

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**PREDIÇÃO ESPACIAL DA DIVERSIDADE POTENCIAL DE
ESPÉCIES ARBÓREAS NA CAATINGA**

ANA LUÍSA LEITE PEREIRA

VITÓRIA DA CONQUISTA
BAHIA - BRASIL
FEVEREIRO 2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**PREDIÇÃO ESPACIAL DA DIVERSIDADE POTENCIAL DE
ESPÉCIES ARBÓREAS NA CAATINGA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Robson Borges de Lima

VITÓRIA DA CONQUISTA
BAHIA - BRASIL
FEVEREIRO 2024

P489p Pereira, Ana Luísa Leite.
 Predição espacial da diversidade potencial de espécies arbóreas
 na Caatinga. / Ana Luísa Leite Pereira, 2024.
 84f.
 Orientador (a): Dr. Robson Borges de Lima.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual do Sudoeste
 da Bahia, Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais,
 Vitória da Conquista, 2024.
 Inclui referências. 59 - 76.
 1. Análise espacial. 2. Caatinga. 3. Precipitação. 4. Random
 Forest. I. Lima, Robson Borges de. II. Universidade Estadual do
 Sudoeste da Bahia, Programa de Pós- Graduação em Ciências
 Florestais. III. T.

CDD: 582.160981

Catálogo na fonte: Juliana Teixeira de Assunção – CRB 5/1890
UESB – Campus Vitória da Conquista - BA

ANA LUÍSA LEITE PEREIRA

**PREDIÇÃO ESPACIAL DA DIVERSIDADE POTENCIAL DE
ESPÉCIES ARBÓREAS NA CAATINGA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 19 de fevereiro de 2024.

Comissão Examinadora:



Documento assinado digitalmente

CINTHIA PEREIRA DE OLIVEIRA

Data: 28/03/2024 17:30:44-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr.^a Cinthia Pereira de Oliveira (D.Sc., Ciências Florestais) – UEAP



Documento assinado digitalmente

JOSELANE PRISCILA GOMES DA SILVA

Data: 25/03/2024 19:03:24-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Joselane Priscila Gomes da Silva (D.Sc., Ciências Florestais) - UESB



Documento assinado digitalmente

ALESSANDRO DE PAULA

Data: 25/03/2024 15:44:14-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alessandro de Paula (D.Sc., Ecologia e Recursos Naturais) - UESB
Co-Orientador



Documento assinado digitalmente

ROBSON BORGES DE LIMA

Data: 28/03/2024 10:14:51-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Robson Borges de Lima (D.Sc., Mensuração Florestal) - UESB
Orientador

“Somente quando a última árvore for cortada,
o último rio for envenenado,
o último peixe for capturado,
só então, as pessoas perceberão
que não se pode comer dinheiro.”
Provérbio indígena.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas bênçãos, pelas oportunidades, pela saúde e pelas pessoas que tem colocado em minha vida. Nos momentos de dúvida e desânimo, ele sempre vem ao meu socorro.

Agradeço aos meus pais, Andréa e Altair, que juntos são a escada da minha subida. Apoiaram-me sempre em todos os meus projetos, aconselhando-me e cuidando de mim. Sem eles, eu não chegaria até aqui.

Agradeço ao meu amigo, companheiro e noivo, Matheus, por tanto carinho, atenção e paciência. Por ouvir minhas lamentações, oferecer seu ombro e me incentivar em cada etapa. Sem você, a caminhada teria sido muito mais difícil.

Agradeço a toda a minha família e amigos que vibraram com positividade junto a mim a cada nova conquista. Em especial, minhas colegas e amigas “floresteiras” Daniela, Karla e Regiane, que percorreram junto comigo a luta diária da graduação, com respeito, compreensão, conselhos e boas risadas.

Agradeço aos meus amigos jordanenses que, mesmo a distância, e com as ocupações diárias, sempre estiveram comigo, com imenso carinho e alegria, Ana Clara, Jackeline, Michelle e Paulo.

Agradeço à minha amiga Renilda, minha mãe em Vitória da Conquista, por tanto apoio, atenção, cuidado, conversas e risadas. Você enriqueceu minha jornada.

Agradeço a todos os meus professores, desde a alfabetização ao mestrado, que dedicaram suas habilidades, tempo e sabedoria para contribuir com a minha formação e de tantos outros. Espero poder conseguir conciliar cada bom exemplo em minha trajetória. Em especial, agradeço ao meu orientador, prof.^o Dr. Robson Lima, pela dedicação e compromisso. Também, meu coorientador de mestrado e orientador na graduação, prof.^o Dr. Alessandro, por tanto conhecimento e ensinamentos. Os senhores são exemplos de profissionais sérios, dedicados, responsáveis, mas, acima de tudo, humanos.

Por fim, agradeço a UESB e a todo o corpo do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais por permitir a conclusão de uma nova etapa em minha carreira.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1.Hipótese Científica	2
1.2.Objetivos	2
1.2.1.Geral	2
1.2.2.Específicos	2
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1.Domínio Fitogeográfico da Caatinga	3
2.2.Vegetação da Caatinga	4
2.3.Diversidade	6
2.4.Fatores ambientais e seus efeitos na vegetação da Caatinga	7
2.4.1.Temperatura	8
2.4.2.Precipitação	10
2.4.3.Relevo	11
2.5.Modelagem Espacial	12
2.6.Aprendizado de Máquina	13
2.7.Random Forest	14
3. MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1.Descrição da área de estudo	17
3.2.Base de dados	18
3.3.Diversidade de espécies	19
3.4.Aquisição e pré-processamento de variáveis geoespaciais	19
3.5.Modelagem espacial	21
3.6.Validação e teste do modelo	22
4. RESULTADOS	24
4.1.Modelagem espacial e fatores ambientais	24
4.2. Diversidade Alfa de Fisher	29
5. DISCUSSÃO	32
5.1.Fatores ambientais e Diversidade de espécies arbóreas	32
5.2.Limitações do estudo: Erros e viés na Amostragem	38
5.3.Degradação Ambiental e Mudanças Climáticas	39
6.CONCLUSÕES	42
7.APÊNDICES	43
8.REFERÊNCIAS	59

RESUMO

PEREIRA, Ana Luísa Leite, M.Sc., Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, fevereiro, 2024. **Predição espacial da diversidade potencial de espécies arbóreas na Caatinga.** Orientador: Prof^o. Dr. Robson Borges de Lima. Co-Orientador: Prof^o. Dr. Alessandro de Paula.

Este trabalho tem como objetivo analisar como as variáveis ambientais climáticas e topográficas influenciam a diversidade de espécies arbóreas no domínio fitogeográfico da Caatinga, e, assim, gerar um mapa preditivo para a diversidade. A base de dados foi obtida por levantamentos florestais realizados ao longo de toda a Caatinga, contemplando um total de 194 parcelas distribuídas em 21 fragmentos florestais. Foi selecionado um conjunto de covariáveis geoespaciais potenciais, climáticas e topográficas, escolhidas com base na singularidade, resolução espacial e relevância ecológica. A previsão espacial da diversidade foi desenvolvida usando o índice de diversidade alfa de Fisher (α), calculado para cada parcela, utilizando o aprendizado de máquina, com o algoritmo *Random Forest* (RF). Na modelagem realizada pelo RF, a diversidade foi posta em função das variáveis ambientais, onde as camadas ambientais foram aplicadas em nível de *pixel*, para toda a Caatinga, por meio de álgebra de mapas. A avaliação da precisão do modelo foi realizada por meio da raiz quadrada do erro médio (RMSE) e coeficiente de determinação (R^2), considerando a validação cruzada k-fold ($k = 15$). O modelo RF ajustado apresentou RMSE de 4,83 e R^2 de 0,75, sendo esse último, um valor marcadamente alto para a diversidade alfa de Fisher. As variáveis relacionadas à precipitação se mostraram as mais importantes na predição da diversidade, seguida pelas variáveis ligadas à temperatura e variáveis topográficas. Os maiores valores de diversidade foram encontrados ao norte da Caatinga, enquanto os menores se localizaram a sudoeste. No geral, observa-se que a diversidade se eleva quando a temperatura se encontra um pouco acima da média (25 °C). No entanto, a região do médio São Francisco apresenta elevadas temperaturas e baixa diversidade, por se tratar de uma região semiárida. Sendo assim, são necessários estudos mais diretos sobre o conjunto de forças ecológicas que atuam para definir padrões de diversidade na Caatinga, a fim de implementar novas áreas de proteção, especialmente se levarmos em conta os efeitos da degradação ambiental e das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Análise espacial, Precipitação, *Random Forest*.

ABSTRACT

PEREIRA, Ana Luísa Leite, M.Sc., Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, february, 2024. **Spatial prediction of the potential diversity of tree species in the Caatinga.** Adviser: Robson Borges de Lima. Co-Adviser: Alessandro de Paula.

This study builds on earlier research aims to analyze how climatic and topographic environmental variables influence the diversity of tree species in the phytogeographic domain of the Caatinga, and thus generating a predictive map for diversity. The database was obtained through forest surveys carried out throughout the Caatinga, covering a total of 194 plots distributed in 21 forest fragments. A set of potential geospatial, climatic and topographic covariates were selected based on their uniqueness, spatial resolution and ecological relevance. The spatial diversity prediction was developed using Fisher's alpha diversity index (α) and it was calculated for each plot using machine learning with the Random Forest (RF) algorithm. In the modeling carried out by RF, diversity was considered a function of environmental variables, where environmental layers were applied at the pixel level, for the entire Caatinga, through map algebra. The model's accuracy was assessed using the root mean square error (RMSE) and coefficient of determination (R^2), considering k-fold cross validation ($k = 15$). The adjusted RF model presented RMSE of 4.83 and R^2 of 0.75, those being a markedly high value for Fisher's alpha diversity. Variables related to precipitation proved to be the most important in predicting diversity, followed by variables linked to temperature and topographic ones. The highest diversity values were found at north Caatinga, while the lowest were located at southwest. In general, it is observed that diversity increases when temperature is slightly above average (25 °C). However, the middle São Francisco region has high temperatures and low diversity, as it is a semi-arid region. Therefore, more direct studies are needed on the set of ecological forces that acts defining diversity patterns in the Caatinga, in order to implement new protection areas, especially if we take into account effects of environmental degradation and climate changes.

Keywords: Precipitation, Random Forest, Spatial Analysis.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a floresta tropical seca, denominada como domínio fitogeográfico da Caatinga, apresenta importante destaque para a manutenção da economia nordestina, uma vez que seus recursos naturais subsidiam diversas atividades econômicas, como a geração de energia, tanto para o uso doméstico quanto industrial, e a extração de produtos não madeireiros, como a extração do mel, fibras, frutos e outros.

Este domínio conta com uma notável diversidade de fauna e flora, algumas endêmicas, possuindo um alto valor de conservação, e por isso devem ser estudadas e monitoradas para garantir a manutenção dos ciclos ecológicos.

Entretanto, o uso indiscriminado dos recursos da Caatinga não regularizados por planos de manejo adequados, aliado às alterações dos fatores ambientais ao longo dos anos, corroborou substancialmente a redução da área total restrita do domínio e nos consideráveis índices de degradação, resultando na fragmentação e redução da vegetação nativa. Outrossim, ainda são pequenos os números de áreas protegidas, o que acaba influenciando negativamente o contexto da biodiversidade.

Entender como a diversidade nos ambientes é alterada, possibilita alcançar respostas a respeito de questões ecológicas extremamente importantes. O conhecimento da variação espacial da diversidade em um número maior de ambientes, permite abordar questões importantes na ecologia regional e global com maior facilidade, possibilitando elaborar políticas de conscientização social para a conservação e estimular a implementação de medidas protetivas.

A partir do conhecimento dos padrões espaciais dos ambientes no passado e no presente, torna-se possível estimar como as mudanças climáticas podem afetar a diversidade no futuro. Dessa forma, torna-se importante entender como os fatores ambientais podem afetar a distribuição geográfica de espécies arbóreas e os padrões de diversidade, de forma a possibilitar predições futuras e determinar estratégias de manejo mais adequadas.

Muitas ferramentas de modelagem ecológica e na escala da paisagem vêm sendo desenvolvidas nos últimos anos. Os métodos de aprendizado de máquina fazem uso da inteligência artificial, que, com base em algoritmos treinados em função de uma problemática, permitem simular análises e tomada de decisões eficazes, reduzindo o tempo e os custos.

Outra tecnologia que facilita as análises no espaço e no tempo é o sensoriamento remoto, que, com o uso de equipamentos, sensores e satélites, possibilita o monitoramento e mapeamento de muitas variáveis ambientais e elevadas extensões geográficas ao longo do tempo. O sensoriamento remoto permite a análise da vegetação, solo e recursos hídricos, agrupando os dados e possibilitando a interpretação pela comunidade científica para indicar as intervenções necessárias.

Por vezes, observa-se o interesse dos pesquisadores em desenvolver metodologias para avaliar os efeitos dos fatores climáticos na diversidade arbórea em florestas com dossel fechado, elevada biomassa e úmidas, resultando em uma escassez de estudos voltados para as áreas de florestas secas.

Como a diversidade da Caatinga está sendo influenciada pelos fatores ambientais? Responder a esse questionamento possibilita identificar áreas com severa perturbação e espécies em desequilíbrio ecológico, e, assim, estabelecer metodologias de recuperação, regeneração e manejo adequado em cada situação. Ainda, permite ter-se uma ideia de como a Caatinga poderá ser afetada com as mudanças climáticas.

1.1. Hipótese Científica

A diversidade das espécies varia em função dos efeitos dos fatores climáticos e topográficos ao longo do domínio fitogeográfico da Caatinga.

