



## Uma nova abordagem para o mapeamento dos trópicos continentais a partir da relação entre temperatura, altitude e latitude

*A new approach to mapping continental tropics based on the relationship between temperature, altitude, and latitude*

Otávio Cristiano Montanher\*  ; Cíntia Minaki  

Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, Brasil.

E-mail: cminaki@uem.br

\*Email para correspondência: otaviocmontanher@yahoo.com.br

Recebido (Received): 18/12/2023

Aceito (Accepted): 30/10/2024

**Resumo:** Existem várias abordagens para se definir os conceitos de região intertropical e de climas tropicais. As principais definições envolvem: latitude, temperatura média anual, amplitude térmica diária e anual, e a circulação geral da atmosfera. Este artigo tem como objetivo propor uma nova abordagem para a classificação da zona tropical nos continentes, distinguindo o globo em dois domínios: tropical e não tropical, utilizando três variáveis: temperatura média anual, latitude e altitude. Foi proposto um modelo simplificado da relação temperatura x latitude, denominado modelo trapezoidal, e utilizando-se a regressão *piecewise*, foram obtidos os limiares latitudinais que dividem o globo nos dois domínios. O principal resultado desta pesquisa é a proposição de um mapeamento dos trópicos a partir da definição de que eles possuem uma baixa variação latitudinal da temperatura do ar. Nas regiões não tropicais, por outro lado, há uma relação linear inversamente proporcional entre temperatura e latitude. Outros resultados: i) No hemisfério Sul os limites definidos se situam próximos ao trópico de Capricórnio, enquanto no Hemisfério Norte os limites estão ao sul do trópico de Câncer em baixas altitudes, e ao norte em altitudes elevadas. ii) Os trópicos continentais no Hemisfério Norte se estendem para latitudes maiores em relação ao Hemisfério Sul. iii) O modelo trapezoidal para descrição da temperatura global permitiu o cálculo de gradientes latitudinais da temperatura. iv) Nos trópicos os gradientes são baixos (próximos a zero), já nas zonas não tropicais os gradientes possuem médias semelhantes (próximas de  $0,8^{\circ}\text{C}/\varphi$ ), mas comportamentos muito diferentes nos dois hemisférios.

**Palavras-chave:** Clima global; Gradiente latitudinal; Geoprocessamento; Regressão *piecewise*.

**Abstract:** There are several approaches to defining the concepts of the intertropical region and tropical climates. The main definitions use latitude, annual average temperature, daily and annual thermal amplitude, and the general circulation of the atmosphere. This article aims to propose a new approach to the classification of the tropical zone on continents, distinguishing the globe into two domains: tropical and non-tropical, using three variables: annual average temperature, latitude, and altitude. A simplified model of the temperature-latitude relationship, called the trapezoidal model, was proposed, and using piecewise regression, the latitudinal thresholds dividing the globe into the two domains were obtained. The main result of this research is the proposition of mapping the tropics based on the definition that they have a low latitudinal variation in air temperature. In non-tropical regions, on the other hand, there is an inversely proportional linear relationship between temperature and latitude. Other results include: i) In the Southern Hemisphere, the limits are close to the Tropic of Capricorn, while in the Northern Hemisphere, the limits are south of the Tropic of Cancer at low altitudes and north at high altitudes. ii) Continental tropics in the Northern Hemisphere extend to higher latitudes compared to the Southern Hemisphere. iii) The trapezoidal model for describing global temperature allowed the calculation of latitudinal temperature gradients. iv) In the tropics, gradients are low (close to zero), whereas in non-tropical zones, gradients have similar averages (around  $0.8^{\circ}\text{C}/\varphi$ ) but exhibit very different behaviors in the two hemispheres.

**Keywords:** Global climate; Latitudinal gradient; Geoprocessing; Piecewise regression.

## 1. Introdução

Existe uma variedade de classificações climáticas, as quais se baseiam em diferentes abordagens teóricas, elementos climáticos, escalas, entre outros parâmetros (ICRISAT, 1980; PLANCHON, 2008). Nesse sentido, podem ser encontradas várias definições para o clima tropical em escala global. Uma característica importante dos climas tropicais é que eles normalmente possuem uma amplitude térmica média diária maior do que a amplitude anual (OLIVER, 2005), sendo o principal critério utilizado por Ayoade (2012) no mapeamento do domínio climático tropical em escala global.

Para fins de definição terminológica de clima tropical, entende-se que a zona equatorial, bem como as áreas de ocorrências de climas equatoriais, está contida no interior da zona intertropical. O clima equatorial é quente e úmido durante todo o ano, frequentemente ocorrendo entre as latitudes de 10° e 12° (hemisférios Norte e Sul) em áreas de baixas altitudes, sendo entendido como um subtipo de uma classe maior de climas tropicais (OLIVER, 2005). Adicionalmente, os trópicos áridos e semiáridos também são entendidos como componentes de uma classe maior de climas tropicais (REDDY, 1983). Ayoade (2012), por exemplo, diferencia os trópicos secos e os trópicos úmidos a partir do limiar de precipitação anual média de 600 mm.

A abordagem mais geral para definição da área de ocorrência dos climas tropicais se refere à área situada entre as latitudes de 23°26'N e 23°26'S, ou seja, entre os trópicos de Câncer e de Capricórnio (AYOADE, 2012). Esse critério utiliza como base o fato de que nessas latitudes, o Sol atinge o zênite (posição exatamente perpendicular em relação à superfície terrestre) ao menos uma vez por ano. Essa característica geométrica resulta da combinação entre a inclinação do eixo de rotação e o movimento de translação terrestres. Como nessa faixa do globo, a radiação solar atinge a superfície terrestre com menores ângulos zenitais, pela lei do cosseno pode-se afirmar também que essa zona recebe os maiores valores de irradiância solar médios ao longo do ano. Isso resulta no maior aquecimento da superfície e, em consequência, em temperaturas médias anuais elevadas em comparação com o restante do globo.

Apesar de a posição dos trópicos limitar a faixa da Terra que recebe mais radiação solar ao longo do ano, a temperatura do ar em superfície não segue exatamente a mesma distribuição espacial da irradiância. Regiões no interior da zona intertropical podem ter temperaturas muito inferiores ao se comparar com outras em maiores latitudes. Isso ocorre principalmente devido ao fator altitude, que explica, por exemplo, a presença de gelo no topo do Vulcão Cayambe (aproximadamente 5.800 m de altitude), situado no Equador (país), muito próximo da latitude de 0°. Assim, se em um primeiro momento, a latitude é o fator que diferencia as grandes zonas térmicas da Terra, em segundo, a altitude é um fator que altera a distribuição latitudinal da temperatura, de modo que a temperatura é inversamente proporcional à altitude de um local. Conforme mencionado por Ayoade (2012), as grandes diferenças de temperatura em pequenas distâncias nos trópicos normalmente se devem às variações de altitude.

