

Oficina: Mapeamento de áreas resilientes a mudanças climáticas nos biomas brasileiros

Table of contents

Resumo executivo	4
1 Resumo	5
2 Justificativa	7
3 Objetivo	8
3.1 Objetivos específicos	8
4 Introdução	9
4.1 Membros da equipe	10
4.1.1 Equipe TNC	10
4.1.2 Equipe Biomas	11
5 Métodos	12
5.1 Regiões eco-geológicas	12
5.2 Resiliência	13
5.2.1 Diversidade da paisagem	13
5.2.2 Amplitude altitudinal	13
5.2.3 Conectividade local	14
5.2.4 Combinando diversidade da paisagem e conectividade local: resiliência .	14
5.3 Conectividade regional	15
6 Detalhamento das Análises	16
6.1 Regiões eco-geológicas	16
6.2 Resiliência da Paisagem	16
6.2.1 Diversidade da paisagem	17
6.2.2 Conectividade local	21
6.2.3 Combinando diversidade da paisagem e conectividade local: resiliência .	22
6.3 Conectividade regional	22
7 Resultados	24
7.1 Diversidade da paisagem	24
7.2 Conectividade local	24
7.2.1 Conectividade baseada em teoria de circuitos	24

Resumo executivo

O projeto *Resiliência de ecossistemas brasileiros a mudanças climáticas*

1 Resumo

As mudanças no clima modificam ambientes naturais e pressionam espécies a se adaptarem às novas condições ambientais ou alterarem suas distribuições espaciais para locais adequados climaticamente. A identificação de locais com adequabilidade climática para sustentar a biodiversidade no futuro de mudanças climáticas é imprescindível para o planejamento sistemático de ações de conservação e restauração. Nesse sentido, o objetivo principal do projeto é mapear sítios resilientes às mudanças climáticas, que permitam a movimentação da biodiversidade na busca de áreas mais climaticamente adequadas. O termo *áreas resilientes* indica locais que apresentam condições necessárias para que espécies e processos ecológicos persistam às mudanças climáticas regionais, definidos por sua alta diversidade microclimática, grau de conservação e conectividade. A metodologia proposta para isso combina a diversidade da paisagem, um proxy da variabilidade microclimática, com a conectividade local, identificando locais que forneçam condições microclimáticas para o enfrentamento às mudanças climáticas, cujas matrizes da paisagem sejam permeáveis à movimentação das espécies. A diversidade da paisagem é baseada na geodiversidade (geomorfologia, geologia, pedologia e hidrologia) do terreno, composta pela variedade de *landforms*, amplitude altitudinal, densidade e quantidade de áreas úmidas e diversidade de solos. A conectividade local é baseada na resistência das matrizes da paisagem ao movimento da biodiversidade, combinando uso do solo e infraestruturas de energia e transporte existentes (com maior ou menor grau de antropização). A metodologia desenvolvida segue três premissas básicas: (1) a diversidade de espécies é correlacionada com a diversidade da paisagem (geodiversidade); (2) em um cenário de mudança climática, espécies se beneficiam de microclimas locais para se manterem na paisagem; e (3) populações de espécies podem usar microclimas e acompanhar mudanças microclimáticas se as áreas adequadas forem permeáveis e bem conectadas. Essa análise foi proposta e validada para a América do Norte pela *The Nature Conservancy* (TNC), complementando outras metodologias disponíveis na literatura, uma vez que ela foca nas propriedades do terreno para identificar áreas resilientes. A aplicação da metodologia da TNC para os biomas brasileiros é um passo importante na identificação de sítios resilientes em ambientes tropicais megadiversos. Atuando em conjunto com especialistas dos diferentes biomas e baseado na literatura disponível, o projeto busca adequar a metodologia original ao contexto dos biomas brasileiros, refinando e adaptando quando necessário. O produto resultante desse projeto é um mapa de áreas resilientes e conectadas para os biomas do Brasil e permite identificar áreas com potencial de sustentar animais e plantas em um clima sob mudanças, um relatório técnico, uma documentação reproduzível das análises e um artigo científico.

Palavras chave: Resiliência climática, mudanças climáticas, conectividade, paisagem, geodi-

versidade, conservação, biodiversidade

2 Justificativa

As mudanças no clima modificam ambientes naturais e pressionam espécies para se adaptar ou alterar a sua distribuição no espaço. Estratégias de conservação de espécies e ecossistemas devem considerar o efeito das mudanças climáticas, bem como pressões antrópicas diretas na biodiversidade (Jones et al. 2016). Entretanto, para conservar espécies em um clima em mudança é preciso considerar como as espécies poderão utilizar os habitats no futuro, levando em consideração como as mudanças climáticas em andamento vão afetar esses locais e essas espécies ao longo do tempo (Carrasco et al. 2021). Identificar locais que podem ser mais adequados para resguardar um conjunto de espécies em um futuro de mudanças é imprescindível para o planejamento de ações de conservação e restauração (Jones et al. 2016, Carrasco et al. 2021). Nesse contexto, existem diversas técnicas de priorização espacial que buscam identificar locais adequados para a conservação de espécies e ecossistemas (Anderson and Ferree 2010, Jones et al. 2016). Uma delas, desenvolvida e aplicada para a América do Norte (Anderson et al. 2014, 2016a, Anderson et al. 2016b), prevê a identificação de áreas-chave para conservação, baseadas nas características do terreno que aumentam a diversidade microclimática, propiciando maior diversidade de habitats para espécies, e que aumentam a conectividade entre esses locais, possibilitando a dispersão das espécies. Essa metodologia, ainda não aplicada para regiões tropicais, tem um potencial alto de aplicação para o planejamento de conservação. Ela identifica áreas com maior resiliência e conectadas entre si, indicando locais que seriam mais resilientes às futuras mudanças no clima e teriam maior potencial de sustentar animais e plantas em um clima sob mudanças.