1.2. Objetivos

1.2.1. Geral

Realizar o mapeamento preditivo da diversidade espacial potencial de espécies arbóreas em função das variáveis ambientais no domínio fitogeográfico da Caatinga.

1.2.2. Específicos

- a) Analisar a variação da diversidade arbórea e de seus fatores contribuintes ao longo do domínio fitogeográfico da Caatinga;
- b) Analisar os efeitos do clima na diversidade. Como a temperatura e a precipitação condicionam os padrões de diversidade arbórea no domínio fitogeográfico da Caatinga;
- c) Estudar o efeito dos fatores topográficos (altitude, inclinação, rugosidade) nos padrões de diversidade arbórea no domínio fitogeográfico da Caatinga.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Domínio Fitogeográfico da Caatinga

O domínio fitogeográfico da Caatinga é uma região de floresta seca encontrada no Brasil e é considerada uma das regiões de maior extensão do clima semiárido (MORO et al., 2016), ocupa cerca de 862.818 km², cobrindo diversas áreas do nordeste brasileiro e parte do norte de Minas Gerais (IBGE, 2019).

É considerado um dos ambientes semiáridos mais povoados do mundo (REDO et al., 2013), apresentando alto grau de antropização, elevada degradação e centros de desertificação, prejudicando a flora, a fauna e a fertilidade dos solos (RAMOS et al., 2020). Apesar disso, a Caatinga é um dos domínios fitogeográficos com menor quantidade de estudos na comunidade científica, provavelmente em razão de o interesse dos pesquisadores se concentrar mais no mapeamento de florestas úmidas e densas (GANEM et al., 2020).

De acordo com o banco de dados registrados na plataforma *Web of Science* (2020), observa-se que a Caatinga possui 73% estudos a menos que a Amazônia, 68% a menos que o Cerrado e 65% a menos que a Mata Atlântica. Ainda, a maioria das iniciativas institucionais para mapeamento dos domínios fitogeográficos é voltada para os domínios anteriormente citados, restando pouco capital técnico-científico destinado a Caatinga. Em razão disso, aumenta-se a importância de se aumentar a coleta de dados atualizados e com maior precisão na Caatinga com o uso do sensoriamento remoto, para se obter informações a respeito do status da conservação da vegetação (GANEM et al., 2020).

O reduzido monitoramento e fiscalização da vegetação da Caatinga dão abertura para a antropização desregulada fortalecida pelo baixo índice econômico. Assim, a vulnerabilidade das comunidades leva à necessidade da exploração dos recursos naturais da floresta com a realização de queimadas, corte de madeira e lenha que desencadeiam a degradação local, além do exercício da pecuária (SILVA et al., 2017).

O MapBiomas (2020) construiu uma série temporal para as classes de vegetação da Caatinga, abrangendo 33 anos (1985 a 2018), revelando uma perda de cerca de 79.000 km² da vegetação natural e aumento proporcional das atividades agropecuárias. Ribeiro et al. (2016) alertaram sobre a alteração das comunidades da Caatinga em razão da presença do gado, alterando a composição taxonômica das

espécies. Segundo o MapBiomas (2020), a área de pasto na Caatinga em 2018 totalizava mais de 25% da área total. Melo (2017) observou que a criação de caprinos, muito comum da população sertaneja na Caatinga, também afeta os processos de regeneração ecológica por meio do pisoteio e herbivoria, mostrando que há uma clara divergência das atividades de sobrevivência utilizadas pelas comunidades e as estratégias de conservação da vegetação.

Apesar de a Caatinga revelar graus inferiores de conversão dos habitats, em relação a outros domínios fitogeográficos brasileiros, metade da área de vegetação original da Caatinga foi perdida, em grande parte pelo estabelecimento de monocultivos (MAPBIOMAS, 2020).

Cabe ressaltar, porém, que a perturbação da vegetação não é uniforme em todo o território da Caatinga, visto que os fatores de alteração estão divididos desigualmente ao longo do domínio fitogeográfico. Fragmentos grandes nas partes central, sul e oeste da Caatinga apresentam baixo grau de perturbação, enquanto no leste e norte é elevado. Esses graus de perturbação estão relacionados com a proximidade de grandes centros urbanos, medidas de gestão das florestas e estabelecimento de áreas protegidas (ANTONGIOVANNI et al., 2020).

Adicionado ao aumento da fragmentação em algumas regiões, há também o agrave da extensão da área de abrangência de cada fragmento. Antongiovanni et al. (2018) estimaram que a vegetação da Caatinga está fragmentada em 47.100 áreas de variadas extensões, e 75% dos fragmentos estão a menos de 1 km de distância da borda, o que favorece o aumento das perturbações, por expor a vegetação aos efeitos de borda e para o uso antrópico não regulamentado, aumentando os riscos inerentes à conservação da vegetação.

Tendo em vista as claras alterações da vegetação da Caatinga, mas, em contraponto, os reduzidos estudos realizados nesse ambiente, conhecer as alterações na cobertura da vegetação, produtividade e estoque de carbono contribui no emprego de ações públicas para a conservação das florestas, para possibilitar a manutenção das funções ecológicas no ecossistema global (ARAGÃO et al., 2019).

2.2. Vegetação da Caatinga

A Caatinga é composta em sua maioria por fisionomias xerófitas, espinhosas, decíduas e semidecíduas, arbustivas e lenhosas, morfologicamente adaptadas para suportar situações de estresse hídrico (MENDES et al., 2017).

De acordo com o IBGE (2012), a Caatinga possui quatro fitofisionomias principais, sendo a Savana-Estépica Florestada, descontínua, com estrato superior adensado e inferior gramíneo-lenhoso; Savana-Estépica Arborizada, com estrato arbóreo-arbustivo esparso e inferior gramíneo-lenhoso; Savana-Estépica Parque, com arbustos e árvores de pequeno porte espaçadas; Savana-Estépica Gramíneo-Lenhosa, composta predominantemente por gramíneas.

A vegetação da Caatinga se revela muito rica, abrigando cerca de 4.963 espécies vegetais, sendo muitas endêmicas (SOBRINHO et al., 2016), contudo, em razão da degradação, estima-se que 30,1% estão em categorias de espécies ameaçadas de extinção (FLORA DO BRASIL, 2021), e apenas 5% desse domínio fitogeográfico é pertencente às áreas protegidas, totalizando 27 unidades de conservação federais, em maior parte no Ceará e na Bahia (ICMBIO, 2019).

As espécies de porte lenhoso são indispensáveis para as regiões semiáridas no auxílio na redução da desertificação e adaptação às mudanças climáticas (FAO, 2016). Ainda, contribuem para a biodiversidade terrestre e para o sequestro de carbono (POULTER et al., 2014). Entretanto há usos consideráveis de madeira nativa, extraída ilegalmente para a produção de carvão para fins industriais, e uso da lenha para fins domésticos, além dos cultivos agrícolas irrigados, atividades pecuárias extensivas e a elevada especulação imobiliária (SILVA et al., 2013).

O corte e a queima de espécies vegetais lenhosas foram fatores importantes para a definição do atual padrão de distribuição e abundância das plantas na Caatinga. A diferença de resposta à queima pode causar mudanças na riqueza e diversidade da vegetação, já que algumas espécies podem ser dizimadas durante o processo (SAMPAIO e SALCEDO, 1993; GARDA, 1996).

Mais que, unicamente, propriedades climáticas e edáficas, repetidos distúrbios também podem ter sido uma força dominante na composição e estrutura das florestas secas da Caatinga (GONZALEZ e ZAK, 1996), interferindo na presença das espécies entre as diferentes unidades de paisagem (FORMAN, 1999). A Caatinga tem uma história de devastação quase tão antiga quanto à colonização brasileira (COIMBRA-FILHO e CÂMARA, 1996).

Seu potencial florístico de valor forrageiro e seu bom clima para a pecuária fizeram com que a proliferação humana fosse espontânea e desordenada, porém direcionada sempre às áreas mais férteis (SAMPAIO e MAZZA, 2000). Com a multiplicação dessa população, o uso das espécies vegetais para os mais diversos fins

(cercas, lenha, carvão, roça, etc.) e a pastagem deixaram a vegetação menos densa (PINTO, 1986). A Caatinga destruída não foi substituída por outra vegetação, apenas empobrecida, quando comparada àquela que existia antes (FERRI, 1980).

2.3. Diversidade

Grace et al. (2016) observaram uma relação entre a diversidade e a precipitação, sendo que na estação mais quente a precipitação revelou-se importante no controle da produtividade local.

Segundo Hill (1973), a diversidade é um parâmetro possível de ser mensurado, cujos valores encontrados podem ser explicados por uma série de teorias e expressões matemáticas. As medidas de diversidade resultantes de índices, podem servir como indicadores do equilíbrio de sistemas ecológicos, funcionando como ferramentas para o manejo ambiental (MAGURRAN, 1988).

A diversidade deve referir-se a fatos e dados empíricos, sendo um descritor da estrutura da comunidade ecológica decorrente da abundância relativa das espécies que a constituem. Além disso, deve-se considerar também a equabilidade, que é a medida da uniformidade da distribuição da abundância entre as espécies de uma comunidade (MARTINS e SANTOS, 1999).

Os dados relativos aos indivíduos de diferentes comunidades ajustam-se a curvas de distribuição diferentes, adaptando-se melhor ao uso de alguns estimadores em detrimento de outros. Os dados que fundamentam as estimativas da diversidade são considerados em unidade de área ou em número de indivíduos (WHITTAKER, 1972).

Segundo Santos e Martins (2004), os índices de diversidade podem ser divididos em três grupos: medidas de riqueza (Tipo I), medidas de abundância, como o índice de Fisher (Tipo II), e medidas de diversidade ou heterogeneidade, como o índice de Shannon – Weaver (Tipo III). Os índices de Shannon - Weaver e Simpson consideram também a equabilidade.

O índice de diversidade de Shannon - Weaver representa o número de espécies que seria esperado encontrar na comunidade se todas as espécies tivessem a mesma abundância (equabilidade máxima). Esse índice considera igual peso entre as espécies abundantes e raras (possuem baixa abundância em uma comunidade) (SHANNON e WEAVER, 1949).

O índice de Simpson é uma medida de concentração de dominância, sendo inversamente proporcional ao índice de Shannon – Weaver. Uma comunidade de espécies com maior diversidade terá uma menor dominância. É também inversamente proporcional à equabilidade: quanto maior a equabilidade de espécies, menor a concentração (MARTINS e SANTOS, 1999).

Esse índice revela a probabilidade de dois indivíduos sorteados de uma comunidade pertencerem à mesma espécie. Captura bem a variação das distribuições de abundância e estabiliza bem com menores tamanhos de amostras, porque não dá muito peso às espécies raras (MARTINS e SANTOS, 1999).

A equabilidade é muito comumente estimada por meio do índice de Pielou, que permite representar a uniformidade da distribuição dos indivíduos entre as espécies existentes (PIELOU, 1966).

No índice de diversidade Alfa de Fisher, a distribuição do número de indivíduos da espécie menos abundante até a espécie mais abundante poder ser descrita por uma série logarítmica, sendo o parâmetro α (alfa) da equação que descreve essa curva. Esse parâmetro α obtido com a equação tem baixo valor quando o número de espécies é pequeno em relação ao número de indivíduos, mas tem alto valor quando o número de espécies é alto em relação ao número de indivíduos (FISHER et al., 1943).

2.4. Fatores ambientais e seus efeitos na vegetação da Caatinga

Em razão da extensa área da Caatinga, influi-se que esta desempenha um importante papel em processos regionais e até globais relacionados às condições entre a biosfera e a atmosfera (MOURA et al., 2016), principalmente quando se considera a vegetação arbóreo-arbustiva, altamente presente neste domínio fitogeográfico. Este tipo de vegetação é adaptado às condições ambientais do semiárido, contribuindo fortemente para a estabilidade do balanço hidrológico e na proteção dos recursos hídricos (GANEM et al., 2020).

Essa adaptação da vegetação ao ambiente, de origem bióticas ou abióticas, deu-se com o desenvolvimento gradual de estratégias que as espécies utilizam para enfrentar as condições do ambiente e a restrição dos recursos, resultando na atual composição das comunidades vegetais da caatinga (KRAFT et al., 2015).

A adaptação ao ambiente é contínua e acaba por determinar condições que selecionam subgrupos da vegetação que possuem as características que os fazem capazes de se ajustar a situações extremas, como as de elevadas temperaturas e

radiação solar. Assim, o monitoramento das condições ambientais permite identificar quais subgrupos são desfavorecidos de acordo com as alterações que venham a ocorrer, como em alterações climáticas, de modo a prever o desaparecimento de espécies (TAKETANI et al., 2017).

O panorama de um ambiente com o aumento da temperatura e evapotranspiração e com a redução da precipitação pode desencadear desequilíbrios na hidrologia, acarretar a degradação dos solos, déficit no crescimento da vegetação (GANEM et al., 2020), alterações do banco de sementes (SANTOS et al., 2020), e, assim, levar às mudanças na composição das espécies e na expressão do fenótipo de cada indivíduo de uma espécie (PESCADOR et al., 2015). Assim, deve-se estudar como cada fator ambiental influencia a vegetação, de modo a identificar como a alteração dos fatores, isolados e em conjunto, podem modificar o ambiente em sua totalidade.

2.4.1. Temperatura

O clima semiárido está presente na maioria das áreas da Caatinga, apresentando elevadas temperaturas médias entre 25° e 30°C, e precipitação com 400 e 1.200mm anuais (TABARELLI et al., 2018). As altas temperaturas se dão em função do posicionamento da Caatinga entre o Trópico de Capricórnio e o Equador, submetendo a região aos altos níveis de radiação solar praticamente o ano inteiro (MORO et al., 2016).