Outra forma de se definir os climas tropicais é diretamente a partir da temperatura, como na classificação climática de Köppen. No esquema climático de Köppen, a classificação foi delineada com base nos parâmetros de precipitação e temperatura, assumindo-se que as variações da vegetação natural resultam das variações desses dois principais elementos climáticos (CUI; LIANG; WANG, 2021). Nela, os trópicos são definidos pelas áreas que possuem temperaturas médias acima de 18 C° em todos os meses. Assim, a característica predominante dos trópicos é a temperatura elevada e pouco variável ao longo do ano.

O clima tropical recebe a letra “A” no sistema de cinco grandes conjuntos climáticos globais de Köppen. Essa classificação ainda diferencia os trópicos conforme a regularidade na distribuição das chuvas. O clima tropical equatorial (“Af”) apresenta chuvas abundantes ao longo do ano (precipitação mensal maior do que 60 mm em todos os meses). O clima tropical de monção (“Am”) possui uma curta estação seca, havendo ao menos um mês com precipitação média menor do que 60 mm. Por fim, o clima tropical de savana (“Aw”) é caracterizado por um padrão de chuvas com estações seca e chuvosa bem definidas.

Embora em escala global, os climas tropicais definidos por Köppen se encontrem predominantemente na faixa intertropical, outras classes podem ser encontradas com certa frequência nessa zona, como as pertencentes aos climas secos (B) (PLANCHON, 2008). Com menor frequência também pode se observar climas temperados (C) e pontualmente climas mais frios (E), principalmente nas grandes cadeias montanhosas. Cui, Liang e Wang (2021) estudaram as mudanças de área, de latitude e de elevação para as zonas climáticas de Köppen, por meio de observações e projeções. A zona climática tropical (“A”) passou por grandes variações de área na segunda metade do século XX, causada pela expansão do tipo climático “Aw” nas regiões montanhosas de baixa latitude nos trópicos. A zona climática árida (“B”) teve a expansão mais notável na mesma época, com redução dos grupos dos climas temperado (“C”) e boreal (“D”).

Além da classificação de Köppen, outros autores utilizaram o critério de temperatura para definição dos climas tropicais. Supan em 1896 e Trewartha em 1954, por exemplo, definiram os climas tropicais como

aqueles que possuem uma temperatura média anual maior do que 20°C (OLIVER, 2005). Planchon (2008) observou que diferentes limites térmicos trazidos pelas classificações causam problemas para os climatologistas. E que, apesar das isotermas de 18°C e 20°C não coincidirem, ambos os valores são interessantes. Ao mencionar que a maior magnitude do ritmo térmico diurno é característica dos climas da zona intertropical, pondera que a linha de igual amplitude anual e diurna muitas vezes é escolhida como limite dos climas tropicais.

Outra forma de se definir os climas tropicais tem relação com a circulação geral da atmosfera, de forma que eles são definidos pela zona de atuação da célula de Hadley. Assim, os trópicos se situam entre as zonas subtropicais de alta pressão, situadas, em média, entre as latitudes de 30° e 35° (hemisférios Norte e Sul). Parte da zona anticiclônica também pode estar contida nessa definição (OLIVER, 2005). Nesse contexto, Ayoade (2012) menciona os trópicos como a área entre as latitudes de 30°N e 30°S.

Ayoade (2012) também retrata os trópicos como as partes do mundo que se caracterizam por sequências de tempo diferentes das sequências observadas em latitudes médias, de modo que as divisas entre os ventos de Leste e de Oeste são aproximações dos limites dessa região. Por fim, Ayoade (2012) também apresenta outra descrição para os trópicos, sendo as áreas onde não há estação fria. Algumas das definições apresentadas não mostram limites claros entre a zona tropical e as regiões mais frias do globo, e sim extensas faixas de transição, como é o caso da delimitação por meio das zonas subtropicais de alta pressão. Em comparação, outros critérios mencionados anteriormente (trópicos de Capricórnio e Câncer e a temperatura) geram fronteiras discretas.

Este artigo tem como objetivo propor outra abordagem para a classificação da zona tropical nos continentes, distinguindo o globo em dois domínios: tropical e não tropical. A proposição não leva em conta um limiar de temperatura média, como no sistema de Köppen, mas parte da análise estatística entre três variáveis: temperatura média anual, latitude e altitude. Assim, avaliando-se essas variáveis foi proposto um modelo simplificado da relação temperatura x latitude, denominado modelo trapezoidal.

Como resultado do modelo trapezoidal, tem-se limiares latitudinais que dividem o globo nos dois domínios. Esses limiares variam para os dois hemisférios (Norte e Sul) e variam ao longo de diferentes altitudes. O principal fundamento dessa proposição é que a temperatura tende a variar com a latitude com maior intensidade nas regiões mais frias do globo do que nos trópicos (AYOADE, 2012).

