	77,3	4,2
	8	78,1	74,1	82,6	8,5
	9	82,7	78,9	86,7	7,8
	12	74,2	74	74,6	0,7
	25	65,8	59,9	72	12,1
	26	79,5	65	93,3	28,3
	27	80,1	64,4	94,6	30,3
28	75,4	67,5	83,7	16,1	
Nordeste e Minas Gerais	10	74	70,7	77,7	7
	11	69,7	65,6	73,4	7,8
	16	65,1	61,5	67,9	6,4
	17	75	73,5	76,9	3,4
	29	66,9	58,7	75,2	16,5
	30	68,4	72,3	62	-10,3
	32	45,3	44,6	46,2	1,6
	33	75,1	68,9	81,9	13
	34	73,3	77	69	-8
	35	57,8	53,1	62,9	9,8
36	46,5	45,3	47,6	2,3	
37	71,6	68,2	75,3	7,1	
Centro-Oeste	2	59,9	57,1	62,9	5,8
	3	66,9	63,6	70,6	7
	13	83,3	79,6	87,4	7,9
	14	65,3	66,4	63,5	-3
	15	73,7	73,7	73,3	-0,3
Bolívia	19	40,2	40,7	40	-0,7
	20	66	61,8	69	7,1
	22	27,7	25,8	29,8	4
	24	35,6	28,8	39,6	10,8

$\delta^{18}\text{O}^*$	-	2,72	2,36	3,09	0,7
-------------------------	---	------	------	------	-----

*Os valores de desvio padrão do $\delta^{18}\text{O}$ são dados em per mil (‰).

3.2 Linha de Tendência por Regressão Linear

A linha de tendência, da regressão linear, indica o acréscimo ou decréscimo da precipitação no período entre 1929-1998. Os valores positivos ou negativos (em mm) do acréscimo e decréscimo estimados pela linha de tendência encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2: Equações de regressão linear e valores da variação da precipitação (em mm) do período 1929-1998.

		Tendência	
Regiões	Nº Estação	Equação	Amplitude de variação
Região Amazônica	4	$y=0.078*x-1.5e+02$	5,382
	5	$y=0.3*x-6e+02$	20,7
	6	$y=0.62*x-1.2e+03$	42,78
	7	$y=0.048*x-94$	3,31
	8	$y=-0.24*x+4.7e+02$	-16,56
	9	$y=-0.18*x+3.6e+02$	-12,42
	12	$y=-0.051*x+96$	-3,519
	25	$y=0.042*x-81$	2,90
	26	$y=0.18*x-3.5e+02$	12,42
	27	$y=-0.31*x+6e+02$	-21,39
	28	$y=-0.0054*x+14$	-0,373
Nordeste	10	$y=0.0470*x+92$	3,24
	11	$y=0.25*x-4.9e+02$	17,25
	16	$y=0.47*x-9.3e+02$	32,43
	17	$y=0.043*x+84$	2,97
	35	$y=0.096*x-1.9e+02$	6,62
	36	$y=0.17*x-3.3e+02$	11,73
	37	$y=0.077*x-1.5e+02$	5,31
	32	$y=0.013*x-28$	0,90
	33	$y=0.067*x-1.3e+02$	4,62
	29	$y=0.067*x-1.3e+02$	4,62
	30	$y=0.69*x+1.3e+03$	47,61
34	$y=0.025*x-51$	1,73	
Centro-Oeste	2	$y=0.052*x-1e+02$	3,588
	3	$y=0.098*x-2e+02$	6,76
	13	$y=0.27*x-5.2e+02$	18,63
	14	$y=0.22*x-4.4e+02$	15,18
	15	$y=-0.21*x+4.2e+02$	-14,49
Sudeste	19	$y=0.15*x+2.9e+02$	10,35
	20	$y=0.41*x-8.1e+02$	28,29

	22	$y=0.022*x-43$	1,52
	24	$y=0.24*x-4.6e+02$	16,56
$\delta^{18}O$ *	-	$y=0.017*x-50$	-1.17*

*Os valores de desvio padrão do $\delta^{18}O$ são dados em per mil (‰).

Das estações observadas, 81% apresentaram uma linha de tendência positiva, o que evidencia um aumento das chuvas ao longo dos 70 anos (1929-1998). A estação Altamira - PA (lat: -3.21, lon: -51.79) (número 6 – nas Tabelas 1 e 2) localizada na região amazônica e a estação de número 30 (Teófilo – lat: -17.85, lon: - 41.52), localizada em Minas Gerais, mostram um aumento significativo na pluviosidade, isso evidencia uma a intensificação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), respectivamente.

