

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

2023-06-12

Índice

Síntese do projeto	3
Palavras chave:	4
1 Introdução	5
1.1 Membros da equipe	6
1.1.1 Equipe TNC Brasil	6
1.1.2 Equipe central por bioma	7
1.1.3 Especialistas convidados	7
2 Objetivo	9
2.1 Objetivos específicos	9
3 Sobre o grupo de trabalho e as oficinas	10
4 Metodologia resumida	11
4.1 Regiões eco-geológicas	11
4.2 Resiliência	12
4.2.1 Diversidade da paisagem	12
4.2.2 Conectividade local	13
4.2.3 Resiliência: combinando diversidade da paisagem e conectividade local .	14
4.3 Dados padronizados (<i>Z-scores</i>)	14
5 Detalhamento das análises	15
5.1 Regiões eco-geológicas	15
5.2 Resiliência da Paisagem	16
5.2.1 Diversidade da paisagem	16
5.2.2 Conectividade local	23
5.2.3 Resiliência: combinando diversidade da paisagem e conectividade local .	25
6 Resultados preliminares	26
References	27

Síntese do projeto

As mudanças no clima modificam ambientes naturais e pressionam espécies a se adaptarem às novas condições ambientais ou alterarem sua distribuição espacial para locais mais 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.

O **objetivo** principal do projeto *Mapeamento de áreas resilientes a mudanças climáticas nos biomas brasileiros* é **mapear sítios resilientes às mudanças climáticas**. 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 fornecem condições microclimáticas para o enfrentamento às mudanças climáticas e 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;
- 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 em diferentes temáticas de pesquisa, e baseado na literatura disponível, o projeto busca adequar a metodologia original ao contexto dos biomas brasileiros, refinando e adaptando quando necessário.

O **produto** principal resultante desse projeto é um mapa de áreas resilientes e conectadas para o Brasil, que permite identificar áreas com potencial de sustentar animais e plantas em um clima sob mudanças. Além disso, estão previstos ainda a preparação de um relatório técnico sobre o projeto, uma documentação reproduzível das análises e ao menos um artigo científico.

Palavras chave:

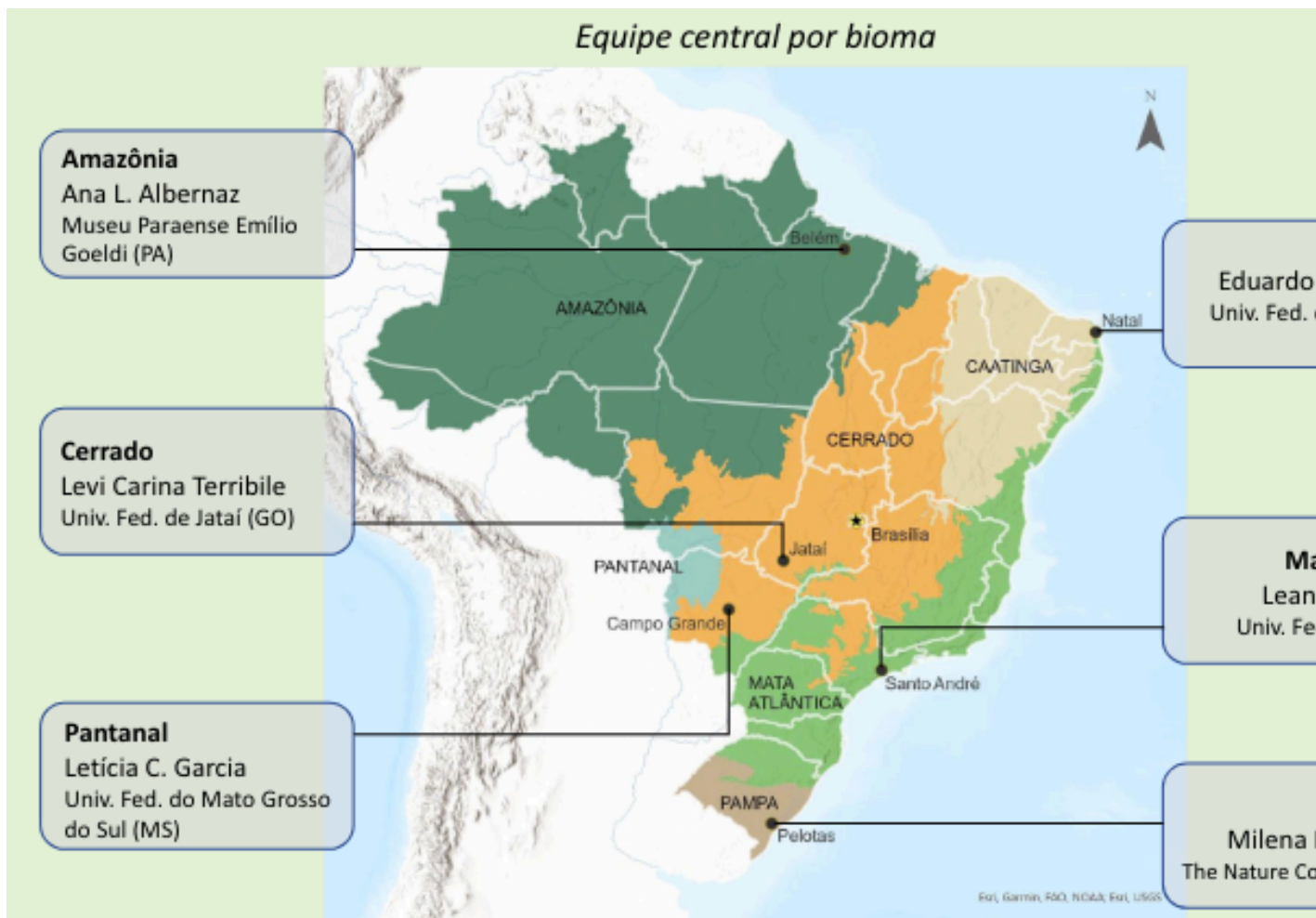
Resiliência climática, mudanças climáticas, conectividade, paisagem, geodiversidade, conservação, biodiversidade.

1 Introdução

O projeto *Mapeamento de áreas resilientes a mudanças climáticas nos biomas brasileiros* é coordenado por *The Nature Conservancy* Brasil e a primeira oficina com especialistas de cada bioma será realizada virtualmente nos dias **13 e 15 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.

1.1 Membros da equipe



1.1.1 Equipe TNC Brasil

- Milena Rosenfield (coordenação)
- Mário Barroso
- José Fronza
- Clícia Barata
- Edenise Garcia

1.1.2 Equipe central por bioma

- Amazônia: Ana Albernaz, Luciano Querido (Museu Paraense Emílio Goeldi)
- Caatinga: Eduardo Venticinque, Marina Antongiovanni (Universidade Federal do Rio Grande do Norte)
- Cerrado: Levi Carina Terribile, Lucas Jardim (Universidade Federal do Jataí)
- Mata Atlântica: Leandro Tambosi, Andrea Sánchez-Tapia (Universidade Federal do ABC)
- Pampa: Milena Rosenfield, Mário Barroso, José Fronza (The Nature Conservancy Brasil)
- Pantanal: Letícia Couto Garcia, Alisson Ribeiro (Universidade Federal do Mato Grosso do Sul)