## 2. Materiais e métodos

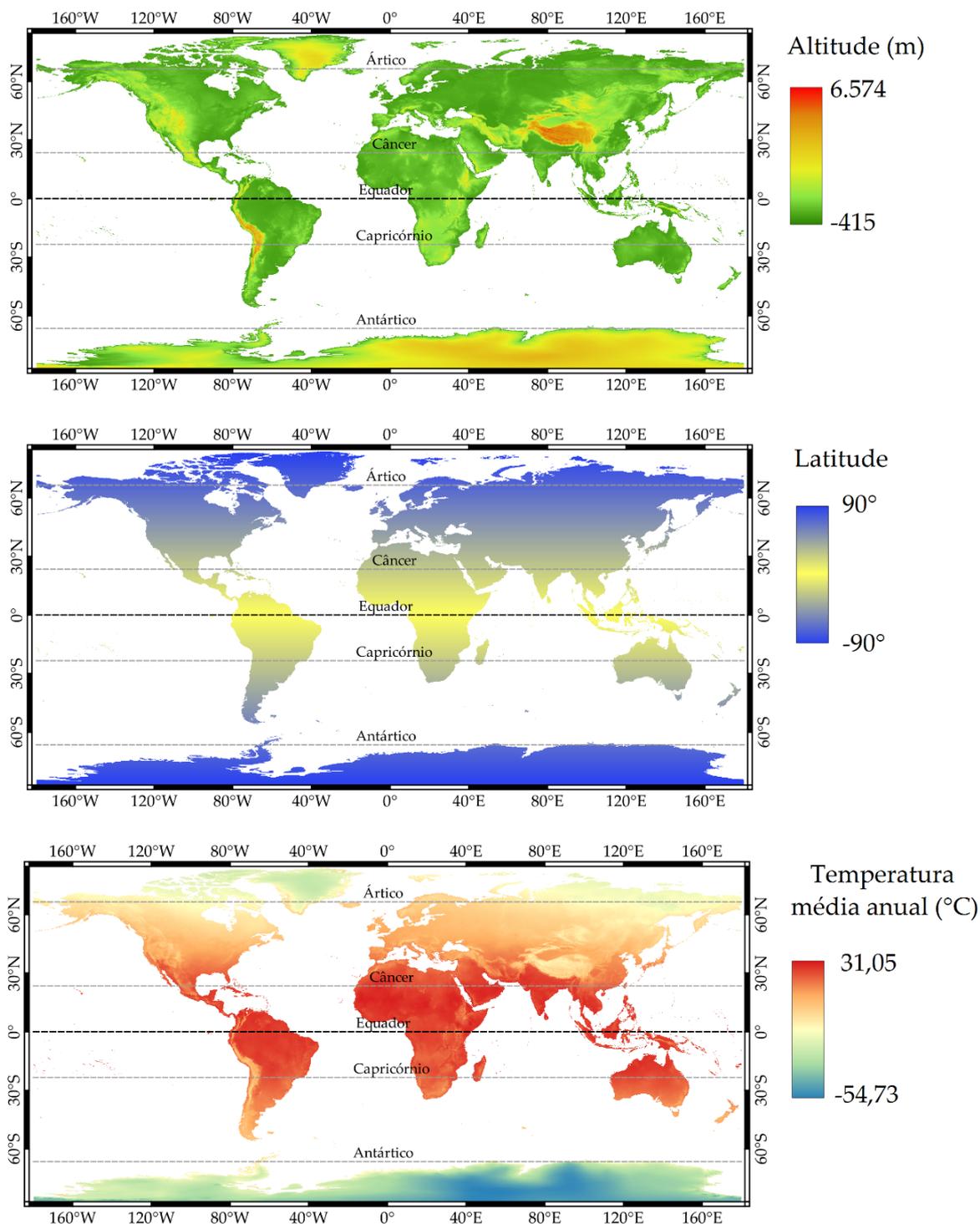
### 2.1. Materiais

Este trabalho foi realizado a partir de três bases de dados matriciais (ou *raster*), processadas por meio do – Sistema de Informação Geográfica (SIG) QGIS (QGIS, 2022), sendo elas: temperatura do ar média anual (°C), altitude acima do nível do mar (m) e latitude (denotada por  $\phi$ , em graus). Para simplificação terminológica, as duas primeiras variáveis serão mencionadas como temperatura e altitude ao longo do texto.

As variáveis temperatura e altitude foram obtidas para todo o globo a partir da base WorldClim, versão 2.1 (WORLDCLIM, 2022). As variáveis climáticas da base WorldClim foram calculadas para o período de 1970-2000, e todos os dados foram processados com resolução de 5' de arco, o que representa cerca de 9,25 km no Equador geográfico. Os dados de temperatura média anual da base WorldClim foram gerados a partir da interpolação de 20.268 estações climatológicas em conjunto com observações feitas por satélites (FICK; HIJMANS, 2017).

Uma característica interessante dos dados WorldClim é que as interpolações foram feitas regionalmente, com a divisão do globo em 23 segmentos, onde cada região teve seus próprios modelos ajustados. A temperatura foi a variável que obteve os melhores resultados no processo de validação, com uma correlação de 0,996 entre os dados observados e estimados. Mais detalhes sobre o processo de geração dessas bases podem ser consultados em Fick e Hijmans (2017).

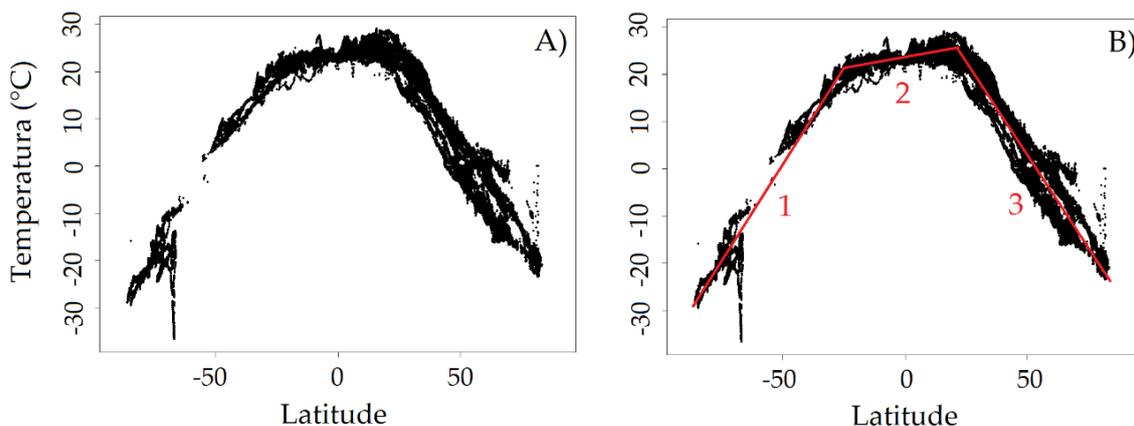
Uma terceira base de dados matriciais é a latitude, que foi gerada em ambiente SIG com resolução espacial compatível com as outras duas bases. Os dados matriciais para essas três variáveis cobrem apenas as terras emersas, de modo que foi aplicada uma máscara entre os dados WorldClim e o arquivo de latitude global. As três bases podem ser observadas na **Figura 1**.



**Figura 1:** Bases globais de altitude, latitude e temperatura, com resolução espacial de 5'. Fonte das bases de altitude e temperatura: WorldClim (2022).

## 2.2. Métodos

A delimitação das zonas tropicais e o roteiro metodológico propostos nesta pesquisa foram idealizados a partir da análise exploratória de gráficos de dispersão entre dados de temperatura e latitude em escala global. Assim, para explicação da abordagem proposta será apresentado um exemplo proveniente dos dados trabalhados nesta pesquisa (**Figura 2**).



**Figura 2:** A) Dispersão entre dados de latitude e temperatura para a faixa de altitudes entre 700 e 800 m em todo o globo. B) O mesmo gráfico com três modelos lineares ajustados por meio da regressão *piecewise*.

Ao se analisar um gráfico de dispersão entre a temperatura e a latitude para todo o globo, nota-se a relação geral esperada de que as temperaturas mais elevadas estão situadas nas baixas latitudes e as menores temperaturas em latitudes mais altas, mas existe uma variabilidade expressiva nesse padrão devido ao efeito da altitude. Por outro lado, ao se avaliar essas duas variáveis em altitudes similares, surge a distribuição representada na **Figura 2A**, que contém dados apenas para altitudes entre 700 e 800 m acima do nível do mar.

