



Mapeamento de áreas resilientes a mudanças climáticas nos biomas brasileiros

Instituições envolvidas:



Índice

Agradecimentos	3
2 Síntese do projeto	4
2.1 Contexto geral do estudo	4
2.2 O que queremos fazer?	4
2.3 Quais as premissas básicas desse estudo?	4
2.4 Qual metodologia estamos utilizando?	5
2.5 Por que a escolha por essa metodologia de análise?	5
2.6 Onde e com quem estamos trabalhando?	5
2.7 Quais são os produtos previstos desse projeto?	6
2.8 Como temos conduzido as atividades?	6
2.9 Palavras chave	6
2.10 Instituições parceiras do projeto	6
3 Apresentação	8
3.1 Equipe TNC Brasil	8
3.2 Equipe central por bioma	8
3.3 Especialistas convidados	9
4 Introdução	11
5 Objetivo	14
5.1 Objetivos específicos	14
5.2 Produtos previstos	14
6 Atividades e oficinas previstas	15
6.1 Atividades previstas	15
6.2 Planejamento das oficinas	15
7 Glossário	17
7.1 Resiliência da paisagem (<i>landscape resilience</i>)	17
7.2 Heterogeneidade da paisagem (<i>landscape heterogeneity</i>)	17
7.3 Resistência da paisagem (<i>landscape resistance</i>)	17
7.4 Conectividade local (<i>local connectedness</i>)	17
7.5 Formas de relevo (<i>landforms</i>)	17
7.6 Densidade de áreas úmidas (<i>wetland density</i>)	18

7.7	Padrão de distribuição regional de áreas úmidas (<i>wetland patchiness</i>)	18
8	Modelo conceitual e premissas	19
8.1	Premissas	19
9	Metodologia resumida	21
9.1	Heterogeneidade da paisagem	21
9.1.1	(a) Variedade de formas de relevo	21
9.1.2	(b) Amplitude altitudinal	23
9.1.3	(c) Índice de áreas úmidas	23
9.1.4	(d) Riqueza de solos	23
9.1.5	Combinando as variáveis para gerar a heterogeneidade da paisagem	23
9.2	Conectividade local	23
9.3	Padronização dos dados (<i>Z-scores</i>)	24
9.4	Conectividade: análise de circuitos	24
9.5	Resiliência da paisagem: combinando heterogeneidade da paisagem e conectividade local	25
10	Refinamento das análises	27
10.1	Eco-georegiões (antiga camada geophysical settings) e janelas móveis	27
10.2	Análise de conectividade local	28
11	Códigos e bases de dados	29
11.1	Códigos	29
11.1.1	Heterogeneidade da paisagem	29
11.1.2	Conectividade local	29
11.1.3	Resiliência da paisagem	29
11.2	Bases de dados	29
11.2.1	Diversidade da paisagem	30
11.2.2	Conectividade local	30
12	Heterogeneidade da paisagem	31
12.1	Bases de dados utilizadas	31
12.2	Variáveis que compõem a heterogeneidade da paisagem	32
	Variedade de formas de relevo (<i>landforms</i>)	32
	Amplitude altitudinal	39
	Índice de áreas úmidas	39
	Riqueza de solos	40
	Heterogeneidade da paisagem: combinação das variáveis	41
13	Conectividade local	43
13.1	Bases de dados utilizadas	43
	Cálculo de resistência	43
13.2	Conectividade: análise de circuitos	47

14 Resiliência da paisagem	50
15 Resultados preliminares	54
15.1 Mapas por bioma	54
15.2 Heterogeneidade da paisagem (link)	54
15.3 Conectividade Local (link)	65
15.4 Resiliência da paisagem (link)	67
16 Aplicações	71
17 Considerações finais	72
Bibliografia	73

1

Agradecimentos

2 Síntese do projeto

2.1 Contexto geral do estudo

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 potencial para sustentar a biodiversidade no futuro de mudanças climáticas é imprescindível para o planejamento de ações de conservação e restauração.

2.2 O que queremos fazer?

O objetivo principal do projeto é **mapear áreas resilientes**, que permitam a movimentação da biodiversidade na busca de áreas mais adequadas climaticamente em um cenário de mudança climáticas.

O termo *áreas resilientes*, neste contexto, indica locais com alta diversidade microclimática e conectividade, condições necessárias para que espécies e processos ecológicos persistam às mudanças climáticas regionais.

2.3 Quais as premissas básicas desse estudo?

A metodologia desenvolvida segue três premissas básicas:

1. A **heterogeneidade da paisagem** resultante da combinação de características do meio físico, (ex. feições topográficas, altitude, disponibilidade hídrica e tipo de solo) proporcionam variabilidade microclimática, que fornecem refúgios microclimáticos e heterogeneidade de habitats para as espécies.
2. A **conectividade local** à movimentação das espécies é proporcionada pela resistência dos tipos de uso e cobertura do solo e a sua estruturação na paisagem.
3. A **resiliência da paisagem** às mudanças do clima é influenciada pela heterogeneidade da paisagem, que gera condições microclimáticas diversificadas para as espécies, e pela conectividade desses habitats na paisagem, que permitem a movimentação desses organismos para áreas mais adequadas climaticamente.

2.4 Qual metodologia estamos utilizando?

A metodologia proposta combina a heterogeneidade da paisagem, um *proxy* da variabilidade microclimática, com a conectividade local, para identificar locais que possibilitem adaptação das espécies às mudanças climáticas, cujas paisagens sejam permeáveis à movimentação das espécies.

O mapeamento da heterogeneidade da paisagem é baseado na geodiversidade (ex. geomorfologia, geologia, pedologia e hidrologia) do terreno e inclui a variedade de formas de relevo, amplitude altitudinal, índice de áreas úmidas e riqueza de solos.

A conectividade local é baseada na resistência das classes de uso da terra da paisagem ao movimento da biodiversidade, combinando classes naturais e antropizadas, além das infraestruturas de transporte e de energia existentes (com maior ou menor grau de antropização).

2.5 Por que a escolha por essa metodologia de análise?

Essa análise foi proposta e validada para a América do Norte pela *The Nature Conservancy* (TNC), e complementa metodologias baseadas em dados climáticos, uma vez que ela foca nas características do terreno para identificar áreas resilientes.

A aplicação da metodologia da TNC para os biomas brasileiros é um passo importante na identificação de áreas 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.

2.6 Onde e com quem estamos trabalhando?

O mapeamento está sendo conduzido para os seis biomas do Brasil. Para isso, em cada bioma temos coordenadores(as) responsáveis em instituições de pesquisa, além de um(a) pesquisador(a) de pós-doutorado diretamente envolvido(a) no projeto. Há ainda uma equipe de especialistas, de diversas áreas de atuação relacionadas à Temática do projeto, que participam como colaboradores do desenvolvimento do estudo.

2.7 Quais são os produtos previstos desse projeto?

O produto resultante desse projeto é um mapa de áreas resilientes para os biomas do Brasil, que permite identificar o potencial de cada área de sustentar a biodiversidade com o clima sob mudanças. Está em construção também um relatório técnico descrevendo o projeto e a metodologia utilizada, além de uma documentação reproduzível das análises. Além desses produtos, está prevista a elaboração de, no mínimo, um artigo científico a ser submetido a uma revista científica internacional.

2.8 Como temos conduzido as atividades?

Os(as) bolsistas de pós-doutorado têm sido responsáveis por liderar as análises e conduzir o projeto regionalmente. A equipe da TNC Brasil coordena as atividades em cada bioma e entre os biomas e também a integração entre as diversas equipes, participando diretamente das discussões nos grupos. Estão sendo realizadas oficinas e reuniões virtuais com as equipes de cada bioma e com os(as) especialistas para discutir as particularidades regionais, refinar as análises e os resultados obtidos.

2.9 Palavras chave

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

2.10 Instituições parceiras do projeto



3 Apresentação

O projeto *Mapeamento de áreas resilientes a mudanças climáticas nos biomas brasileiros* é coordenado pela *The Nature Conservancy Brasil* e executado por diversas instituições de pesquisa localizadas em cada um dos biomas do Brasil: Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG), Universidade Federal do ABC (UFABC), Universidade Federal do Jataí (UFJ), Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS) e Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

3.1 Equipe TNC Brasil

Nome	Atuação	Lattes
Edenise Garcia	Diretora de ciências	http://lattes.cnpq.br/ 6575206025031796
Milena Rosenfield	Coordenadora técnica	http://lattes.cnpq.br/ 8181631357765054
Mário Barroso	Especialista em SIG	http://lattes.cnpq.br/ 7182178358444899
José Fronza	Especialista em SIG e dados	http://lattes.cnpq.br/ 1205403331686811
Clícia Barata	Especialista em SIG	http://lattes.cnpq.br/ 2750496081930336

3.2 Equipe central por bioma

Bioma	Supervisão	Equipe	Intituição
Amazônia	Ana Albernaz http://lattes.cnpq.br/ 1220240487835422	Luciano Querido http://lattes.cnpq.br/ 3123978281728788	Museu Paraense Emílio Goeldi

Bioma	Supervisão	Equipe	Intituição
Caatinga	Eduardo Venticinque http://lattes.cnpq.br/3582966116563351	Marina Antongiovanni http://lattes.cnpq.br/6734509642838870	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Cerrado	Levi Carina Terribile http://lattes.cnpq.br/0833667862532867	Lucas Jardim http://lattes.cnpq.br/6537020596919365	Universidade Federal do Jataí
Mata Atlântica	Leandro Tambosi http://lattes.cnpq.br/5301210732686095	Priscila Silveira http://lattes.cnpq.br/4707570912229034	Universidade Federal do ABC
Pampa	Milena Rosenfield http://lattes.cnpq.br/8181631357765054	Mário Barroso http://lattes.cnpq.br/7182178358444899 e José Fronza http://lattes.cnpq.br/1205403331686811	The Nature Conservancy Brasil
Pantanal	Letícia Couto Garcia http://lattes.cnpq.br/9330007643430035	Alisson Ribeiro http://lattes.cnpq.br/9104693095499880	Universidade Federal do Mato Grosso do Sul

3.3 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	Juazeiro
Caatinga	Eugenio Cordero Schmidt	IUCN	João Pessoa

Bioma	Pesquisador(a)	Instituição	Cidade
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
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 Mioto	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

4 Introdução

As mudanças climáticas estão alterando os regimes de temperatura e pluviosidade global, impactando a fenologia, o comportamento e a distribuição geográfica das espécies (IPCC 2022). As espécies têm sofrido mudanças nas bordas das suas distribuições para localidades mais temperadas e de maior altitude (Lemes, Priscila et al. 2014, Abreu-Jardim, Tatianne P.F. et al. 2021). Essas mudanças nas distribuições geográficas modificam a composição de espécies das comunidades ecológicas, causando disruptão de interações inter-específicas e distribuição de atributos funcionais, comprometendo o provimento, regulação e suporte de funções, estrutura e dinâmica ecossistêmica (**(montoya_raffaelli_2010?)**).

O impacto das mudanças climáticas não é uniforme ao longo do globo. A vulnerabilidade das espécies depende das suas exposições e sensibilidades às mudanças ambientais [Williams, Stephen E. et al. (2008); Folden]. A exposição é caracterizada pela forma como as mudanças globais, regionais e locais atuam diretamente nos organismos pela interação entre variáveis climáticas, bióticas, pedológicas, hidrológicas e topográficas, na determinação das condições microclimáticas e dos habitats onde as espécies vivem. Por outro lado, a sensibilidade depende da plasticidade fisiológica, morfológica e comportamental das espécies, sua adaptação às novas condições ambientais e capacidade de dispersar para áreas adequadas ambientalmente. Dessa forma, dependendo do grau de exposição, as espécies podem continuar nas suas localidades ou buscar áreas adequadas, dada a velocidade com que o clima muda localmente e regionalmente (Loarie, Scott R. et al. 2009). Locais com alta velocidade climática possuem alta taxa de mudança local ou baixa diferença climática em relação ao entorno. Nesse cenário, as espécies precisam se locomover por maiores distâncias para encontrarem áreas adequadas. Locais com baixa velocidade climática possuem baixa mudança climática ao longo do tempo ou alta variabilidade climática no entorno, possibilitando a manutenção na localidade ou a busca por regiões adequadas em localidades próximas. Assim, as espécies necessitam de uma rede de localidades não somente climaticamente adequadas, como também com baixa resistência à movimentação dado o uso e cobertura do solo.

As paisagens naturais têm sido severamente degradadas pela mudança no uso e cobertura do solo causada pela atividade antrópica ((**fao_coppus_2023?**); citações). A perda e fragmentação de habitat é uma das principais causas de ameaça de extinção das espécies (**(pardini_et_al_2017?)**), tanto por reduzir a capacidade de suporte populacional quanto por diminuir a permeabilidade e alterar as dinâmicas metapopulacionais, o fluxo gênico e a riqueza das comunidades (**(chase_2020?)**). Além disso, a perda e fragmentação de habitat também reduz a capacidade das espécies de se movimentarem na paisagem na busca por condições climáticas adequadas, aumentando a velocidade climática nas paisagens mais degradadas.

Portanto, estratégias adequadas de conservação dependem de abordagens integrativas que considerem esses efeitos múltiplos, e sinérgicos, das mudanças globais sobre a distribuição das espécies (Sirami et al 2016).

Os estudos sobre os impactos das mudanças climáticas na distribuição da biodiversidade tem como base modelos que combinam informações sobre a distribuição das espécies e dados de projeções climáticas para diferentes períodos de tempo. Essas projeções climáticas utilizam modelos globais e regionais, possibilitando a identificação de áreas mais vulneráveis, refúgios climáticos e a projeção dos impactos futuros (citação). No entanto, os modelos climáticos fornecem dados em escalas regionais ou como interpolações em resoluções mais finas (Lima-Ribeiro, Matheus S et al. 2015, Fick e Hijmans 2017, Karger, Dirk Nikolaus et al. 2017), limitando o diagnóstico e desenvolvimento de estratégias de mitigação em escalas mais locais, onde as ações devem ser desenvolvidas efetivamente. Mesmo modelos microclimáticos, desenvolvidos para modelar mudanças em variáveis locais, são fornecidos globalmente em escalas regionais (Kearney, Michael R. et al. 2014). Uma alternativa aos modelos globais e regionais é a utilização de séries temporais de dados climáticos derivados de sensoriamento remoto orbital (Hulley, G. e Hook, S. 2018) ou estações metereológicas (Xavier et al. 2022). Nesse caso, apesar dos dados de longa duração possuírem escalas mais regionais ($> 1\text{km}^2$), eles fornecem variabilidade de informação nessa escala, o que não é fornecido pelas interpolações dos modelos climáticos. Por outro lado, esses dados não possuem projeções para o clima futuro. Uma terceira abordagem, complementar aos modelos climáticos, é a utilização da topografia, geodiversidade e aspectos fisiográficos (Anderson, Mark G. et al. 2014, Lawler, Joshua J. et al. 2015, Theobald et al. 2015) para diagnosticar, mapear e desenvolver soluções para as mudanças climáticas.

A geodiversidade da paisagem, caracterizada pelo conjunto de variáveis abióticas da superfície e subsolo terrestre (ex. topografia, geologia, pedologia e hidrologia), tende a ter baixa taxa de mudança no intervalo de tempo factível para ações de mitigação das mudanças climáticas. Essas variáveis são componentes dos fatores determinantes de microclimas locais, como por exemplo a superfície que mais recebe radiação solar, as posições no relevo mais expostas a ação de ventos, o direcionamento de ventos frios, o acúmulo de umidade e retenção de água no solo. A interação entre a atmosfera e a topografia resulta em topoclimas, que tendem a ser desconectados do clima regional. Os locais onde o topoclima permite a manutenção das características microclimáticas, independente das mudanças regionalmente, têm sido definidos como locais potenciais para refúgios microclimáticos. Além disso, locais com maior complexidade topográfica e amplitude altitudinal proporcionam maior variabilidade de condições ambientais para as espécies. O potencial para atuar como refúgio microclimático e a maior variabilidade microclimática no entorno reduz a velocidade climática localmente.