As estações que apresentam linha de tendência negativa apontam para uma redução da precipitação (Tabela 2). Tais resultados estão de acordo com Tavares (2007) que afirma um aumento da precipitação nas áreas de atuação das zonas de convergência tropical (ZCIT e ZCAS) e uma diminuição nas bordas dessas zonas. Como exemplo torna-se possível citar o processo de savanização das bordas sul e norte da Amazônia (SALAZAR, 2010).

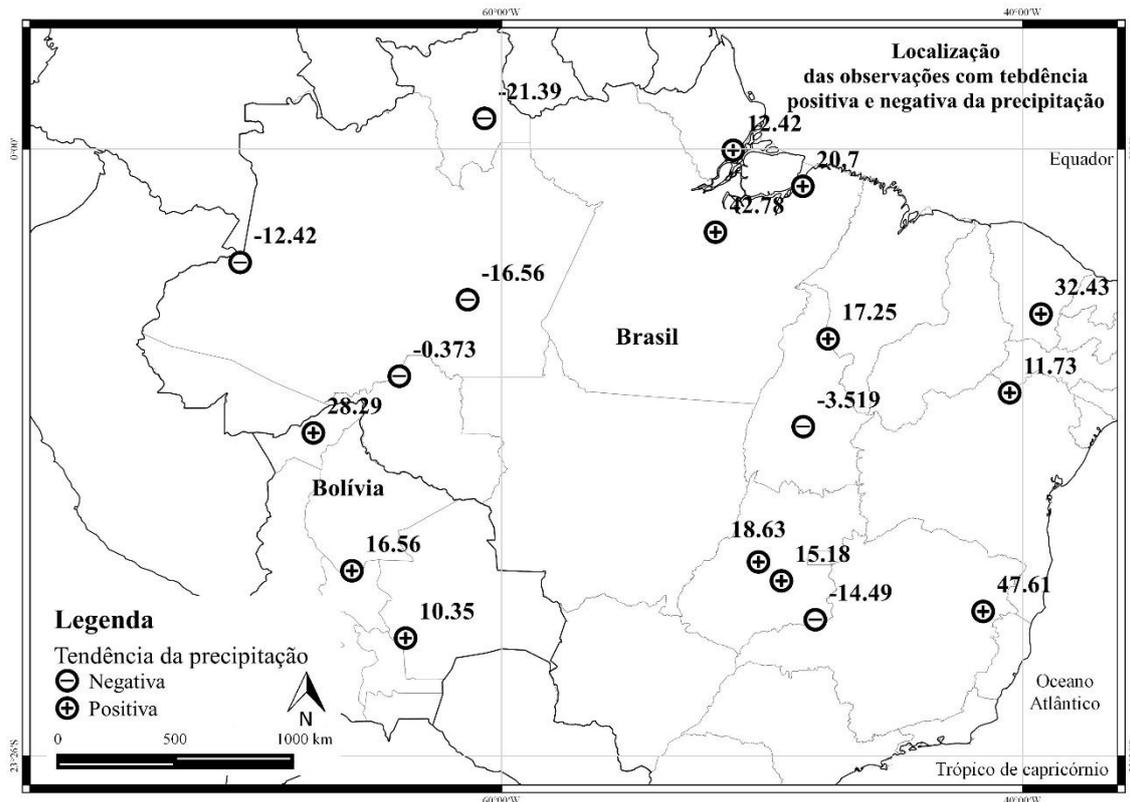
Os maiores índices de variação da precipitação estão espacializados e quantificados na Figura 3, sendo possível observar que as distribuições das estações, que apresentam acréscimo da precipitação, se situam na área leste de atuação da ZCIT e na porção norte da área de atuação da ZCAS. Segundo Tavares (2007) temperaturas mais elevadas no planeta aumentam a intensidade das células de circulação global. Conseqüentemente, os fenômenos de convergência tropical intensificam o transporte e a convergência da umidade para o interior continental. Adicionalmente, tais alterações confinam a umidade na porção leste da Cordilheira dos Andes aumentando a taxa de precipitação na borda sudoeste da bacia amazônica.

Nas demais áreas, que se situam na periferia das zonas de convergências tropicais, observam-se tendências negativas da precipitação (Figura 3). Segundo Marengo (2006) é possível que o processo de

desmatamento da Floresta Amazônica e a consequente diminuição do processo de transferência de umidade do solo para atmosfera (evapotranspiração) pode causar o ressecamento do ecossistema, evidenciado pela diminuição das precipitações nas áreas mais dependentes do processo de reciclagem da umidade que são a borda oeste e sul da Amazônia. Já na região sul da zona de atuação da ZCAS, representada pela estação Catalão (GO – lat: - 18.17, lon: -47.96, número 15 das Tabelas 1 e 2) constata-se uma tendência negativa da precipitação pela maior atuação da ZCAS mais ao norte. Tais resultados estão de acordo com os modelos espaciais de simulação dos cenários climáticos do futuro para a AS (MARENGO, 2006).

