

Heterogeneidade da paisagem

A heterogeneidade da paisagem é uma métrica composta pelas médias de *Z-scores* das variáveis **variedade de formas de relevo**, **amplitude altitudinal**, **índice de áreas úmidas** e **riqueza de solos**. A métrica é composta por uma média hierárquica dessas diferentes variáveis (**Figura**). A seguir, descreveremos como cada variável que compõe a métrica é criada e como elas são combinadas para formar a heterogeneidade da paisagem.

As análises de heterogeneidade da paisagem foram realizadas no *Google Earth Engine* (Gorelick et al. 2017).

Bases de dados utilizadas

Nós utilizamos o modelo digital de elevação (DEM) do Merit-DEM (Yamazaki et al. 2017), na escala de 90 m, como base para os cálculos de terreno como **declividade**, **orientação do relevo** e **índice de posição topográfica (TPI)**. Esse DEM é um produto em escala global, permitindo a replicabilidade das análises em outras regiões, e possui correções de vários vieses derivados de imagens de satélite, principalmente em áreas com alta densidade de florestas como a floresta Amazônica. Além disso, o Merit-DEM já possui uma camada de **acúmulo de fluxo**, em escala global, disponível no Merit-Hydro (Yamazaki et al. 2019). Essa camada de acúmulo de fluxo possui correções para áreas planas e para o efeito da densidade de árvores no cálculo da rede hidrográfica (Yamazaki et al. 2019), que são importantes para a análise de florestas tropicais com alta densidade de árvores.

O acúmulo de fluxo não captura bem a distribuição e área de lagos e rios largos como o rio Amazonas. Desta forma, nós incluímos a **classe 33** do MapBiomas **Coleção 7** (MapBiomas Project 2020), que representa os rios e lagos para complementar as informações sobre as áreas úmidas. O MapBiomas é um projeto nacional de mapeamento e classificação de mudanças do uso do solo dos últimos 30 anos, a partir de dados de sensoriamento remoto.

Variáveis que compõem a heterogeneidade da paisagem

Variedade de formas de relevo (*landforms*)

A variedade de formas de relevo (*landforms*) é a representada pela quantidade de formas de relevo dentro de uma vizinhança da célula focal. Primeiro classificamos as formas de relevo e em seguida contabilizamos a quantidade de formas no entorno de cada célula.

As formas de relevo representam a variação na umidade, exposição à radiação solar, velocidade de ventos e deposição de sedimentos na paisagem (Dobrowski 2011, Anderson et al. 2016). Essa classificação é determinada pelas variáveis de **declividade do relevo (slope)**, **orientação do relevo (aspect)**, **índice de posição topográfica (topographic position index)**, **índice de umidade (moisture index)** e distribuição de **rios e lagos**, descritas em detalhes abaixo.

A combinação dessas variáveis permite identificar os tipos de montanhas e vales, áreas íngremes ou planas, orientação do relevo com mais sombra ou incidência solar, áreas secas ou úmidas dado o acúmulo de fluxo, declividade do relevo e a presença de lagos e rios (Figura 1). A classificação foi baseada em estudos anteriores (Fels e Matson 1996, Anderson et al. 2012, 2014, 2016, 2023) conduzidos para a América do Norte (<https://crcs.tnc.org/pages/land>).

A análise conduzida no presente estudo apresentou algumas modificações com relação aos estudos anteriores. O cálculo da posição topográfica foi substituído entre o *landscape position index* (LPI) (Anderson et al. 2012) pelo *topographic position index* (Weiss 2001). Além disso, a orientação do relevo (faces quentes ou frias) foi ajustada para o Hemisfério Sul. Por fim, a classificação das formas de relevo foi ajustada para valores de TPI e índice de umidade que melhor classificavam as formas de relevo das paisagens analisadas.

Declividade do relevo (*slope*)

A declividade do relevo foi calculada pela função `ee.Terrain.slope`, como um gradiente local das 4 células adjacentes. Os resultados são apresentados em graus de declividade (0° a 90°).

Orientação do relevo (*aspect*)

A orientação do relevo foi calculada pela função `ee.Terrain.aspect`, como um gradiente local das 4 células adjacentes. Os resultados são apresentados em graus da direção do relevo (0° = Norte, 90° = Leste, 180° = Sul e 270° = Oeste). Nós dividimos a orientação do relevo em dois grupos, baseados na quantidade de incidência solar, sendo células com valores entre 90° e 270° classificados como **faces frias** e valores entre 0° a 90° e 270° a 360°, classificados como **faces quentes**.