3 Objetivo

O objetivo principal do projeto é mapear sítios resilientes a mudanças climáticas e conectados entre si, identificando locais que seriam mais adequados a persistir e se adaptar a mudanças no clima.

3.1 Objetivos específicos

O objetivo geral do estudo pode ser detalhado em dois objetivos específicos:

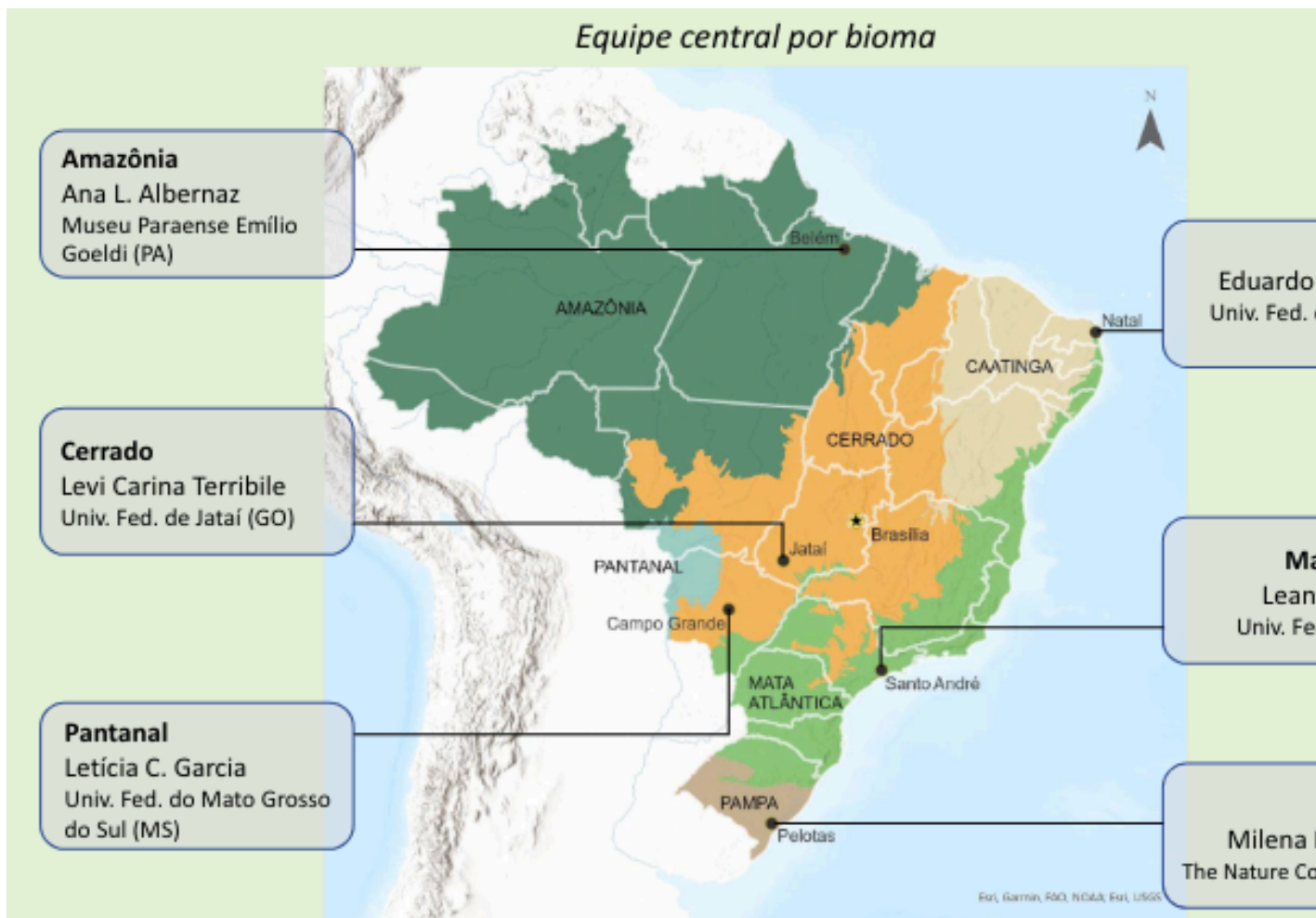
- Aplicar a metodologia de mapeamento de sítios resilientes, proposta e validada para a região da América do Norte, para o Brasil, conduzindo as análises de diversidade da paisagem e de conectividade local
- Refinar e adaptar a metodologia proposta, **com base em discussões com especialistas no tema que atuam na região de estudo**, produzindo um mapa de áreas resilientes para o Brasil.