1.1.3 Especialistas convidados

Bioma	Pesquisador(a)	Instituição	Cidade
Amazônia	Ane A. C. Alencar	IPAM	Brasília
Amazônia	Cintia Cornelius Frische	UFAM	Manaus
Amazônia	Fernanda Werneck	INPA	Manaus
Amazônia	Flávia Costa	INPA	Manaus
Amazônia	Ima Vieira	Museu Goeldi	Belém
Amazônia	Liana O. Anderson	CEMADEN	São José dos Campos
Amazônia	Marcos Adami	INPE	São José dos Campos
Caatinga	Adrian Garda	UFRN	Natal
Caatinga	Camile Lugarini	ICMBio	Juazeiro
Caatinga	Carlos R. S. D. da Fonseca	UFRN	Natal
Caatinga	Cláudia B. Campos	ICMBio/Pró-carnívoros	Juazeiro
Caatinga	Felipe P. L. de Melo	UFPE	Recife
Caatinga	Marcelo F. Moro	UFC	Fortaleza
Cerrado	Alessandro R. de Moraes	IF Rio Verde	Rio Verde
Cerrado	Beatriz S. Marimon	UNEMAT	Nova Xavantina
Cerrado	Gustavo Vasquez	Embrapa Solos	Rio de Janeiro
Cerrado	Karla Maria Silva de Faria	UFG	Goiânia
Cerrado	Luisa Carvalheiro	UFG	Goiânia
Cerrado	Manuel E. Ferreira	UFG	Goiânia
Cerrado	Paulo de Marco	UFG	Goiânia
Cerrado	Priscila L. de A. Silva	UFMT	Cuiabá
Cerrado	Rafael Loyola	IIS	Rio de Janeiro
Cerrado	Vania R. Pivello	USP	São Paulo
Mata Atlântica	Andreza Neri	UFV	Viçosa
Mata Atlântica	Camila Rezende	FBDS	Rio de Janeiro
Mata Atlântica	Danilo Neves	UFMG	Belo Horizonte

Bioma	Pesquisador(a)	Instituição	Cidade
Mata Atlântica	Gerd Sparovek	ESALQ	Piracicaba
Mata Atlântica	Kátia M. de B. Ferraz	USP	São Paulo
Mata Atlântica	Maíra Benchimol	UESC	Ilhéus
Mata Atlântica	Márcia Marques	UFPR	Curitiba
Mata Atlântica	Mariana M. Vale	UFRJ	Rio de Janeiro
Mata Atlântica	Ricardo Dobrovolski	UFBA	Salvador
Mata Atlântica	Rita Portela	UFRJ	Rio de Janeiro
Pampa	Alexandre J. D. Krob	Inst. Curicaca	Porto Alegre
Pampa	Eduardo Vélez Martin	UFRGS	Porto Alegre
Pampa	Fernando Becker	UFRGS	Porto Alegre
Pampa	Gerhard E. Overbeck	UFRGS	Porto Alegre
Pampa	Heinrich Hasenack	UFRGS	Porto Alegre
Pampa	Márcio Borges Martins	UFRGS	Porto Alegre
Pampa	Sandra C. Müller	UFRGS	Porto Alegre
Pantanal	Angélica Guerra	IHP	Corumbá
Pantanal	Antônio C. Paranhos Filho	UFMS	Campo Grande
Pantanal	Camila Leonardo Miotto	UFR	Rondonópolis
Pantanal	Cátia N. da Cunha	UFMT	Cuiabá
Pantanal	Fabio de O. Roque	UFMS	Campo Grande
Pantanal	Geraldo A. Damasceno Júnior	UFMS	Campo Grande
Pantanal	Mario Luis Assine	Unesp	Rio Claro
Pantanal	Renata Libonati	UFRJ	Rio de Janeiro
Pantanal	Thadeu Sobral de Souza	UFMT	Cuiabá

2 Objetivo

O objetivo principal do projeto é mapear sítios resilientes a mudanças climáticas e conectados entre si, identificando locais que seriam mais adequados a sustentar a biodiversidade em um futuro de mudanças no clima.

2.1 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.

3 Sobre o grupo de trabalho e as oficinas

As atividades previstas para o projeto serão divididas em duas etapas: a primeira se refere à aplicação da metodologia de mapeamento descrita acima; e a segunda corresponde ao refinamento e adaptação dela para a realidade dos diversos biomas brasileiros, que será feita a partir de discussões com especialistas. A partir da metodologia proposta, serão realizadas reuniões internas com a equipe e workshops com especialistas nas temáticas do projeto e com experiência em diversos biomas do Brasil para discussão da metodologia e sugestão de refinamento para a sua melhoria.