A elevada temperatura, uma condição relevante da Caatinga, é um dos fatores ambientais que mais afetam a distribuição de espécies, visto que influencia diretamente as taxas metabólicas, os processos fisiológicos das plantas e controla a duração da estação de crescimento. Além disso, a temperatura tem influências sob o teor de água disponível no solo e déficit hídrico, taxa de radiação solar e velocidade dos ventos (MAHARJAN et al., 2021).

Zhang et al. (2020) encontraram uma correlação entre a temperatura e as taxas de vegetação, observando que a diversidade de espécies geralmente se eleva com a temperatura e a precipitação. Fei et al. (2018) relataram o favorecimento de espécies mais competitivas com o aumento da temperatura e da disponibilidade de água, o que pode minimizar a coexistência de algumas e, assim, afetar a diversidade.

Além dos efeitos diretos sobre a vegetação, as elevadas temperaturas modificam a temperatura do solo, que adquire uma correlação com a eficiência

foto-sintética acarretando interferências nas dinâmicas de absorção de CO₂ da atmosfera (GOBEL et al., 2019). Essa condição é maximizada em áreas com supressão da cobertura vegetal, em que a superfície se torna suscetível à radiação solar, acarretando perdas de carbono no solo e maior ação da fauna microbiana (DA SILVA GOMES et al., 2021).

Outro fator observado com o aumento da temperatura é o favorecimento do crescimento das populações de fungos no solo em relação às bactérias, como resposta às adaptações ambientais com o desenvolvimento da esporulação para aumentar a taxa de sobrevivência (COUSINS et al., 2003). Segundo Sharma e Jha (2017), os microrganismos são ferramentas verdes com papel importante no aumento da captação de nutrientes, como a fixação de nitrogênio, e, ainda, atuam na degradação de pesticidas residuais. Bactérias e fungos atuam como promotores de crescimento das plantas, o que influencia diretamente a permanência das espécies (BAREA e AZCÓN-AGUILAR, 2005). Ademais, no estudo realizado no semiárido brasileiro por Souza et al. (2016), foi constatado que os fungos exibem alta esporulação durante a estação seca e podem induzir as plantas a tolerarem o calor ao produzirem substâncias dentro do tecido vegetal (ALI et al., 2018).

As condições da temperatura da Caatinga também favorecem o banco de sementes, visto que este fator exerce forte influência na velocidade e uniformidade de germinação das sementes, resultando em um percentual de germinação próximo a 90% das espécies do semiárido (BARBOSA, 2003). De acordo com Flores et al. (2014), a temperatura influencia a germinação por afetar a velocidade de embebição da água e nas reações bioquímicas e enzimáticas que ocorrem durante todo o processo.

Cabe ressaltar que a germinação em temperaturas mais elevadas condicionou a adaptação das espécies a esse ambiente, visto que cada espécie apresenta uma faixa de temperatura onde a capacidade de germinação é mais elevada. Algumas espécies necessitam de elevadas temperaturas para que suas sementes possam germinar, no entanto, outras podem perder sua viabilidade com o aumento da temperatura (NUNES et al., 2006; OLIVEIRA, 2008). Assim, em função da adaptação e seleção natural, as elevadas temperaturas e a sazonalidade da precipitação na Caatinga definem a época em que as sementes germinam. Ao iniciar um período úmido, as sementes germinam e as plântulas podem se estabelecer caso a estação perdure. No entanto, quando há a ocorrência de chuvas esporádicas, as plântulas podem morrer em função do déficit hídrico (NUNES et al., 2008; ZAIDAN e BARBEDO, 2004).

Além dos desafios já encontrados pela vegetação para superar os efeitos adversos da temperatura, os cenários dos efeitos das mudanças climáticas apontam tendências da elevação da temperatura do ar, maiores taxas de evapotranspiração e condições de déficit hídrico que podem restringir ainda mais o número de espécies que consigam sobreviver as novas faixas de temperatura e disponibilidade hídrica (MAGRIN et al., 2014; MARENGO et al., 2017).

2.4.2. Precipitação

Como em todas as regiões semiáridas, a Caatinga é caracterizada pela elevada variabilidade interanual da precipitação (MARENGO et al., 2017). Os períodos de seca são alternados com anos úmidos que acabam por impactar fortemente a dinâmica espacial de evapotranspiração e disponibilidade de água, principalmente na escala de bacia hidrográfica (VIOLA et al., 2017).

Os longos períodos de seca, geralmente com duração de seis a 11 meses (MORO et al., 2016), associados à alta radiação solar incidente ocasionam em elevadas temperaturas diurnas e podem causar também um aumento na concentração de sais na superfície do solo impactando fortemente a estrutura da vegetação (RENGASAMY, 2006).

Aliada à escassez temporal, a condição extrema de disponibilidade hídrica na Caatinga se dá também pela evapotranspiração potencial maior em até duas ou três vezes em relação ao total precipitado no ano (ANDRADE et al., 2020). Em um levantamento realizado de 1998 a 2019, a evapotranspiração potencial média foi três vezes maior à precipitação média anual (INMET, 2020).

Mesmo nos períodos chuvosos, parte do total precipitado é perdido pela evapotranspiração, visto que os solos pedregosos, muito comuns na Caatinga, não conseguem armazenar a água (GANEM, 2017). Entretanto, Mutti et al. (2019) observaram que, durante um ano chuvoso na Caatinga, as diferenças de evapotranspiração foram menos perceptíveis em função da saturação do solo e a urgência de absorção pelas plantas, enquanto, na estação seca, a evapotranspiração se elevou.

Na Caatinga é comum o período chuvoso ser concentrado em três a quatro meses (eventos extremos de secas e cheias), raramente ultrapassando cinco meses no ano, e sendo, geralmente, curtos períodos com precipitação de alta intensidade. Pode ocorrer por exemplo, em um mês, a precipitação ser superior a 70% da média da

região ou ultrapassando 200mm em um único dia, sendo que geralmente entre os meses de janeiro a maio concentram-se 85% do total anual precipitado (ANDRADE et al., 2016; ANDRADE et al., 2018; ANDRADE et al., 2020).

Da Silva Gomes et al. (2021) observaram que a Caatinga sofre forte influência das chuvas, que afetam de forma direta na fenologia das plantas. Na estação chuvosa, as plantas reconstituem sua área foliar, o que demanda grande quantidade de carbono, assim, torna-se maior o sequestro de carbono da atmosfera, sendo ampliado nas áreas onde se encontra a Caatinga preservada, com integridade da vegetação. Assim, a quantidade de CO₂ fixado supera o CO₂ que as plantas emitem no seu processo de respiração (DE OLIVEIRA et al., 2023), fazendo com que, de modo geral, a Caatinga funcione como sumidouro de CO₂ na maior parte do tempo e território, em função da disponibilidade hídrica de cada região (GANEM et al., 2020).

Apesar dessa notória relação bidirecional entre a precipitação e a vegetação, é de extrema importância entender como essa interação se dá na Caatinga e apontar outros fatores ambientais e antrópicos que podem influenciar a heterogeneidade espacial e temporal (SILVA et al., 2016).

Essa variação da precipitação ao longo do ano dificulta a análise da cobertura vegetal na floresta tropical seca, visto que as alterações ambientais podem ser confundidas com efeitos da perturbação antrópica, e não como resultado da variabilidade das chuvas de acordo com as estações (MAIA et al. 2018).

2.4.3. Relevo

A heterogeneidade das condições do solo geralmente está ligada à topografia e exerce uma notável influência sobre a composição, a estrutura e os padrões de diversidade da vegetação (LESCURE e BOULET, 1985; PELISSIER et al., 2001; BISPO et al., 2010). A variabilidade na declividade, na altitude e na orientação do terreno determinam o sombreamento e influenciam diferentes características associadas à posição na paisagem (NAZAR e RODRIGUES, 2019).

Maharjan et al. (2022) definiram a declividade como um fator importante para a distribuição vegetal, visto que, em áreas de maior inclinação, algumas espécies têm dificuldade em fixar suas raízes ao solo, não conseguindo se estabilizar. Além disso, maiores declividades ocasionam maior escoamento superficial de água e, conseqüentemente, menor absorção e retenção de água, afetando a disponibilidade hídrica nessas regiões.

Em regiões de solos declivosos, a retirada da vegetação acarreta processos erosivos principalmente nos períodos chuvosos, onde a água precipitada não é absorvida e torna elevado o escoamento superficial. Nesse processo há a translocação de partículas do solo, ou até deslizamentos que elevam a degradação do solo e podem evoluir à desertificação (GUERRA et al., 2014).

A rugosidade do terreno reflete a variação de altitude na paisagem de um ponto em relação a outros no seu entorno, revelando o quão acidentado ele é (NAZAR e RODRIGUES, 2019). A rugosidade do terreno influencia o nível do lençol freático, acarretando a formação de pequenas bacias de inundação, translocação de materiais, tornando-se um fator importante no desenvolvimento das comunidades arbóreas (LOURENÇO et al., 2016).

Além dos fatores associados ao relevo citados acima, Syfert et al. (2018) afirmaram que há tendências de redução da riqueza de espécies de acordo com o aumento da elevação.

2.5. Modelagem Espacial

Nas zonas semiáridas há uma clara variabilidade espaço-temporal da vegetação, o que dificulta o monitoramento da regeneração, reflorestamento e desmatamento dessas regiões (GANEM et al., 2020). Essa variabilidade se dá em função da complexa ecologia regional adicionada às práticas de uso do solo e outras perturbações (MAYES et al., 2015). Ainda, a distribuição irregular e fragmentada das diversas espécies de arbustos, árvores e pastagens altera a resposta espectral nesses ambientes (TOMASELLA et al., 2018).

Estudos afirmaram a importância da análise espaço-temporal, que pode ser utilizada na Caatinga, como a constatação de mudanças da cobertura do solo (SIDHU et al., 2018), análise da fenologia das espécies (QI et al., 2020) e indicadores estacionais para condições severas de seca (LAI et al., 2020).

O uso do sensoriamento remoto permite utilizar dados de sensores orbitais e óticos para permitir a análise de mudanças drásticas na cobertura do solo, com qualquer desvio do estado saudável esperado do ecossistema (SLINGSBY et al., 2020), fornecendo dados de uso do fogo, desmatamento, processos erosivos e outras atividades potenciais de degradação ambiental (CHEN et al., 2017).

O projeto mais atual em relação ao mapeamento da Caatinga é o do MapBiomias (2020), que foi utilizado o dado óptico do *Landsat* (TM - *Thematic Mapper*, ETM e OLI – *operational Lands Imager*) e a técnica do *Random Forest* para o período de 1985 a 2018.

A série Landsat é muito utilizada em estudos de monitoramento de uso da terra em função da disponibilidade de imagens óticas de resolução maiores quando comparados aos satélites MODIS, AVHRR, Sentinel e SPOT. Entretanto vale ressaltar que os satélites Landsat cobrem a Terra a cada 16 dias, coletando dados com ciclos consistentes de revisita de 8 dias. Por sua vez, o sensor Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), apesar de apresentar uma resolução espacial mais baixa, possui uma alta resolução temporal com revisitas entre 1-2 dias (ALVARADO et al., 2018). Assim, sobressaem quando se deseja desenvolver modelos capazes de prever mudanças globais mais precisas para a formulação de tomada de decisões acertadas sobre a proteção do meio ambiente.

Utilizando-se técnicas de análise de imagens por meio de sensoriamento remoto também é possível identificar características particulares da vegetação, como variações fenológicas. O processo de interação entre a radiação eletromagnética referente ao espectro óptico e uma folha permite analisar a vegetação a partir da informação da quantidade de absorção, transmissão e da reflexão da radiação (HERRMANN, 2022).

Com as informações da assinatura espectral da vegetação, é possível empregar índices desenvolvidos para avaliar a cobertura vegetal para obter parâmetros mensuráveis no campo tanto quantitativamente quanto qualitativamente (GUERINI FILHO et al., 2020).

2.6. Aprendizado de Máquina

O Aprendizado de Máquina (do inglês *machine learning*) permite a identificação de padrões com base em casos e experimentos anteriores, de modo análogo ao que ocorre com a inteligência humana (ERICKSON et al., 2017). Na construção do Aprendizado de Máquina é utilizada grande quantidade de comandos e exemplos para introduzir o conhecimento ao computador, gerando hipóteses a partir dos dados (MITCHELL, 1997).

A inferência indutiva é um dos métodos mais utilizados para introduzir novos conhecimentos e prever eventos futuros com Aprendizado de Máquina, sendo que as

chances de as generalizações serem precisas aumentam de acordo com a qualidade dos dados (LEGER et al., 2017).

Existem três tipos principais de Aprendizado de Máquina: Supervisionado, Não Supervisionado e por Reforço. No Aprendizado Supervisionado, para cada exemplo apresentado ao algoritmo, é necessário fornecer a resposta desejada. No Aprendizado Não Supervisionado, os exemplos são apresentados ao algoritmo sem rótulos, de forma que o algoritmo agrupe os exemplos pelas similaridades dos seus atributos. No Aprendizado por Reforço, o algoritmo não recebe a resposta correta, mas recebe um sinal de reforço, de recompensa ou punição (LUDEMIR, 2021).

2.6.1. *Random Forest*

O *Random Forest* (RF) é um método de classificação da vegetação por meio do aprendizado da máquina, baseando-se em árvores de decisão, sendo necessária apenas a escolha das amostras para representar a classe-alvo de modo que seja mais próximo da realidade possível (GANEM et al., 2020). A utilização dessas árvores de decisão como um aprendizado estatístico é um método prático para estimativa da média condicional não paramétrica (ATHEY, 2019).