4 Introdução

O projeto *Mapeamento de áreas resilientes a mudanças climáticas nos biomas brasileiros* está coordenado por *The Nature Conservancy* Brasil e será realizado virtualmente nos dias **12 e 16 de junho de 2023**.

O projeto procura mapear sítios resilientes a mudanças climáticas e áreas importantes para manutenção ou restabelecimento da conectividade entre eles, identificando locais que seriam mais adequados a persistir e se adaptar às futuras mudanças no clima. O produto principal do projeto é um mapa de áreas resilientes a mudanças climáticas para o Brasil.

4.1 Membros da equipe



4.1.1 Equipe TNC

- Milena F. Rosenfield
- José Fronza
- Mário Barroso
- Edenise Silveira
- Clícia Barata

4.1.2 Equipe Biomas

- Amazônia: Ana Albernaz, Luciano Querido
- Caatinga: Eduardo Venticinque, Marina Antongiovanni
- Cerrado: Levi Carina Terribile, Lucas Jardim
- Mata Atlântica: Leandro Tambosi, Andrea Sánchez-Tapia
- Pampa: Milena F. Rosenfield, José Fronza
- Pantanal: Letícia Couto Garcia, Alisson Ribeiro

5 Métodos

A metodologia proposta para identificar sítios resilientes (Anderson et al. 2014, 2016a, Anderson et al. 2016b, e Anderson et al. 2023) envolve o mapeamento das configurações geofísicas, a análise da diversidade da paisagem e da conectividade local, para, por fim, gerar o mapa de áreas resilientes. Cada uma dessas etapas é descrita a seguir.

5.1 Regiões eco-geológicas

A primeira etapa consiste em caracterizar e classificar a região de estudo em **regiões eco-geológicas** baseadas no meio físico e biológico. Para tal, nós utilizamos domínios geológicos e ecoregiões. Os domínios geológicos foram derivados de unidades geológicas, as quais são agrupamentos de rochas. Entretanto, devido ao alto número de categorias para o Brasil (em torno de 1350), foram utilizados os domínios geológicos (14 categorias) como agrupamentos de unidades geológicas. Zonas altitudinais não foram utilizadas, pois a variabilidade proveniente das mesmas já é considerada nas ecoregiões. Esses dados são então integrados para identificar regiões homólogas (com características similares). Tanto os domínios geológicos quanto as ecoregiões são polígonos que representam as diferentes categorias, que foram rasterizados para prosseguir com o cálculo das regiões eco-geológicas através da seguinte equação:

$$Regies\ eco - geologicas = (Ecoregies) + (100 \times Domnio\ Geolgico)$$

Desta forma, os valores do raster final estão no formato **GGEE**, onde **GG** representam os domínios geológicos e **EE** as categorias de ecoregiões.

No estudo desenvolvido nos EUA o mapeamento foi feito por ecoregiões, uma vez que esses locais apresentam condições ambientais similares, especialmente relacionado a *landforms*, geologia e solos, e que compartilham conjuntos de comunidades naturais e espécies. Esse produto foi chamado de *geophysical settings*, levando em conta a geologia ou solo com zonas altitudinais. Entretanto, neste trabalho chamamos o mesmo produto de regiões eco-geológicas, visto que a geofísica investiga características não utilizadas no trabalho (elétricas, térmicas, magnéticas, gravitacionais e sísmicas).

5.2 Resiliência

A segunda etapa consiste nas estimativas de resiliência dos sítios. Para estimar a resiliência de um sítio, é necessário estimar a **diversidade da paisagem** e a **conectividade local** para cada célula de 30 m. O resultado dessas análises é combinado para então estimar o valor de resiliência para cada local.

5.2.1 Diversidade da paisagem

A diversidade da paisagem está relacionada à variedade de microclimas em um determinado local. A análise de diversidade da paisagem resume informações relacionadas a: (a) variedade de landforms, (b) amplitude altitudinal, (c) densidade de banhados ou áreas úmidas (*wetlands*) e (d) propriedades do solo em um determinado local. A variedade de *landforms* diz respeito à variedade de componentes naturais do terreno criados pela topografia. Sua avaliação é baseada em um modelo de landforms (derivado de um DEM com resolução de 30 m), que classifica a superfície em diversas categorias de *landforms*, como por exemplo:

- precipícios e áreas íngremes - *cliff and steep slope*
- topos de montanha e divisores de águas (*summit and ridge-top*)
- vertentes norte e sul, que determinam se uma vertente é cálida ou fria, especialmente em latitudes maiores, (*north/south-facing side slope*)
- colinas baixas (*low hill*)
- áreas planas de terras baixas (*dry flat*), entre outros.

A classificação de *landforms* leva em conta a combinação de informações sobre **inclinação, orientação, posição no terreno e acumulação de umidade** (*slope, aspect, land position, moisture accumulation*), que corresponde a ambientes topográficos locais com combinações distintas de umidade, radiação e deposição.