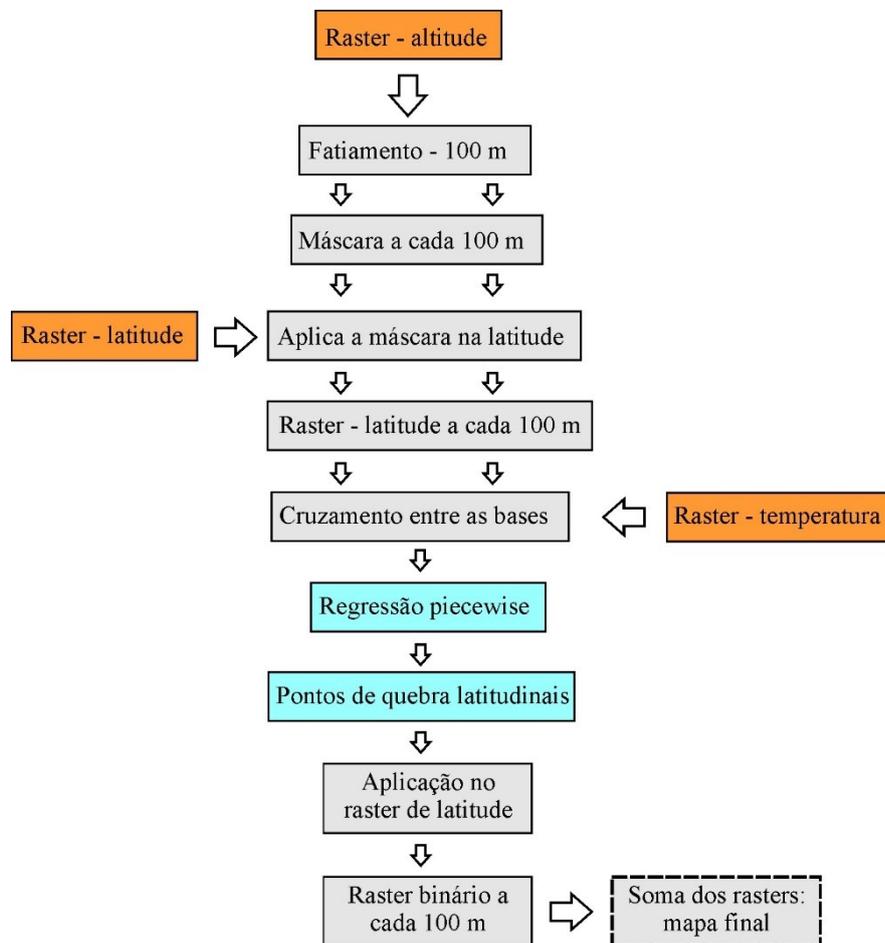
Conforme mencionado por Ayoade (2012), a altitude é um importante fator que influencia a temperatura nos trópicos, distorcendo a uniformidade térmica que predomina nessas regiões. Assim, segmentar os dados de temperatura e altitude por faixas de altitude, como exemplificado na **Figura 2**, é essencial para remover o efeito da altitude sobre a temperatura.

Observa-se no Hemisfério Sul que, entre o Polo Sul e uma certa latitude, há uma tendência aproximadamente linear de aumento da temperatura, assim como há a tendência de diminuição da temperatura no Hemisfério Norte após uma certa latitude, em direção ao Polo Norte. Na **Figura 2B** essas duas regiões estão representadas pelos números 1 e 3. Entre essas regiões há uma área do globo onde a temperatura varia pouco em função da latitude (representada pelo número 2 na **Figura 2B**). Assim, em escala global pode-se conceber três zonas em termos de temperatura e latitude, desde que fixada a altitude: duas regiões onde a temperatura diminui de forma aproximadamente linear com o aumento da latitude, e uma zona onde há pouca variação latitudinal (**Figura 2B**).

Nota-se então que uma propriedade das zonas tropicais é a baixa variação latitudinal da temperatura, de modo que se propõe mapeá-las a partir dos locais onde se inicia uma diminuição linear da temperatura em direção aos polos. Para determinar os limites latitudinais entre as três zonas foi utilizada a técnica de regressão linear por partes (ou *Piecewise linear regression*). Essa técnica foi aplicada em ambiente R (R Core Team, 2020), utilizando-se o pacote *segmented* (MUGGEO, 2008). A regressão linear por partes é uma variação da regressão linear tradicional em que, ao invés de se ajustar uma reta para todo o conjunto de dados, são ajustados vários modelos lineares considerando faixas de valores da variável independente, como exemplificado na **Figura 2B**.

Em termos geométricos, a união entre os três segmentos de reta exemplificados na **Figura 2B** forma uma figura semelhante a um trapézio. Dessa forma, denominamos essa simplificação da realidade como “modelo trapezoidal”. Os aspectos mais importantes do uso desse modelo para delimitação das zonas tropicais são os pontos de quebra, denotados por  $\psi$ . Esses pontos definem os limites, na variável independente, em que se tem diferentes relações lineares entre as duas variáveis, resultando em diferentes modelos para cada segmento. É necessário esclarecer que embora tenham sido apresentados apenas dados entre 700 e 800 m de altitude, o modelo trapezoidal repetiu-se para a temperatura e a latitude em outras faixas de altitudes.

Definidas as três variáveis, a abordagem e o modelo estatístico aplicado, a sequência de passos adotada está representada na **Figura 3**. Inicialmente, a base global de altitude foi reclassificada por meio de fatiamento simples, a cada 100 m de altitude, até 4.000 m (resultando em 40 camadas analisadas). Acima de 4.000 m há poucas superfícies para o ajuste do modelo, sendo áreas que ficaram sem classificação. As bases matriciais fatiadas foram utilizadas para gerar máscaras que foram aplicadas na base matricial de latitude. Como resultado, obteve-se dados matriciais de latitude apenas em áreas com altitudes semelhantes (a cada 100 m).



**Figura 3:** Fluxograma metodológico. As bases de dados originais estão representadas na cor alaranjada. Em cinza estão representados os passos executados por meio de geoprocessamento (em SIG), e em azul estão os passos executados em ambiente R.

O próximo passo foi o cruzamento entre as bases de latitude e temperatura, de modo que os dados foram exportados em planilha, permitindo a geração de gráficos como o exemplificado na **Figura 2**. Os dados em planilha foram importados para o ambiente R, onde o pacote *segmented* foi aplicado para se encontrar os pontos de quebra, que delimitam as três regiões mencionadas. É importante esclarecer que os pontos de quebra não eram conhecidos *a priori*, sendo estimados no processo de análise da regressão *piecewise* (MUGGEO, 2017). Os pontos de quebra foram denotados como  $\psi_S$  e  $\psi_N$  para os hemisférios Sul e Norte, respectivamente.