Du et al. (2015) definiram o *Random Forest* como um classificador que apresenta uma acurácia elevada, processamento de dados com maior velocidade e pouco sensível aos ruídos. O classificador ganhou destaque após sua descrição por Breiman (2001), influenciado por trabalhos anteriores. Desde então, esse algoritmo provou ser útil em muitos campos devido à sua alta precisão preditiva (DENISKO et al. 2018).

Ainda, o RF pode ser adaptado para problemas de classificação e de regressão, permite utilizar variáveis qualitativas e quantitativas juntas sem pré-processamento, possibilita a utilização de dados padrão para os quais o número de observações é maior que o número de variáveis, e onde o número de variáveis é bastante grande em comparação com o número de observações (GENUER e POGGI, 2020).

Nesse método, a partir do nó de uma árvore, são selecionados aleatoriamente atributos até que se obtenha informações suficientes para subdividir o nó até que uma resposta seja adquirida (BASHIR et al., 2014). As construções dos nós de uma árvore são repetidas até que as quantidades de árvores predefinidas no modelo sejam concluídas (DRAGUT e DORNIK, 2016). Após a definição das classificações, são

geradas as matrizes de erro e definido o acerto global com base na amostragem (CARDOSO et al., 2021).

Genuer e Poggi (2020) definiram a sensibilidade do desempenho da previsão para os dois principais parâmetros, como sendo o número de árvores e o número de variáveis escolhidas em cada nó. Ainda, Probst et al. (2019) afirmaram que número de árvores necessárias para obter um bom resultado depende da natureza do conjunto de dados.

Girolamo Neto (2018) afirmou que a utilização de um maior número de árvores de decisão resulta em taxas de acerto maiores, pois o erro decorrente de uma única classificação é sobreposto pela conjunção de variadas classificações. Realizando testes com um grande número de conjuntos de dados, Probst e Boulesteix (2017) mostraram que um bom desempenho geralmente pode ser alcançado ao utilizar as primeiras 100 árvores e que este número pode ser decidido por meio das curvas de desempenho para um número crescente de árvores utilizadas.

O algoritmo de árvores como tomada de decisão é utilizado em diversas áreas: na medicina, com base de dados de câncer de colo de útero (RIGATTI, 2017) e na localização de câncer em tecidos específicos a partir de biópsia (COHEN et al., 2018); na meteorologia, em análises espaço-temporais de tornado, granizo e tipos de precipitação (MCGOVERN et al., 2019); previsão de concentração de ozônio e na poluição por poeira, e na análise de dados genômicos (GENUER e POGGI, 2020).

Lacerda et al (2021) realizaram um estudo que buscou avaliar camadas de florestas que sofreram pouca ou nenhuma variação em escala temporal. Por meio das análises realizadas, verificou-se que, na comparação entre o uso do *Random Forest* com a base de dados do Mapbiomas, o primeiro apresentou melhor desempenho para o objetivo do estudo.

Cardoso et al. (2021) fizeram uso do *Random Forest* para mapear e classificar a vegetação da bacia do rio Taperoá - PB, utilizando como variáveis os índices de vegetação. A acurácia do mapeamento ficou em 79%, e foi possível definir seis classes de vegetação, que revelaram elevada porcentagem de degradação da área bacia.

Nguyen et al (2019) desenvolveram um estudo utilizando o RF e imagens aéreas com análise hiperespectral, para classificar a vegetação ao longo de corredores ribeirinhos estreitos e semiáridos por meio de um estudo de caso do rio Colorado, no Grand Canyon, onde a precisão geral da classificação chegou a 94,8% com coeficiente Kappa de 0,93.

Pham e Brabyn (2017) mapearam e analisaram a mudança de biomassa entre 2000 e 2011 de florestas de mangue na região de Cangio, no Vietnã. Foram utilizadas imagens do satélite SPOT 4 e 5 em conjunto com análise realizada pelo RF. Para a modelagem e mapeamento de biomassa, o modelo que integrou espectrais e tipo de associação de vegetação obteve a maior precisão ($R^2 = 0,73$). Entre as diferentes variáveis, o tipo de associação da vegetação foi a variável mais importante identificada pelo modelo algoritmo.

Linhui et al (2020) analisaram florestas na província chinesa de Heilongjiang, a partir de imagens de satélite (RGB) e de dados de inventários florestais, realizando a classificação dos tipos de floresta pelo RF. Experimentos comparativos foram realizados usando o classificador *Support Vector Machine* (SVM). Os resultados experimentais indicaram que a acurácia global e o coeficiente kappa do RF foram 83%, 16% e 79,86%, respectivamente, superiores aos do método de classificação SVM.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição da área de estudo

A área de abrangência deste estudo compreende o território inserido no domínio fitogeográfico da Caatinga (Fig. 1), ocupando uma área de cerca de 862.818 km², que compreende 18,2% do território nacional do Brasil (IBGE, 2019). A Caatinga abrange os estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Piauí, Sergipe e o norte de Minas Gerais.

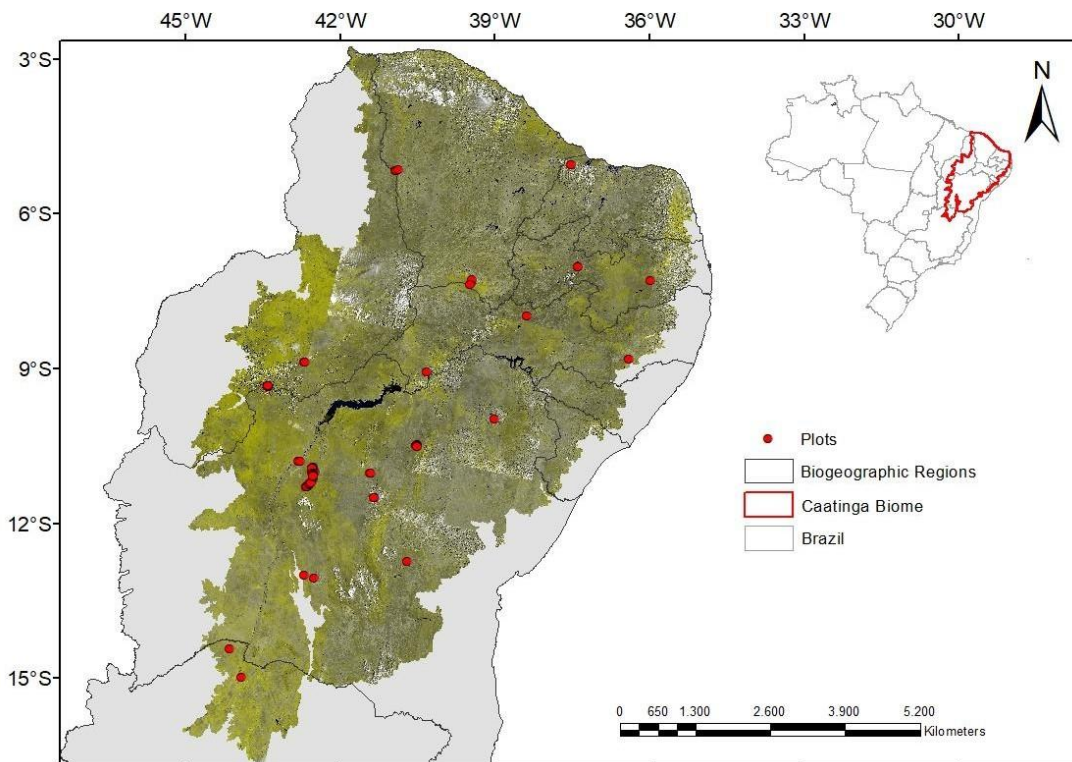


Figura 1 - Área compreendida pelo domínio fitogeográfico da Caatinga, localizada no Nordeste brasileiro, com demarcação das parcelas amostradas.

A maior parte da Caatinga possui clima semiárido, sendo considerada a região mais seca do Brasil, com grande variabilidade interanual e espacial das chuvas. A precipitação anual é em média ≤ 800 mm/ano, com estações de seca e de chuvosa bem definidas, e, ainda, períodos de seca extrema intercalados a períodos chuvosos. Além disso, a região da Caatinga revela elevadas taxas anuais e mensais de radiação solar e evaporação (LUCENA e STEINKE, 2015; SILVA et al., 2017; SUDENE, 2021).

A temperatura média na Caatinga é elevada, entre 25°C e 30°C. Entretanto, nos planaltos, as temperaturas podem se apresentar mais baixas e a precipitação mais elevada. Dessa forma, a Caatinga se mostra um domínio fitogeográfico extremamente

heterogêneo, apresentando gradientes na topografia, nos solos, no clima e na vegetação (SILVA et al., 2017).

Os solos presentes nessa região são solos rasos e pedregosos, apresentam baixa fertilidade natural, baixos teores de matéria orgânica e reduzida capacidade de retenção de água, normalmente apresentando as ordens Neossolos, Latossolos, Planossolos, Cambissolos, Argissolos e Luvisolos (MARQUES et al., 2014). O relevo se apresenta como semiplano e deprimido com formações testemunhas (*inselbergs*) (SUDENE, 2021).

3.2. Base de dados

A base de dados para a estimativa da diversidade de espécies foi obtida por levantamentos florestais realizados ao longo de todo o domínio fitogeográfico da Caatinga, contemplando um total de 194 parcelas distribuídas em 21 fragmentos florestais (Fig. 1).

Parte do banco de dados foi cedido pelo Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado da Bahia – INEMA, composto por inventários florestais realizados entre os anos de 2016 e 2020. O número e o tamanho das parcelas variaram entre os inventários em 0,02 a 0,1 ha.

A esse banco também foram acrescentados dados de parcelas permanentes de 1 ha, registradas no ForestPlots.net (LOPEZ-GONZALEZ et al., 2011). Para esses dados, assumiu-se cada parcela como um fragmento florestal.

Os indivíduos arbóreos foram mensurados quanto ao Diâmetro à Altura do Peito (DAP), medida na altura de 1,30 metros acima do nível do solo, adotando como critério de inclusão o DAP maior ou igual a 3 cm. Ainda, todas as parcelas tiveram as informações de latitude e longitude coletadas, para possibilitar sua geolocalização dentro do território da Caatinga.

Os nomes das espécies foram corrigidos e atualizados e tiveram suas sinónimas reunidas fazendo uso de bibliografia especializada como a Flora da Bahia, Barroso (1992), Lorenzi (1992, 2009) e Queiroz (2009) e acesso a herbários virtuais (tropicicos.org, fm1.fieldmuseum.org; reflora.jbrj.gov.br). O sistema taxonômico utilizado foi o APG IV (CHASE et al., 2016).

As parcelas estão distribuídas nos municípios de Juvenília - MG, Boa Vista Tupim – BA, Canudos – BA, Gruta dos Brejões – BA, Ibiraba Dunas - BA, Campo Alegre de Lurdes – BA, Campo Formoso – BA, Macaúbas – BA, Morro do Chapéu –

BA, Xique-Xique – BA, São Vitor – BA, Campina Grande – PB, Patos – PB, Lagoa Grande – PE, Serra Talhada – PE, São João Garanhuns – PE, Parque de Furna Feia – RN, Serra das Almas – CE, Araripe-Cariri – CE, Serra da Capivara – PI.

3.3. Diversidade de espécies

A diversidade foi analisada usando o índice de diversidade alfa de Fisher (α) calculado para cada uma das 194 parcelas. A diversidade Alfa de Fisher é recomendada por ser pouco influenciada pelo tamanho da amostra (KEMPTON e TAYLOR, 1976).

A diversidade alfa expressa como alfa de Fisher (α) é uma medida que corrige o tamanho da amostra, principalmente em ambientes extensos, com gradientes de variação, sendo um ótimo estimador da comunidade real (FISHER et al., 1943), onde:

$$S = \alpha \ln \left(1 + \frac{n}{\alpha} \right)$$

S: é o número de total de espécies de uma determinada área;

n: é o número de indivíduos;

α : índice de diversidade alfa de Fisher

Para complementar as informações sobre o índice de diversidade, também foi calculada a riqueza resultante do número total de espécies para cada parcela. A riqueza e a diversidade são consideradas indicadores de biodiversidade geral (GASTAUER et al., 2021). Todos os dados foram analisados usando o pacote *vegan* (OKSANEN et al., 2022) e *BiodiversityR* (KINDT, 2022) em R.

3.4. Aquisição e pré-processamento de variáveis geoespaciais

Para o desenvolvimento do modelo preditivo, foi selecionado um conjunto de covariáveis geoespaciais potenciais com base na singularidade, resolução espacial e relevância ecológica (CROWTHER et al., 2015). Essas covariáveis foram obtidas por meio de sensoriamento remoto por satélite e estações meteorológicas terrestres, sendo classificadas como de origem topográfica e climática.

Foi pré-selecionado um total de 27 variáveis ambientais, divididas embioclimáticas (wordclim.org) e topográficas (earthenv.org). As 19 variáveis bioclimáticas foram baixadas do *WorldClim* versão 2 (FICK e HIJMANS, 2017), e revelam os valores médios adquiridos em uma série histórica de 30 anos.

As covariáveis topográficas incluídas foram: elevação, inclinação do terreno, aspecto (norte e leste), latitude (valor absoluto da latitude), longitude, perfil de curvatura da superfície e um índice de rugosidade do terreno (IRT).