A **diversidade da paisagem** é calculada pelo número de *landforms* dentro de uma área circular de 40 ha no entorno de cada célula de 30 m.

5.2.2 Amplitude altitudinal

A amplitude altitudinal é determinada a partir do DEM, tabulando a amplitude em uma área circular de 40 ha no entorno de cada célula de 30 m. A amplitude altitudinal considerada no estudo corresponde ao componente não correlacionado com o componente de *landforms*. Para áreas extremamente planas, nas quais a variedade de *landforms* e a amplitude altitudinal não permitem discriminar de forma correta células equivalentes, foram avaliadas a densidade de áreas úmidas/banhados (*wetlands*) e a diversidade de solos. A densidade de banhados é incluída como um indicador em escala mais fina de características microtopográficas não capturadas nas classes do modelo de *landforms*. O índice de densidade de banhados é obtido

pelo cálculo do percentual de banhados dentro de buffers de 40 ha e 400 ha em cada célula de 30 m. O cálculo do valor de banhados envolve ainda a avaliação de manchas irregulares de áreas úmidas (*wetland patchiness*) na paisagem, que leva em conta a distribuição irregular de áreas úmidas de tamanho reduzido. Por fim, em áreas muito planas de regiões costeiras, **foi incluído ainda um componente adicional de diversidade de solos**, que gera uma informação em escala mais fina para identificar variações em áreas planas de alta diversidade nas características do solo.

A combinação dos índices de variedade de **landforms**, amplitude altitudinal, valor de banhado e diversidade de solos descritos acima gera o **índice de diversidade da paisagem**. Esse índice pondera a variedade de *landforms* com peso maior, sendo ela o dobro do peso das demais variáveis:

5.2.3 Conectividade local

A conectividade local permite estimar o grau de permeabilidade (ou reciprocamente o grau de resistência) em torno de cada célula avaliada. O algoritmo utilizado mede a conectividade de uma célula focal com o seu vizinho ecológico quando a célula é vista como uma fonte de movimento radiando em todas as direções. O pressuposto é de que a permeabilidade de duas células adjacentes aumenta quando a sua similaridade ecológica aumenta.

A partir de um mapa de uso e cobertura do solo, incluindo a presença de estradas, é realizada uma simplificação dos tipos de uso em componentes principais da paisagem e determinado pesos de resistência para cada categoria, nos quais áreas naturais apresentam o valor mínimo, e áreas com intervenção antrópica intensa, o valor máximo.

As categorias principais de componentes da paisagem foram definidas como:

- áreas naturais (florestas, banhados, campos),
- áreas agrícolas ou modificadas (incluindo áreas improdutivas não-naturais)
- áreas urbanizadas (de baixa ou alta intensidade).

A conectividade local é medida através da análise de resistência de cada célula. Nesse contexto, a dispersão teórica de uma espécie (ou processo) a partir de uma célula focal é uma função dos valores de resistência das células vizinhas e suas distâncias com relação à célula focal, até uma distância máxima de 3 km. A nota de conectividade local para uma célula é igual à área de dispersão, levando em conta a resistência dividida pela área de dispersão teórica se não houvesse resistência.

5.2.4 Combinando diversidade da paisagem e conectividade local: resiliência

O valor de resiliência de um sítio é determinado pela combinação da diversidade da paisagem e da conectividade local

(valor de resiliência = (diversidade da paisagem + conectividade local)/2),

utilizando dados padronizados (*z-scores*).

O resultado final é um mapa com grid de 30 m, constando os valores estimados de resiliência para cada local.

O mapeamento final dos sítios resilientes é feito por **configurações geofísicas** (item acima) dentro de ecoregiões. Isso garante a inclusão de condições físicas e ambientais distintas e permite capturar variações na composição da biota associada. Nesse sentido, **a resiliência é comparada dentro de cada configuração e não entre configurações geofísicas.**

O mapa final de resiliência indica locais com maior ou menor resiliência comparados ao valor médio da região avaliada. São considerados valores médios aqueles com -0,5 a 0,5 desvios padrão ao redor da média.

Os sítios com valores mais elevados de resiliência estão associados a locais com maiores níveis de biodiversidade (Anderson et al. 2014). A metodologia descrita indica, para cada configuração geofísica, sítios que são mais prováveis de reter espécies e funções por um maior período sob mudanças no clima, possibilitando a identificação de refúgios naturais para conservação no futuro (Anderson et al. 2014)

5.3 Conectividade regional

A conectividade regional...

A conectividade baseada em teoria de circuitos utiliza um marco conceitual originário da teoria de circuitos (elétricos) e consegue propor diferentes caminhos de menor resistência por onde a “corrente” (o fluxo entre áreas) pode passar. Esta abordagem detecta áreas onde esta corrente se veria **concentrada** pela configuração espacial da paisagem (por exemplo, através de uma barra ou um estreito) ou a presença de áreas de alta resistência, e áreas onde o fluxo seria **difuso** (por exemplo, em áreas contíguas de baixa resistência, onde o fluxo pode acontecer em qualquer direção e com menor intensidade).