Após a obtenção dos pontos de quebra para cada faixa de altitude, as bases matriciais de latitude foram reclassificadas em zonas tropicais (no interior dos pontos de quebra, área 2 da **Figura 2B**) e não tropicais (em latitudes maiores do que os pontos de quebra, áreas 1 e 3 da **Figura 2B**). Essa reclassificação produziu bases matriciais binárias, com valores de 0 e 1, e o mapa global foi então produzido a partir da soma dos 40 arquivos binários.

### 3. Resultados e Discussões

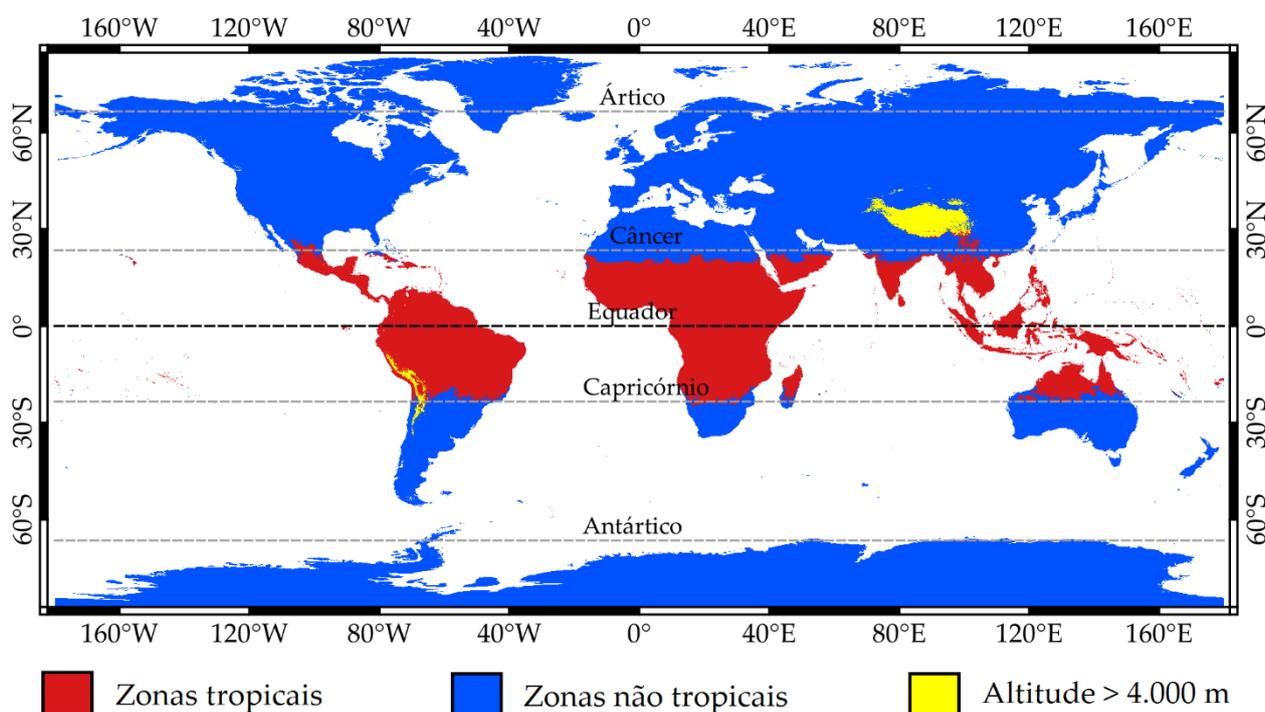
#### 3.1. Pontos de quebra e a distribuição global dos trópicos

Os valores de  $\psi_S$  e  $\psi_N$  para cada faixa altimétrica estão apresentados na **Tabela 1**. Ressalta-se que os valores se alteram em diferentes altitudes e para os dois hemisférios, variando entre  $-18,71^\circ$  e  $-25,84^\circ$  no Hemisfério Sul (H.S.) e entre  $19,51^\circ$  e  $30,45^\circ$  no Hemisfério Norte (H.N.). Assim,  $\psi_S$  possui uma amplitude de  $7,12^\circ$  e  $\psi_N$  possui uma amplitude de  $10,94^\circ$ , e os valores médios para  $\psi_S$  e  $\psi_N$  são respectivamente  $-22,39^\circ$  e  $25,29^\circ$ .

**Tabela 1:** Limiares entre as zonas tropicais e não tropicais no Hemisfério Sul ( $\psi_S$ ) e no Hemisfério Norte ( $\psi_N$ ).

Altitude (m)	$\Psi_S$	$\Psi_N$	Altitude	$\Psi_S$	$\Psi_N$
0 – 100	-18,716	22,248	2000 – 2100	-22,895	26,943
100 – 200	-20,230	22,145	2100 – 2200	-22,306	26,579
200 – 300	-20,792	20,188	2200 – 2300	-21,268	24,859
300 – 400	-21,792	19,771	2300 – 2400	-19,941	26,386
400 – 500	-23,556	19,516	2400 – 2500	-20,881	28,284
500 – 600	-23,665	20,191	2500 – 2600	-21,099	27,446
600 – 700	-22,261	20,724	2600 – 2700	-20,537	26,762
700 – 800	-21,435	21,677	2700 – 2800	-20,283	26,816
800 – 900	-22,584	21,450	2800 – 2900	-20,669	27,232
900 – 1000	-22,476	22,294	2900 – 3000	-20,644	27,542
1000 – 1100	-24,156	22,052	3000 – 3100	-20,875	29,382
1100 – 1200	-23,923	22,260	3100 – 3200	-21,542	28,540
1200 – 1300	-24,164	22,223	3200 – 3300	-21,288	29,009
1300 – 1400	-24,839	21,811	3300 – 3400	-23,047	29,466
1400 – 1500	-24,206	22,029	3400 – 3500	-23,277	29,504
1500 – 1600	-23,127	22,513	3500 – 3600	-23,096	30,081
1600 – 1700	-21,450	24,164	3600 – 3700	-25,843	30,052
1700 – 1800	-22,480	25,917	3700 – 3800	-25,210	30,176
1800 – 1900	-23,503	26,074	3800 – 3900	-24,195	30,458
1900 – 2000	-22,955	26,920	3900 – 4000	-24,695	30,161

O resultado cartográfico do mapeamento das zonas tropicais por meio de  $\Psi_S$  e  $\Psi_N$  está apresentado na **Figura 4**. Ressalta-se que as áreas que possuem altitude acima de 4.000 m representam uma pequena porção do globo não classificada, sendo que as regiões mais expressivas nessas condições se localizam nas cadeias montanhosas dos Andes e dos Himalaias.



**Figura 4:** Zonas tropicais definidas a partir da análise estatística entre latitude, temperatura e altitude. As regiões com altitude superior a 4.000 m não foram classificadas.