As covariáveis climáticas foram compostas pela evapotranspiração potencial e por um conjunto de 19 variáveis bioclimáticas, sendo:

11 variáveis derivadas da temperatura: Temperatura Média Anual, Intervalo Médio Diurno da temperatura, Isothermalidade, Sazonalidade de temperatura, Temperatura máxima do mês mais quente, Temperatura mínima do mês mais frio, Faixa anual de temperatura, Temperatura Média do Quarto de ano Mais Úmido, Temperatura Média do Trimestre Mais Seco, Temperatura Média do Trimestre Mais Quente, Temperatura Média do quarto de ano Mais Frio.

8 variáveis derivadas da precipitação: Precipitação média Anual, Precipitação do mês mais chuvoso, Precipitação do mês mais seco, Sazonalidade da Precipitação, Precipitação do trimestre mais úmido, Precipitação do quarto de ano Mais Seco, Precipitação do trimestre mais quente, Precipitação do quarto de ano Mais Frio.

A evapotranspiração potencial também foi pré-selecionada e foi obtida a partir de dados do TerraClimate (climatologylab.org/terraclimate.html), que combinam normas climatológicas do WorldClim, da Unidade de Pesquisa Climática (CRU) Ts4.0, dados de Reanálise Japonesa de 55 anos (JRA-55) e da metodologia Penman-Monteith.

Todas as covariáveis espaciais foram pré-processadas usando o *ArcMap* 10.1 (BUNDY, 2012) e o *software* R 4.1.0 (R CORE TEAM, 2021). Posteriormente foram reprojetaadas no sistema de coordenadas de área de cada ponto amostral da área de estudo para extrair os valores *in loco* de cada variável para a modelagem estatística e para otimizar a precisão da área de figuras e mapas finais.

O objetivo desse procedimento foi realizar coleções de medições de diversidade de espécies arbóreas de locais distintos em toda a vegetação de Caatinga, explorando os padrões espaciais e ambientais que explicam a diversidade de espécies arbóreas nesses pontos. Assim, tornou-se possível criar uma previsão espacial da diversidade, bem como entender os padrões para prever esses valores de diversidade em escala regional.

Muitas dessas condições ambientais são descritas em detalhes e estão disponíveis como produtos espaciais, geralmente chamadas de camadas *raster* (VAN DEN HOOGEN et al., 2021). Assim, na camada *raster*, forma-se uma imagem em grade, espacialmente explícita, em que cada *pixel* representa o valor da covariável

descrita. Ambos os dados brutos medidos (por exemplo, dados de número de árvores na parcela e covariáveis geoespaciais) e produtos modelados podem ser representados por dados *raster*.

A primeira etapa preparatória da criação da previsão espacial foi montar uma matriz de dados com a localização (informações de longitude e latitude) de cada ponto de amostra. Em seguida, foram plotados todos os arquivos *raster* das covariáveis geoespaciais (um a um) nos pontos localizados. Em cada ponto de amostra foram extraídas as métricas geoespaciais usada a função *raster::extract* do pacote *raster* (HIJMANS et al., 2021) do R em cada arquivo *raster* das covariáveis geoespaciais; essas informações foram armazenadas e salvas em uma matriz final e usadas como variáveis preditoras no modelo.

3.5. Modelagem espacial

Para criar uma previsão espacial da diversidade de espécies arbóreas a partir dos pontos amostrais, foi utilizado o aprendizado de máquina. Pesquisas recentes apontam esse tipo de modelagem como uma ótima ferramenta para melhorar os modelos globais de variáveis ecológicas (CAI et al., 2022) e diversidade arbórea (MEYER e PEBESMA, 2022).

O algoritmo *Random Forest* (RF) foi usado para modelar a relação entre variáveis ambientais e diversidade usando 500 árvores de decisão aleatórias do tipo regressão. O número de variáveis amostradas aleatoriamente como candidatas em cada divisão foi definido como o número de variáveis explicativas dividido por 3 (parametrização padrão do algoritmo).

A avaliação da precisão do modelo foi realizada por meio da raiz quadrada do erro médio (RMSE) e coeficiente de determinação (R^2), considerando a validação cruzada *k-fold* ($k = 15$).

O RF identifica quais variáveis têm o maior poder preditivo, gerando um fator de importância, que pode ser plotado usando o comando *var_imp_plot*, gerando uma lista em ordem decrescente de importância para as variáveis preditoras da diversidade. Assim, a importância das variáveis ambientais foi analisada por meio de gráficos marginais, mantendo as demais variáveis constantes em um valor médio. A importância das variáveis é medida pela permuta de variáveis no modelo e pela medição do aumento no erro de estimativa (MSE).

O modelo *Random Forest* foi aplicado às camadas ambientais em nível de *pixel*, para toda a Caatinga, por meio de álgebra de mapas. Os parâmetros do modelo foram aplicados independentemente a cada *pixel* para produzir o mapa de diversidade (Fig. 7). Todos os procedimentos de análise, modelagem estatística e espacial foram desenvolvidos em ambiente R (R CORE TEAM, 2021), utilizando os pacotes *MASS* (RIPLEY et al., 2022) e *RandomForest* (CUTLER e WIENER, 2022). Essa abordagem permite explorar os mecanismos que potencialmente governam os padrões na riqueza e diversidade de espécies arbóreas no domínio fitogeográfico da Caatinga.

Do total de variáveis ambientais selecionadas para o estudo, o *Random Forest* excluiu automaticamente aquelas variáveis que apresentam uma alta correlação, pois não possuíam um peso significativo na estimativa da diversidade. As parcelas que ficaram com os valores zerados para as variáveis ambientais, onde, provavelmente, o banco de dados não conseguiu interpolar o valor da variável para aquela coordenada, foram retiradas da modelagem, sobrando, portanto, 189 parcelas.

Para a modelagem do RF, foram carregados os pacotes de informações geográficas: *ggplot2*, *Raster*, *tidyverse*, *tmap*, *gridExtra*, *magrittr*, *factoextra*, *randomForest*, *caret*, *RColorBrewer*, *hexbin* e para plotar a frequência: *ggpubr* e *MASS*. Devido à natureza inerentemente interativa do clima, topografia e gradientes ambientais em toda a Caatinga, foi assumido que não houve independência acentuada dentro do conjunto completo de variáveis biofísicas extraídas das camadas *raster* compiladas. No entanto, para explicar qualquer colinearidade entre as covariáveis geoespaciais, foi realizada a validação cruzada do modelo.

3.6. Validação e teste do modelo

Na modelagem realizada pelo *Random Forest* é posta a diversidade alfa de Fisher em função das variáveis ambientais. Assim, é preciso fazer o ajuste e validação do modelo. Foi realizado, neste caso, o método de validação cruzada (cv), que é feito utilizando um percentil de a cada 15% do banco de dados ($k=15$, $cluster=k$). Ou seja, um treinamento é feito com os 85% dos dados, e a cada 15% dos dados é realizado o ajuste e validação o modelo.

Foi avaliado o ajuste do modelo, investigando o viés e a precisão presentes ao prever a diversidade média em um número agregado de pontos amostrais. Essa abordagem permitiu analisar quantas parcelas são necessárias para garantir que a diversidade média prevista (ou total) da vegetação tivessem viés e precisão razoáveis.

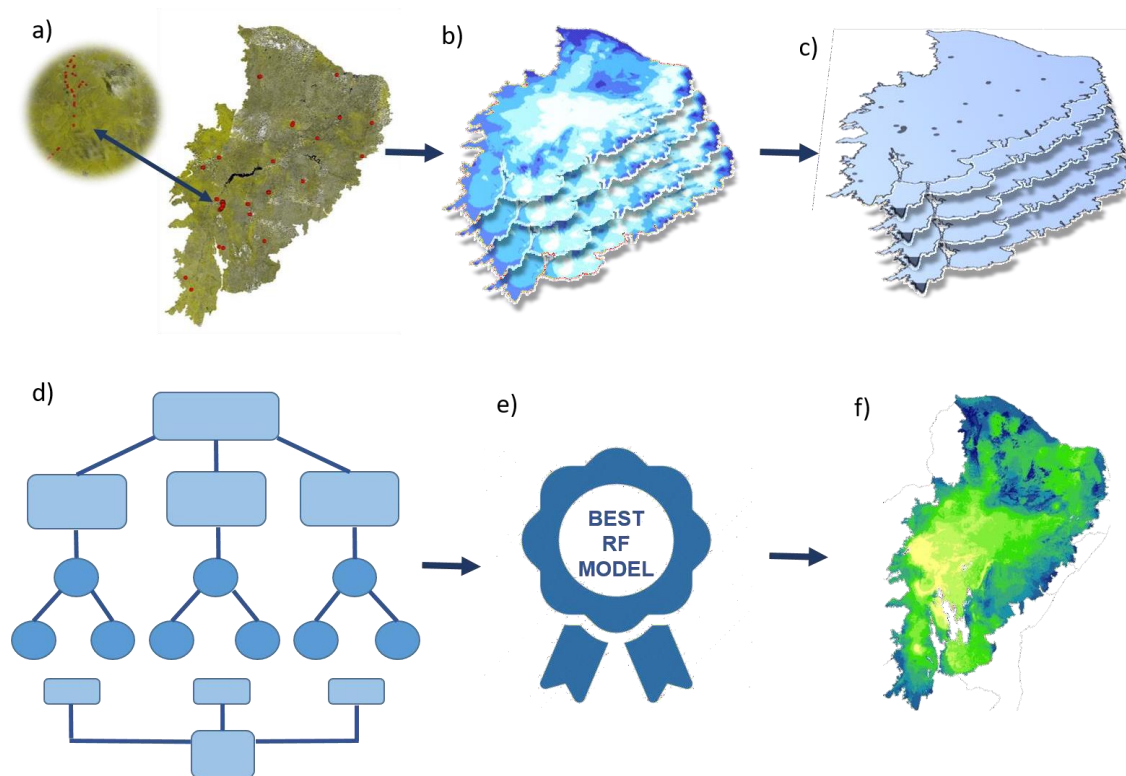


Figura 2 - Fluxograma de processamento e análise de dados: (a) rede com os dados das parcelas georreferenciados; (b) empilhamento de camadas espaciais ambientais; (c) cruzamento das parcelas de campo e da pilha de variáveis ambientais; (d) treinamento e ajuste do modelo *Random Forest* para diversidade; (e) modelo preditivo de nível superior criado calculando a média do modelo usando uma validação cruzada; (f) estimativa da diversidade de espécies arbóreas para toda a Caatinga em nível de pixel.

4. RESULTADOS

4.1. Modelagem espacial e fatores ambientais

O modelo *Random Forest* ajustado apresentou erro médio absoluto (*Mean Absolute Error* - MAE) de 2,87 e raiz quadrada do erro médio (*Root Mean Squared Error* - RMSE) de 4,83. O coeficiente de determinação alcançado pelos modelos RF foi marcadamente alto para a diversidade ($R^2 = 0,75$). A análise gráfica de dados de diversidade observados *versus* previstos mostra associações positivas indicando bom ajuste do modelo RF (Fig. 3).

Tabela 1 – Classificação dos melhores resultados estatísticos do modelo *Random Forest* gerado para o domínio fitogeográfico da Caatinga. Em que: RMSE: raiz do erro quadrático médio; *R Squared*: coeficiente de determinação; MAE: erro médio absoluto.

RMSE	<i>R Squared</i>	MAE
4.830937	0.7532119	2.866330
5.267997	0.7286000	3.058693
5.425000	0.7226708	3.119905

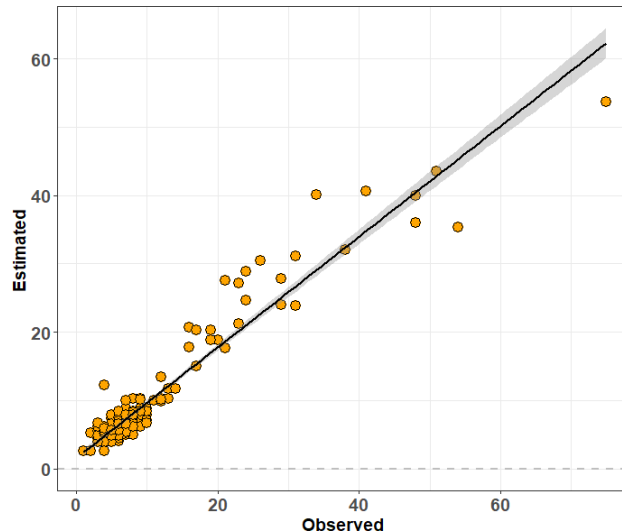


Figura 3 - Gráfico de correlação dos valores de diversidade estimados com os observados.

As 16 variáveis ambientais, consideradas pelo RF como preditoras da diversidade alfa de Fisher no domínio fitogeográfico da Caatinga, estão apresentadas na Figura 4 de acordo com a ordem de importância definida pelo modelo RF.