Nesta abordagem, áreas com alta resistência—onde o fluxo seria impedido—devem ser diferenciadas das áreas de baixa resistência onde o fluxo é baixo por ter se dispersado.

6 Detalhamento das Análises

6.1 Regiões eco-geológicas

As regiões eco-geológicas do Brasil foram feitas para encontrar regiões homólogas em relação aos **Domínios Geológicos** e às **Ecoregiões** do país, que pudessem ser usadas para limitar a variação das variáveis ambientais usadas ao calcular **Resiliência da Paisagem**, de modo a normalizar os valores de resiliência de acordo com regiões homólogas, ao invés de todo o país.

Os **Domínios Geológicos** são grupos de unidades geológicas, separados pelas similaridades nas classificações de tipo de rocha. Os domínios foram criados a partir da classificação feita pela CPRM (Serviços Geológico do Brasil; (citação?)). A classificação por unidades geológicas consistia em um número muito grande de categorias para o Brasil (aproximadamente 1350), por esse motivo utilizamos um agrupamento dessas categorias por **Domínios Geológicos** (14 domínios).

Já as **Ecoregiões** são agrupamentos de regiões ecológicas similares, consistem em unidades biogeográficas que compartilhem comunidades naturais de espécies, dinâmicas naturais e condições ambientais (citação?). Nós utilizamos a classificação da Terrestrial Ecoregions of the World (TEOW), que é uma regionalização biogeográfica da biodiversidade terrestre realizada pela WWF (citação?). Para o Brasil existem 50 ecoregiões.

Tanto os domínios geológicos quanto as ecoregiões são polígonos que representam as diferentes categorias, que foram rasterizados para prosseguir com o cálculo das regiões eco-geológicas através da seguinte equação:

$$Regiões\ eco - geológicas = (Ecoregions) + (100 \times Domínio\ Geológico)$$

Desta forma, os valores do raster final estão no formato **GGEE**, onde **GG** representam os domínios geológicos e **EE** as categorias de ecoregiões.

6.2 Resiliência da Paisagem

A Resiliência da Paisagem foi calculada como a média entre os valores padronizados (Z) de **Diversidade da Paisagem** e **Conectividade Local**. Todas as imagens utilizadas para o cálculo de Resiliência estão na escala de 90 metros e foram reprojetaadas para o *DATUM WGS84*.

6.2.1 Diversidade da paisagem

O cálculo de diversidade da paisagem foi realizado no Google Earth Engine (Gorelick et al. 2017) e é composto por médias feitas pixel a pixel entre os maiores valores padronizados (*Z-scores*) das imagens: **Variedade de Formas de Relevo**, **Amplitude Altitudinal**, **Densidade de Banhados** e **Diversidade de Solo**. Utilizamos o Google Earth Engine por ser uma plataforma baseada em nuvem que oferece acesso remoto a uma vasta coleção de imagens de satélite e bases de dados geoespaciais de acesso livre e com capacidade computacional para realizar as análises em qualquer equipamento disponível (Gorelick et al. 2017). Isso possibilita com que nossas análises sejam de livre acesso e que contribua para uma ciência mais transparente e livre (citação?).

6.2.1.1 Formas de Relevo

A classificação e distribuição espacial das formas de relevo são a base para o cálculo da **diversidade da paisagem** e representam áreas com maiores estabilidade microclimática que resistirão aos impactos causados pelas mudanças climáticas (citação?). Essa classificação é baseada em combinações de informações sobre a **inclinação** (*slope*), **orientação** (*aspect*), **índice de posição topográfica** (*topographic position index*), **índice de umidade** (*moisture index*) e a distribuição de **rios**, **lagos** e **áreas úmidas** dos ambientes. Essa combinação corresponde a ambientes topográficos locais com combinações distintas de umidade, radiação e deposição de sedimentos (citação?).

Nossa metodologia de classificação de formas de relevo foi baseada em estudos prévios executados pela equipe de **Ciências da TNC Global**, publicada inicialmente em 2014 (citação?) e refinada em 2016 (citação? dos dois relatórios).

Para o cálculo de **inclinação**, **aspecto** e **índice de posição topográfica (TPI)**, utilizamos a imagem do modelo digital de elevação (DEM) do Merit-DEM (citação?), em uma escala de 90 metros. Escolhemos utilizar esse DEM por ser um produto em escala global, de livre acesso e com correções de vários vieses de modelos de elevação, que possibilitam que nosso trabalho seja replicável e mais próximo a realidade dos biomas que modelamos (citação?).

Para o cálculo de **acúmulo de fluxo**, utilizamos o Merit-Hydro (citação?) que é um produto derivado do Merit-DEM e que possibilita o cálculo do acúmulo de fluxo em uma escala global e corrigida para o efeito da densidade de árvores no cálculo da rede hidrográfica da região (citação?).

Para complementar a superfície gerada pelo acúmulo de fluxo e definir a presença de **rios**, **lagos** e **áreas úmidas**, nós incluímos as classes de água do MapBiomas (citação?). 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. ##### Índice de posição topográfica O cálculo do TPI foi feito em três escalas com um *kernel* circular com 7, 11 e 15 células de

raio, calculando a diferença da média de elevação entre a célula focal e um conjunto de células vizinhas no *kernel*, divididos pelo número de células vizinhas (n).