O entendimento dos impactos das mudanças climáticas localmente necessita da compreensão dos seus impactos nas dimensões de biodiversidade, clima e geodiversidade, uma vez que todas essas variáveis se retroalimentam. Locais com maior geodiversidade são potencialmente mais resilientes às mudanças climáticas regionais tanto por amenizarem as mudanças microclimáticas locais, devido ao descolamento do topoclima com o clima regional, quanto

pela disponibilidade de maior variabilidade microclimática. Além disso, locais com maior geodiversidade têm sido demonstrados com potencial de suportarem maior biodiversidade, em diferentes escalas espaciais (Tukiainen et al. 2018, Vernham et al. 2023). Portanto, a geodiversidade tem surgido como uma alternativa para o desenvolvimento de estratégias de mitigação das mudanças climáticas, sobretudo pelos avanços teóricos e operacionais, como a maior disponibilidade de informações acessíveis em escalas espaciais finas. Essa abordagem tem sido classificada como conservar o palco da natureza (do inglês **Conserving nature's stage**), que é onde os atores da biodiversidade e as interações operam. A proposta é que a composição das comunidades muda ao longo do tempo, mas a manutenção das características abióticas que promovem e mantém a biodiversidade permite a promoção da diversidade biológica, mesmo que os componentes originais se modifiquem.

O primeiro mapeamento de áreas com potencialmente resilientes às mudanças climáticas dada a sua geodiversidade foi para a América do Norte (citação). Nessa proposta, áreas resilientes são definidas como aquelas com alta diversidade de condições abióticas superficiais e do subsolo, que possuem baixa degradação ambiental e são conectadas na paisagem (citação). Portanto, áreas resilientes teriam alta heterogeneidade de variáveis abióticas na paisagem e alta conectividade entre as manchas de habitat. A partir desse mapeamento, propusemos uma adaptação à metodologia utilizada anteriormente, de modo a aplicá-la para o contexto dos biomas brasileiros e identificar áreas resilientes a mudanças do clima para uma região tropical.

5 Objetivo

O objetivo principal do projeto é identificar **áreas resilientes às mudanças climáticas**, com maior potencial de sustentar a biodiversidade no futuro, por meio do mapeamento da **heterogeneidade microclimática** e da **conectividade local** entre as áreas.

5.1 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 **heterogeneidade 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.

5.2 Produtos previstos

O produto principal do projeto é um mapa de áreas resilientes para os biomas do Brasil, que permita identificar áreas com potencial de sustentar a biodiversidade em um clima sob mudanças.

Estão previstos ainda:

- Relatório técnico, em português, descrevendo o projeto e a metodologia utilizada;
- Documentação detalhada das análises, incluindo o compartilhamento dos códigos, para que seja possível reproduzir as análises;
- Elaboração de, no mínimo, um artigo científico a ser submetido a uma revista científica internacional.

6 Atividades e oficinas previstas

6.1 Atividades previstas

As atividades previstas para o projeto serão divididas em duas etapas: a primeira é a aplicação da metodologia de mapeamento de diversidade da paisagem, conectividade local e resiliência da paisagem; e a segunda etapa corresponde ao refinamento e adaptação desta metodologia para o contexto 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 soluções de potenciais limitações do projeto. 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.

6.2 Planejamento das oficinas

As oficinas previstas para o projeto terão como objetivo discutir a metodologia proposta e sugerir adequações (metodológicas e de bases de dados) às características dos ecossistemas e particularidades dos biomas brasileiros. A exequibilidade das sugestões será posteriormente avaliada internamente sob as condições limitantes de recurso e tempo de conclusão do projeto.

Está prevista a realização de três oficinas, nas quais participarão especialistas de todos os biomas do Brasil. Nessas oficinas serão discutidas questões importantes relativas ao projeto, incluindo pontos teóricos, procedimentos analíticos e resultados obtidos.

Oficina	Data prevista	Modalidade	Pontos discutidos
Oficina #1	13/06 e 15/06	Virtual	Introdução geral do projeto; apresentação das análises e dos resultados preliminares; momento de perguntas e respostas
Oficina #2	10/10 e 19/10	Virtual	Devolutiva da Oficina #1 e apresentação do refinamento das análises, conforme ajustes feitos após discussões na Oficina #1
Oficina #3	nov/dez (a confirmar)	Virtual ou presencial (a confirmar)	Apresentação e discussão dos resultados finais obtidos após Oficina #2

7 Glossário

7.1 Resiliência da paisagem (*landscape resilience*)

Capacidade de uma área de absorver impactos das mudanças climáticas na diversidade de espécies e funções ecológicas. Uma área resiliente apresenta variabilidade de condições que sustentam a biodiversidade, mantendo relações fundamentais entre componentes ecológicos, e permite mudança adaptativa na composição e estrutura do ecossistema.

7.2 Heterogeneidade da paisagem (*landscape heterogeneity*)

Estimativa da variabilidade microclimática, definida pelas formas de relevo, amplitude altitudinal, índice de áreas úmidas e riqueza de solos presentes no entorno de uma dada localidade.

7.3 Resistência da paisagem (*landscape resistance*)

Dificuldade imposta pelas classes de uso e cobertura do solo à movimentação dos organismos.

7.4 Conectividade local (*local connectedness*)

Medida de facilitação ao deslocamento de organismos entre os elementos da paisagem (ou tipos de uso e cobertura do solo). A conectividade é dependente da resistência dos elementos da paisagem ao deslocamento dos organismos, assim como a sua estruturação espacial.

7.5 Formas de relevo (*landforms*)

Feições topográficas presentes na paisagem como tipos de montanhas, vales, desfiladeiros e declividades. Cada feição topográfica sofre diferentes níveis de exposição à radiação solar, vento e umidade, sendo a variabilidade das formas de relevo usada como *proxy* dos microclimas da paisagem.

7.6 Densidade de áreas úmidas (*wetland density*)

Média da contagem de locais saturados de água, que ficam encharcados ou alagados de forma perene ou sazonal, presentes em uma determinada região.

7.7 Padrão de distribuição regional de áreas úmidas (*wetland patchiness*)

Avaliação da forma com que as áreas úmidas estão distribuídas em uma determinada região, de acordo com o número de áreas úmidas naquela escala espacial.

8 Modelo conceitual e premissas

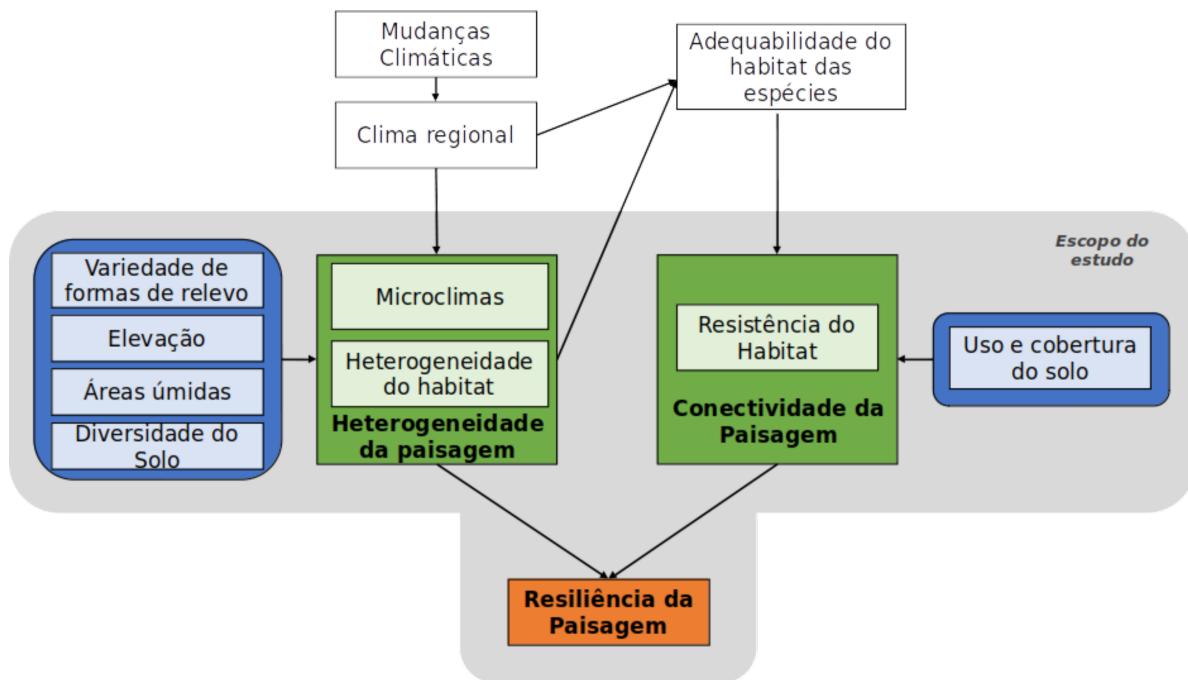


Figura 8.1: Modelo conceitual para o mapeamento das áreas resilientes às mudanças climáticas.

8.1 Premissas

- 1 - A heterogeneidade da paisagem é composta pelas feições topográficas, altitude, disponibilidade hídrica e riqueza de solos, e promove variabilidade microclimática.
- 2 - O variação microclimática possui dinâmica diferente da variação no clima regional.
- 3 - Quanto maior a heterogeneidade da paisagem, maior a probabilidade de haver refúgio microclimático.
- 4 - A heterogeneidade da paisagem é mais estável que o clima regional, sendo um bom indicador microclimático.

5 - Quanto maior a heterogeneidade da paisagem maior, a diversidade de espécies.

6 - Conservar locais com maior heterogeneidade da paisagem permite conservar as características que promovem a biodiversidade.

7 - A alta conectividade local da paisagem permite maior mobilidade dos organismos na busca de refúgios microclimáticos.

8 - Locais com alta heterogeneidade da paisagem e alta conectividade local são mais resilientes às mudanças climáticas.

9 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 o mapeamento da **heterogeneidade da paisagem** e da **conectividade local**, que são as camadas que irão compor a **resiliência da paisagem** ((fluxograma?)). Os sítios com maior resiliência, possuem alto potencial de abrigar a biodiversidade em um cenário de mudanças climáticas e estão conectados entre si (Anderson et al. 2014), permitindo a movimentação da biodiversidade entre diferentes microclimas nesses locais.

9.1 Heterogeneidade da paisagem

A heterogeneidade da paisagem está relacionada à variedade de microclimas em um determinado local. A análise de heterogeneidade da paisagem resume informações relacionadas a: (a) variedade de formas de relevo, (b) amplitude altitudinal, (c) índice de áreas úmidas e (d) riqueza de solos.

9.1.1 (a) Variedade de formas de relevo

A variedade de formas de relevo (*landforms*) diz respeito à variedade de feições topográficas gerados 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* e *steep slope*)
- tops de montanha e divisores de águas (*summit/ridge-top*)
- vertentes norte e sul, que determinam se uma vertente é quente ou fria, especialmente em latitudes maiores, (*warm/cool side slope*)
- colinas (*flat hill top* e *gentle slope hilltop*)
- áreas planas de terras baixas (*dry flat*), entre outros.

A classificação de formas de relevo é baseada em índices de **inclinação do relevo**, **orientação da vertente**, **posição topográfica** e **acúmulo de umidade** (*slope*, *aspect*, *land position* e *moisture accumulation*), que correspondem aos locais com diferenças em umidade, radiação e deposição. A variedade de formas de relevo é calculada como a quantidade de formas de relevo dentro de uma área circular, de 450 m de raio, no entorno de cada célula de 90 m.

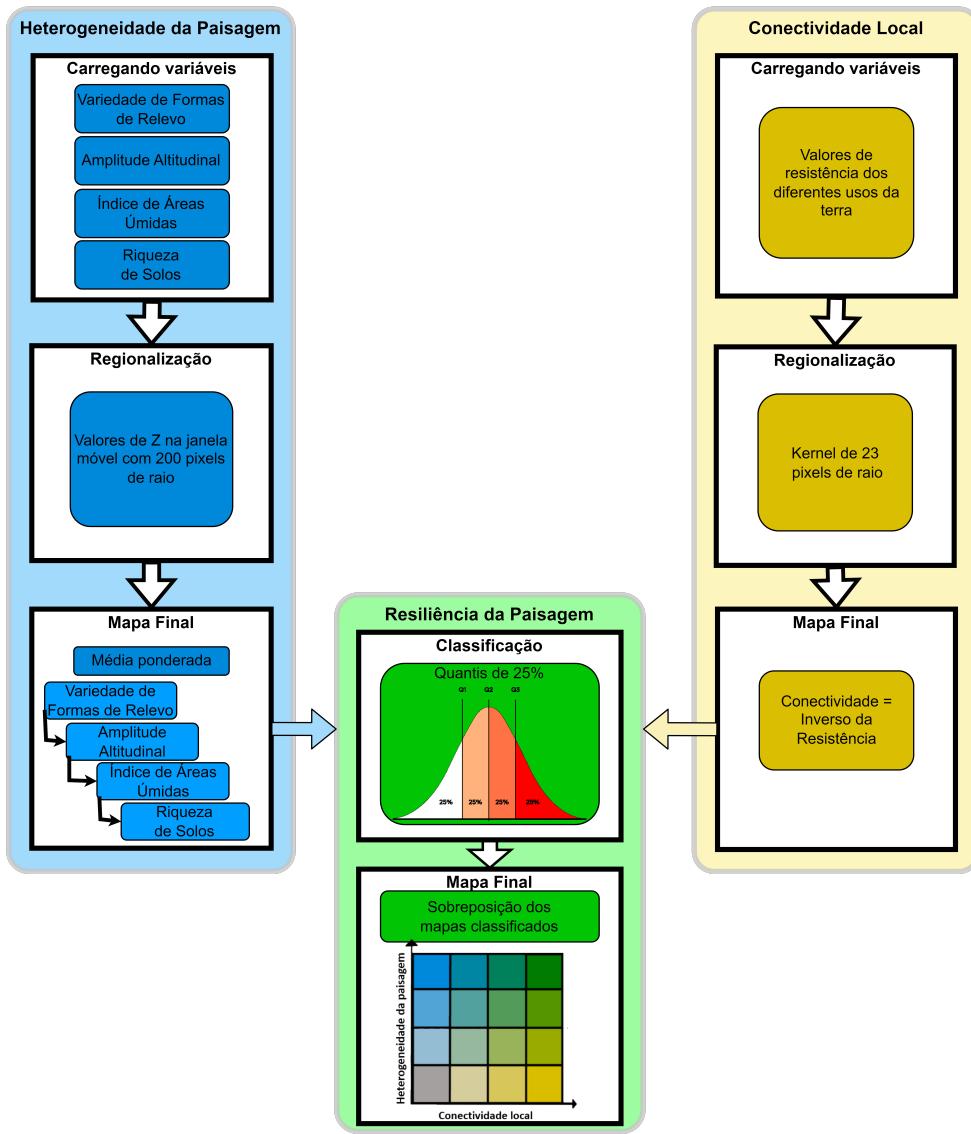


Figura 9.1: Fluxograma da análise de resiliência da paisagem, que inclui as camadas de heterogeneidade da paisagem e de conectividade local.

9.1.2 (b) Amplitude altitudinal

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

9.1.3 (c) Índice de áreas úmidas

Para áreas planas, nas quais a variedade de formas de relevo e a amplitude altitudinal não permitem discriminar a variação microclimática, a densidade e quantidade de áreas úmidas captura a variação microclimática.

A densidade e quantidade de áreas úmidas são resumidas no índice de áreas úmidas, que é obtido pela média das densidade de áreas úmidas dentro de áreas circulares de 450 m de raio (escala local) e 1170 m de raio (escala regional), em cada célula de 90 m. Essa densidade é combinada com a quantidade de áreas úmidas (*wetland patchiness*) em área circular de 1170 m de raio, formando o índice de áreas úmidas.

9.1.4 (d) Riqueza de solos

Por fim, em locais com baixa variação de formas de relevo, amplitude de elevação e presença de áreas úmidas, a riqueza de solo é usada para identificar variações na paisagem que possam sustentar a variação da biodiversidade.

9.1.5 Combinando as variáveis para gerar a heterogeneidade da paisagem

A combinação dos índices de variedade de formas de relevo, amplitude altitudinal, índice de áreas úmidas e riqueza de solos gera a **heterogeneidade da paisagem**. Esse índice pondera a variedade de formas de relevo com peso maior, sendo ela o dobro do peso das demais variáveis.