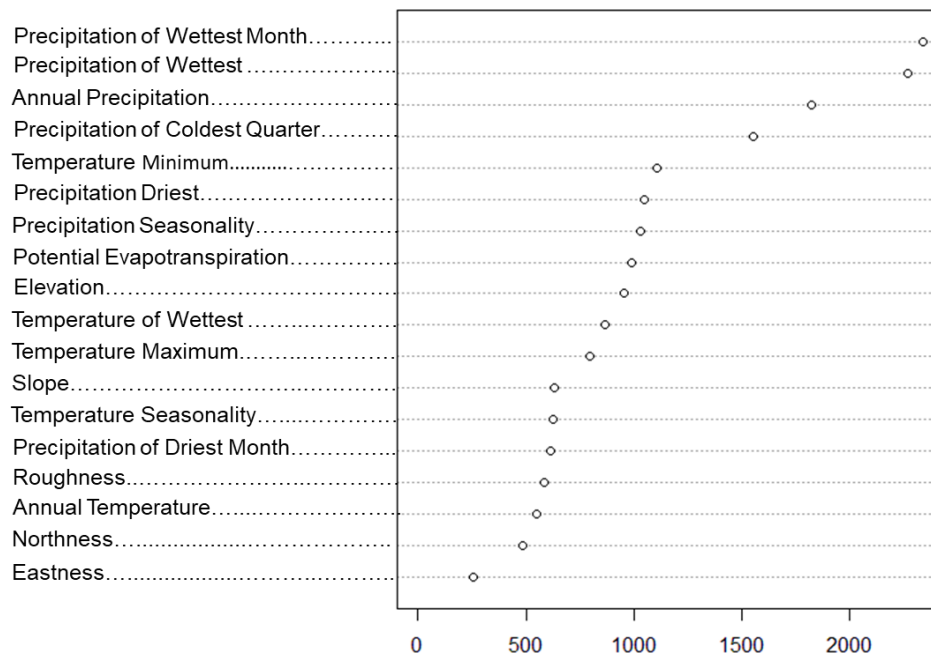


Figura 4 - Variáveis ambientais selecionadas pelo RF por ordem de importância. *Precipitation of Wettest Month*: Precipitação do Mês Mais Úmido; *Precipitation of Wettest*: Precipitação no Período Chuvoso; *Annual Precipitation*: Precipitação Anual; *Precipitation of Coldest Quarter*: Precipitação do Quadrimestre Mais Frio; *Temperature Minimum*: Temperatura Mínima; *Precipitation Driest*: Precipitação do Período Seco; *Precipitation Seasonality*: Sazonalidade da Precipitação; *Potential Evapotranspiration*: Evapotranspiração Potencial; *Elevation*: Elevação; *Temperature of Wettest*: Temperatura do Período Mais Úmido; *Temperature Maximum*: Temperatura Máxima; *Slope*: Inclinação; *Temperature Seasonality*: Sazonalidade da Temperatura; *Temperature of Driest Month*: Temperatura do Mês Mais Seco; *Roughness*: Rugosidade do Terreno; *Annual Temperature*: Temperatura Anual; *Northness*: Aspecto Norte; *Eastness*: Aspecto Leste.

Pode-se observar que as variáveis relacionadas à precipitação se mostraram muito importantes na predição da diversidade alfa de Fisher, sendo que as sete primeiras variáveis, com exceção da quinta, mais importantes estão relacionadas à precipitação (*Precipitation of Wettest Month*, *Precipitation of Wettest*, *Annual Precipitation*, *Precipitation of Coldest Quarter*), portanto, um condicionante fundamental para a riqueza e diversidade de espécies arbóreas na Caatinga. Seguindo a precipitação, têm-se os fatores relacionados à temperatura, que também se mostraram importantes impulsionadores de diversidade.

As variáveis aspecto norte (*Northness*) e aspecto leste (*Eastness*) não se mostraram como de grande importância na determinação da diversidade de espécies arbóreas na Caatinga, visto que foram as que menos influenciaram a diversidade, segundo o modelo gerado pelo RF.

Na Figura 5 é possível observar os gradientes ambientais dentro da Caatinga. Percebe-se que para as variáveis ligadas a precipitação, há regiões mais escuras localizadas na porção norte do domínio fitogeográfico, revelando maiores concentrações de chuva. Porém, para temperatura, observa-se valores maiores (*tmax*)

para a região oeste e menores (*tmin*) ao norte. Para melhor análise do gradiente das variáveis, cada mapa pode ser visualizado individualmente nos apêndices.

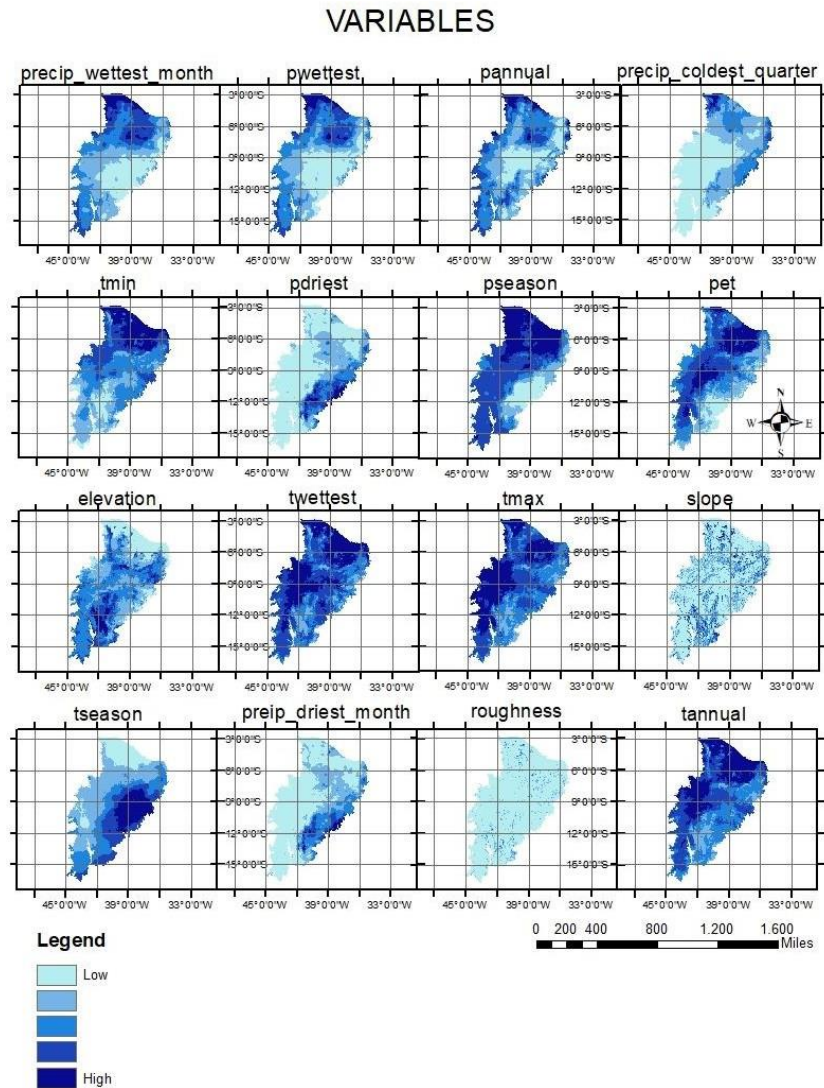


Figura 5 – Expressão das variáveis ambientais ao longo da Caatinga. Onde, **precip_wettest_month**: *Precipitation of Wettest Month* (Precipitação do Mês Mais Úmido); **pwettest**: *Precipitation of Wettest* (Precipitação no Período Chuvoso); **pannual**: *Annual Precipitation* (Precipitação Anual); **p_Coldest_Quarter**: *Precipitation of Coldest Quarter* (Precipitação do Quadrimestre Mais Frio); **tmin**: *Temperature Minimum* (Temperatura Mínima); **pdriest**: *Precipitation of Driest* (Precipitação do Período Seco); **pseason**: *Precipitation Seasonality* (Sazonalidade da Precipitação); **pet**: *Temperature Evapotranspiration* (Evapotranspiração Potencial); **elevation**: *Elevation* (Elevação); **twettest**: *Temperature of Wettest* (Temperatura do Período Mais Úmido); **tmax**: *Temperature Maximum* (Temperatura Máxima); **Slope**: *Slope* (Inclinação); **tseason**: *Temperature Seasonality* (Sazonalidade da Temperatura); **t_driest_month**: *Temperature of Driest Month* (Temperatura do Mês Mais Seco); **roughness**: *Roughness* (Rugosidade); **tannual**: *Annual Temperature* (Temperatura Anual).

Para algumas variáveis ligadas à precipitação, como a precipitação do período seco (*pdriest*) e precipitação do mês mais seco (*precip_driest_month*), há alterações na distribuição ao longo da Caatinga, havendo maiores precipitações a leste.

Pela distribuição espacial da temperatura anual (*tannual*), podemos observar regiões a oeste e ao norte como sendo as mais elevadas durante o ano. As regiões com elevada evapotranspiração potencial coincidem com as regiões evidenciadas por temperaturas mais elevadas. Pelo mapa de distribuição da sazonalidade de temperatura (*tseason*) (Fig. 5), observa-se que a região leste é a que tem a maior variabilidade de temperatura ao longo do ano; e a região norte, a menor.

Os mapas de distribuição da inclinação (*slope*) e rugosidade do terreno (*roughness*) (Fig. 5) indicam diversos pontos onde há maiores variações no relevo. Para a inclinação do terreno, há maior evidência para as áreas mais ao sudeste, onde está localizada a Chapada Diamantina (BA), constituída de uma grande variedade de morros e depressões.

As 16 variáveis ambientais apresentaram dois diferentes graus de importância de associação (Fig. 6). Um grau de importância positivo, onde a diversidade tende a aumentar conforme o fator aumenta, e um grau de importância negativo, quando a diversidade tende a se reduzir à medida que o fator aumenta.

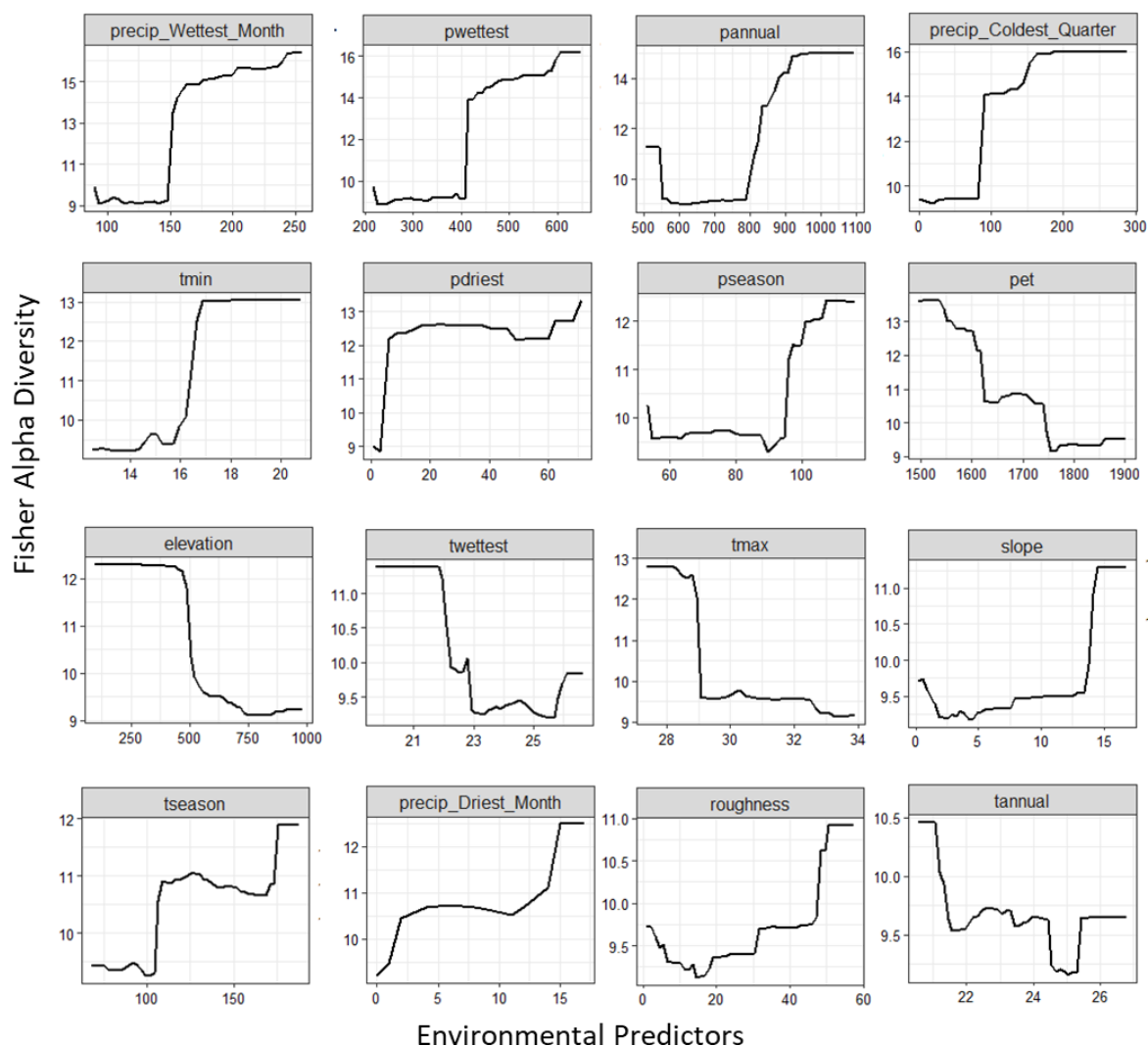


Figura 6 - Gráfico de dependência parcial das 16 variáveis ambientais utilizadas pelo modelo RF para predição da diversidade alfa de Fisher. Onde, **precip_wettest_month**: *Precipitation of Wettest Month* (Precipitação do Mês Mais Úmido); **pwettest**: *Precipitation of Wettest* (Precipitação no Período Chuvoso); **pannual**: *Annual Precipitation* (Precipitação Anual); **p_Coldest_Quarter**: *Precipitation of Coldest Quarter* (Precipitação do Quadrimestre Mais Frio); **tmin**: *Temperature Minimum* (Temperatura Mínima); **pdriest**: *Precipitation of Driest* (Precipitação do Período Seco); **pseason**: *Precipitation Seasonality* (Sazonalidade da Precipitação); **pet**: *Temperature Evapotranspiration* (Evapotranspiração Potencial); **elevation**: *Elevation* (Elevação); **twettest**: *Temperature of Wettest* (Temperatura do Período Mais Úmido); **tmax**: *Temperature Maximun* (Temperatura Máxima); **Slope**: *Slope* (Inclinação); **tseason**: *Temperature Seasonality* (Sazonalidade da Temperatura); **t_driest_month**: *Temperature of Driest Month* (Temperatura do Mês Mais Seco); **roughness**: *Roughness* (Rugosidade); **tannual**: *Annual Temperature* (Temperatura Anual).