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

Onde a vizinhança i representa cada uma das n células dentro do *kernel* da célula focal. O índice final é composto pela média de TPI das três janelas, o que permite a consideração de diferentes níveis de resolução da paisagem, tanto local quanto regional (Theobald *et al.* 2015)(citação?). Os tamanhos das janelas foram definidos visualmente para que melhor representassem as formas de relevo.

6.2.1.1.1 Aspecto do relevo

O **aspecto do relevo** é calculado como um gradiente local das 4 células adjacentes, os resultados são apresentado em graus que representam a direção do relevo (0° = Norte, 90° = Leste, 180° = Sul e 270° = Oeste). Nós dividimos os resultados do aspecto em dois grupos baseados na quantidade de insidência solar, sendo células com valores entre 90° e 270° classificados como **faces frias** e valores entre 0° a 90° e 270° a 360° foram classificados como **faces quentes**.

6.2.1.1.2 Inclinação do Relevo

A **inclinação do relevo** é calculada como um gradiente local das 4 células adjacentes, os resultados são apresentado em graus que representam a inclinação do relevo (0° a 90°). A inclinação foi dividida em 5 grupos baseado em faixas de inclinação, para melhor classificar diferentes formas do relevo. |Inclinação|Grupo | |---| 0° a 2° | 1 | 2° a 6° | 2 | 6° a 24° | 3 | 24° a 35° | 4 | 35° a 90° | 5 |

6.2.1.1.3 Índice de umidade

O índice de umidade foi calculado com base no **acúmulo de fluxo** do Merit-Hydro e a **inclinação do relevo** que calculamos anteriormente.

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

O *moisture index* é a média do índice dentro de um *kernel* circular de uma célula de raio. O tamanho do raio foi escolhido visualmente para suavizar o índice, mas representando bem a distribuição dos cursos d'água. Classificamos como áreas úmidas somente regiões que apresentassem um valor do índice de umidade acima de 3000 e definimos esse valor para que visualmente pudessemos capturar a distribuição dos cursos d'água sem superestimar outras áreas planas. Porém, esse corte do índice não consegue classificar bem corpos de água com grandes extensões (Amazonas, represas e grandes lagos), por isso nós corrigimos a classificação sobrepondo a camada do índice de umidade com a camada de águas do MapBiomias.

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

6.2.1.2 Amplitude Altitudinal

A amplitude Altitudinal vai representar a variação da elevação em uma região, independente do número de **formas de relevo**, para diminuir a relação entre as formas de relevo e a elevação já que elas são correlacionadas entre si (**citação?**). A amplitude altitudinal foi calculada como a diferença entre os valores máximos e mínimos de elevação, dentro de um *kernel* circular de 450 metros, a partir dos dados do *Digital Elevation Model* do MERIT (**citação?**). Então fizemos uma Regressão Linear Simples (*Ordinary Linear Regression*; (**citação?**)) entre os **valores de amplitude** e a **variedade de formas de relevo** e obtivemos os valores dos resíduos dessa análise para diminuir a correlação entre as duas variáveis.

Por fim, os valores da variação desses resíduos da correlação entre a amplitude e a variedade da forma de relevo, para cada pixel (Z_{pixel}) podem ser calculados ao subtrair o valor da média (μ) e dividindo o resultado pelo desvio padrão (σ), como mostrado na fórmula a seguir:

$$Z_{pixel} = \frac{X_{pixel} - \mu}{\sigma}$$

Dessa forma, temos uma imagem que nos mostra a variação, em relação a média, dos valores dos resíduos da amplitude altitudinal para o Brasil e dentro de cada uma das categorias de **regiões eco-geológicas**.

6.2.1.3 Densidade de Banhados

Para calcular a densidade de banhados usados os dados disponibilizados na base de dados *Global Wetlands Database* (**citação?**), que é uma base de dados que fornece informação e

inventário de áreas úmidas no mundo. Os dados são obtidos através de imagens de satélite, amostragens aéreas e relatórios publicados. Como áreas de banhados ocorrem em diversas configurações e distribuição no espaço, nós avaliamos as variações das mesmas em escala local (450 metros) e em uma escala regional (1170 metros). Para o cálculo final dos valores de Densidade de banhados, utilizamos tanto o número de pixels em escala regional e a densidade, tanto em escala regional quanto local. A **densidade de banhados** foi calculada como o uma média do número de *pixels* de áreas de banhado, dentro de um kernel de escala regional (1170 metros) e um kernel em escala local (450 metros), excluindo rios e lagos. Já a **contagem em escala local** foi calculada como uma contagem de *pixels* dentro de um *kernel* circular com 1170 metros de diâmetro. A contagem vai representar o número de áreas úmidas (excluindo rios e lagos), mostrando regiões de maiores concentrações de pixels de áreas úmidas, que apresentem uma baixa densidade de banhados. Essas 3 camadas vão auxiliar na identificação de regiões de **Diversidade da Paisagem** que apresentem valores baixos para formas de relevo e amplitude de elevação, mas que tenham uma acumulação de áreas úmidas que poderiam amenizar localmente o efeito das mudanças climáticas (**citação?**).