9.2 Conectividade local

A conectividade local é uma medida de facilitação ao deslocamento de organismos entre os elementos que compõem a paisagem (ou tipos de uso e cobertura do solo). A conectividade é maior quanto menor for a resistência que esses elementos oferecem ao deslocamento dos organismos, representando o grau de permeabilidade da paisagem (ou reciprocamente o grau de resistência) em torno de cada célula avaliada. A partir de um mapa de uso e cobertura do solo, incluindo a presença de infraestruturas energéticas e de transporte, foram atribuídos pesos de resistência à movimentação de organismos para cada classe que compõem este mapa, sendo o

valores menores (menor resistência) atribuídos para áreas naturais e os valores maiores (maior resistência) atribuídos a áreas intensamente antropizadas (áreas urbanas), com um gradiente de valores entre um extremo e outro.

Uma vez atribuídos os valores de resistência, a conectividade local foi estimada pela média ponderada das resistências dentro uma janela móvel circular de aproximadamente 2070 m, que representa o contexto espacial em que cada pixel está inserido. Para o cálculo da média ponderada, foi utilizada uma função de decaimento linear que reconhece que pixels mais próximos possuem maior influência um sobre o outro do que pixels mais distantes, influenciando o valor de conectividade local de cada pixel.

9.3 Padronização dos dados (*Z-scores*)

Antes de calcularmos a resiliência da paisagem, as variáveis variedade de formas de relevo, amplitude de elevação, índice de áreas úmidas, riqueza de solos e conectividade local são convertidas para valores de Z (*Z-scores*), assumindo as médias e desvios padrões dentro de janelas móveis de 200 pixels de raio. Isso garante a inclusão de condições físicas e ambientais distintas e permite capturar variações locais na composição da biota associada. Posteriormente, os valores de Z são combinados em heterogeneidade da paisagem.

9.4 Conectividade: análise de circuitos

Calculamos a conectividade baseada em teoria de circuitos (McRae 2006) utilizando a implementação de Omniscape para Julia (Landau et al. 2021, Hall et al. 2021).

Como base para estas análises, utilizamos:

- o raster de resistência utilizado como base para a conectividade local;
- um raio da área de interesse de 210 pixels (~19km);
- agrupamentos de 21 pixels de interesse para a janela móvel (~1.9km).

O raio da área de interesse é o raio de busca ou tamanho da janela móvel circular. O tamanho da janela foi equivalente ao utilizado no cálculo dos Z scores (200 pixels), o valor é levemente diferente devido à limitação do tamanho do bloco central da janela ser um número ímpar de pixels (agrupamento de 21) e segundo Landau et al. (2021) esse valor não deve ultrapassar 10% do raio.

Consideramos o uso de *kernel* sobre a superfície de resistência como entrada para o Omniscape, entretanto, os resultados da análise com *kernel* diluíram muito corredores e passagens menores, por conta da natureza de suavização da superfície de resistência pelo *kernel*. Dessa maneira, ao utilizar a resistência sem *kernel* como entrada, preservamos estruturas espaciais menores, mas importantes para a conectividade da paisagem.

O *output* do 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 pixels 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 acumulada, levando em conta a configuração espacial e os valores de resistência.
- `normalized_current` equivale a $\frac{\text{cumulative_current}}{\text{flow_current}}$ e controla o efeito da configuração espacial do cálculo de conectividade.

9.5 Resiliência da paisagem: combinando heterogeneidade da paisagem e conectividade local

Finalmente, a **resiliência da paisagem** é calculada pela sobreposição dos mapas de heterogeneidade da paisagem e conectividade local baseada no histograma de distribuição dos valores dessas métricas. Dessa forma, podemos criar um mapa bivariado da resiliência da paisagem, que tem como objetivo mostrar as áreas onde os resultados das duas métricas se sobrepõem ou divergem ((**resilience?**)). Com base na escala de cor que escolhemos e destacando regiões que merecem atenção especial em termos de conservação e manejo, são identificadas áreas onde a heterogeneidade da paisagem e a conectividade local são mais importantes para a resiliência da paisagem.

Classificação da resiliência da paisagem

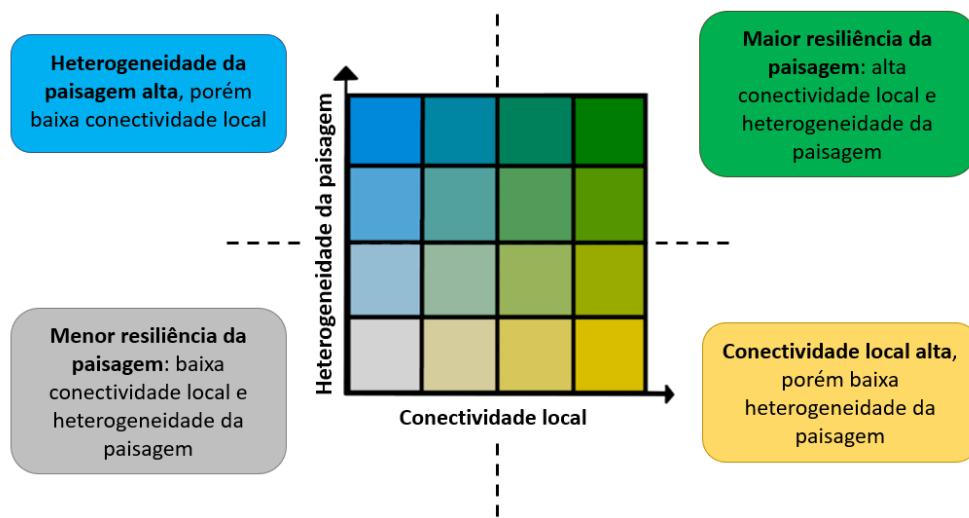


Figura 9.2: Definição das classes de resiliência da paisagem, baseada na distribuição de pixels nas imagens originais de heterogeneidade da paisagem e conectividade local.

10 Refinamento das análises

A presente análise se baseou em trabalho anterior, que mapeou a resiliência para os Estados Unidos (citar trabalhos Anderson). Com base em discussões internas realizadas pela equipe central do projeto e com base nos comentários e sugestões de especialistas temáticos, foram realizados refinamentos nas análises para melhorar o mapeamento da resiliência para o território brasileiro. Abaixo, são incluídos os principais refinamentos realizados, assim como a explicação de alguns pontos de atenção importantes que surgiram ao longo do processo de criação do projeto.

10.1 Eco-georegiões (antiga camada geophysical settings) e janelas móveis

No estudo original conduzido para a América do Norte, foi utilizada uma camada chamada **geophysical settings** que considerava variáveis de pedologia e eco-regiões, de modo a regionalizar o território e incluir a variabilidade de ambientes por região. O objetivo da utilização dessas regiões seria pela regionalização dos valores de heterogeneidade da paisagem e de conectividade, visto que temos o interesse em saber qual é a posição dos valores (estatisticamente) relacionados à região em que os mesmos estão inseridos, gerando uma contextualização regional das características de heterogeneidade e conectividade. No nosso caso, consideramos que o nome utilizado no trabalho anterior poderia potencialmente trazer confusão, pois sítios geofísicos poderiam se referir a sítios diferenciados por características geofísicas, as quais não foram utilizadas no trabalho. Com isso decidimos alterar o nome dessa camada para eco-georegiões, que seriam geradas pela intersecção de regiões ecofisiográficas (eco-regiões) e domínios geológicos. Rodamos os resultados iniciais da nossa análise considerando a regionalização por eco-georegiões. Após as discussões com especialistas durante a Oficina #1, a sugestão de um dos especialistas (geólogo de formação) nos levou a considerar a substituição da variável de geologia por uma de geomorfologia na geração das eco-geo regiões, visto que a diversidade de espécies estaria melhor relacionada com geomorfologia do que com geologia. Entretanto, na mesma oficina foi sugerida a utilização de janelas móveis para realizar a regionalização: ao invés de regionalizar as variáveis dentro de uma eco-georegião, elas seriam regionalizadas dentro de uma janela móvel que passaria por todo o Brasil, evitando problemas de quebras abruptas no mapeamento. Essa técnica de janelas móveis, também conhecida como filtros ou convolução, foi a técnica selecionada para a regionalização dos dados. O tamanho da janela móvel na análise (circular com raio

de 200 pixels) foi determinada através de testes em que não se observassem padrões espaciais destoantes das estruturas espaciais conhecidas (e.g., descontinuidades espaciais abruptas inexistentes).

10.2 Análise de conectividade local

Para a análise de conectividade local, inicialmente seguimos a metodologia conduzida para a América do Norte, que utilizada filtros kernel como um proxy de conectividade. Em conversas com o time que conduziu o estudo nos EUA, nos foi indicado que o filtro Kernel teria resultados semelhantes a uma análise de circuitos (derivada da ferramenta circuitscape), mas com uma capacidade computacional muito menor, o que facilitaria a análise dada a amplitude territorial. A utilização de Kernel traz uma contextualização da resistência de acordo com seu entorno. O filtro considera um tamanho de 23x23 pixels e pesos seguindo decaimento linear com relação ao centro do Kernel. No nosso caso, optamos pela utilização da análise de circuitos com base no omniscape (técnica de circuitscape omnidirecional), por ser uma análise mais sofisticada que o Kernel. O resultado é equivalente à passagem de um filtro passa-baixa. Essa análise segue a teoria de circuitos, análoga à análise de resistência e correntes elétricas, trazendo a possibilidade de identificar corredores e onde estão localizados os acúmulos de corrente. A descrição sobre a análise de circuitos (omniscape) está indicada no item xx [incluir link].

11 Códigos e bases de dados

11.1 Códigos

Os códigos para as análises estão disponíveis no repositório do projeto: ...

A documentação para cada uma das diferentes camadas pode ser encontrada nos links abaixo.

11.1.1 Heterogeneidade da paisagem

Documentação para a análise de heterogeneidade da paisagem: ...

11.1.2 Conectividade local

- Documentação para a análise de resistência da paisagem: ...
- Documentação para a análise de conectividade da paisagem (análise omniscape): ...

11.1.3 Resiliência da paisagem

Documentação para a análise de resiliência da paisagem: ..

11.2 Bases de dados

As seguintes bases de dados foram utilizadas para gerar as análises:

11.2.1 Diversidade da paisagem

- Formas de relevo e altitude: [MERIT DEM: Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM](#)
- Acúmulo de fluxo: [MERIT Hydro: Global Hydrography Datasets](#)
- Áreas úmidas: [Global Wetlands](#)
- Solos: [IBGE](#)
- Corpos d'água: [Mapbiomas Coleção 7](#)

11.2.2 Conectividade local

- Uso e cobertura do solo: [Mapbiomas Coleção 7](#)
- Infraestrutura de transporte: [IBGE BCIM](#)
- Infraestrutura de energia: [ANEEL](#)

12 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).

12.1 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.

12.2 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. 2016a). 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 12.1). A classificação foi baseada em estudos anteriores (Fels e Matson 1996, Anderson et al. 2012, 2016a, Anderson, Mark G. et al. 2014, 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**.

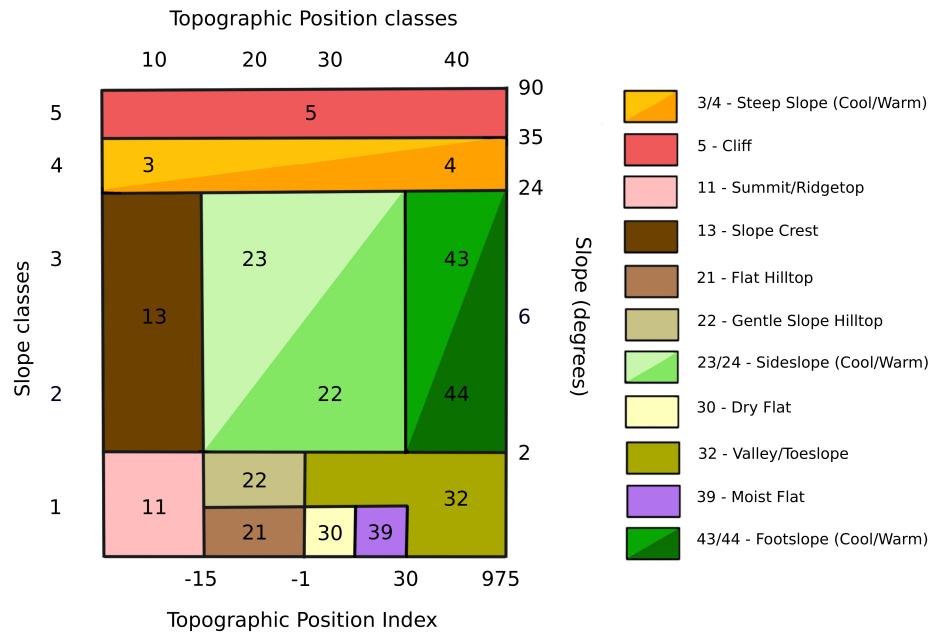


Figura 12.1: Classificação de formas de relevo de acordo com a declividade do relevo, índice de posição topográfica, orientação do relevo, índice de umidade, rios e lagos. Baseado na classificação de Anderson et al. (2016a).

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).

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

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 12.1) para formarem os tipos de formas de relevo. A declividade e orientação do relevo seguiram a classificação em Anderson et al. (2016a), 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 MapBiomas.

Tabela 12.1: 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 12.2): + **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 12.2).

Tabela 12.2: 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 12.3.

Tabela 12.3: 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 12.2: 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. 2016a).

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:

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

»»»> b590b003fdcd8825dfb060688503229ed162237b

13 Conectividade local

13.1 Bases de dados utilizadas

A superfície de resistência foi calculada usando como base os dados de uso e cobertura do solo fornecida pelo MapBiomas coleção 8.0 para o ano de 2021 (MapBiomas Project 2020). Complementamos essa camada do uso do solo com informações sobre: ::: {} 1. Largura dos rios; 2. Presença de infraestruturas de transporte; 3. Infraestruturas de energia. :::

As informações sobre largura dos rios foram derivadas a partir das camadas de águas do abertas do MapBiomas (MapBiomas Project 2020), a camada de bacias hidrográficas no nível 8 [Lehner & Grill (2013)] e a camada de largura efetiva dos corpos d'água [Yamashida et al. 2014].

As informações sobre infraestrutura de transporte foram originadas a partir das camadas de estradas pavimentadas, estradas não-pavimentadas e ferrovias fornecidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) ([BCIM250, 2021]) (<https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/bases-cartograficas-continuas/15759-brasil.html?=&t=downloads>).

As bases de infraestrutura de energia correspondem às camadas de aerogeradores, centrais geradoras de energia fotovoltaicas, linhas de transmissão de energia eólica e usinas termelétricas fornecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (<https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/>) e a camada de linhas de transmissão de energia fornecida pelo IBGE ([BCIM250, 2021]).

Cálculo 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.

As análises de mapeamento das áreas resilientes às mudanças climáticas estão na resolução espacial de 90 metros. Desta forma, reamostramos os dados do MapBiomas (MapBiomas Project 2020) , que estão na resolução de 30 metros, para uma resolução de 90 metros e as diferentes classes de uso do solo receberam valores de resistência baseados na a

diferença estrutural da classe de cobertura do solo para o habitat original do bioma **?@tbl-resistencia**.

Para avaliar o efeito das larguras do rio na movimentação das espécies foi necessário avaliar o tamanho máximo do corpo d'água regionalmente. Para isso, a classe do MapBiomas equivalente a águas abertas (rios, lagos e oceanos) foi subdividida em quatro classes distintas de acordo com a largura dos corpos d'água já que rios mais largos tendem a ser barreiras mais resistentes à movimentação das espécies. Para fazer a divisão, extraímos a máscara de corpos d'água e dividimos essa classe única em pedaços menores, regionalizando suas larguras por trechos que foram utilizados como unidades espaciais de consulta da base de largura efetiva máxima dos corpos d'água, de margem a margem (base GWD – LR de **Yamashida et al. 2014**). Todos os corpos d'água foram então divididos em quatro classes de resistência **?@tbl-resistencia**: :::{}

i. 1 a 250 metros, ii. 250 a 1000 metros, iii. 1000 a 4000 metros e iv. maiores de 4000 metros ::::.

As camadas de infraestrutura de transportes e energia estavam em formatos vetoriais e foram convertidos para *raster*, com pixels de tamanho aproximado de 90 m e agrupados em um único arquivo matricial que foi sobreposto sobre ao mapa de uso do solo do Mapbiomas e da largura dos rios, sendo que prevalecia o valor do pixel com resistência mais alta nas situações em que havia sobreposição entre pixels de infraestrutura, uso do solo ou largura de rios.