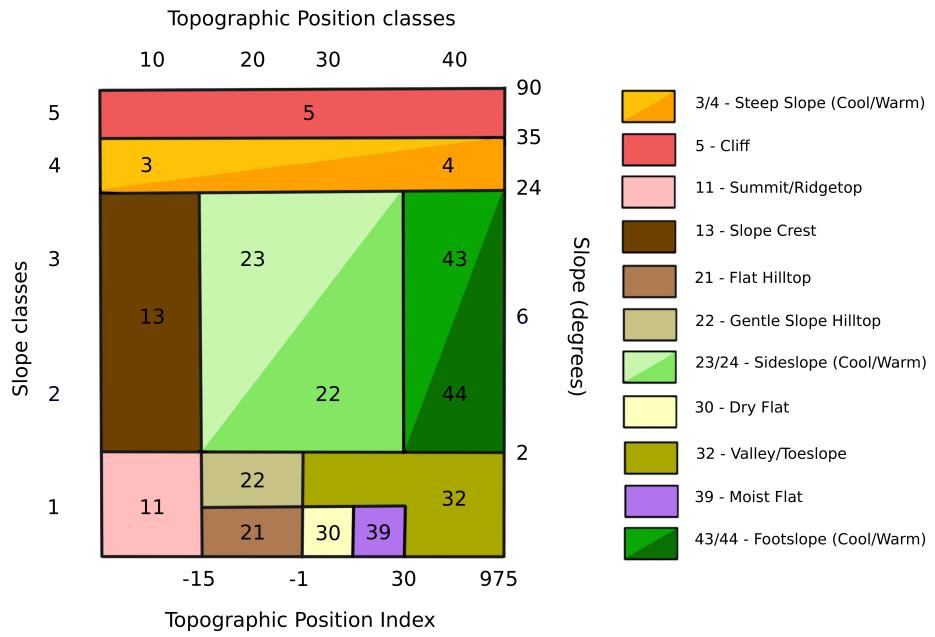


Figura 1: Classificação de formas de relevo de acordo com a declividade do relevo, índice de posição topográfica, orientação do relevo, índice de umidade, rios e lagos. Baseado na classificação de Anderson et al. (2016).

Índice de posição topográfica (TPI)

O cálculo do TPI foi feito em três escalas com uma janela circular com 7, 11 e 15 células de raio, calculando a soma da diferença da elevação da célula focal para as suas vizinhas (i), divididos pelo número de células vizinhas (n).

$$TPI = \frac{\sum_i^n (vizinhana_i - focal)}{n}$$

O índice é composto pela média de TPI das três escalas, o que permite a consideração de níveis locais e regional de resolução da paisagem (Theobald et al. 2015). Essa abordagem foi implementada para permitir a classificação de formas de relevo que emergem tanto em escalas locais (ex. vales, topos de montanhas) quanto regionais (ex. topos planos de chapadas) (Fels e Matson 1996). Os tamanhos das janelas foram ajustados visualmente para que representassem as formas de relevo.

Índice de umidade (*moisture index*)

O índice de umidade (*moisture index*) foi calculado com base no **acúmulo de fluxo** do Merit-Hydro e na **declividade do relevo** calculadas anteriormente.

$$moisture.index = \frac{\log (fluxo + 1)}{(slope + 1)} \times 1000$$

Após o cálculo do índice de umidade para cada célula, suavizamos o padrão de distribuição da rede de drenagem como a média do índice dentro de uma janela circular com uma célula de raio.

Transformando os índices em classes

Cada índice (declividade e orientação do relevo, TPI e índice de umidade) foi transformado em classes (Tabela 1) para formarem os tipos de formas de relevo. A declividade e orientação do relevo seguiram a classificação em Anderson et al. (2016), com a orientação do relevo ajustada para o Hemisfério Sul. Os ajustes dos limiares de TPI e índice de umidade foram definidos visualmente. Classificamos como áreas úmidas somente células com índice de umidade acima de 3000, uma vez que valores menores superestimavam a distribuição de corpos d'água em áreas planas. Depois combinamos o mapa de áreas úmidas com o de água e lagos do MapBiomass.

Tabela 1: Classes dos índices usados para a classificação de *landforms*

Variáveis	Classes	Limiar inferior	Limiar superior
Declividade do relevo	1	-1	2
Declividade do relevo	2	2	6
Declividade do relevo	3	6	24
Declividade do relevo	4	24	35
Declividade do relevo	5	35	90
TPI	1	-Inf	-15
TPI	2	-15	-1
TPI	3	-1	30
TPI	4	30	975
Orientação	2	0	90
Orientação	1	90	270
Orientação	2	270	360
Índice de Umidade	0	-Inf	30000
Índice de Umidade	1	3000	Inf

Combinando as variáveis e classificando as formas de relevo

As classes de cada variável foram combinadas para representar as formas de relevo como um código numérico (Figura 2): + **índice de umidade** foi multiplicado por 1000; + **orientação do relevo** foi multiplicado por 100; + **TPI** foi multiplicado por 10; + **declividade do relevo** foi multiplicado por 1.