Esses *workshops* terão como objetivo refinar a metodologia de forma que ela seja mais adequada às características dos ecossistemas e particularidades da região. Com base nas discussões com o grupo de especialistas, se espera incorporar possíveis novos elementos (variáveis) e validar a metodologia para o Brasil.

O processo consistirá, portanto, da aplicação da abordagem desenvolvida, análise dos métodos, avaliação, complementação e validação dos resultados, e geração de mapas de áreas resilientes e conectadas nos biomas brasileiros.

4 Metodologia resumida

A metodologia proposta para identificar os sítios resilientes às mudanças climáticas (Anderson et al. 2014, 2016a, Anderson et al. 2016b, e Anderson et al. 2023) envolve a divisão do espaço geográfico em regiões eco-geológicas, que são similares na sua geologia, geomorfologia, vulnerabilidade ao intemperismo, formação de solos e biodiversidade. Dentro de cada região são mapeadas a diversidade da paisagem e a conectividade local, que posteriormente, compõem a resiliência da paisagem. Os sítios com maior resiliência possuem alto potencial de abrigar a biodiversidade num cenário de mudanças climáticas e estão conectados entre si (Anderson et al. 2014), permitindo a migração da biodiversidade para essas localidades.

4.1 Regiões eco-geológicas

As regiões eco-geológicas são agrupamentos dos domínios geológicos e ecoregiões, que descrevem as variações geológicas e geomorfológicas promotoras da formação das paisagens, das redes de drenagem, da pedologia e que atuam como base de sustentação da biodiversidade que evoluiu nessas regiões, representadas pelas ecoregiões. O mapeamento das áreas resilientes às mudanças climáticas dentro das regiões eco-geológicas permite a identificação de locais que suportarão a biodiversidade pelos parâmetros locais, sem o enviesamento para regiões com mais variação de elevação e formas de relevo.

Os domínios geológicos são grupos de litoestratigrafia semelhantes em relação ao posicionamento tectônico, nível crustal, classe de rocha, expressão geomorfológica, entre outros [...]. Os domínios geológicos agrupam unidades geológicas, que são agrupamentos de rochas. Portanto, os diferentes domínios geológicos descrevem variações no tipo de rocha, potencial de sofrer intemperismo e idade geológica. As ecoregiões são regionalizações biogeográficas abaixo hierarquicamente dos domínios biogeográficos e biomas, representando agrupamentos espaciais da biodiversidade, numa escala regional, sustentando seus processos ecológicos principais [Olson et al. 2001; Dinerstein et al 2017 (veja material suplementar)]. As integrações dos domínios geológicos e ecoregiões foram realizadas pela transformação dos polígonos dos domínios geológicos e ecoregiões em *rasters*, que são posteriormente combinados como a seguinte equação:

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

Desta forma, os valores do raster final estão no formato **GGEE**, onde as duas primeiras unidades (**GG**) representam os domínios geológicos e as duas últimas unidades (**EE**) as ecoregiões.

4.2 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 90 m. O resultado dessas análises é combinado para então estimar o valor de resiliência para cada local.

4.2.1 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.

4.2.1.1 Variedade de *landforms*

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 modelo digital de elevação (DEM) com resolução de 90 m, que classifica a superfície em diversas categorias, 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 e moisture accumulation*), que correspondem 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 450 m no entorno de cada célula de 90 m.

4.2.1.2 Amplitude altitudinal

A amplitude altitudinal é determinada a partir do DEM, tabulando a amplitude em uma área circular de 450 m no entorno de cada célula de 90 m. A amplitude altitudinal considerada no estudo corresponde ao componente não correlacionado com a diversidade de *landforms* (os resíduos de uma regressão linear simples).