Para calcular os valores finais de densidade de banhado, precisamos juntar as informações das 3 camadas produzidas, primeiro calculando os valores estandarizados para cada uma delas e depois fazendo uma série de médias pixel a pixel para selecionar os maiores valores de Z . Calculamos os valores estandarizados de Z para cada pixel (Z_{pixel}) ao subtrair o valor da média (μ) e dividir o resultado pelo desvio padrão (σ), como mostrado na fórmula a seguir:

$$Z_{pixel} = \frac{X_{pixel} - \mu}{\sigma}$$

A média e o desvio padrão, e portanto os valores de Z , foram calculados tanto para toda a extensão do Brasil, como dentro das diferentes categorias de **regiões eco-geológicas**. Com o Z calculado para as 3 camadas, podemos calcular os valores de diversidade de áreas de banhado ($Z_{banhado}$) ao fazermos uma média dos valores para as camadas de densidade e contagem. Primeiro calculamos a média entre as imagens de densidade de banhados em escala local (Z_{local}) e regional ($Z_{regional}$), com mais peso para os valores da densidade local:

$$Z_{densidade} = \frac{(Z_{local} \times 2) + Z_{regional}}{3}$$

Ao compararmos esse resultado a imagem de contagem regional, podemos identificar os locais onde os valores para densidade ($Z_{densidade}$) são menores que os valores de contagem ($Z_{contagem}$) e calculamos a média para esses pixels, novamente dando mais peso ao valores de densidade:

$$Z_{banhado} = \frac{(Z_{densidade} \times 3) + Z_{contagem}}{4}$$

Ao final de todas as operações, temos uma única imagem com valores que representam a variação em relação à média dos valores de densidade e contagem de pixels de áreas de banhado tanto para a extensão do Brasil, quanto referentes às regiões eco-geológicas.

6.2.1.4 Diversidade de Solo

A diversidade de solo foi calculada como a distribuição do número de classes de solo, dentro de um *kernel* de 1350 metros e foi usada para indicar áreas com grande concentração dos diferentes tipos de solo que vão afetar diretamente na diversidade de espécies do ambiente. Para calcular o raster de diversidade do solo usamos a classificação oficial dos solos brasileiros, disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE; (**citação?**)). Como a classificação do IBGE foi disponibilizada em formato de *shapefiles*, começamos a análise separando cada uma das 108 classes de solo do Brasil e calculamos um raster de presença e ausência do tipo de solo. Ao final do processo podemos somar os diferentes mapas de presença para obter os mapas de diversidade do solo, onde os maiores valores de cada pixel mostram áreas com concentração de diferentes tipos de solo.

Por fim, calculamos os valores de Z para cada pixel (Z_{pixel}) ao subtrair o valor da média (μ) e dividindo o resultado pelo desvio padrão (σ), como mostrado na fórmula a seguir:

$$Z_{pixel} = \frac{X_{pixel} - \mu}{\sigma}$$

Os cálculos de Z foram feitos tanto a nível nacional do Brasil, quanto dentro de cada classificação de **regiões eco-geológicas** usando as médias e desvios padrões dentro de cada uma das classes.

6.2.2 Conectividade local

Resíduos da regressão da diversidade da paisagem em função do clima.

6.2.2.1 Cálculos de resistência

Os valores de resistência são medidas relativas do grau de dificuldade de deslocamento dos organismos nos diferentes tipos de cobertura do solo. Essas medidas foram atribuídos por bioma, seguindo a premissa é que quanto maior for a diferença estrutural entre um dado tipo de cobertura do solo e a vegetação original do bioma, maior será o valor de resistência da classe de cobertura do solo em questão.

Os dados espaciais primários utilizados para calcular a superfície de resistência, até o momento, foram a camada de cobertura do solo fornecida pelo MapBiomas (coleção 7, ano 2021) e a base de estradas pavimentadas e não pavimentadas fornecida pelo IBGE (BCIM250, ano 2021). Para tanto, preliminarmente, a superfície de cobertura do solo do MapBiomas foi reamostrada para gerar pixels com 90 metros de tamanho, aproximadamente. Também convertimos o arquivo vetorial de estradas para o formato matricial, com pixels de tamanho aproximado de 90 metros. Conjugamos, por álgebra de mapas, as bases matriciais do MapBiomas e de estradas de tal maneira que todos os pixels da base do MapBiomas que se sobrepuseram a um pixel de

estrada assumiram um novo valor correspondente a um pixel de estrada pavimentada ou não pavimentada. Os pixels do mapa consolidado de cobertura do solo, já incluindo as estradas pavimentadas e não pavimentadas como novas classes, receberam, separadamente por bioma, valores de resistência que buscaram traduzir, comparativamente entre as classes, o grau de dificuldade de movimentação de um dado animal ou propágulo numa dada classe de cobertura do solo. A premissa assumida aqui é que quanto maior for a diferença estrutural da classe de cobertura do solo para o hábitat original do bioma, maior será a dificuldade à movimentação que esta classe oferece. Os valores de resistência dos pixels de cada uma das classes foram atribuídos, por bioma, pela equipe do Projeto e podem ser vistos na tabela XXX.