Como pode ser notado pelas estatísticas descritivas de  $\psi_S$  e  $\psi_N$ , principalmente por suas médias, no H.S. a delimitação proposta neste artigo se aproxima mais do Trópico de Capricórnio quando comparado com os limites no H.N., que tendem a estar mais para norte em relação ao Trópico de Câncer. Essa extensão dos trópicos para maiores latitudes no H.N. pode ter relação com o fato de que esse hemisfério é mais quente do que o H.S., cerca de 1,2 a 1,5°C (FEULNER *et al.* 2013).

Segundo Feulner *et al.* (2013), essa diferença entre as temperaturas médias anuais nos dois hemisférios tem sido historicamente atribuída a fatores como: diferenças sazonais na insolação, diferentes distribuições das massas continentais, características de albedo e temperatura da Antártica, e o transporte de calor para norte por meio da circulação oceânica. Em seu estudo, os mesmos autores demonstraram que apenas dois desses fatores explicam o contraste: i) transporte de calor pelos oceanos (responsável por 90% da diferença) e ii) distintos albedos das regiões polares nos dois hemisférios.

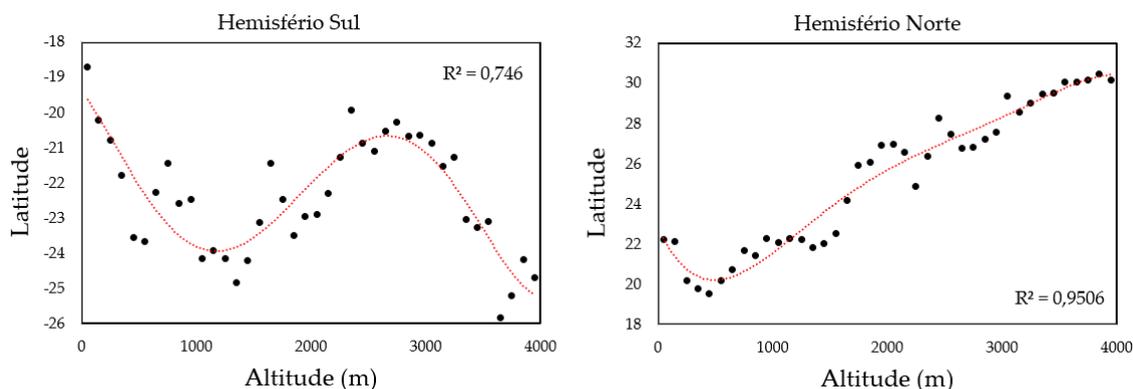
### 3.2. Pontos de quebras e a altitude

Além das diferenças nos valores absolutos e nas estatísticas de  $\psi_S$  e  $\psi_N$ , eles possuem diferentes relações com a altitude. Em termos cartográficos, pode-se notar pelo mapa-múndi (**Figura 4**) que no H.N. a divisa proposta está ao sul do trópico de Câncer em baixas altitudes, e ao norte em altitudes elevadas (por exemplo: México e Himalaia).

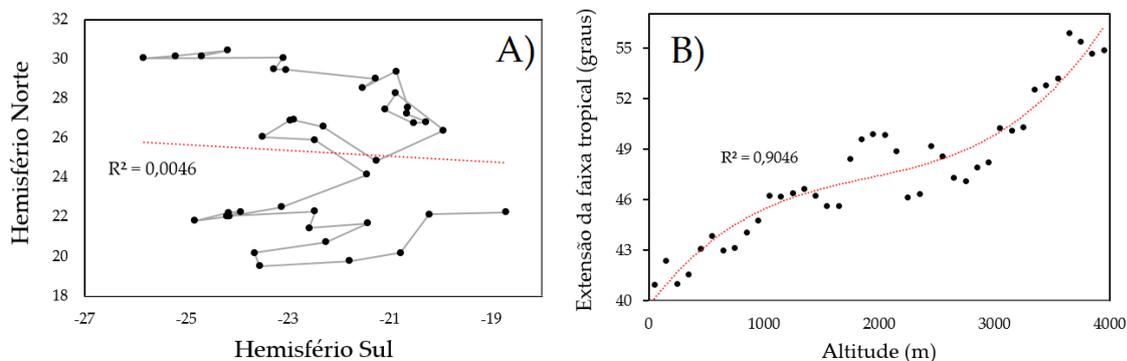
De forma mais específica, ao se analisar a dispersão entre a latitude dos pontos de quebra e a altitude (**Figura 5**), notamos os padrões a seguir:  $\psi_S$  tende a avançar para latitudes maiores entre o nível do mar e aproximadamente 1.300 m, de  $-18,71^\circ$  para  $-24,83^\circ$ . Entre 1.300 e 2.300 m,  $\psi_S$  retorna para aproximadamente  $-20^\circ$  e segue uma tendência para Sul até 4.000 m. No H.N. essa relação é um pouco menos complexa, de modo que,  $\psi_N$  tende para Sul aproximadamente entre o nível do mar e 500 m, de  $22,24^\circ$  para  $19,51^\circ$ . Entre 500 e 4.000 m,  $\psi_N$  tende para Norte de forma aproximadamente linear. Também é notável a diferença da força da relação entre  $\psi$  e a altitude nos dois hemisférios ( $R^2 = 0,746$  no H.S. e  $R^2 = 0,95$  no H.N.).

Uma possível explicação para a variação latitudinal dos pontos de quebra observada entre o nível do mar e 500 m de altitude no H.N. é que em menores altitudes, principalmente até 200 m, o efeito de oceanidade é mais expressivo, podendo fazer com que o efeito da latitude seja perceptível apenas em latitudes um pouco maiores, o que estenderia a faixa intertropical para norte. Com o aumento da altitude, a oceanidade se reduziria, fazendo com que a faixa intertropical retroceda para Sul. No entanto, ao se analisar os dados do H.S., a faixa intertropical avança menos para Sul próximo ao nível do mar e mais para Sul até por volta de 1.300 m de altitude, processo oposto ao mencionado no H.N.

Outro ponto importante ao se comparar os pontos de quebra nos dois hemisférios é a baixa correlação entre eles (**Figura 6A**), mostrando que a relação entre temperatura e latitude para diferentes faixas de altitude é distinta nos dois hemisférios, não só em magnitude, mas também em forma. No momento, não temos uma interpretação física para explicar esses padrões latitudinais dos pontos de quebra. Supõe-se que o conjunto de variáveis que influenciam a temperatura, que não foram avaliadas nesta modelagem, como a cobertura do solo, a oceanidade/continentalidade, e os efeitos da atuação das massas de ar e das correntes marítimas, devem causar esses diferentes padrões observados nos dois hemisférios, mas não sabemos quais e como essas variáveis influenciam os pontos de quebra.



**Figura 5:** Variação em altitude dos limiares entre as zonas tropicais e não tropicais no H.S. ( $\psi_S$ ) e no H.N. ( $\psi_N$ ).