Os pixels do mapa consolidado de cobertura do solo, largura dos rios e infraestrutura de transportes e energia receberam valores de resistência em cada bioma que buscaram traduzir o grau de dificuldade de movimentação da biodiversidade numa dada classe de cobertura do solo. Os valores de resistência dos pixels de cada uma das classes foram atribuídos pela equipe do projeto, separadamente por bioma, e podem ser vistos na **?@tbl-resistencia** e o **mapa final de resistência** (**(fig_res?)**) foi usado como base do cálculo de **Coneectividade Local**.

Tabela 13.1: Valores de resistência para as 39 classes de uso e cobertura do solo - resultante da junção das superfícies de uso do solo do MapBiomas (N: 1 - 28), as separações do tamanho dos rios por bacias hidrográficas (N 29 - 32) e de infraestrutura de transporte e energia (N: 33 - 39).{#tbl-resistencia}

N	Classe de cobertura		Mata				
	do solo	Amazônia	Caatinga	Cerrado	Atlântica	Pampa	Pantanal
1	Afloramento rochoso	3	1	2	3	2	-
2	Algodão	7	7	10	-	-	-
3	Aquacultura	-	10	7	7	7	-
4	Área urbana	20	20	20	20	20	20

N	Classe de cobertura do solo	Amazônia	Caatinga	Cerrado	Mata Atlântica	Pampa	Pantanal
5	Áreas alagadas (Campos e Pântanos)	1	-	1	2	1	1
6	Arroz	-	-	10	10	10	-
7	Café	-	7	10	4	-	-
8	Cana de açúcar	15	10	10	10	-	10
9	Citrus	-	-	10	4	-	-
10	Dendê	10	-	-	-	-	-
11	Floresta alagada	1	-	-	-	-	-
12	Formação campestre (campos)	1	1	1	2	1	1
13	Formação de savana	1	1	1	2	-	1
14	Formação florestal	1	1	1	1	1	1
15	Mangue	1	1	1	1	-	-
16	Mineração	20	20	20	20	20	20
17	Mosaico de usos	10	7	10	10	10	7
18	Outras áreas não vegetadas	10	10	10	10	10	10
19	Outras culturas perenes	10	7	7	4	-	-
20	Outras culturas temporárias	15	7	10	10	10	5
21	Outras formações não florestais	-	7	-	2	-	-
22	Pastagem	17	7	7	9	7	7

N	Classe de cobertura do solo	Amazônia	Caatinga	Cerrado	Mata Atlântica	Pampa	Pantanal
23	Praia, duna e areal	2	2	2	2	2	2
24	Salina (Apicum)	2	1	2	2	-	-
25	Silvicultura (floresta plantada)	7	2	7	3	10	5
26	Soja	17	10	10	10	10	10
27	Vegetação de restinga arbórea	-	1	-	1	1	-
28	Vegetação de restinga herbácea	-	1	-	2	1	-
29	Corpos d'água abertas até 250 metros	2	2	2	2	2	2
30	Corpos d'água abertas de 250 a 1000 metros	5	5	5	5	5	5
31	Corpos d'água abertas de 1000 a 4000 metros	10	10	10	10	10	10

N	Classe de cobertura do solo	Amazônia	Caatinga	Cerrado	Mata Atlântica	Pampa	Pantanal
32	Corpos d'água abertas acima de 4000 metros	12	12	12	12	12	12
33	Aerogeradores	15	15	15	15	15	15
34	Centrais geradoras de energia solar	15	17	17	17	17	17
35	Estradas não pavimentadas	10	10	7	10	7	3
36	Estradas pavimentadas	20	20	20	20	20	20
37	Ferroviás	10	10	10	10	10	10
38	Linhos de transmissão (tradicionais e anexas ao sistema eólico)	10	7	7	7	7	7
39	Termelétricas	20	20	20	20	20	20

13.2 Conectividade: análise de circuitos

Calculamos a conectividade baseada em teoria de circuitos (McRae 2006) utilizando a implementação de Omniscape para Julia (Landau et al. 2021, Hall et al. 2021).

Como base para estas análises, utilizamos:

- o raster de resistência utilizado como base para a conectividade local;
- um raio da área de interesse de 200 pixels (18km);
- agrupamentos de 19 pixels de interesse para a janela móvel ($\sim 1.7\text{km}$).

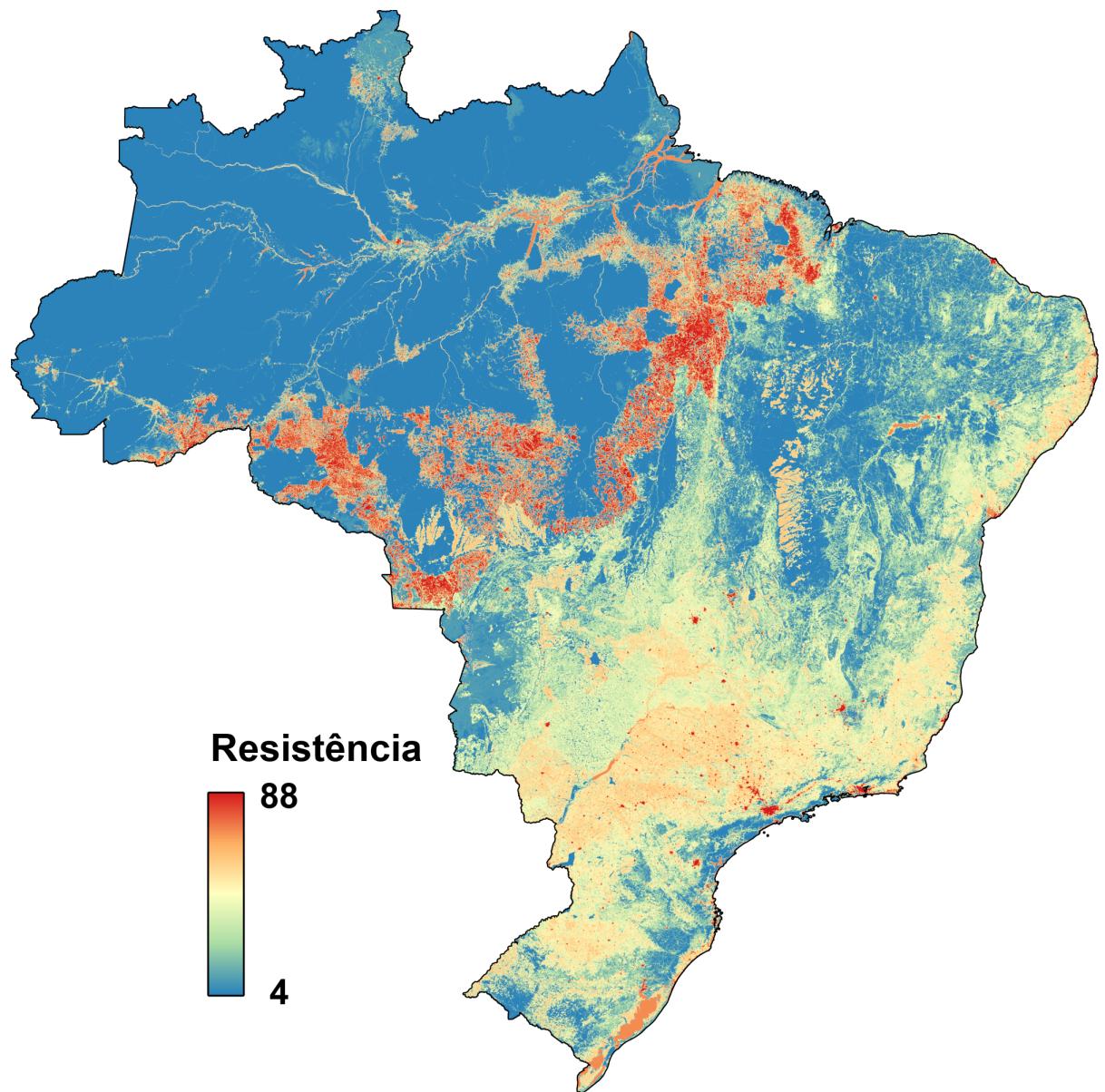


Figura 13.1: Mapa final de classificação da resistência à movimentação de organismos dos diferentes tipos de uso e cobertura da terra.

O raio da área de interesse é o raio de busca ou tamanho da janela móvel circular. O tamanho da janela foi equivalente ao utilizado no cálculo dos valores de Z (200 pixels), o valor é levemente diferente devido à limitação do tamanho do bloco central da janela ser um número ímpar de pixels (agrupamento de 19) e segundo Landau et al. (2021) esse valor não deve ultrapassar 10% do raio.

Consideramos o uso de *kernel* sobre a superfície de resistência como entrada para o Omniscape, entretanto, os resultados da análise com *kernel* diluíram muito corredores e passagens menores, por conta da natureza de suavização da superfície de resistência pelo *kernel*. Dessa maneira, ao utilizar a resistência sem *kernel* como entrada, preservamos estruturas espaciais menores, mas importantes para a conectividade da paisagem.

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

Devido à alta demanda computacional a superfície de resistência para todo o Brasil foi fragmentada em 9 tiles com o dobro do raio (total de 400 pixels) de sobreposição entre eles, dessa maneira após o processamento individual dos tiles, foram removidos os 200 pixels de cada borda sobreposta, eliminando o efeito de borda para a execução o mosaico dos tiles, resultando na superfície de conectividade para todo o Brasil. Essa fragmentação para o processamento de grandes regiões é importante para que as análises possam ser feitas com menos poder computacional, sem prejuízo nos resultados.

14 Resiliência da paisagem

A **resiliência da paisagem** se refere à capacidade de um determinado local em manter a diversidade de espécies e as funções ecossistêmicas mesmo diante das pressões provocadas pelas mudanças climáticas. Para calcular essa resiliência, utilizamos as camadas padronizadas de heterogeneidade da paisagem e conectividade local (Figura 14.1) descritas anteriormente. A partir delas, classificamos as imagens em quatro quantis, baseados no histograma de distribuição dos valores dessas métricas

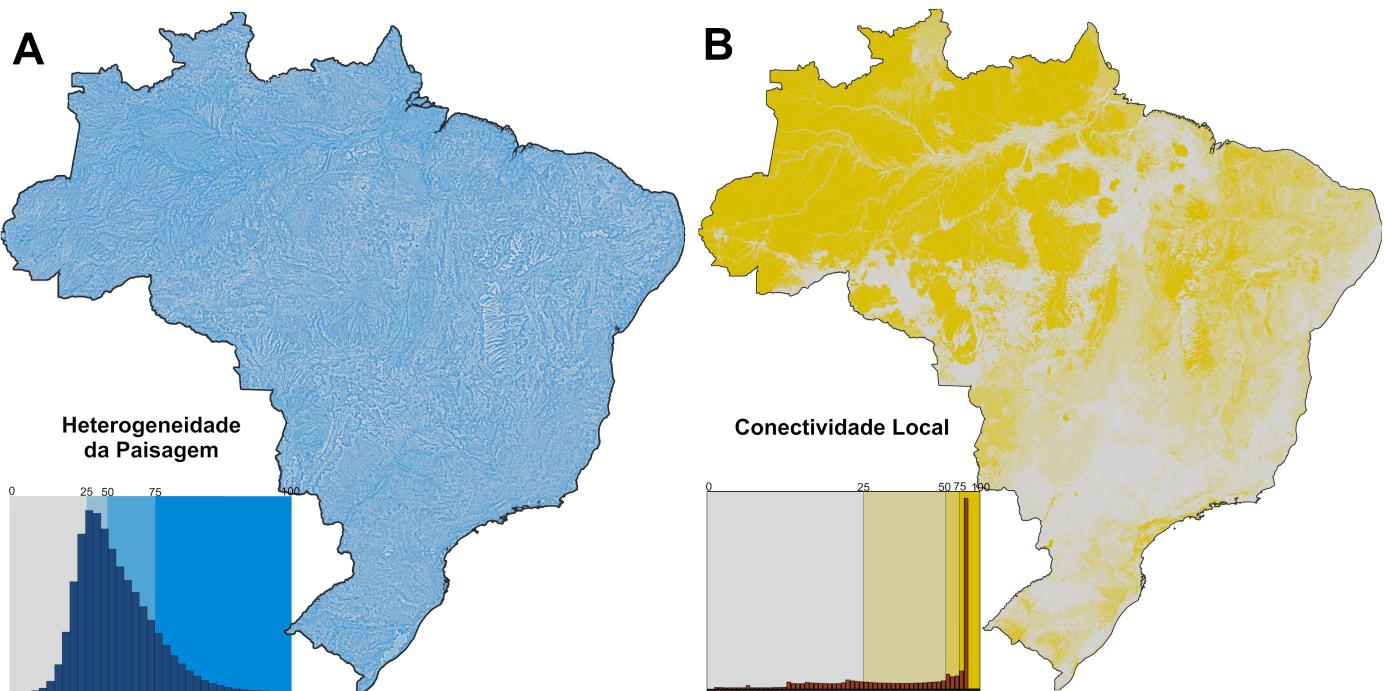


Figura 14.1: Classificação do histograma de valores dos pixels em quantis de 25% de: A) **heterogeneidade da paisagem** e B) **Conectividade local**.

Com a sobreposição das duas imagens classificadas por quantis, geramos um mapa bivariado da resiliência da paisagem, que tem como objetivo mostrar as áreas onde os resultados das duas métricas se sobrepõem ou divergem, baseado na escala de cor escolhida (Figura 14.2).

O mapa bivariado da **resiliência da paisagem** (Figura 15.12) destaca as regiões que merecem atenção especial em termos de conservação e manejo, identificando áreas onde a

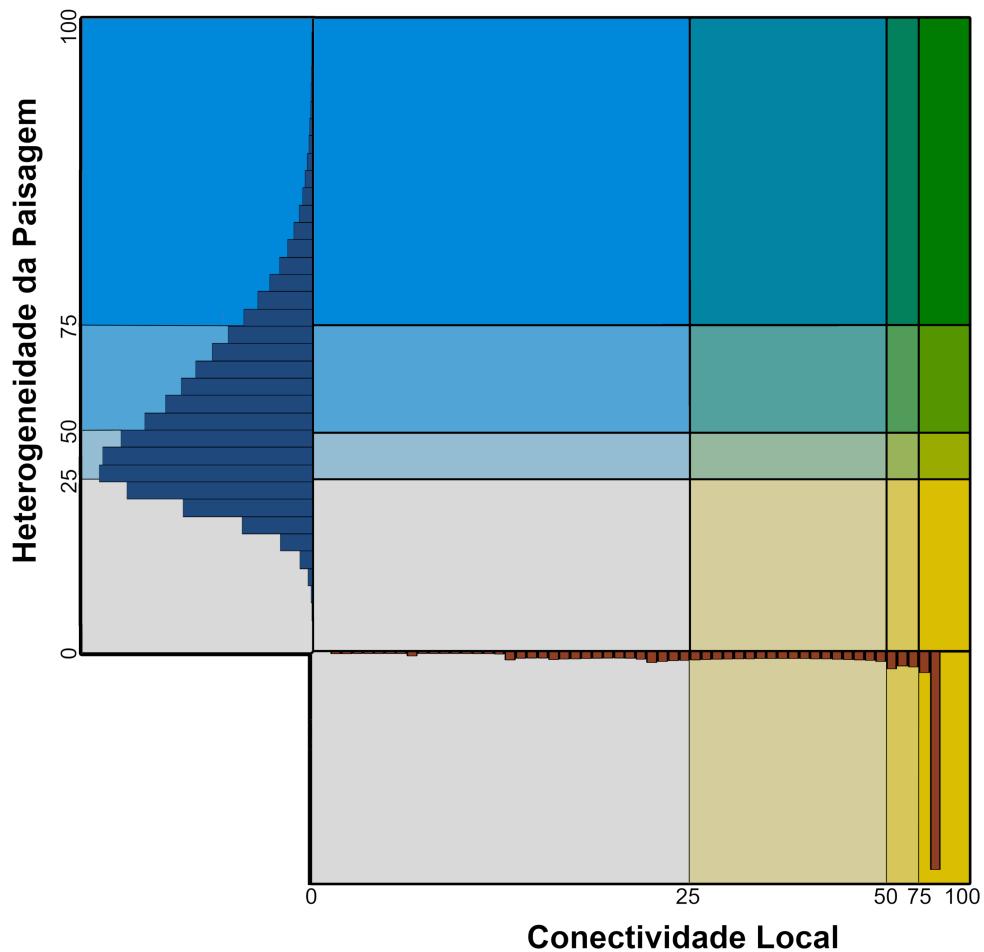


Figura 14.2: Definição das classes de resiliência da paisagem, baseada no histograma de distribuição de pixels nas imagens originais de heterogeneidade da paisagem e conectividade local.

heterogeneidade da paisagem e a conectividade local são mais importantes para determinar a resiliência da paisagem.