Depois de atribuídos os valores de resistência, aplicamos à superfície gerada a função Kernel de decaimento linear. Esta análise considerou, numa janela móvel de 23 pixels, o contexto espacial em que cada pixel está inserido, reconhecendo que pixels mais próximos possuem uma influência maior um sobre outro do que pixels mais distantes. Desta maneira, a função Kernel nos auxilia na tarefa de encontrar os melhores caminhos de deslocamento na paisagem, ou seja, aqueles caminhos que oferecem menor resistência.

6.2.2.2 Filtro de kernel como *proxy* da conectividade local

Um filtro de *kernel* de 23 x 23 píxeis (~2070m) foi aplicado ao raster de resistências.

6.2.3 Combinando diversidade da paisagem e conectividade local: resiliência

6.3 Conectividade regional

O cálculo da conectividade regional, baseada em teoria de circuitos (McRae 2006) foi realizado utilizando a implementação de Omniscape para Julia (Landau et al. 2021, Hall et al. 2021).

Foram utilizados:

- o raster de resistência, com filtro de *kernel* utilizado como base para a conectividade local, subamostrado para uma resolução de 900m por pixel,
- um raio da área de interesse de 100 píxeis (~90km)
- agrupamentos de 5 píxeis de interesse para a janela móvel (~4.5km).

O output de Omniscape são três arquivos de conectividade relacionados:

- **flow_current** é o fluxo que aconteceria sem levar em conta a camada de resistência. Ele leva em conta a configuração espacial da paisagem (estreitos, barras) e dos píxeis de baixa resistência de origem. Nem todo pixel é source pixel, mas a corrente que entra em cada pixel de baixa resistência entra sem resistência. Flow current é usado como um “modelo nulo” de conectividade.

- **cumulative_current** é a corrente levando em conta a configuração espacial e os valores de resistência
- **normalized_current** equivale a $\frac{cumulative_current}{flow_current}$ e controla o efeito da configuração espacial do cálculo de conectividade.

Os resultados da análise nesta escala espacial foram reclassificados de acordo com a distribuição ao redor da média dos valores nas categorias seguintes:

- Entre o valor mínimo e média - 0,5 desvio padrão: fluxo impedido. O fluxo não consegue circular devido à presença de áreas de alta resistência, podendo se redirecionar em torno a essas áreas
- Entre média - 0,5 desvio padrão e média + 1 desvio padrão: fluxo difuso. O fluxo consegue se dispersar em áreas contíguas de resistências baixas a moderadas, sem se ver impedido ou canalizado
- Entre média + 1 desvio padrão e média + 2 desvios padrão: fluxo intensificado. O fluxo potencial se concentra devido à configuração da paisagem ou de áreas de alta resistência que forçam um rumo determinado
- Maior que a média + 2 desvios padrão: fluxo canalizado. Fluxo muito acima do esperado em uma área sem resistência. Ele passa por estreitos, barras de areia e estruturas similares.

7 Resultados

7.1 Diversidade da paisagem

7.2 Conectividade local

7.2.1 Conectividade baseada em teoria de circuitos

References

- 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, and 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* 120:e2204434119.
- Anderson, M. G., M. Clark, and A. O. Sheldon. 2014. [Estimating Climate Resilience for Conservation across Geophysical Settings](#). *Conservation Biology* 28:959–970.
- Anderson, M. G., M. Clark, and A. O. Sheldon. 2016a. [Resilient Sites for Terrestrial Conservation in Eastern North America](#). *Conservation Biology* 28:959–970.
- Anderson, M. G., and C. E. Ferree. 2010. [Conserving the Stage: Climate Change and the Geophysical Underpinnings of Species Diversity](#). *PLOS ONE* 5:e11554.
- Anderson, M., A. Barnett, M. Clark, J. Prince, S. A. Olivero, and B. Vickery. 2016b. Resilient and Connected Landscapes for Terrestrial Conservation.
- Carrasco, L., M. Papeş, K. S. Sheldon, and X. Giam. 2021. [Global progress in incorporating climate adaptation into land protection for biodiversity since Aichi targets](#). *Global Change Biology* 27:1788–1801.
- Gorelick, N., M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore. 2017. [Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone](#). *Remote Sensing of Environment*.
- Hall, K. R., R. Anantharaman, V. A. Landau, M. Clark, B. G. Dickson, A. Jones, J. Platt, A. Edelman, and V. B. Shah. 2021. [Circuitscape in Julia: Empowering Dynamic Approaches to Connectivity Assessment](#). *Land* 10:301.
- Jones, K. R., J. E. M. Watson, H. P. Possingham, and C. J. Klein. 2016. [Incorporating climate change into spatial conservation prioritisation: A review](#). *Biological Conservation* 194:121–130.
- Landau, V., V. Shah, R. Anantharaman, and K. Hall. 2021. [Omniscape.jl: Software to compute omnidirectional landscape connectivity](#). *Journal of Open Source Software* 6:2829.
- McRae, B. H. 2006. Isolation by resistance. *Evolution* 60:1551–1561.