Por exemplo, o código 11 (0011) representa a primeira classe de declividade (áreas de baixa declividade) e a primeira classe de TPI (posição do relevo mais alta que o entorno), sendo, portanto, um topo de montanha (*summit*). No entanto, alguns códigos tiveram que ser inspecionados visualmente para classificar apropriadamente alguns tipos de formas de relevo, como por exemplo *sideslopes*, *valleys* e *toeslopes* (Tabela 2).

Tabela 2: Combinações entre as variáveis para classificar as formas de relevo

Valores da Combinação	Código para Formas de Relevo
10	11
11	11
12	11
13	13
14	11
15	5
20	21

Valores da Combinação	Código para Formas de Relevo
21	21
22	22
23	24
24	24
25	5
31	30
32	32
33	24
34	24
35	5
40	32
41	32
42	32
43	43
44	3
45	5
51	51
111	11
112	11
113	13
114	3
115	5
121	21
122	22
123	23
124	3
125	5
131	30
132	32
133	23
134	3
135	5
141	32
142	32
143	43
144	3
145	5
151	51
211	11
212	11
213	13

Valores da Combinação	Código para Formas de Relevo
214	4
215	5
221	21
222	22
223	24
224	4
225	5
231	30
232	32
233	24
234	4
235	5
241	32
242	32
243	44
244	4
245	5
251	51
1000	39

A classificação final de formas de relevo pode ser visualizada na Tabela 3.

Tabela 3: Códigos das formas de relevo obtidas após classificação das variáveis

Códigos	Nomes
3	Cool Steep Slope
4	Warms Steep Slope
5	Cliff
11	Summit/Ridgetop
13	Slope Crest
21	Flat Hilltop
22	Gentle Slope Hilltop
23	Cool Sideslope
24	Warm Sideslope
30	Dry Flats
32	Valley/Toeslope
39	Moist Flats
43	Cool Footslope
44	Warm Sideslope



Figura 2: Classificações das formas de relevo do Brasil.

Obtendo a variedade de formas de relevo

A variedade de formas de relevo foi calculada como a quantidade de tipos de formas de relevo dentro de uma janela circular da célula focal. O tamanho do raio da janela foi definido calculando a variedade em diferentes raios (2, 5, 7, 10, 15, 20 células) e calculando a diferença na média de variedade obtido para o Brasil a cada aumento de raio. O raio escolhido foi aquele em que o seu subsequente não adicionou variedade. Desta forma, o raio representa o nível de resolução da paisagem que captura o máximo de variedade de formas de relevo. O raio escolhido foi de 5 células de raio (450 m) para todo o Brasil. Agora que temos os valores de variedade de formas de relevo, precisamos padroniza-los para compor a imagem final de **heterogeneidade da paisagem**, fizemos essa padronização usando uma janela móvel com 200 pixel de raio onde calculamos o valor de Z ao subtraímos a média da vizinhança (σ) do valor da célula (X_{clula}) e dividimos o resultado pelo desvio padrão da vizinhança(μ).

$$Z_{clula} = \frac{X_{clula} - \mu_{vizinhana}}{\sigma_{vizinhana}}$$

Amplitude altitudinal

A amplitude altitudinal representa a variação da altitude em uma região, independente da variedade de formas de relevo. A amplitude altitudinal foi calculada como a diferença entre os valores máximos e mínimos de altitude, dentro de uma janela circular de 450 m (5 células de raio), a partir do MERIT-DEM (Yamazaki et al. 2017). Em seguida, fizemos uma Regressão Linear Simples (*Ordinary Linear Regression*) entre os **valores de amplitude altitudinal e a variedade formas de relevo** e obtivemos os valores dos resíduos dessa análise como a amplitude altitudinal independente da variedade de formas de relevo. os valores finais de amplitude altitudinal podemos calcular os valores de Z para podermos compor a heterogeneidade da paisagem. O Z foi calculado no interior de uma janela móvel com 200 pixels de raio onde calculamos o valor de Z ao subtraímos do valor da célula (X_{clula}) a média dentro da vizinhança (μ) e dividirmos o resultado pelo desvio padrão da vizinhança (σ).