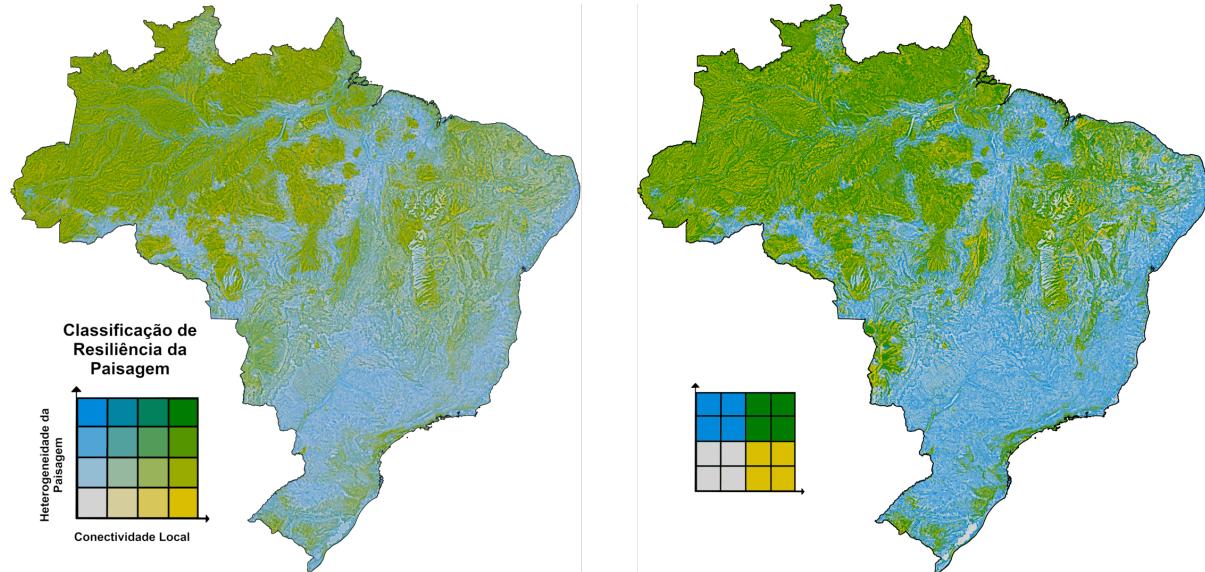


Figura 14.3: Mapa final de resiliência da paisagem com a sobreposição dos mapas de heterogeneidade da paisagem e conectividade local.

Assim, no mapa bivariado da resiliência da paisagem, podemos identificar diferentes áreas de interesse (Figura 14.4):

- **Áreas em amarelo:** Apresentam um alto grau de conectividade local, indicando que os elementos do ecossistema estão bem interligados nessa região. No entanto, essas áreas também exibem baixa heterogeneidade da paisagem, sugerindo que a variação topográfica da paisagem é limitada;
- **Áreas em azul:** Possuem alta heterogeneidade da paisagem, o que significa que há uma grande variedade de tipos de habitats ou características na paisagem. No entanto, a conectividade local é baixa, o que indica que os elementos do ecossistema podem estar isolados ou menos interligados;
- **Áreas em verde:** São aquelas que apresentam os maiores valores para as duas métricas, ou seja, possuem alta conectividade local e alta heterogeneidade da paisagem. Isso sugere que essas áreas são particularmente resilientes, pois apresentam alto potencial de manter a diversidade de espécies e funções ecossistêmicas, mesmo diante das mudanças climáticas.

Classificação da resiliência da paisagem

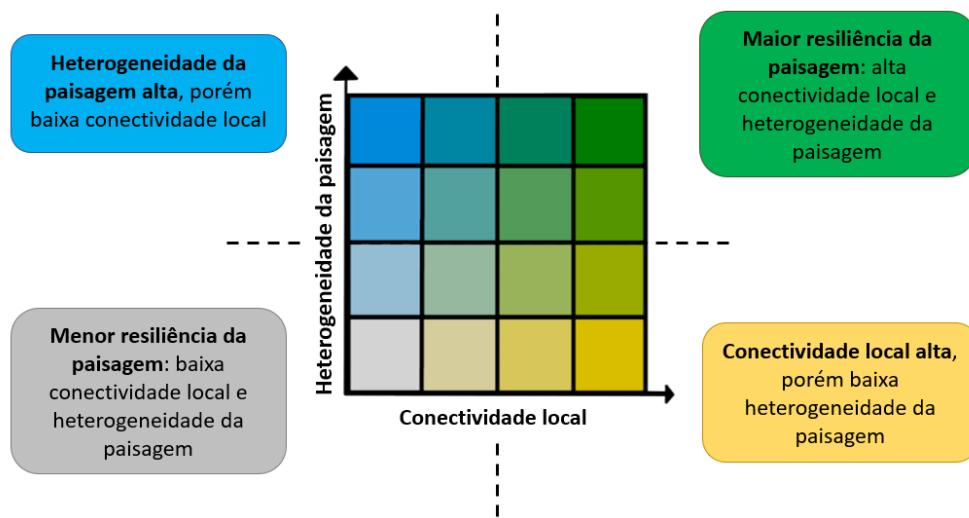


Figura 14.4: Definição das classes de resiliência da paisagem, baseada na distribuição de pixels nas imagens originais de heterogeneidade da paisagem e conectividade local.

15 Resultados preliminares

Os mapas das camadas principais e das variáveis intermediárias da análise podem ser visualizados no seguinte link: <https://projeto-resiliencia-tnc.hub.arcgis.com/?share=link>.

Atenção: o projeto ainda está em andamento, então os resultados apresentados são ainda versões preliminares do estudo.

Abaixo são descritos resultados principais por bioma e alguns padrões gerais obtidos para cada uma das camadas.

15.1 Mapas por bioma

São apresentados abaixo os mapas de heterogeneidade da paisagem, conectividade local e resiliência da paisagem por bioma: Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal.

15.2 Heterogeneidade da paisagem ([link](#))

As áreas de alta heterogeneidade da paisagem estão distribuídas por todo o Brasil (Figura 15.7). As regiões de destaque são aquelas próximas aos rios, em localidades com alta rugosidade do relevo, mudanças abruptas de declividade, alta densidade de áreas úmidas e riqueza de solos.

A heterogeneidade da paisagem foi calculada utilizando diferentes conjuntos de variáveis para cada localidade (Figura 15.8 A). A presença de todas as variáveis no cálculo da heterogeneidade, por todo Brasil, mostra que todas as variáveis foram importantes dependendo do contexto local (Figura 15.8 A). A variedade de formas de relevo foi a principal variável na atribuição da heterogeneidade da paisagem, seguida pela média de todas as variáveis (Figura 15.8 B). O índice de áreas úmidas e riqueza de solos também foram importantes nos locais onde a variedade de formas de relevo e a amplitude altitudinal não apresentaram altos valores (Figura 15.8 B).

As distribuições da heterogeneidade da paisagem para cada conjunto de variável tiveram medianas semelhantes, mas diferiram nas suas variâncias (Figura 15.9). As maiores heterogeneidades estiveram associadas à variedade de formas de relevo e índice de áreas úmidas (Figura 15.9).

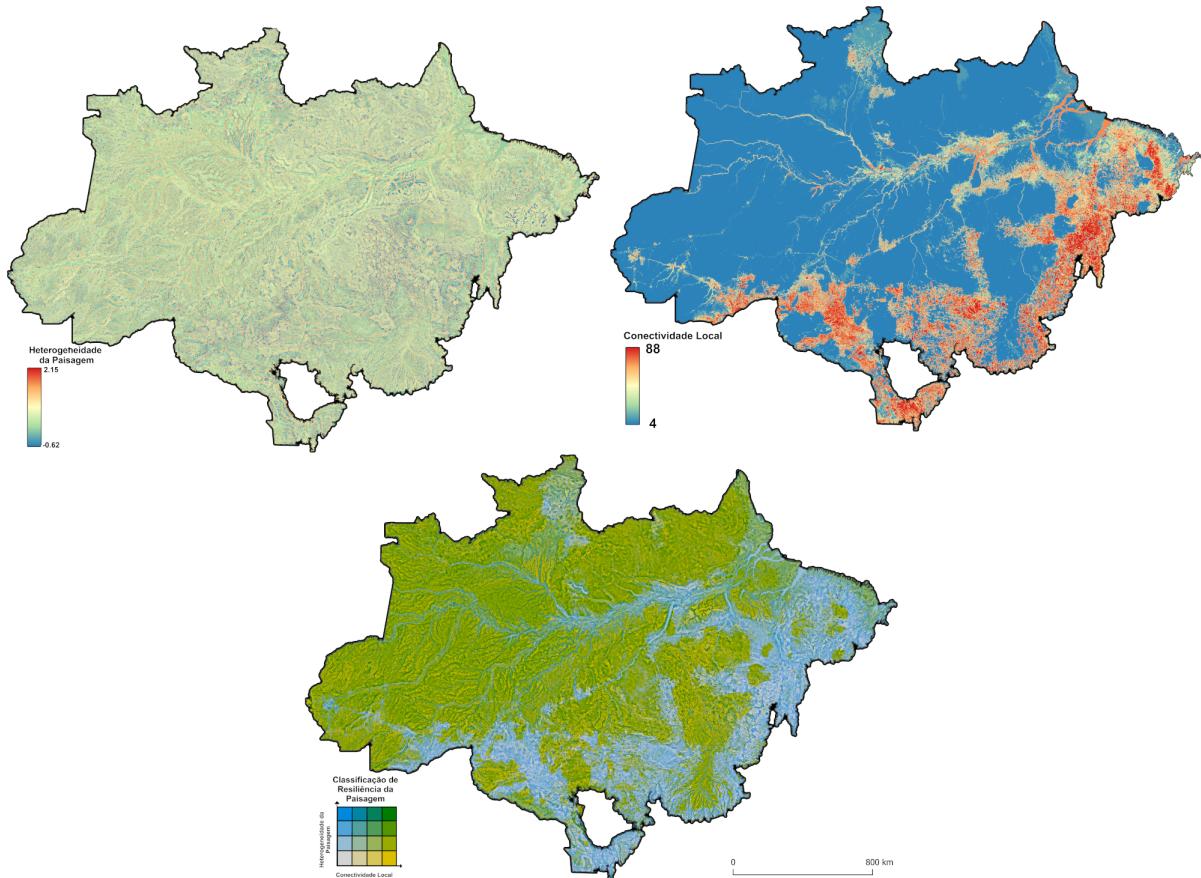


Figura 15.1: Recorte das camadas de (A) **Heterogeneidade da paisagem**, (B) **Conectividade local** e (C) **Resiliência da paisagem** para a Amazônia.

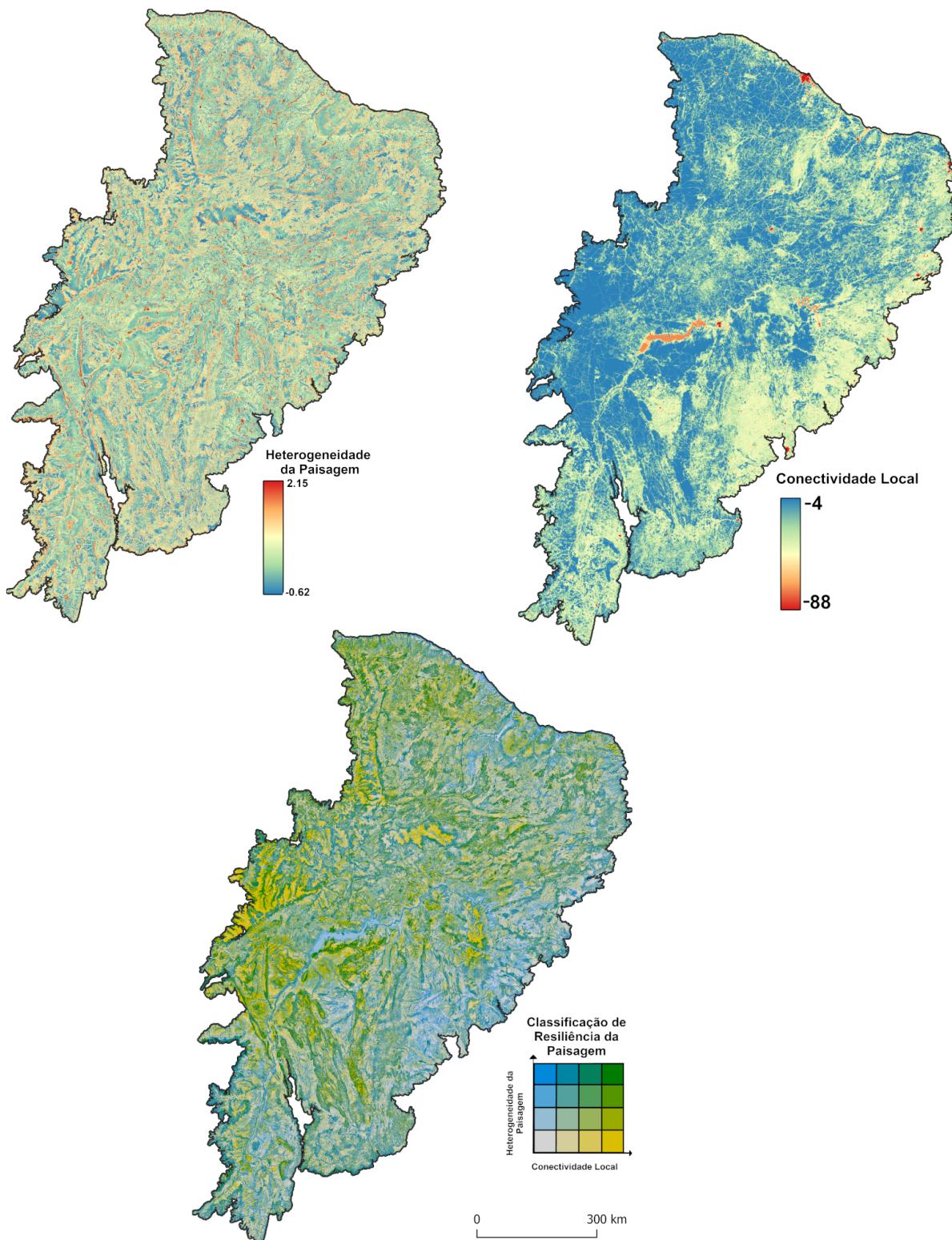


Figura 15.2: Recorte das camadas de (A) **Heterogeneidade da paisagem**, (B) **Conectividade local** e (C) **Resiliência da paisagem** para a Caatinga.