4.2.1.3 Densidade de banhados

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 banhados/áreas úmidas (*wetlands*) e a diversidade de solos (descrito abaixo). 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 (escala local) e 400 ha (escala regional) 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.

4.2.1.4 Diversidade de solo

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:

4.2.2 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 infraestruturas energéticas e de transporte, foi 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, etc.),
- 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.

4.2.3 Resiliência: combinando diversidade da paisagem e conectividade local

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

$$Resilincia = \frac{(Diversidade\ da\ paisagem + Conectividade)}{2}$$

4.3 Dados padronizados (Z-scores)

O resultado final é um mapa com grid de 90 m, constando os valores estimados de resiliência para cada local.

O mapeamento final dos sítios resilientes é feito por **configurações eco-geológicas** (item acima). 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 eco-geológicas.**

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.

5 Detalhamento das análises

O detalhamento das análises apresenta uma descrição mais aprofundada da metodologia utilizada para o mapeamento. São apresentadas as bases de dados e os diferentes critérios utilizados para desenvolver as análises, considerando as diversas camadas necessárias para gerar o mapa de resiliência da paisagem.

5.1 Regiões eco-geológicas

As regiões eco-geológicas do Brasil foram delimitadas para encontrar regiões homólogas em relação aos **domínios geológicos** e às **ecoregiões** do país. Essas regiões são usadas para limitar a variação das características ambientais usadas ao calcular a **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). 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 e consistem em unidades biogeográficas que compartilhem comunidades naturais de espécies, dinâmicas naturais e condições ambientais (Olson et al. 2017). Nós utilizamos a classificação da Terrestrial Ecoregions of the World (TEOW), que é uma regionalização biogeográfica da biodiversidade terrestre realizada pela WWF, que classifica o Brasil em 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** representa os domínios geológicos e **EE**, as categorias de ecoregiões.

5.2 Resiliência da Paisagem

A resiliência da paisagem foi calculada como a média entre os valores padronizados (Z) de **diversidade da paisagem** e de **conectividade local**. Todas as imagens utilizadas para o cálculo de resiliência estão na escala de 90 m e foram reprojetadas para o *DATUM WGS84*.

5.2.1 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 *landforms***, **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 que nossas análises sejam de livre acesso e que contribuam para uma ciência mais transparente e livre.

5.2.1.1 Variedade de *landforms*

A classificação e distribuição espacial de *landforms* (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 (Anderson et al. 2016a). Essa classificação é baseada em combinações de informações sobre a **inclinação** (*slope*), **orientação do relevo** (*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 (Anderson et al. 2016a).

A metodologia de classificação de formas de relevo foi baseada em estudos prévios conduzidos pela equipe da **TNC América do Norte**, publicada inicialmente em 2014 (Anderson et al. 2014) e refinada em 2016 (Anderson et al. 2016a).

Para o cálculo de **inclinação**, **orientação do relevo** e **índice de posição topográfica (TPI)**, utilizamos a imagem do modelo digital de elevação (DEM) do Merit-DEM (Yamazaki et al. 2017), em uma escala de 90 m. 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 da realidade dos biomas que modelamos.

Para o cálculo de **acúmulo de fluxo**, utilizamos o Merit-Hydro (Yamazaki et al. 2019) 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 (Yamazaki et al. 2019).

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 Coleção 7 (Project 2020). 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.

5.2.1.1.1 Índice de posição topográfica (TPI)

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). Os tamanhos das janelas foram definidos visualmente para que melhor representassem as formas de relevo.

5.2.1.1.2 Orientação do relevo

A orientação 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 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**.

5.2.1.1.3 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 (Tabela 5.1).

Tabela 5.1: Classes de declividade usadas para a classificação de *landforms*

Inclinação	Grupo
0° a 2°	1

Inclinação	Grupo
2° a 6°	2
6° a 24°	3
24° a 35°	4
35° a 90°	5

5.2.1.1.4 Índice de umidade

O índice de umidade (*moisture index*) 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 índice de umidade é a média do índice dentro de um *kernel* circular de uma célula de raio determinado. 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 pudéssemos 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 (por exemplo, rio 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.