Índice de áreas úmidas

O índice de áreas úmidas foi calculado a partir dos dados da *Global Wetlands Database* (Gumbrecht et al. 2017). Essa base de dados fornece informação e inventário de áreas úmidas para todo o mundo. Os dados são obtidos através de imagens de satélite, amostragens aéreas e relatórios publicados. No presente estudo, reamostramos o mapa de áreas úmidas para a mesma resolução das demais variáveis. Depois, calculamos o índice de áreas úmidas considerando a densidade de áreas úmidas na escala local (450 m) e na escala regional (1170 m). Também foi incluído no índice final a **quantidade de áreas úmidas** regional (Anderson et al. 2016).

Primeiro, calculamos a quantidade de áreas úmidas como o número de *células* de áreas úmidas dentro de uma *janela* local (450 m) e regional (1170 m). A divisão da quantidade de áreas úmidas pelo número de células na janela produz a **densidade de áreas úmidas**. Em seguida, as densidades de áreas úmidas local e regional e a quantidade de áreas úmidas regional foram transformados em *Z-scores*. Cada célula focal (X_{clula}) foi subtraída pela média da vizinhança ($\mu_{vizinhana}$) e dividida pelo desvio padrão ($\sigma_{vizinhana}$) da vizinhança. A média e desvio padrão foram calculados dentro de uma vizinhança circular de 200 células de raio de cada célula focal.

$$Z_{clula} = \frac{X_{clula} - \mu_{vizinhana}}{\sigma_{vizinhana}}$$

O índice de áreas úmidas foi calculado como a média ponderada da densidade local e regional, atribuindo peso 2 para a densidade local:

$$Z_{ndice\ de\ areas\ midas} = \frac{(Z_{local} \times 2) + Z_{regional}}{3}$$

Nos locais onde a quantidade de áreas úmidas regionais (*Z-score*) eram maiores que o índice de áreas úmidas, o índice foi calculado como a média ponderada das densidades e da quantidade de áreas úmidas:

$$Z_{ndice\ de\ areas\ midas} = \frac{(Z_{local} \times 2) + Z_{regional} + Z_{quantidade}}{4}$$

Riqueza de solos

A riqueza de solos foi calculada como a quantidade de tipos de solos dominantes e sub-dominantes nos polígonos de solo obtidos da base do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/10871-pedologia.html>). Essa informação foi rasterizada e projetada na mesma resolução espacial das variáveis descritas anteriormente. Para compormos a heterogeneidade da paisagem, calculamos os valores de Z dentro de uma janela móvel com 200 pixels de raio. O valor de Z para cada célula é calculado seguindo a fórmula:

$$Z_{clula} = \frac{X_{clula} - \mu_{vizinhana}}{\sigma_{vizinhana}}$$

Onde, subtraímos do valor da célula(X_{clula}) a média da vizinhança ($\mu_{vizinhana}$) e dividimos pelo desvio padrão da vizinhança ($\sigma_{vizinhana}$).

Heterogeneidade da paisagem: combinação das variáveis

A heterogeneidade da paisagem é calculada seguindo uma hierarquia nas variáveis padronizadas por Z na janela móvel. Na etapa 1, ela é definida inicialmente como o valor de Z da variedade de formas de relevo. Na etapa 2, em locais onde o valor de Z para amplitude altitudinal é maior que aquele obtido para a variedade de formas de relevo, a heterogeneidade da paisagem é calculada como a média ponderada das duas variáveis, dando peso 2 para variedade de formas de relevo.

$$Z_{\text{heterogeneidade da paisagem}} = \frac{(Z_{\text{variedade de formas de relevo}} \times 2) + Z_{\text{amplitude altitudinal}}}{3}$$

Na etapa 3, em locais onde o índice áreas úmidas é maior que a heterogeneidade da paisagem calculada na etapa 2, calculamos a média ponderada da heterogeneidade da paisagem e índice de áreas úmidas, atribuindo peso dois para as áreas úmidas. O peso duplo das áreas úmidas é justificado por esses locais estarem em áreas planas com baixa variabilidade topográfica, sendo as áreas úmidas locais com alta disponibilidade hídrica que determinam a variabilidade microclimática.

$$Z_{\text{heterogeneidade da paisagem}} = \frac{Z_{\text{variedade de formas de relevo}} + Z_{\text{amplitude altitudinal}} + (Z_{\text{ndice de reas midas}} \times 2)}{4}$$