A diversidade alfa de Fisher aumentou substancialmente com a precipitação do mês mais úmido (*Precipitation of Wettest Month*), precipitação no período úmido (*Precipitation of Wettest*), precipitação anual (*Annual Precipitation*) e precipitação do quadrimestre mais frio (*Precipitation of Coldest Quarter*) alcançando α maiores. Para precipitação anual (*pannual*), é notável o aumento significativo da diversidade quando a precipitação passa dos 800mm. É possível observar que há valores mais elevados de

precipitação para os meses mais úmidos, porém se sabe que na estação seca há longos períodos sem chuvas nessa região.

Em contraste, o aumento da elevação (*Elevation*), temperatura do período mais úmido (*Temperature Wettest*), temperatura máxima (*Temperature Maximun*) e evapotranspiração potencial (*Temperature Evapotransporation*) estão associadas à menor diversidade alfa de Fisher (Fig. 6).

Fazendo uma análise dos gráficos de dependência parcial (Fig. 6) relacionados à temperatura, observa-se um aumento da diversidade de espécies arbóreas quando a temperatura está aproximadamente acima de 17°C e abaixo de 29°C.

Observa-se que a diversidade se eleva também com o aumento de sazonalidade da temperatura (*tseason*) e com a precipitação do mês mais seco (*precipitation of Driest Month*), havendo uma estabilização em certo momento e voltando a se elevar novamente. Nota-se que, quanto maior a sazonalidade da temperatura (desvio padrão $\times 100$), ou seja, quanto maior a variabilidade de temperaturas ao longo do ano, maior se torna a diversidade de espécies arbóreas.

Para a variável elevação (*elevation*), pode-se observar que há uma redução considerável dos valores de diversidade quando a altitude do terreno aumenta, próximo a 500m.

4.2. Diversidade Alfa de Fisher

Maiores valores de diversidade foram encontrados ao norte da Caatinga onde se encontra o extremo nordeste do País (cerca de -39 a -41° de longitude, Fig. 7), enquanto os menores valores para diversidade foram encontrados no sudoeste da Caatinga, onde está o norte do Estado da Bahia, próximo à Área de Preservação Permanente Dunas e Veredas do Baixo-Médio São Francisco.

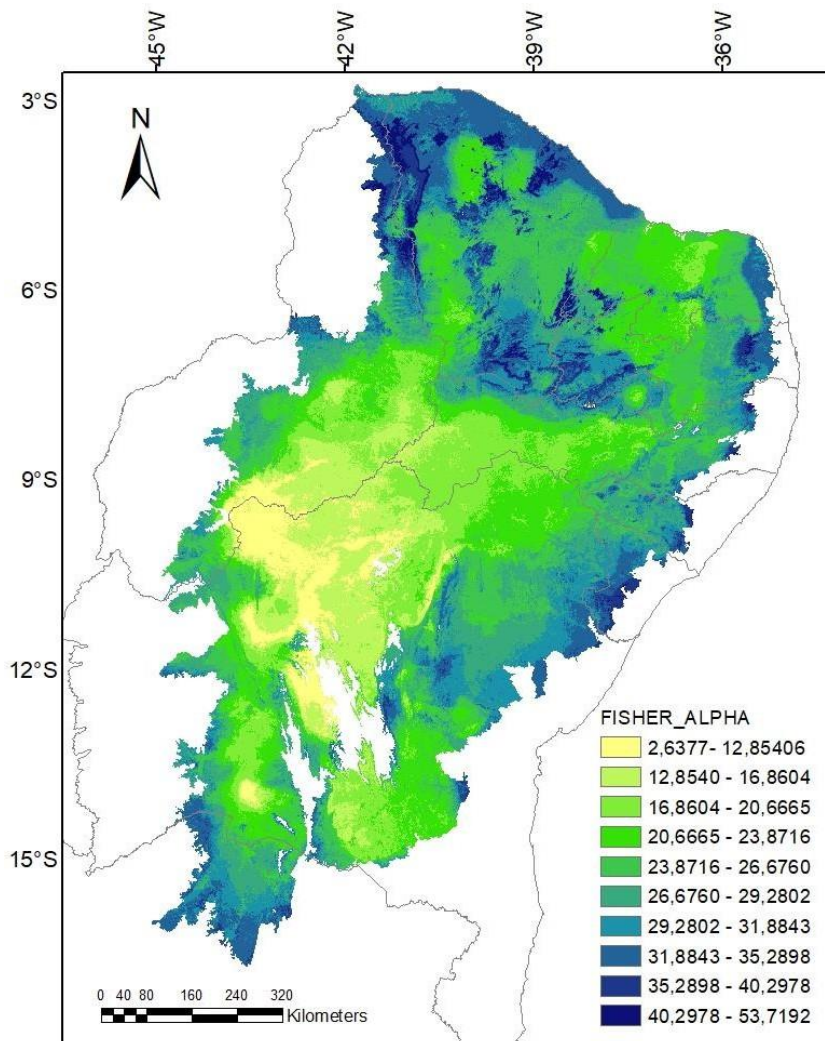


Figura 7- Mapa de distribuição da diversidade alfa de Fisher dentro do domínio fitogeográfico da Caatinga.

Na porção inferior do centro sul da Bahia, há uma zona de transição com o domínio fitogeográfico do Cerrado, havendo uma descontinuação da Caatinga, onde em suas bordas vê-se um aumento de diversidade, com valores de alfa de até 29,28. Mais acima, em uma porção maior descolorida no mapa, são referentes as áreas correspondentes a região da Chapada Diamantina e em áreas pertencentes aos municípios de Santo Sé e Morro do Chapéu, na Bahia.

Na porção de Caatinga presente no norte de Minas Gerais, os valores de diversidade chegam a até 40,29, apresentando algumas manchas de áreas com valores inferiores (20,66 a 26,67).

O nordeste baiano aparece como a região de maior valor alfa de Fisher do estado, revelando valores que vão de 20,36 a 29,67.

A porção do estado de Sergipe pertencente à Caatinga apresenta uma considerável área de valores de maiores diversidades, em alguns pontos chegando a até 53,71.

O estado de Alagoas apresenta valores de diversidade de médio a elevados considerando a variação de todo o domínio fitogeográfico. No entanto, a maior parte do estado está concentrado em valores médios considerando a escala de diversidade para este estudo.

Na porção pertencente ao São Francisco pernambucano (PE), a diversidade alfa varia de 12,85 a 23,87. Elevando-se um pouco acima, na região do sertão pernambucano, majoritariamente com valores até 29,28, mas apresentando algumas manchas com valores próximos a 40,29. Nas regiões da mata pernambucana e na região metropolitana de Recife, os valores também são mais elevados, chegando a até 53,71.

No estado da Paraíba, a diversidade é mais elevada no sertão paraibano, reduz na porção do Borborema e volta a elevar-se no agreste paraibano e na mata paraibana, chegando aos valores máximos de diversidade para este domínio fitogeográfico.

Seguindo os padrões do sertão paraibano, a porção do litoral oriental do Rio Grande do Norte mostra, em sua maioria, valor alfa de Fisher próximos aos de 35,28, com pequenas manchas de 35,28 a 40,29. Já no litoral norte do RN e na região mossoroense, a diversidade segue padrões próximos à média de diversidade da área estudada, com valores entre 20,66 e 26,67.

O estado do Ceará apresenta grande variabilidade de diversidade ao longo de toda a sua extensão, sendo as regiões norte e nordeste do estado as com valores mais elevados de diversidade, e que, junto à porção norte e centro norte do Piauí, formam a maior extensão do domínio fitogeográfico com valores mais elevados de diversidade (53,71). Mais abaixo do estado do Ceará, a diversidade reduz um pouco, voltando a elevar-se na porção centro sul e sul.

Nas porções sudeste e sudoeste do Piauí pertencentes à Caatinga, a diversidade também é reduzida, permanecendo em valores próximos até a região da APP Dunas e Veredas do Baixo-Médio São Francisco, no Vale do São Francisco na Bahia.

5. DISCUSSÃO

O modelo RF sugere que os mapas gerados apresentam alta confiabilidade (R^2

= 0.75). Segundo Ramos et al. (2009), o *R^{squared}* assume os seguintes intervalos: ≤ 25% (baixa dependência espacial), 25% < de ≤ 75% (moderada) e > 75% (forte). Além disso, apresentou um RMSE de 4.83, um valor baixo, revelando que os valores estimados e os reais estão de acordo com a realidade local nos pontos inventariados. O MAE de 2.87 mostra que, para cada estimativa de diversidade que está sendo gerada por cada parcela, existe uma estimativa de erro absoluto de 2.87 espécies.

5.1. Fatores ambientais e Diversidade de espécies arbóreas

Pode-se observar que, para o domínio fitogeográfico da Caatinga, a variável precipitação mostrou-se, de fato, como uma forte impulsionadora da diversidade alfa de Fisher. Isso pode ser observado *in loco* e com clareza durante as estações do ano. No período chuvoso, a vegetação revela seus mais variados tons de verde, que não podem ser apreciados durante os longos períodos de seca.

Seguindo a mesma regionalidade do mapa de distribuição de precipitação (Fig. 5), há um aumento da diversidade de espécies arbóreas na região norte da Caatinga, evidenciando mais uma vez que a diversidade na Caatinga é fortemente influenciada por fatores ambientais ligados à precipitação (Figs. 5 e 6). Esse fato pode ser corroborado por Moro et al. (2016), que afirmaram que a presença de diferentes fitofisionomias tende a ser associada à distribuição da precipitação na região, afetando diretamente a cobertura vegetal.

A região norte da Caatinga apresenta maior precipitação, pois essa região está sob influência do sistema atmosférico Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que confere as elevadas precipitações no período de fevereiro a maio, mais precisamente no Estado do Ceará (FERREIRA e MELLO, 2005; SILVA et al., 2005).

A ocorrência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) torna a região Nordeste do País mais afetada pelas secas (anuais ou plurianuais). A variabilidade climática que ocorre por meio da ZCIT é também combinada com fatores que

ocasionam o regime pluviométrico da Zona da Mata e no Nordeste Meridional (ANDRADE, 2009).

Na Figura 5 é possível observar os gradientes ambientais. Para a variável precipitação no período de seca (*Pdriest*), durante os períodos de estiagem na Caatinga, a região leste da Caatinga é a que possui maiores valores de precipitação. Isso se deve à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que atua majoritariamente no verão austral, compreendendo o sul da Bahia, sendo o causador das chuvas primavera-verão nessa região. Por sua vez, as frentes frias surgem no inverno e são mais expressivas no sul do litoral baiano (PEREIRA, 2018). Seu ápice de ação ocorre ao norte, mais precisamente no município de Recife, mas raramente ultrapassa o litoral da Bahia em seu deslocamento do Norte até a costa (MOLION e BERNARDO, 2002). A influência do Atlântico na climatologia nessa região é tão forte que o oceano foi inserido na designação do tipo de clima da região definido como “tropical litorâneo do Nordeste oriental” por Mendonça e Danni-Oliveira (2007).

A variável sazonalidade da precipitação (*pseason*) (Fig. 5) é um índice que fornece uma porcentagem da variabilidade da precipitação ao longo do ano, sendo que quanto maior a porcentagem maior será a variabilidade da precipitação (O'DONNELL e IGNIZIO, 2012). Ou seja, trata-se de uma medida da variação dos totais mensais de precipitação ao longo do ano, expressa em porcentagem. No gráfico de dependência parcial (Fig. 6) observa-se situações em que os valores do Coeficiente de Variação (CV) ultrapassaram 100%, ou seja, o desvio padrão da precipitação ao longo do ano excedeu a precipitação média, afirmando a desigualdade da distribuição de chuvas ao longo do ano.

Para as variáveis ligadas à temperatura, observa-se valores maiores para a região oeste da Caatinga, em regiões onde se encontra a porção do médio São Francisco. O clima do médio São Francisco é semiárido e árido, sendo o submédio a região mais seca da bacia, onde a precipitação média anual da região, em sua totalidade, varia entre 350mm e 850mm, e a temperatura possui uma média anual de 26°C (MMA, 2016). Os municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA apresentam os maiores níveis de insolação da região, 2.800 a 2.900 horas/ano, e a evaporação, também é alta na região, atingindo a média anual de 1.550mm (MMA, 2016).

Apesar de haver uma variação de temperaturas máximas e mínimas (Fig. 5) no norte da Caatinga, percebe-se que, no geral, as temperaturas ao norte são

majoritariamente mais elevadas, não sendo muito relevante na redução na diversidade, conforme mostrado pelo gráfico de dependência parcial (Fig. 6).

A variável da temperatura no período mais úmido (*twettest*) é uma informação útil ao examinar se as distribuições de espécies são afetadas por anomalias de temperaturas mais frias ao longo do ano (O'DONNELL e IGNIZIO, 2012), o que é confirmado pelo gráfico na Figura 6 ao revelar que a diversidade de espécies arbóreas na Caatinga volta a elevar-se ao superar os 25°C, não respondendo muito bem a baixas temperaturas.