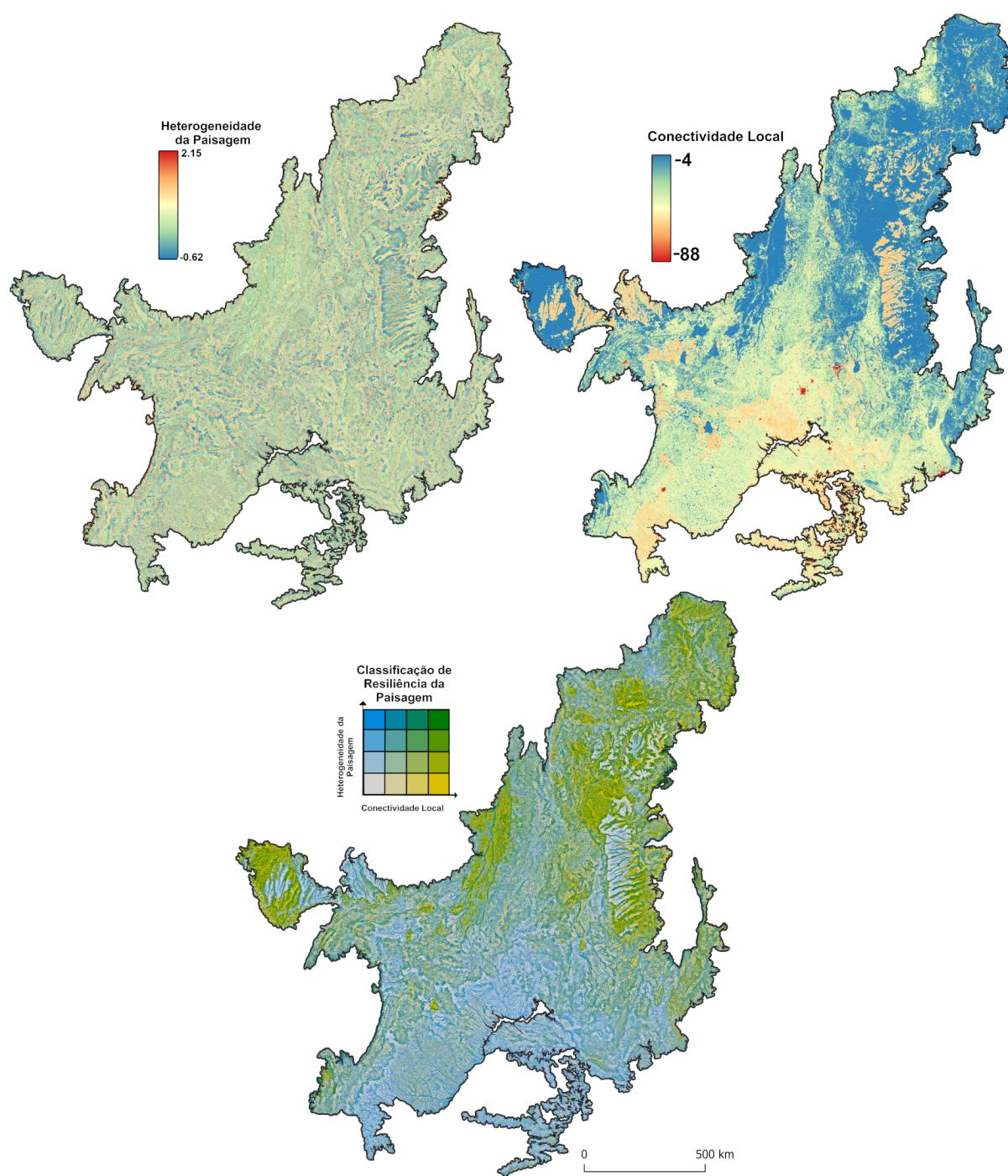


Figura 15.3: Recorte das camadas de (A) Heterogeneidade da paisagem, (B) Conectividade local e (C) Resiliência da paisagem para o Cerrado.

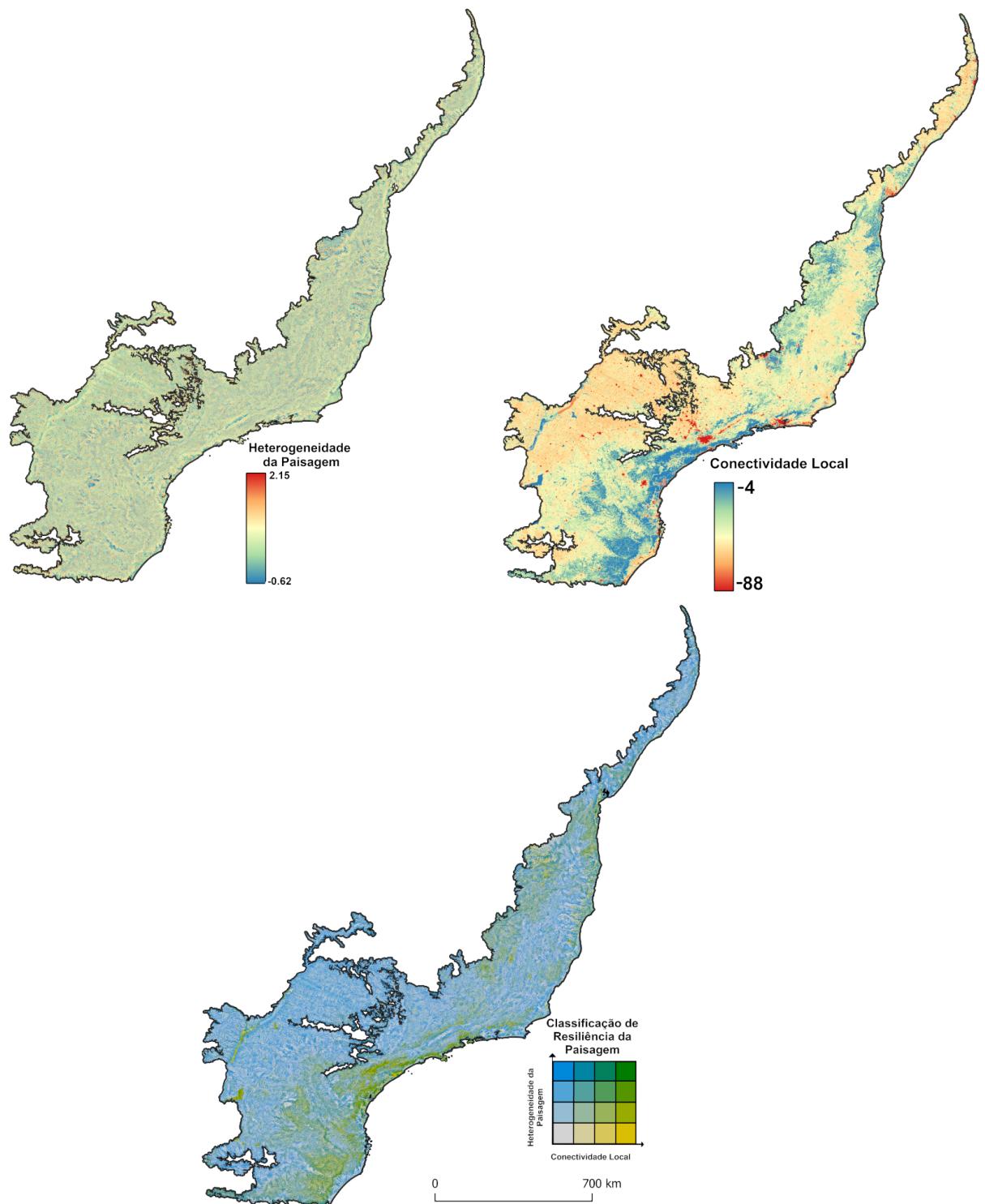


Figura 15.4: Recorte das camadas de (A) **Heterogeneidade da paisagem**, (B) **Conectividade local** e (C) **Resiliência da paisagem** para a Mata Atlântica.

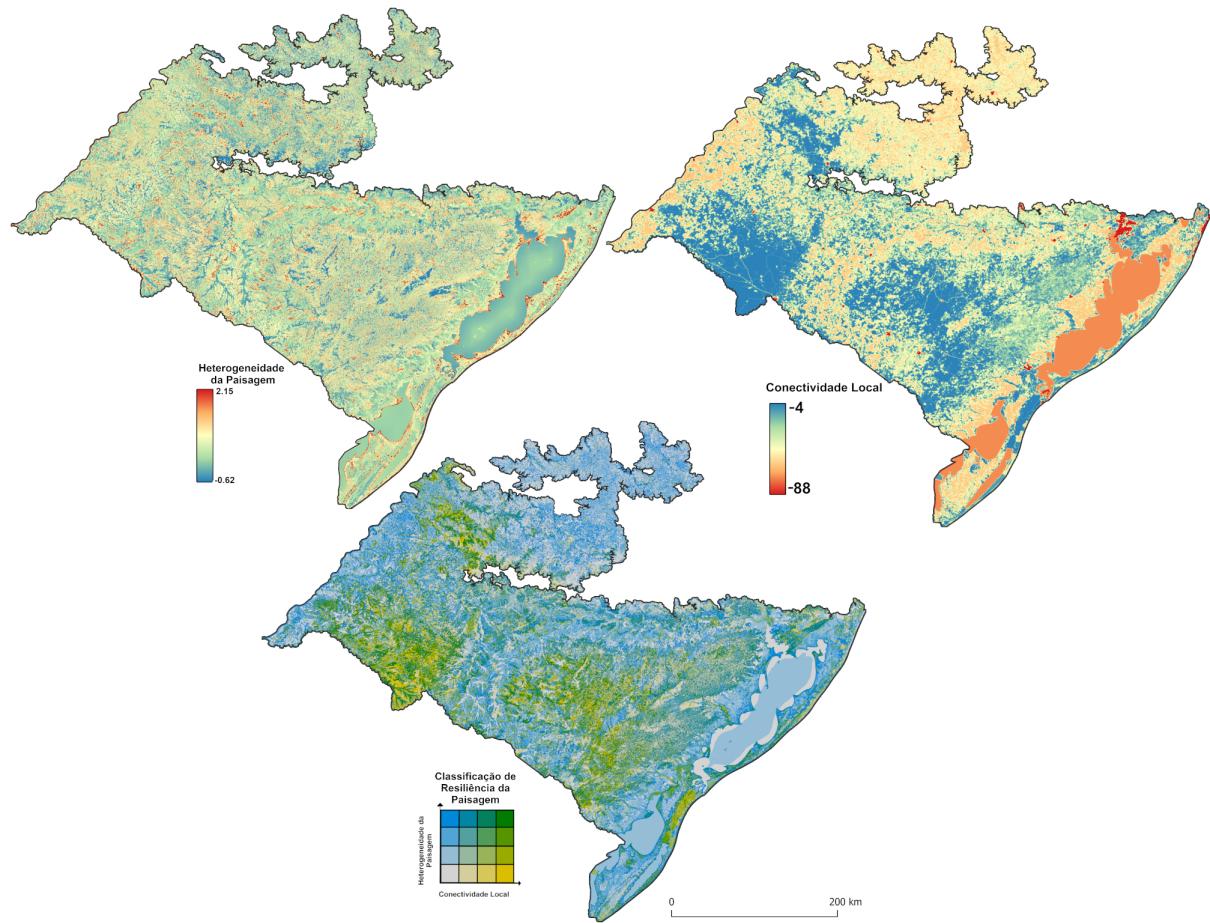


Figura 15.5: Recorte das camadas de (A) **Heterogeneidade da paisagem**, (B) **Conectividade local** e (C) **Resiliência da paisagem** para a Pampa.

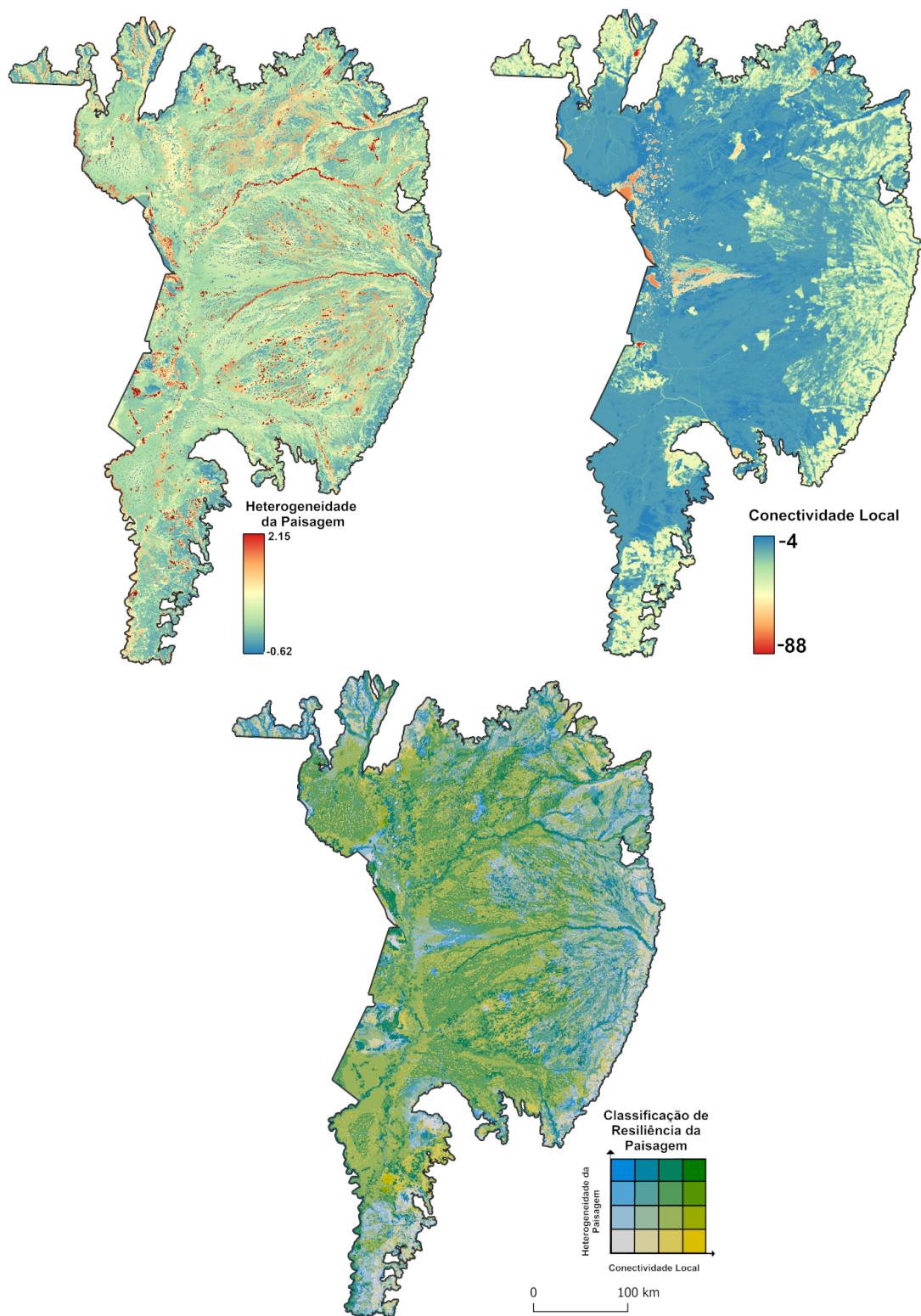


Figura 15.6: Recorte das camadas de (A) **Heterogeneidade da paisagem**, (B) **Conectividade local** e (C) **Resiliência da paisagem** para a Pantanal.

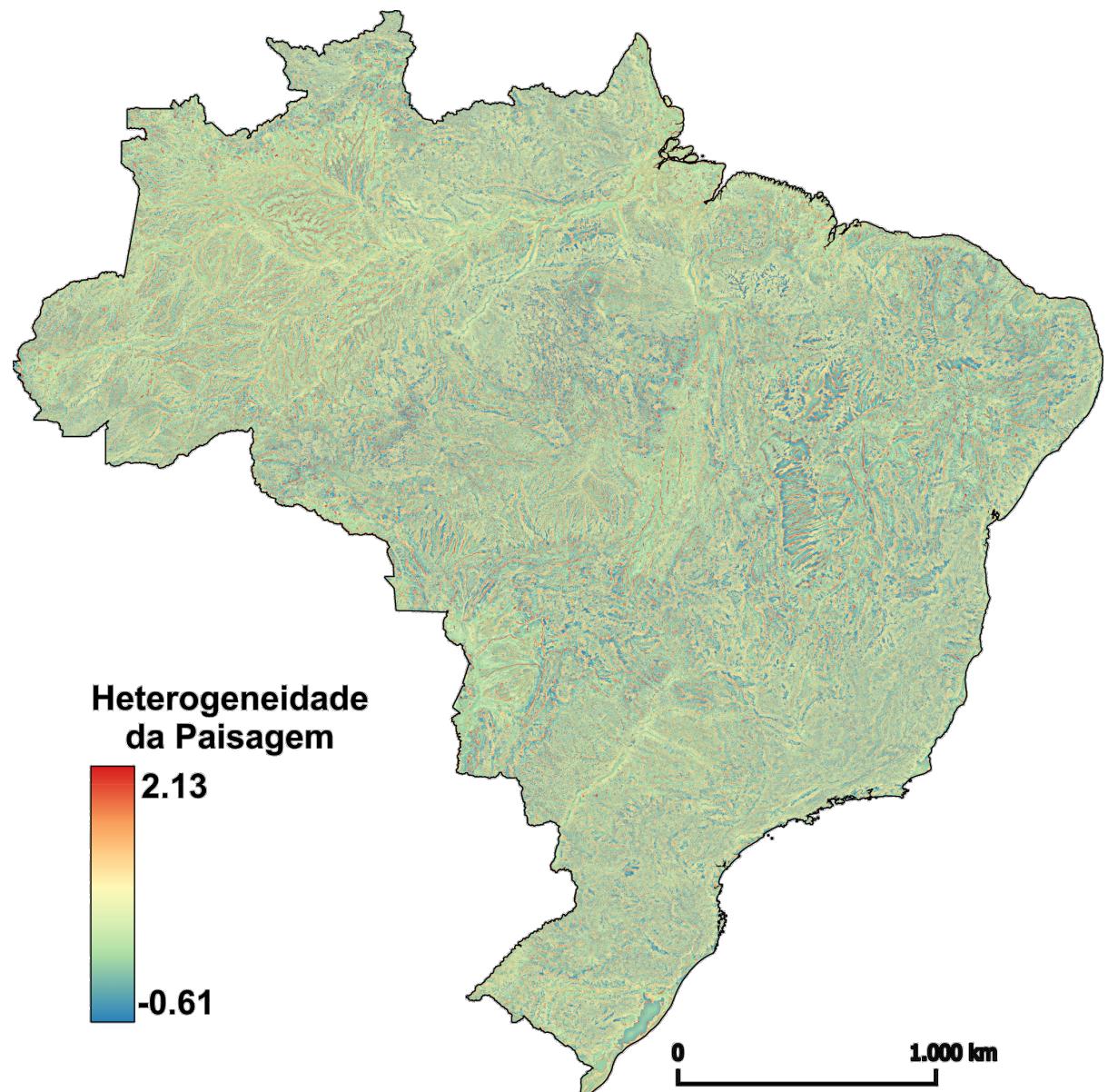


Figura 15.7: Heterogeneidade da paisagem, gerada a partir da média ponderada dos *Z-scores* das variáveis: variedade de formas de relevo, amplitude altitudinal, índice de áreas úmidas e riqueza do solo.