5.2.1.1.5 Combinando as variáveis e classificando as *landforms*

A partir das classificações de todas as variáveis anteriores podemos gerar um código representativo para combinar todas elas. Começamos multiplicando índices de umidade por 1000, aspect por 100, TPI por 10 e slope por 1. Dessa forma, podemos classificar os tipos de formas de relevo que são melhor representadas pelas diferenças em cada variável.

Por exemplo, o código 11 representa áreas de baixa inclinação do relevo e uma posição do relevo mais alta que o entorno, sendo portanto um topo de montanha (*summit*). No entanto, alguns códigos tiveram que ser inspecionados para separar alguns tipos de *landforms* como foi o caso para *sideslopes*, *valleys* e *toeslopes* Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Combinações entre as variáveis para classificar as formas de relevo

Valores da Combinação	Código para Landforms
10	11
11	11
12	11

Valores da Combinação	Código para Landforms
13	13
14	11
15	5
20	21
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

Valores da Combinação	Código para Landforms
151	51
211	11
212	11
213	13
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 landforms se encontra na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: 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

Códigos	Nomes
39	Moist Flats
43	Cool Footslope
44	Warm Sideslope

5.2.1.1.6 Gerando a variedade de *landforms*

A variedade de *landforms* foi calculada como a soma dos diferentes tipos de *landforms*, dentro de um *kernel* circular da célula focal. O tamanho do raio do kernel foi definido calculando a variedade em diferentes raios (2, 5, 7, 10, 15, 20 células) e calculando o ganho de variedade 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 *landforms*. Assim, o raio escolhido foi de 5 células de raio (450 m) para todo o Brasil. 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 dentro de cada classificação de **regiões eco-geológicas** usando médias e desvios padrão dentro de cada uma das classes.

5.2.1.2 Amplitude altitudinal

A amplitude altitudinal representa a variação da elevação em uma região, independente do número de *landforms*, controlando a relação entre ambas já que elas são correlacionadas entre si. A amplitude altitudinal foi calculada como a diferença entre os valores máximos e mínimos de elevação, dentro de um *kernel* circular de 450 m, a partir dos dados do DEM do MERIT (Yamazaki et al. 2017). fizemos então uma Regressão Linear Simples (*Ordinary Linear Regression*) entre os **valores de amplitude altitudinal** e a **variedade *landforms*** 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 dividir 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 mostra a variação, em relação à média, dos valores dos resíduos da amplitude altitudinal dentro de cada uma das categorias de regiões eco-geológicas.

5.2.1.3 Densidade de banhados

Para calcular a densidade de banhados usados os dados disponibilizados na base de dados *Global Wetlands Database* (Gumbricht et al. 2017), 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 m) e em uma escala regional (1170 m). Para o cálculo final dos valores de densidade de banhados, utilizamos tanto o número de pixels em escala regional e a densidade em escala regional e local.

A **densidade de banhados** foi calculada como a média do número de *pixels* de áreas de banhado, dentro de um kernel de escala regional (1170 m) e um kernel em escala local (450 m), excluindo rios e lagos. Já a **contagem em escala local** foi calculada como uma contagem de *pixels* dentro de um *kernel* circular com 1170 m 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 um acúmulo de áreas úmidas que poderiam amenizar localmente o efeito das mudanças climáticas (Anderson et al. 2016a).

Para calcular os valores finais de densidade de banhado, é necessário juntar as informações das 3 camadas produzidas, primeiro calculando os valores padronizados para cada uma delas e depois fazendo uma série de médias pixel a pixel para selecionar os maiores valores de Z .

Calculamos os valores padronizados 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 ($Z_{regional}$), atribuindo mais peso para os valores da densidade local:

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

Ao compararmos esse resultado com a camada 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 camada com valores que representam a variação em relação à média dos valores de densidade e contagem de pixels de áreas de banhado referentes às regiões eco-geológicas.