A tendência negativa da reta de regressão do $\delta^{18}\text{O}$ indica intensificação do empobrecimento isotópico da água, isso pode estar associado a intensificação dos ciclos naturais de reciclagem da água, principalmente no inverno dos respectivos hemisférios, porque é no período de seca que a água continental é a principal gênese das precipitações ou pode estar associado as mudanças no usos de solo, visto que o processo de savanização altera os processos da biosfera no fluxo da água entre a litosfera e a atmosfera, assim acelerando a perda da água contida no solo. No entanto, são necessários mais estudos e coleta de dados para compreender a influência das mudanças ambientais e climáticas no processo de fracionamento isotópico na planície amazônica.

Figura 3: Espacialização das estações com tendências positivas e negativas da precipitação.



Fonte: Base cartográfica disponibilizada pelo IBGE.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os registros históricos da precipitação e paleoclimáticos são ótimas fontes de informações climáticas, que podem revelar a distribuição espacial e temporal da água da chuva. Tais registros possibilitam assim uma melhor compreensão dos ciclos que impactam o ecossistema, conseqüentemente, influenciando nos recursos naturais que os seres humanos são dependentes para alimentação, hidratação, higiene e produção de energia.

Tratando-se da análise estatísticas das séries temporais destaca-se que a estatística (descritiva e inferencial) é uma ferramenta simples e útil para agrupar e representar de forma organizada e sistemática a diversidade dos registros das estações meteorológicas, e que os resultados das análises estatísticas evidenciaram comportamentos temporais das séries coerentes com as principais bibliografias do assunto.

Além disso, os resultados da estatística descritiva e inferencial demonstraram que a variação temporal da precipitação na região tropical da

AS possui a seguinte distribuição espacial: nas áreas de atuação das zonas de convergência tropical e na porção leste da Cordilheira dos Andes existem tendências positivas da precipitação no período 1929-1998, e nas áreas periféricas dessas zonas de convergência existem tendências negativas da precipitação para o mesmo período. Adicionalmente, 81% das estações meteorológicas apresentaram desvio padrão maiores quando se compara o período após 1970 com o período anterior, evidenciando uma maior variação dos registros mensais e uma maior incerteza de ocorrência da média mensal.

As mudanças nos padrões de precipitação na região tropical da AS influenciam no ciclo hidrológico desse continente. Além disso, as maiores incertezas sobre como se comportam os parâmetros do tempo e do clima acarretam em dificuldades de gestão e planejamento para sociedade.

Nesse contexto, também se ressalta as mudanças ambientais associados às mudanças climáticas, visto que os ecossistemas contidos na área de estudo sofreram grandes transformações ao longo do último século. Integrado a mudança climática, ocorreram grandes mudanças no uso e cobertura da terra, principalmente, na Floresta Amazônica e no Cerrado brasileiros, onde os ecossistemas foram transformados para o cultivo de espécies agrícolas ou para o pastoreio de bovinos.

Agradecimentos

Agradecemos a concessão da bolsa de iniciação científica do Programa Institucional de Desenvolvimento do Estudante da FURG, sob edital EPEC Nº 01/2016.

6.BIBLIOGRAFIA

BIGG, G. **The Oceans and Climate**. New York: Cambridge University Press, 2003.

BUENAFUENTE, S, M, F. Introdução. In: BUENAFUENTE, S, M, F (Org.). **Amazônia: Dinâmica do Carbono e Impactos Socioecômicos e Ambientais**. Boa Vista: Universidade Federal De Roraima, 2010, p. 13 – 16.

CECATTO, J, R. O Sol. In: MILONE, A, C. et al (Org.). **Introdução à Astronomia e Astro- física**. Versão Digital. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas espaciais, 2003. Disponível em:

CaderNAU- Cadernos do Núcleo de Análises Urbanas, v. 10, n. 1, 2018, p. 79-101.
E-ISSN 2525-7994, ISSN 1982-2642

http://staff.on.br/maia/Intr_Astron_eAstrof_Curso_do_INPE.pdf. Acesso em: 19 jul.de 2016.

CRAIG, H. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural Waters. **Science**, v.133, n.3467, , 1961b, p.1833-1834.

DANSGAARD, W. The O¹⁸ abundance in fresh water. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.6, n.5, 1954, p.241-260.