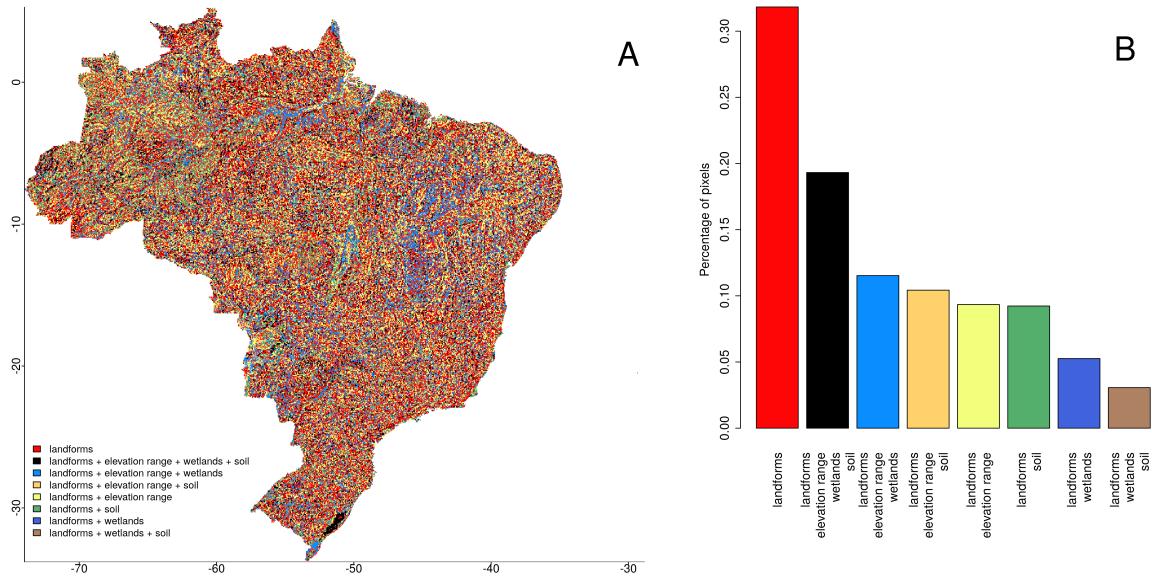


Figura 15.8: Variáveis que compõem a heterogeneidade da paisagem em cada localidade: (A) Distribuição espacial das variáveis; (B) Porcentagem de células composta por cada variável. A heterogeneidade da paisagem é a média ponderada dos Z-scores das variáveis.

No nível de bioma, todos eles apresentaram a variedade de formas do relevo e a média de todas as variáveis como as duas variáveis mais importantes (Figura 15.10). A partir dessas, os biomas diferiram um pouco: para Amazônia e Pantanal, a média de formas de relevo, amplitude altitudinal e riqueza de solo foram mais importantes; para Mata Atlântica e Pampa, amplitude altitudinal e formas de relevo se destacaram; e para Caatinga e Cerrado, foram as formas do relevo, amplitude altitudinal e índice de áreas úmidas. Além disso, o índice de áreas úmidas foi bastante representativo no Pantanal, quando somadas as porcentagens das localidades que utilizaram o índice de áreas úmidas (Figura 15.10).

Com relação a algumas regiões de destaque dentro dos biomas, é importante mencionar: - Na Amazônia, destacam-se o entorno dos vales dos rios menores (ex. Parque do Xingu), as regiões montanhosas ao norte do bioma (ex. Raposa Serra do Sol) e as regiões com maior rugosidade no relevo (ex. Território Kayapó) (Figura 15.1);

- Na Caatinga, é possível identificar alta heterogeneidade da paisagem nas áreas de alta rugosidade do relevo (ex. Sítio Boqueirão), nas variações de declividade bruscas (ex. Chapada do Araripe) e nos vales de rios (ex. Assunção do Piauí) (Figura 15.2);
- No Cerrado, observa-se alta heterogeneidade nas transições dos platôs das Chapadas para as áreas baixas (ex. Chapada dos Veadeiros, Chapadas do Rio São Francisco), em localidades com alta rugosidade do relevo (ex. Serra da Canastra) e locais com variação

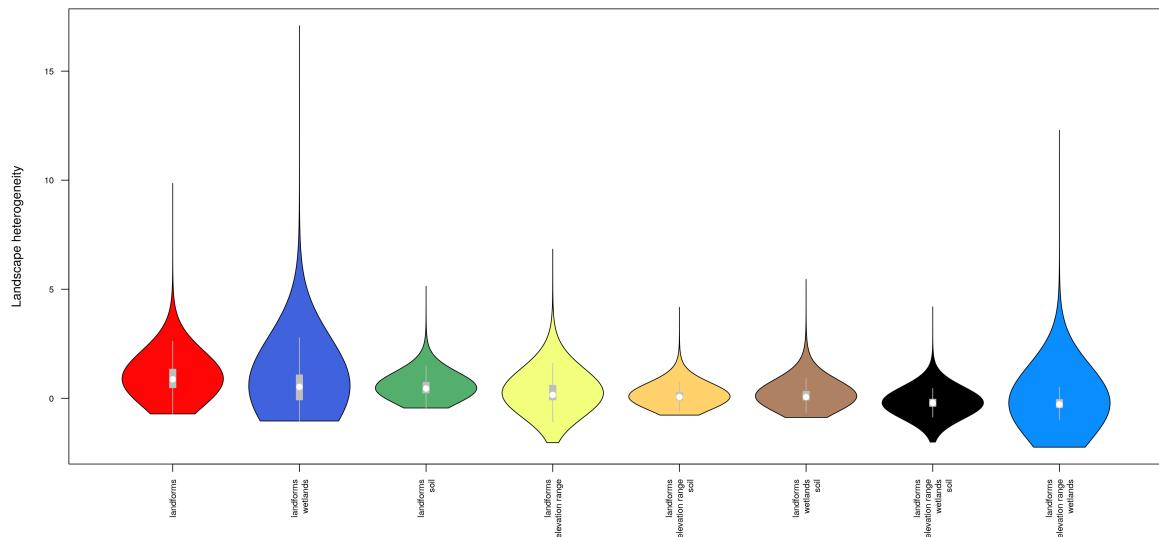


Figura 15.9: Distribuição da heterogeneidade da paisagem por cada variável componente. As variáveis estão ordenadas pelas medianas da heterogeneidade de cada variável. A densidade da heterogeneidade é representada pela forma dos polígonos. Os pontos brancos são as medianas de cada grupo, as caixas cinzas são os quantis (25% e 75%) e as linhas cinzas são 1.5 x intervalo interquantil.

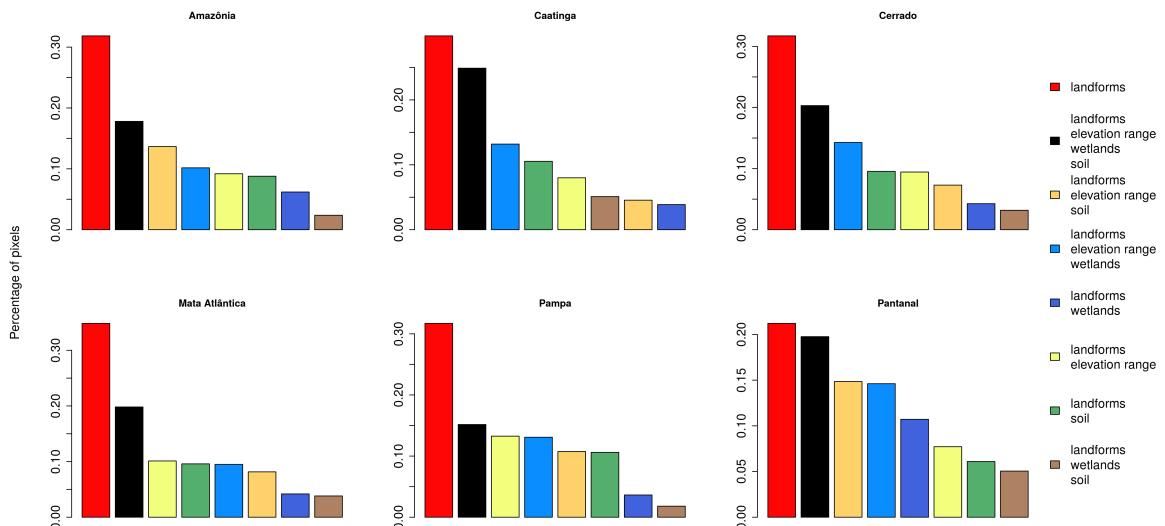


Figura 15.10: Porcentagem de células composta por cada variável no cálculo da média ponderada em cada bioma. A heterogeneidade da paisagem é a média ponderada dos *Z-scores* das variáveis.

de altitude (ex. Patamares Ocidentais da Bacia do Paraná). Nas áreas de relevo mais planas, destacam-se os rios Araguaia e das Mortes como as áreas de alta heterogeneidade, principalmente em função da presença de grandes áreas úmidas no entorno (Figura 15.3);

- Na Mata Atlântica, as áreas de alta heterogeneidade da paisagem estão localizadas próximos aos vales das redes fluviais na região oeste do bioma (ex. Araçatuba, Galinhos), nas áreas de transições abruptas de declividade (ex. Bom Jardim da Serra) e com alta rugosidade do relevo (ex. Pacatuba-SE), e em localidades nas grandes cadeias de montanhas (ex. Serra da Mantiqueira, Serra do Mar) (Figura 15.4);
- No Pampa, a heterogeneidade da paisagem se destaca em regiões com alta rugosidade do relevo (ex. Serra do Sudeste, APA do Ibirapuitã, na Campanha, e na região nordeste do Estado), e próximo a rios (ex. rio Jacuí) e lagos (ex. entorno da lagoa dos Patos) (Figura 15.6).
- No Pantanal, as localidades com maior heterogeneidade da paisagem foram próximas aos rios (ex. Piquiri, São Lourenço e Taquari), lagoas (ex. Nhecolândia) e regiões mais altas (ex. Serra do Amolar), contrastantes com o entorno plano (Figura 15.5) devido ao contraste da variação de relevo com o entorno, visto que pequenas declividades em um ambiente muito plano são relevantes na heterogeneidade da paisagem (Figura 15.5). Dentre regiões altas inseridas no Pantanal, destacamos a paisagem da Serra do Amolar (borda oeste do Pantanal).

15.3 Conectividade Local ([link](#))

A conectividade local da paisagem apresenta um padrão diferente daquele apresentado na camada de heterogeneidade da paisagem, mostrando uma divisão entre regiões muito conectadas na região norte e outras com conectividade mais baixa nas regiões central e sudeste Figura 15.11. Essa distribuição evidencia uma fragmentação clara do mapa do Brasil em duas porções, divindo-se ao histórico de ocupação dessas regiões e do uso atual com relação a agricultura e ocupação urbana.

O padrão de conectividade local encontrado reflete a distribuição espacial das classes de uso e cobertura do solo com valores de resistência distintos. É possível observar uma concentração alta de classes com alto valor de resistência na parte mais ao sul e leste da região Norte (coincidindo com o arco do desmatamento) que divide o Brasil em duas porções muito marcadas. Ao noroeste, na região Amazônica, está a porção com maior concentração de áreas naturais, com menores valores de resistência e, portanto, com alta conectividade. Na porção sul e ao leste do arco do desmatamento há um mosaico de áreas com diferentes graus de resistência à movimentação dos organismos, prevalecendo classes com valores médios e altos de resistência na região Sul e Sudeste e classes com valores médios e baixos de resistência na região Nordeste, com uma porção litorânea marcadamente mais atropizada que as porções mais a oeste nesta região.

Dentro de cada bioma, podemos destacar alguns padrões gerais: - Na Amazônia, a conectividade local tende a ser alta de modo geral. As áreas de baixa conectividade estão situadas principalmente no “Arco do Desmatamento”, nas regiões do sul e leste do bioma, e ao longo dos grandes rios da região (ex. [citar alguns]) (Figura 15.1 **FIGURA para Amazonia esta com o valor invertido para conectividade**).

- Na Caatinga, a conectividade local é alta principalmente na porção ocidental do bioma e ao norte do rio São Francisco, onde há uma concentração espacial maior de áreas naturais e, portanto, com valores menores de resistência à movimentação de organismos. A porção leste do bioma se configura por uma pulverização mais fina de classes mais atropizadas (mais resistentes) entremeadas por áreas descontínuas com valores de resistência mais baixos, conferindo a essas partes do bioma valores de conectividade local mais baixos do que nas porções a oeste. Ao sul do rio São Francisco é possível identificar um mosaico mais marcado de grandes áreas com baixa conectividade local e grande áreas com alta conectividade local, refletindo, respectivamente, a predominância espacial de classes de uso e ocupação do solo mais antropizadas (de alta resistência) e de áreas com predominância de classes menos antropizadas (com baixa resistência). O Rio São Francisco aparece também como uma importante barreira geográfica no bioma, devido a sua extensa largura em alguns trechos na região central (Figura 15.2 B).
- No Cerrado, as regiões norte, leste e oeste possuem altos valores de conectividade. Na porção central e sul do bioma concentram-se as áreas com baixa conectividade, sendo as menos conectadas aquelas próximas a grandes centros urbanos como Goiânia, Campo