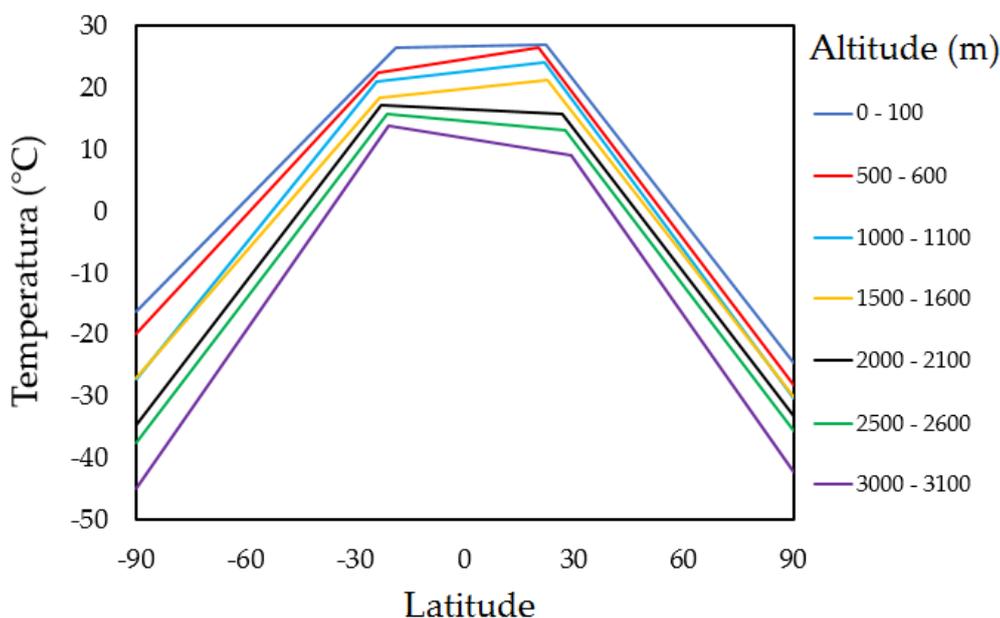
**Figura 6:** A) Dispersão entre os pontos de quebra ( $\psi_S$  e  $\psi_N$ ) nos dois hemisférios. B) Dispersão entre a extensão latitudinal da faixa tropical em graus e a altitude.

Ao se somar as extensões latitudinais nos dois trópicos tem-se o resultado apresentado na **Figura 6B**, o qual mostra que em maiores altitudes, a faixa tropical é mais extensa do que em altitudes mais baixas. Principalmente a partir de 3000 m de altitude, os valores de  $\psi_S$  e  $\psi_N$  tendem para latitudes cada vez maiores. Esse resultado pode ter relação com o fato que a densidade do ar diminui com a altitude, devido à redução da pressão das camadas atmosféricas adjacentes e com a redução da umidade relativa do ar (BARRY; CHORLEY, 2013).

Nas camadas mais baixas da troposfera o ar é mais denso e tende a ter maiores concentrações de vapor de água, fazendo com que ele armazene mais calor proveniente do aquecimento da superfície terrestre. Por outro lado, em maiores altitudes o ar mais rarefeito e seco tem menor capacidade de armazenar o calor gerado pela superfície (BARRY; CHORLEY, 2013). Desse modo, supõe-se que em altitudes mais elevadas, a menor radiação solar em latitudes maiores se tornaria menos importante do que em altitudes mais baixas.

### 3.3. Gradientes globais de temperatura

Até este momento foi explorada apenas uma propriedade dos modelos de regressão *piecewise*, os pontos de quebra, como um novo indicador dos trópicos. No entanto, os modelos trapezoidais produzidos a cada 100 m de altitude possibilitam análises adicionais das relações entre temperatura, altitude e latitude em escala global. Uma visão geral dos modelos trapezoidais produzidos com os resultados da regressão *piecewise* está apresentada na **Figura 7** para algumas faixas de altitude.



**Figura 7:** Modelo trapezoidal: descrição da temperatura em função da latitude para diferentes faixas altimétricas.

Como os modelos de regressão *piecewise* foram ajustados em três partes, tem-se coeficientes angulares e interceptos para cada segmento de reta. Assim, chama-se atenção para os coeficientes angulares, que indicam a variação da temperatura a cada grau de latitude, ou gradiente latitudinal ( $^{\circ}\text{C}/\varphi$ ). Visto que foram obtidos 40 coeficientes angulares para cada zona (120 no total), a **Tabela 2** apresenta as estatísticas descritivas dos gradientes latitudinais. Observa-se que, de fato, o gradiente latitudinal nos trópicos é baixo, com média próxima de zero, variando entre  $-0,11$  e  $0,1^{\circ}\text{C}/\varphi$ . Em termos médios as duas zonas não tropicais se assemelham (valores próximos de  $0,8^{\circ}\text{C}/\varphi$ ), mas na realidade os gradientes variam bastante ao se comparar os dois hemisférios para cada faixa altimétrica (**Figura 8**).

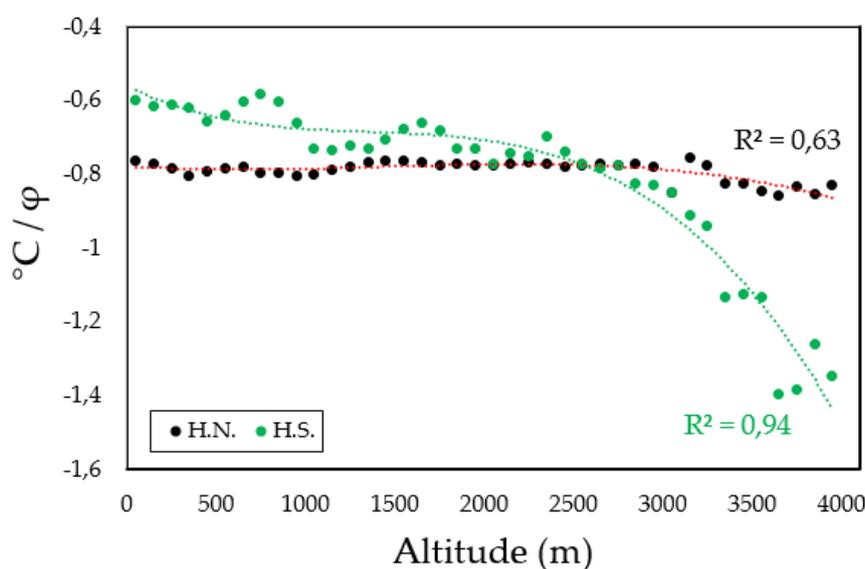
**Tabela 2:** Gradientes latitudinais da temperatura para os trópicos e para as regiões não tropicais nos dois hemisférios.