FEARNSIDE, P, M. **A Floresta Amazônica nas Mudanças Globais**. Manaus: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, 2003.

GOMES, N, A. Mudanças Climáticas: Impactos Ambientais nos Recursos Hídricos da Amazônia, decorrentes de seus usos múltiplos. . In: BUENAFUENTE, S, M, F (Org.). **Amazônia: Dinâmica do Carbono e Impactos Socioeconômicos e Ambientais**. Boa Vista: Universidade Federal De Roraima, 2010, p. 105 – 125.

IPCC. Intergovernmental Panel On Climate Change. Climate Change 2001: The Scientific Basis-Contribution of Working Group 1 to the IPCC Third Assessment Report. Cambridge Univ. Press. 2001.

IPCC. Intergovernmental Panel On Climate Change. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2013.

IPCC. Intergovernmental Panel On Climate Change IPCC. Climate Change 2014 Synthesis Report. Cambridge Univ. Press. 2014.

MATSUURA, K.; WILLMOTT, C.J. Terrestrial precipitation: 1900–2010 gridded monthly time series (versão 3.01). Newark – EUA: Center for Climatic Research, Department of Geography, University of Delaware, 2012. Disponível em: <http://climate.geog.udel.edu/~climate/>. Acesso em 29 de mar. 2016.

MARENGO, J.A. **Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade**: Caracterização do Clima Atual e Definições das Alterações Climáticas para o Território Brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

NÓBREGA, R.S., CAVALCANTI, E.P.; SOUZA, E.P. Reciclagem de vapor d'água sobre a América do Sul utilizando reanálises do NCEP-NCAR. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, 2005, p. 253-262.

PERES, T, C. MAIER, E, L, B. Análise das relações entre o $\delta^{18}\text{O}$ do testemunho de gelo do Nevado Illimani (Bolívia) com a precipitação da região tropical da América do Sul (1929- 1998). **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. n. 3 , 2016, p.820. Disponível em:

<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233720>. Acesso: 20 jun. 2018.

RAMIREZ, E.; HOFFMANN. G.; TAUPIN, J.D.; FRANCOU, B.; RIBSTEIN, P.; CAILLON, N.; FERRON, F.A.; PETIT, J.R.; LANDAIS, A.; SIMÕES, J.C. A new Andean deep ice core from Illimani (6350 m), Bolivia.**Earth and Planetary Science Letters**, v. 212, n. 3, 2003, p. 337–350.

REBOITA, M.S., GAN, M.A., ROCHA, R.P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: Uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v25n2/a04v25n2.pdf>. Acesso: 20 jun. 2016.

ROSS, J, L, S. A Sociedade Industrial e o Ambiente. In: ROSS, J, L, S (Org). **Geografia do Brasil**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1998, p 209-231.

SALAZAR, F, F. Desmatamento, Mudanças Climáticas e a Hipótese de “Savanização” da Amazônia. In: BUENAFUENTE, S, M, F (Org.). **Amazônia: Dinâmica do Carbono e Impactos Socioeconômicos e Ambientais**. Boa Vista: Universidade Federal De Roraima, 2010, p. 17 – 26.

SILVA, M, A, V. **Meteorologia e Climatologia**. Versão Digital 2. Pernambuco: Instituto Nacional de Meteorologia, 2006. Disponível em: http://www.leb.esalq.usp.br/aulas/lce5702/Meteorologia_e_Climatologia_VD2_Mar_2006.pdf. Acesso em jul. de 2016.

THOMPSON, L.G. Reconstructing the paleo ENSO records from tropical and subtropical icecores. **Bulletin de Institut Français d’Études Andines**. v. 22, n. 1, p. 65-83, 1993.

TAVARES, A, C. Mudanças Climáticas. In: VITTE, A, C. GUERRA, A, J (Org.). **Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007, p 49 – 88.

TOLEDO, G, L. OVALLE, I, I. **Estatística Básica**. São Paulo: Atlas, 1992.

VIMEUX, F., GALLAIRE, R., BONY, S., HOFFMANN, G. e CHIANG, J.C.H. What are the climate controls on δD in precipitation in the Zongo Valley (Bolivia)? Implications for the Illimani ice core interpretation. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 240, n. 2 , 2005, p. 205–220.

WILLMOTT, C. J., ROWE, C.M. e PHILPOT, W.D. Small-scale climate maps: a sensitivity analysis of some common assumptions associated with grid-point interpolation and contouring. **American Cartographer**, v. 12, n. 1 , 1985 p. 5–16.

Recebido em 23 de outubro de 2018. Aceito em 12 de dezembro de 2018.