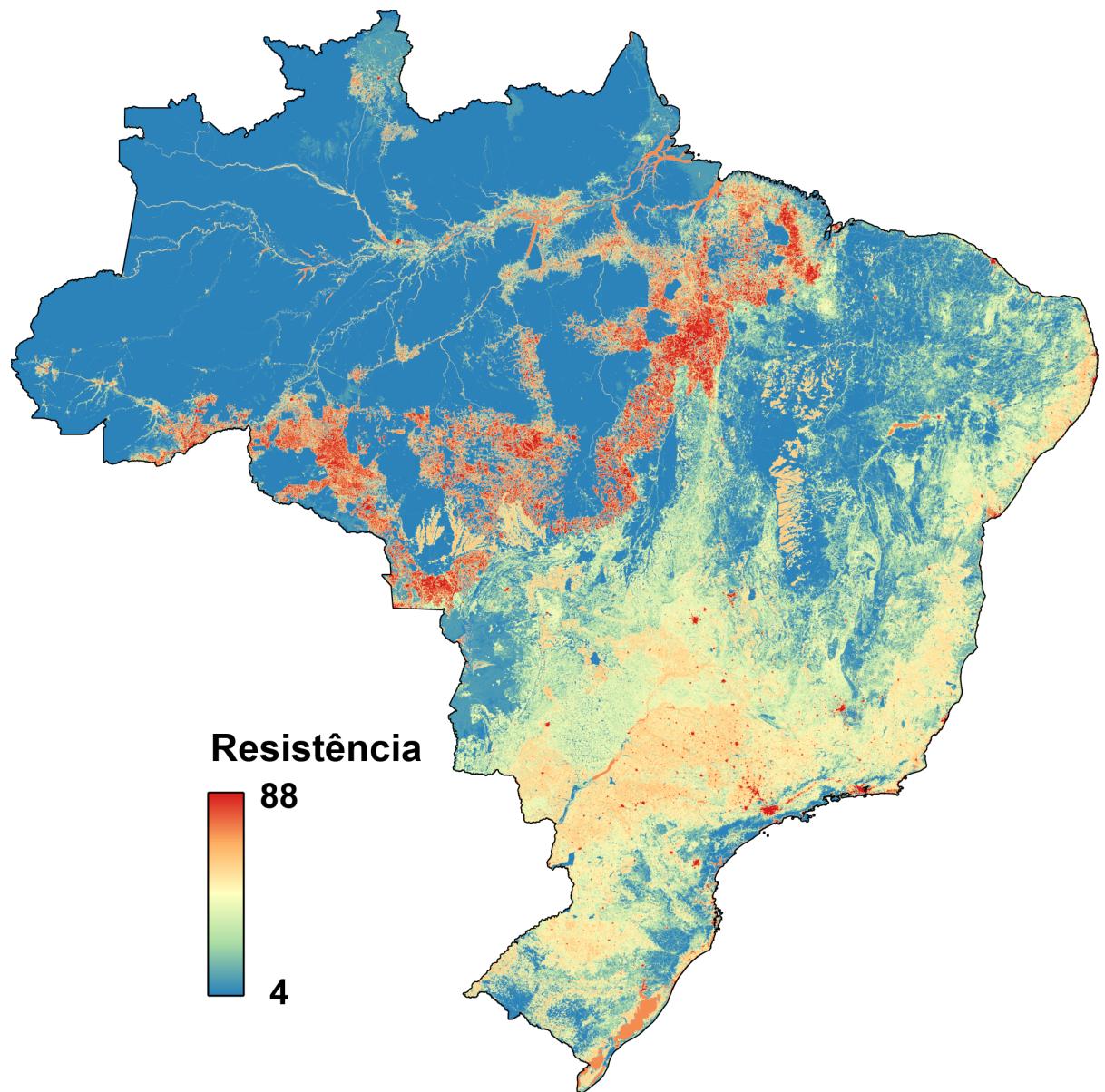


Figura 15.11: Resistência da paisagem, baseada na dificuldade de movimentação das espécies imposta pelos diferentes usos da terra.

Grande e Brasília. Na Chapada do Rio São Francisco (Bahia), há também baixa conectividade nas áreas de agricultura. Por outro lado, a maior parte da região menos conectada possui áreas de alta e média conectividade dentro delas (Figura 15.3 B).

- Na Mata Atlântica, a conectividade local é amplamente distribuída, porém espacialmente estruturado. Regiões de alta conectividade local concentram-se ao sul do bioma com diminuição da conectividade em direção ao limite norte, onde então um padrão bifurcado de áreas de alta conectividade emerge novamente, porém interposto por áreas de conectividade moderada (Figura 15.4 A). As áreas de menor conectividade, principalmente localizadas na maior extensão longitudinal do bioma, correspondem a grandes ocupações urbanas nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, áreas de maior densidade populacional do Brasil (Figura 15.2 B).
- No Pampa, as localidades com alta conectividade estão localizadas na Serra do Sudeste, na Campanha (nas proximidades com a APA do Ibirapuitã) e na região das Missões. Em contraste, os locais com menor conectividade estão localizados próximo aos principais centros urbanos, como é o caso de Porto Alegre e região metropolitana, assim como nas proximidades com grandes rodovias (ex. ao longo da BR-116 e BR-287);
- No Pantanal, a conectividade local de modo geral é alta ao longo de todo bioma, com exceção nos limites do bioma, como é o caso da borda leste, em função do avanço da agricultura, no limite oeste, devido a xx, e em uma mancha central, em função de xx

15.4 Resiliência da paisagem ([link](#))

A resiliência da paisagem apresentou um padrão...

A Amazônia possui a maior porcentagem de áreas resilientes (39,5%), seguida por Pantanal (28,6%), Caatinga (19,9%), Cerrado (18,1), Pampa (13,2%) e Mata Atlântica (5,1%). [citar Figura histogramas] Essa mesma ordem é mantida para a porcentagem de áreas com alta conectividade local e baixa heterogeneidade, menor porcentagem de áreas de baixa resiliência e alta heterogeneidade e baixa conectividade local (Figura 15.13).

Uma avaliação mais detalhada dos resultados de resiliência por bioma mostra que: - As áreas mais resilientes da Amazônia estão concentradas na região oeste do bioma (estado do Acre) e na região norte do estado do Amazonas (Figura 15.1 C).

- Na Caatinga, as áreas resilientes estão concentradas no interior do bioma (Figura 15.2 C).
- No Cerrado, as áreas resilientes estão mais concentradas no norte do bioma (Figura 15.3 C).
- A Mata Atlântica é o bioma com menor porcentagem de áreas resilientes e áreas conectadas, concentradas nas regiões sudeste, sul e norte do bioma (Figura 15.4 C).

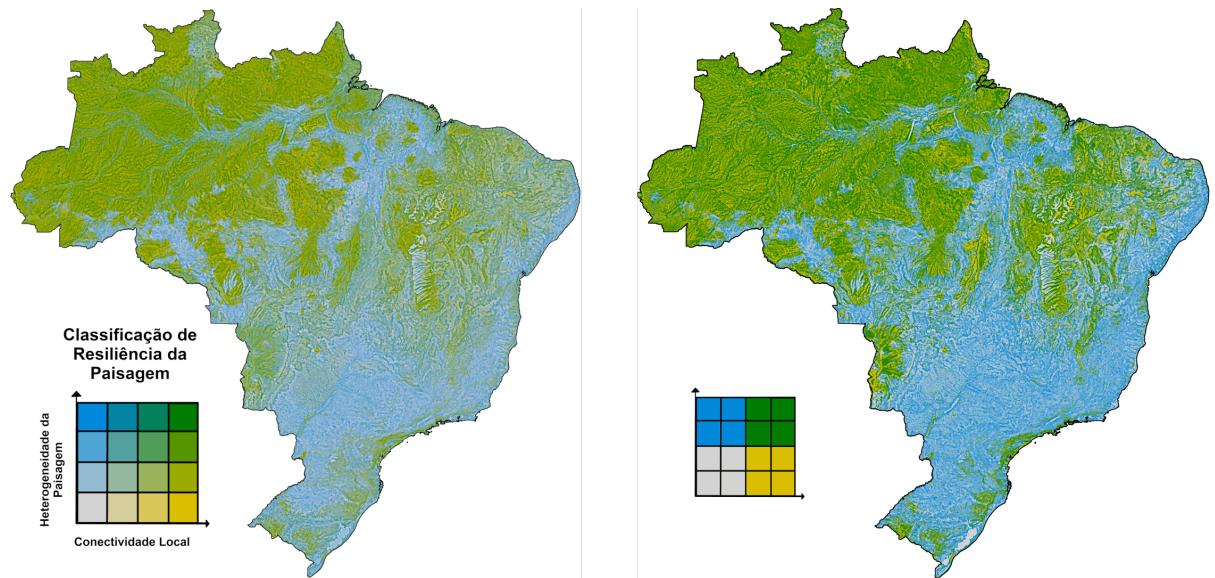


Figura 15.12: Mapa final de resiliência da paisagem com a sobreposição dos mapas de heterogeneidade da paisagem e conectividade local classificados por quantis de 25%. A classificação bivariada da camada de resiliência da paisagem foi dividida em quadrantes com diferentes graus de conectividade local e heterogeneidade da paisagem.

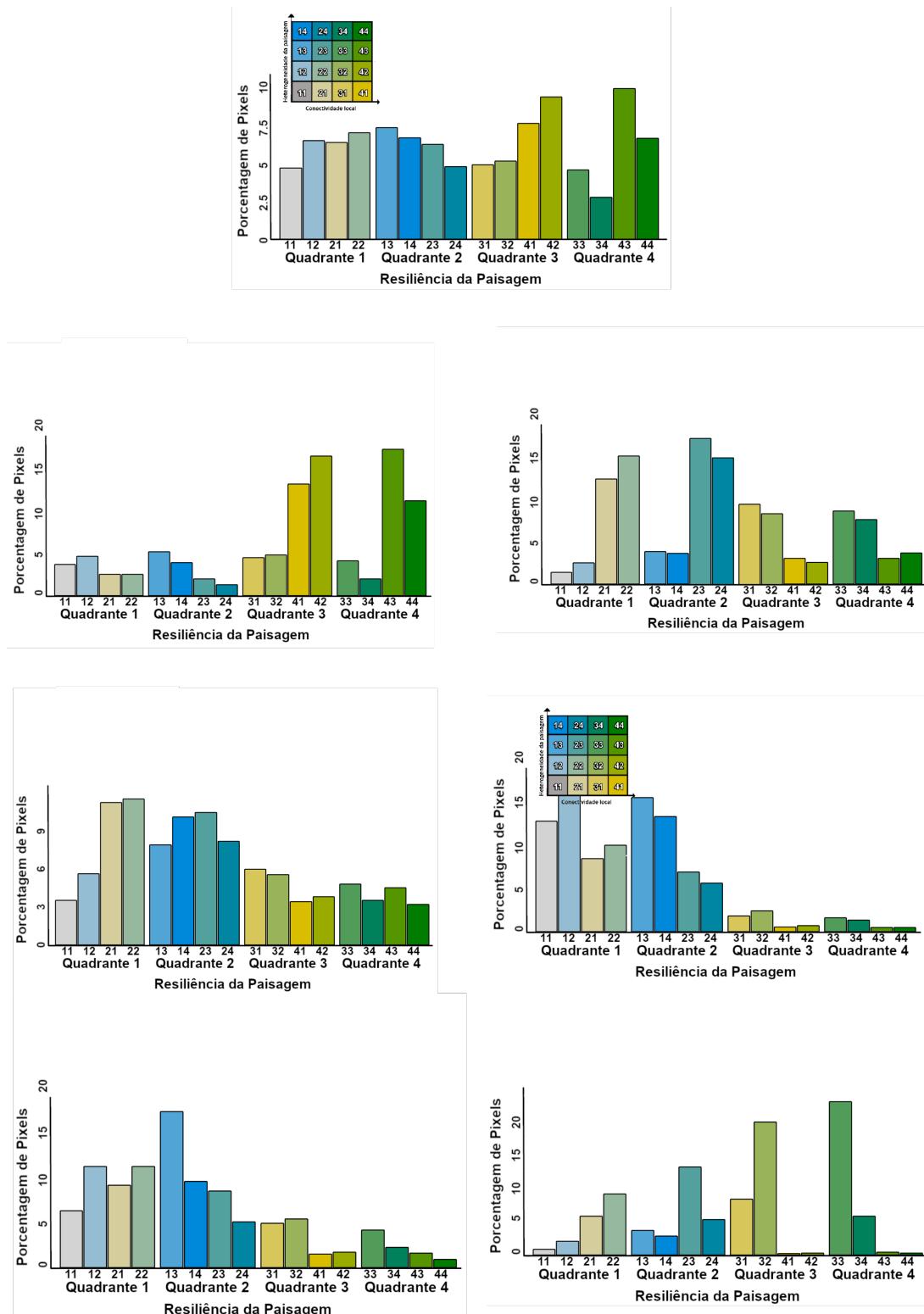


Figura 15.13: Histogramas ilustrando os valores de resiliência da paisagem por classe, para o Brasil (A) e para cada bioma (B-G).

- No Pampa, as áreas resilientes estão na região central e oeste do bioma (Figura 15.5 C).
- No Pantanal, as regiões de maior resiliência da paisagem são majoritariamente nas regiões com maior densidade de áreas úmidas (Figura 15.6 C).

16 Aplicações

[discutir aplicações potenciais: foco em conservação, restauração e uso sustentável; incluir mapa de resiliência com sobreposição de UCs/TIs]

17 Considerações finais

Bibliografia

- Abreu-Jardim, Tatianne P.F., Jardim, Lucas, Ballesteros-Mejia, Liliana, Maciel, Natan M., e Collevatti, Rosane G. 2021. [Predicting impacts of global climatic change on genetic and phylogeographical diversity of a Neotropical treefrog](#). Diversidad y Distribución 27:1519–1535.
- 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. 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. 2016a. [Resilient Sites for Terrestrial Conservation in Eastern North America](#). Conservation Biology 28:959–970.
- Anderson, Mark G., Clark, Melissa, Olivero, Arlene P., Barnett, Analie R., Hall, Kimberly R., Cornett, Meredith W., Ahlering, Marissa, Schindel, Michael, Unnasch, Bob, Schloss, Carrie, e Cameron, D. Richard. 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, Mark G., Clark, Melissa, e Sheldon, Arlene Olivero. 2014. [Estimating climate resilience for conservation across geophysical settings](#). 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.
- 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.
- Fick, S. E., e R. J. Hijmans. 2017. [WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas](#). International Journal of Climatology 37:4302–4315.
- 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. Murdiyarso. 2017. [Tropical and subtropical wetlands distribution version 2](#).
- Hall, K. R., R. Anantharaman, V. A. Landau, M. Clark, B. G. Dickson, A. Jones, J. Platt, A. Edelman, e V. B. Shah. 2021. [Circuitscape in Julia: Empowering Dynamic Approaches to Connectivity Assessment](#). Land 10:301.
- Hulley, G., e Hook, S. 2018. [VIIRS/NPP Land Surface Temperature and Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid Day V001](#). NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center.
- IPCC. 2022. [Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change \[H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama \(eds.\)\]](#). Cambridge University Press, Cambridge, UK; New York, NY, USA.
- Karger, Dirk Nikolaus, Conrad, Olaf, Böhner, Jürgen, Kawohl, Tobias, Kreft, Holger, Soria-Auza, Rodrigo Wilber, Zimmermann, Niklaus E., Linder, H. Peter, e Kessler, Michael. 2017. [Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas](#). Scientific Data 4:170122.
- Kearney, Michael R., Isaac, Andrew P., e Porter, Warren P. 2014. [Microclim: Global estimates of hourly microclimate based on long-term monthly climate averages](#). Scientific Data 1:140006.
- Landau, V., V. Shah, R. Anantharaman, e K. Hall. 2021. [Omniscape.jl: Software to compute omnidirectional landscape connectivity](#). Journal of Open Source Software 6:2829.
- Lawler, Joshua J., Ackerly, David D., Albano, Christine M., Anderson, Mark G., Dobrowski, Solomon Z., Gill, Jacquelyn L., Heller, Nicole E., Pressey, Robert L., Sanderson, Eric W., e Weiss, Stuart B. 2015. [The theory behind, and the challenges of, conserving nature's stage in a time of rapid change](#). Conservation Biology 29:618–629.
- Lemes, Priscila, Melo, Adriano Sanches, e Loyola, Rafael Dias. 2014. [Climate change threatens protected areas of the Atlantic Forest](#). Biodiversity and Conservation 23:357–368.
- Lima-Ribeiro, Matheus S, Varela, Sara, González-Hernández, Javier, de Oliveira, Guilherme, Diniz-Filho, José Alexandre F, e Terribile, Levi Carina. 2015. [Ecoclimate : a Database of Climate Data From Multiple Models for Past , Present , and Future for Macroecologists and Biogeographers](#). Biodiversity Informatics 10:1–21.
- Loarie, Scott R., Duffy, Philip B., Hamilton, Healy, Asner, Gregory P., Field, Christopher B., e Ackerly, David D. 2009. [The velocity of climate change](#). Nature 462:1052–1055.
- MapBiomass Project. 2020. [Collection 7 of the Annual Series of Land Use and Land Cover Maps of Brazil](#).
- McRae, B. H. 2006. Isolation by resistance. Evolution 60:1551–1561.
- 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.
- Williams, Stephen E., Shoo, Luke P., Isaac, Joanne L., Hoffmann, Ary A., e Langham, Gary. 2008. [Towards an integrated framework for assessing the vulnerability of species to climate](#)

- change. PLoS biology 6:e325.
- Xavier, A. C., B. R. Scanlon, C. W. King, e A. I. Alves. 2022. [New improved Brazilian daily weather gridded data \(1961–2020\)](#). International Journal of Climatology 42:8390–8404.
- 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.