5.2.1.4 Diversidade de solo

A diversidade de solo foi calculada como a distribuição do número de classes de solo, dentro de um *kernel* de 1350 m. Ela foi usada para indicar áreas com grande concentração dos diferentes tipos de solo que vão afetar diretamente na diversidade de espécies no 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).

Como a classificação do IBGE foi disponibilizada em formato de *shapefile*, 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 dentro de cada classificação de regiões eco-geológicas usando as médias e desvios padrão dentro de cada uma das classes.

5.2.2 Conectividade local

5.2.2.1 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. Esses valores foram atribuídos por bioma, seguindo a premissa de 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 foram a camada de cobertura do solo fornecida pelo MapBiomias (Project 2020) e a base de estradas pavimentadas e não pavimentadas fornecida pelo IBGE (BCIM250, ano 2021). Em um segundo momento, serão ainda inseridas bases de dados de infraestrutura energética, a serem incorporadas nessa camada.

A superfície de cobertura do solo do MapBiomias foi reamostrada para gerar pixels com 90 m de tamanho, aproximadamente. Também convertemos o arquivo vetorial de estradas para o formato matricial, com pixels de tamanho aproximado de 90 m. Conjugamos, por álgebra de mapas, as bases matriciais do MapBiomias e de estradas de tal maneira que todos os pixels da base do MapBiomias 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 5.4.

Tabela 5.4: Valores de resistência para cada tipo de cobertura por bioma

a	b	c
1	2	3
2	3	4

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 (~2070 m), o contexto espacial em que cada pixel está inserido, reconhecendo que pixels mais próximos possuem uma influência maior um sobre o 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.

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) e multiplicando tudo por -1, como mostrado na fórmula a seguir:

$$Z_{pixel} = \left(\frac{X_{pixel} - \mu}{\sigma} \right) \times -1$$

Os cálculos de Z foram feitos dentro de cada classificação de regiões eco-geológicas usando as médias e desvios padrão dentro de cada uma das classes. Multiplicamos o valores por -1 por

considerarmos que a conectividade local é o inverso dos valores de resistência suavizados pelo *kernel*.

5.2.3 Resiliência: combinando diversidade da paisagem e conectividade local

A **resiliência da paisagem** é definida como a capacidade de um local de manter diversidade de espécies e funções ecossistêmicas perante as pressões impostas por mudanças climáticas. Ela foi calculada como a média entre os valores padronizados (Z) de **diversidade da paisagem** e **conectividade local**.

Para melhorar a visualização e comparação entre os valores de diversidade da paisagem e conectividade local calculamos os quartis de 5% e 95% e limitamos os valores maiores que 95% e menores que 5%.

6 Resultados preliminares

Os resultados preliminares das análises realizadas pela equipe se encontram no website da *The Nature Conservancy* Brasil: [*Mapping climate resilient sites in Brazil*](#)

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, 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 120:e2204434119.
- 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. 2016a. [Resilient Sites for Terrestrial Conservation in Eastern North America](#). Conservation Biology 28:959–970.
- Anderson, M., A. Barnett, M. Clark, J. Prince, S. A. Olivero, e B. Vickery. 2016b. Resilient and Connected Landscapes for Terrestrial Conservation.
- 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.
- Gumbricht, T., R. M. Román-Cuesta, L. V. Verchot, M. Herold, F. Wittmann, E. Householder, N. Herold, e D. Murdiyarto. 2017. [Tropical and Subtropical Wetlands Distribution Version 2](#).
- Olson, D. M., E. D. Dinerstein, N. D. Wikramanayake, Burgess, G.V.N., Powell, E.C., Underwood, J.A., D’Amico, I., e Itoua, H.E. 2017. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth. BioScience.
- Project, M. 2020. Collection 7 of the Annual Series of Land Use and Land Cover Maps of Brazil. [projects/mapbiomas-workspace/public/collection7/mapbiomas_collection70_integration_v2](#).
- 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.
- 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.