Estatística	H.S.	Trópicos	H.N.
Mínimo	-1,40	-0,11	-0,86
Máximo	-0,58	0,10	-0,76
Média	-0,81	-0,008	-0,79
Desvio-padrão	0,23	0,07	0,03

No H.N. os gradientes variam pouco ao redor da média em diferentes altitudes, com um aumento, não muito pronunciado, acima de 3.000 m de altitude. Já no H.S. se observa um comportamento mais variável, com gradientes menores do que no H.N. para altitudes mais baixas e um padrão invertido para altitudes mais elevadas, ocorrendo a inversão em torno de 2.500 m de altitude.

Os maiores gradientes latitudinais do globo ocorrem nas altitudes mais elevadas do H.S. Nesse hemisfério, entre 3.500 e 4.000 m de altitude, os gradientes são em média 60% maiores do que nas mesmas altitudes no H.N., atingindo um máximo de  $-1,4^{\circ}\text{C}/\varphi$ . Isso ocorre devido ao fato de que a Antártica apresenta regiões elevadas com as menores temperaturas do globo (**Figura 1**), causando o aumento da inclinação dos coeficientes angulares nesse hemisfério.

A Antártica possui duas vastas regiões, leste e oeste, divididas pela Cadeia Transantártica, de modo que a região leste é predominantemente terrestre, estável e possui altitudes superiores a 4.000 m de altitude (INGÓLFSSON, 2004). Feulner *et al.* (2013) mencionam que, além das diferenças de altitude e de albedo ao se comparar a Antártica com o Ártico, alguns fatores geográficos adicionais contribuem para as menores temperaturas na Antártica, sendo eles: a falta de transferência de calor dos oceanos e os efeitos de isolamento do oceano circumpolar Antártico e do vórtice atmosférico. Assim, as regiões mais altas e interiores do leste da Antártica possuem temperaturas muito inferiores ao se comparar com condições de altitude e latitude semelhantes no H.N., o que explica grande parte do aumento dos gradientes latitudinais acima de 3.000 m.



**Figura 8:** Gradientes latitudinais da temperatura para os dois hemisférios.

Por fim, é necessário esclarecer que o modelo trapezoidal é extremamente simplificado, não levando em conta uma série de fatores que interferem na temperatura do ar, como a atuação das massas de ar, de correntes marítimas, os efeitos de oceanidade/continentalidade e as características da superfície, como a presença de cobertura vegetal e o albedo. No entanto, a proposta é justamente reconhecer os padrões globais de distribuição da temperatura em função da latitude, removendo-se o efeito da altitude.

#### 4. Conclusões

A principal contribuição deste artigo é a proposição de um mapeamento dos trópicos a partir da definição de que eles possuem uma baixa variação latitudinal da temperatura do ar. Em consequência, nas regiões não tropicais a relação entre a temperatura e a latitude é clara, sendo possível notar uma dinâmica linear de redução da temperatura com o aumento da latitude. Adicionalmente, essa diferença de padrões só fica evidente quando se avalia dados em faixas de altitudes similares, ou seja, removendo-se o efeito da altitude, a relação entre temperatura e latitude se torna mais nítida. Mais especificamente:

- Os pontos de quebra variam bastante em função da altitude e de formas diferentes nos dois hemisférios. Não sabemos exatamente o porquê dessas variações.

- Os trópicos continentais no Hemisfério Norte se estendem para latitudes maiores em relação ao Hemisfério Sul. Isso pode ter relação com a maior temperatura média do primeiro.

- O modelo trapezoidal para descrição da temperatura global permitiu o cálculo de gradientes latitudinais da temperatura nos trópicos e nas zonas não tropicais. Nos trópicos os gradientes são muito baixos, com média próxima de zero. Já nas zonas não tropicais os gradientes possuem médias semelhantes (próximas de  $0,8^{\circ}\text{C}/\varphi$ ), mas comportamentos muito diferentes nos dois hemisférios.

#### Referências

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 16 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, tempo e clima**. 9 ed. Porto Alegre: Bookman. 2013. 512 p.

CUI, D.; LIANG, S.; WANG, D. Observed and projected changes in global climate zones based on Köppen climate classification. **WIREs Climate change**. 2021; v. 12:e701, n. 3. Disponível em: <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/wcc.70>. 1 Acesso em: 27 out. 2023.

FEULNER, G.; RAHMSTORF, S.; LEVERMANN, A.; VOLKWARDT, S. On the Origin of the Surface Air Temperature Difference between the Hemispheres in Earth's Present-Day Climate. **Journal of Climate**. V. 26, p. 7136 – 7150. 2013.

FICK, S.E.; HIJMANS, R.J. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017.

ICRISAT – International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics. **Climate Classification: A Consultants Meeting**, 14-16, April, 1980, ICRISAT Center, Patancheru, A.P. 502324 India, 1980. 153 p. Disponível em; [https://oar.icrisat.org/3656/1/Climatic\\_classification\\_\\_A\\_Consultant\\_Meeting.pdf](https://oar.icrisat.org/3656/1/Climatic_classification__A_Consultant_Meeting.pdf). Acesso em: 26 out. 2023.

INGÓLFSSON, O. Quaternary glacial and climate history of Antarctica. **Developments in Quaternary Sciences**. V. 2, p. 3-43, 2004.

MUGGEO, V. M. **segmented**: an R Package to Fit Regression Models with Broken-Line Relationships. **R News**, v. 8, n. 1, p. 20-25. 2008.

MUGGEO, V.M. Interval estimation for the breakpoint in segmented regression: a smoothed score-based approach. **Australian & New Zealand Journal of Statistics**, v. 59, p. 311-322. 2017.

PLANCHON, O. Transition entre climats tropicaux et tempérés en Amérique du sud: essai de régionalisation climatique. **Les Cahiers d'Outre-Mer**, Revue de géographie de Bordeaux, 223, 2008. p. 1-14. Disponível em: <https://journals.openedition.org/com/772?gathStatIcon=true&lang=en>. Acesso em: 26 out. 2023.

R Core Team. R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. 2020. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: 12 dez. 2020.

REDDY, S. J. Climatic classification: the semi-arid tropics and its environment a review. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 18, n. 8, p. 823-847, ago. 1983.

OLIVER, J. E. **Encyclopedia of World Climatology**. Dordrecht, Springer. 2005.

QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project. 2022. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>. Acesso em: 15 ago. 2022.

WORLDCLIM - **Historical climate data**. 2022. Disponível em: [https://worldclim.org/data/worldclim21.html#google\\_vignette](https://worldclim.org/data/worldclim21.html#google_vignette). Acesso em: 15 abr. 2023.



BY



NC



SA

Este artigo é distribuído nos termos e condições do *Creative Commons Attributions/Atribuição-NãoComercial-CompartilhaIgual* (CC BY-NC-SA).