Se, na etapa 2, a amplitude altitudinal não foi importante para a célula, a heterogeneidade da etapa 3 é calculada conforme segue:

$$Z_{\text{heterogeneidade da paisagem}} = \frac{Z_{\text{variedade de formas de relevo}} + (Z_{\text{ndice de reas midas}} \times 2)}{3}$$

Na etapa 4, nos locais onde o valor de Z da riqueza de solos é maior que a heterogeneidade da paisagem calculada na etapa 3, os valores são substituídos pela média ponderada das variáveis naquela localidade, com peso 2 para variedade de formas de relevo.

$$Z_{\text{heterogeneidade da paisagem}} = \frac{(Z_{\text{variedade de formas de relevo}} \times 2) + Z_{\text{amplitude altitudinal}} + Z_{\text{ndice de reas midas}} + Z_{\text{riqueza de solos}}}{5}$$

Se, na etapa 3, nas células onde o índice de áreas úmidas não foi importante, a heterogeneidade da paisagem é calculada conforme segue:

$$Z_{\text{heterogeneidade da paisagem}} = \frac{(Z_{\text{variedade de formas de relevo}} \times 2) + Z_{\text{amplitude altitudinal}} + Z_{\text{riqueza de solos}}}{4}$$

Da mesma forma, em locais onde a amplitude altitudinal não foi importante, a heterogeneidade da paisagem é calculada conforme segue:

$$Z_{heterogeneidade\ da\ paisagem} = \frac{(Z_{variedade\ de\ formas\ de\ relevo} \times 2) + Z_{ndice\ de\reas\ midas} + Z_{riqueza\ de\ solos}}{4}$$

Por fim, em locais onde apenas a variedade de formas de relevo foram importantes até aqui, a heterogeneidade da paisagem é calculada conforme segue:

$$Z_{heterogeneidade\ da\ paisagem} = \frac{(Z_{variedade\ de\ formas\ de\ relevo} \times 2) + Z_{riqueza\ de\ solos}}{3}$$

- Anderson, M. G., M. Clark, A. P. Olivero, A. R. Barnett, K. R. Hall, M. W. Cornett, M. Ahlering, M. Schindel, B. Unnasch, C. Schloss, e D. R. Cameron. 2023. [A resilient and connected network of sites to sustain biodiversity under a changing climate](#). Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 120:109.
- Anderson, M. G., M. Clark, e A. O. Sheldon. 2012. Resilient Sites for Terrestrial Conservation in the Northeast and Mid-Atlantic Region. Página 168. The Nature Conservancy, Eastern Conservation Science.
- Anderson, M. G., M. Clark, e A. O. Sheldon. 2014. [Estimating climate resilience for conservation across geophysical settings](#). Conservation Biology 28:959–970.
- Anderson, M. G., M. Clark, e A. O. Sheldon. 2016. [Resilient Sites for Terrestrial Conservation in Eastern North America](#). Conservation Biology 28:959–970.
- Dobrowski, S. Z. 2011. [A climatic basis for microrefugia: The influence of terrain on climate](#). Global Change Biology 17:1022–1035.
- Fels, J. E., e K. C. Matson. 1996. A cognitively-based approach for hydrogeomorphic land classification using digital terrain models. National Center for Geographic Information; Analysis, Santa Fe, New Mexico, USA.
- Gorelick, N., M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, e R. Moore. 2017. [Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone](#). Remote Sensing of Environment.
- Gumbrecht, T., R. M. Román-Cuesta, L. V. Verchot, M. Herold, F. Wittmann, E. Householder, N. Herold, e D. Murdiyarso. 2017. [Tropical and subtropical wetlands distribution version 2](#).
- MapBiomass Project. 2020. [Collection 7 of the Annual Series of Land Use and Land Cover Maps of Brazil](#).
- Theobald, D. M., D. Harrison-Atlas, W. B. Monahan, e C. M. Albano. 2015. [Ecologically-Relevant Maps of Landforms and Physiographic Diversity for Climate Adaptation Planning](#). PLOS ONE 10:e0143619.
- Weiss, A. C. 2001. Topographic position and landforms analysis. San Diego, CA, USA.
- Yamazaki, D., D. Ikeshima, J. Sosa, P. D. Bates, G. H. Allen, e T. M. Pavelsky. 2019. [MERIT Hydro: A High-Resolution Global Hydrography Map Based on Latest Topography Dataset](#). Water Resources Research 55:5053–5073.

Yamazaki, D., D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O'Loughlin, J. C. Neal, C. C. Sampson, S. Kanae, e P. D. Bates. 2017. [A high-accuracy map of global terrain elevations: Accurate Global Terrain Elevation map](#). Geophysical Research Letters 44:5844–5853.