A sazonalidade da temperatura (*tseason*) (Fig. 5) é a quantidade de variação de temperatura durante um determinado período com base na razão entre o desvio padrão das temperaturas médias mensais e a temperatura média mensal (O'DONNELL e IGNIZIO, 2012). Assim, como a temperatura da Caatinga tem elevada flutuação ao longo do ano, observa-se que houve situações onde os valores de CV ultrapassaram 100% (Fig. 6), ou seja, o desvio padrão da temperatura ao longo do ano excedeu a temperatura média.

No mapa de dependência parcial (Fig. 6), observa-se que a diversidade aumenta conforme os valores de CV aumentam, deixando claro então que algumas espécies podem ser favorecidas com a temperatura um pouco acima da média, geralmente de 25°C (TROVÃO et al., 2007). Essa observação pode ser corroborada observando a variabilidade da temperatura máxima (*tmax*), onde se observa a redução da diversidade de espécies arbóreas apenas após os 29°C.

As áreas de maior evapotranspiração coincidem com as de maiores temperaturas máximas no mapa da variação das variáveis ambientais (Fig. 5). As longas exposições das plantas à alta radiação solar associadas aos períodos prolongados de déficit hídrico sazonal resultam em elevadas temperaturas e conseqüentemente em uma elevada atividade fotossintética (SUDENE, 2021). No período seco, a Caatinga é comumente denominada “mata cinza” (língua indígena Tupi), devido às quedas das folhas como uma das estratégias de adaptação ambiental para reduzir a área de evapotranspiração (DE FARIAS et al., 2019).

Devido à evapotranspiração, a parte aérea das folhas podem estar alguns graus abaixo da temperatura do ar, no entanto, a temperatura das raízes é bem semelhante à do solo. Por isso, a temperatura do solo pode ser mais crítica para as plantas do que a temperatura do ar, visto que a temperatura do solo influi na germinação de sementes,

atividade de raízes e de microrganismos como fungos e bactérias promotoras de crescimento (DAUBENMIRE, 1974).

A temperatura do solo afeta a evaporação, e, de forma indireta, afeta também as condições hídricas. A quantidade de radiação absorvida é influenciada por diversos fatores, como a cor do solo, pois solos de cor clara absorvem menos radiação do que solos escuros, assim, a presença de queimadas também acaba por absorver mais radiação solar, pois torna a superfície mais escura (FERRI, 1979). O fluxo de calor no solo se dá por condução, sendo um fluxo lento, e quanto mais úmido o solo, mais lento será esse fluxo, porque o calor específico da água é maior do que o dos minerais do solo (LARCHER, 1986).

Para Taiz e Zeiger (2013), o estímulo térmico é provocado diretamente pela radiação solar, entretanto, também depende de outros fatores como a velocidade dos ventos e a umidade relativa. O material genético de cada espécie possui limites térmicos ótimos, máximos e mínimos, adequados à sua fenologia (ORTOLANI e CAMARGO, 1987). Também existem limites ótimos de umidade relativa do ar para o desenvolvimento ótimo das plantas (DAUBENMIRE, 1974).

Outras adaptações da vegetação também podem ser observadas como a presença de espinhos e folhas reduzidas, e a sincronia da estação chuvosa com a inflorescência e frutificação. É, portanto, uma estratégia, a emissão de folhas a partir de mínimas precipitações e o fechamento de ciclos reprodutivos em um curto espaço de tempo (FERNANDES e QUEIROZ, 2018). Sendo assim, a diversidade é notoriamente reduzida quando há perdas consideráveis de água das plantas para o ambiente (evapotranspiração), principalmente após os 1.500mm onde o alfa de Fisher é reduzido em 5 (Fig. 6).

Analisando as variáveis topográficas, observa-se que a região marcada no mapa (Fig. 5) como de elevada altitude (*elevation*) no sudeste da Bahia coincide com a área marcada com elevada precipitação no mês mais seco (*p_driest_month*), maiores precipitações anuais (*pannual*) e valores mais baixos de temperatura no mapa de temperatura máxima (*tmax*). Essa região compreende a Chapada Diamantina – BA, que se diferencia das regiões do seu entorno por apresentar áreas planálticas e serranas, com altitudes que variam de 500m a 1000m. Possui um clima tropical com precipitações que vão de 700mm a 1000mm anuais e 15° a 25°C de temperatura (MMA, 2010).

A inclinação e a rugosidade do terreno indicam que em áreas mais acidentadas há uma associação positiva com a diversidade alfa de Fisher, ou seja, com o aumento do ângulo de inclinação do terreno, há uma tendência do favorecimento da diversidade de algumas espécies. A essas variáveis, pode-se associar à composição dos solos, visto que esta é alterada conforme a inclinação, altitude e rugosidade, alterando também a adaptação das plantas. Os fatores edáficos são fundamentais para explicar muitos atributos e padrões ecológicos da floresta, principalmente relacionados à produtividade e diversidade nas florestas tropicais (HOFHANSL et al., 2020; HOMEIER e LEUSCHNER, 2021).

Na Caatinga há uma variação de relevos que vão de plano à suave ondulado e que influenciam a formação de pelo menos 11 classes de solo (RADAMBRASIL, 1983; CAVEDON, 1986), o que também garante a formação de um mosaico de disponibilidade hídrica e fertilidade do solo (LINS, 1989). Associada às variações naturais, há também ações antrópicas (pecuária e agricultura de subsistência) instaladas nos ambientes mais favoráveis (SAMPAIO e MAZZA, 2000). Essa heterogeneidade ambiental está relacionada às características distintas encontradas em cada unidade de paisagem, tornando-se uma das mais importantes forças responsáveis pela distribuição das espécies (FORMAN, 1999).

As variáveis de aspecto norte e leste (*northness* e *eastness*) não se mostraram como determinantes de diversidade de espécies arbóreas na Caatinga, revelando que, havendo ou não incidência direta do sol sob a superfície de uma montanha, não haverá influências diretas sob a diversidade.

Trabalhos revelam maior diversidade em regiões florestais de baixa altitude, visto que as populações ficam isoladas pela ação da variação de altitude (ECHTERNACHT et al., 2011; ALLENDORF, 2013). A altitude interfere na diversidade genética de várias espécies (LI et al., 2013; RUSSELLO et al., 2015; MEENA et al., 2016; FILATOV et al., 2016), fato que pode ser corroborado no gráfico de dependência parcial (Fig. 6) para a variável altitude, que mostra que, ao reduzir a altitude, há uma redução considerável da diversidade. Fazendo uma associação com o mapa de inclinação do terreno (*slope*) (Fig. 5), ao considerar uma área com grandes variações de inclinação, a área mais baixa será a de maior diversidade, e quanto maior essa variação de inclinação mais áreas de baixada serão formadas, portanto maior a diversidade nesses locais.

Nas áreas de baixadas há o acúmulo de sedimentos carregados pelas chuvas, maior tendência de acúmulo de precipitação e maior umidade relativa (DVORETT et al., 2012; JACKSON et al., 2014). Dependendo da sua proximidade com sistemas fluviais, rios e da sua carga de sedimentos e topografia, as florestas elevam sua diversidade (GOMES e MAGALHÃES JÚNIOR, 2017). O escoamento representa a contribuição de massa e energia para o sistema de canais e alimenta os processos fluviais dos rios de terras secas (GRAF, 1988). De modo geral, o semiárido possui como característica marcante comum a translocação de grandes quantidades de sedimentos durante períodos chuvosos que ocorrem com baixa frequência (FRYIRS et al., 2007).

O estudo realizado por Da Fonseca (2003) apontou as áreas prioritárias para a conservação da diversidade biológica da Caatinga, adaptando um mapeamento realizado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2002). A ação principal recomendada para a maioria (54,8%) das áreas prioritárias é a proteção integral. Esta ação foi recomendada para 81% das áreas de extrema importância, 75% das áreas de muito alta importância e 72% das áreas de alta importância. Algumas das regiões apontadas no estudo mencionado como de extrema prioridade para conservação coincidiram com as áreas de baixa diversidade definidas pelo presente estudo, por exemplo, os municípios baianos: Parque Nacional Serra das Confusões; município de Santo Sé; a região do Médio São Francisco; município de Ibotirama; Morro do Chapéu; Bom Jesus da Lapa; Milagres e Senhor do Bonfim.

O Relatório de Atualização e Complementação do Diagnóstico do Meio Biofísico da BHSF (Bacia Hidrográfica do São Francisco) (MMA, 2016) revela a presença de diversos fragmentos com áreas antropizadas pela agropecuária, com regiões com elevado número de assentamentos, áreas coincidentes ou em borda de duas áreas consideradas como alta e muito alta prioridade de preservação.

O padrão de diversidade de espécies arbóreas encontrado neste estudo se enquadra bem no conceito de *nestedness* (aninhamento), que é esperado em biotas distribuídas ao longo de um gradiente de condições ambientais, onde há locais que abrigam subgrupos de espécies que ocorrem nos ambientes menos restritivos e, dessa forma, com maior riqueza de espécies (ATMAR e PATTERSON, 1993; BIGARELLA et al., 1994).

Os graus de perturbação estão relacionados com a proximidade de grandes centros urbanos, medidas de gestão das florestas e estabelecimento de áreas protegidas (ANTONGIOVANNI et al., 2020). Além disso, Antongiovanni et al. (2018)

estimaram que 75% da vegetação da Caatinga está a menos de 1km de distância da borda, o que favorece o aumento das perturbações, por expor a vegetação aos efeitos de borda.

É fato que os elementos abióticos de temperatura e precipitação, quando somados às práticas destrutivas do homem, são causadores de sérias transformações negativas no ambiente. Áreas com baixas densidades de população humana na região e ausência de estradas conferem um valor particular na conservação (GALVÍNCIO et al., 2016).

5.2. Limitações do estudo: Erros e viés na amostragem

Ainda que sendo utilizadas uma grande variedade de fontes de dados e ferramentas analíticas para desenvolver o mapa preditivo de distribuição espacial de diversidade em escala de todo o domínio fitogeográfico, quando se considera a disponibilidade de dados e cobertura há uma certa carência quando se trata da caatinga, apresentando-se como uma limitação neste estudo.

Algumas áreas do mapa de distribuição de diversidade ficaram descoloridas (centro sul Baiano, município de Santo Sé e Morro do Chapéu-BA), considerando as diferenças de altitude, relevo, clima e povoamento desses locais em particular, onde se localiza a região da Chapada Diamantina – BA, como anteriormente citada. Uma investigação detalhada desses fatores localmente seria fundamental, pois poderia identificar outras funções ecológicas do conjunto de informações edáficas para a diversidade de espécies arbóreas na Caatinga (MARCA-ZEVALLOS et al., 2022; TERRA et al., 2018).

No estudo de (FERNANDES e QUEIROZ, 2018), na região da Chapada Diamantina – BA, em altitudes superiores a 900 metros associados a afloramentos de quartzitos e arenitos, onde ocorrem os campos rupestres, foi encontrada elevada diversidade de espécies, estimada em mais de 4.000 angiospermas, constituindo um outro tipo de vegetação, reforçando a necessidade de estudos localizados.

Ainda são encontradas dificuldades ao utilizar dados de inventário coletados de forma diferente em cada localidade, principalmente associados a dados taxonomicamente confiáveis. Como resultado, algumas espécies comuns no domínio fitogeográfico podem não sobressair, fazendo com que o tipo de vegetação não seja igualmente representado, direcionando os resultados a elevados desvios padrão ou

estimativas tendenciosas de diversidade para cada tipo de floresta ou região biogeográfica (SLIK et al., 2009).

Embora as parcelas estivessem bem distribuídas espacialmente para o domínio fitogeográfico, algumas eram próximas umas das outras. Além disso, algumas regiões ou áreas continham mais parcelas e indivíduos amostrados, resultando em diferentes níveis de diversidade capturados em cada local. Embora tenham sido feitas tentativas para corrigir esse tipo de viés na amostragem, é provável que eles tenham influenciado, pelo menos parcialmente, os resultados. Em meta-análises como esta, o ideal seria realizar a amostragem em um layout de parcelas padronizado em combinação com dados ambientais de alta resolução (por exemplo, GERSTNER et al., 2017). No entanto, essa ainda não é uma realidade na Caatinga, visto a baixa disponibilidade de dados de inventário e dados climáticos, além da confiabilidade e resolução (FICK e HIJMANS, 2017).

Tanto a riqueza amostral como os estimadores de riqueza são fortemente influenciados pelas espécies mais raras, que são precisamente as espécies mais difíceis de identificar no campo. Esta é outra forma de dizer que a riqueza tem uma elevada incerteza (ROSWELL et al., 2021). Na verdade, muitas vezes esta incerteza não é superada na estimativa e comparação da diversidade comunitária a partir de amostras. Como a riqueza é muito sensível ao esforço amostral e à abundância relativa, mesmo fazendo uso da melhor forma de distribuir as parcelas e buscando os melhores estimadores de riqueza assintótica, não é possível prever com segurança a verdadeira diversidade da comunidade (JOST, 2007).

A análise realizada em relação aos padrões de diversidade também necessita de classificações precisas de cobertura e uso da terra, que podem ocasionalmente estar desalinhados com as parcelas inventariadas (SCHMIT et al., 2006). Também foi realizada a correção dos nomes científicos.

Finalmente, são necessários estudos mais diretos sobre o conjunto de forças ecológicas que atuam para definir padrões de diversidade de espécies arbóreas para esclarecer essas respostas.

5.3. Degradação ambiental e mudanças climáticas

Embora este estudo não tenha como objetivo modelar os possíveis impactos das alterações climáticas, é preocupante notar que diversas variáveis climáticas fortemente associadas à diversidade de árvores podem sofrer fortes alterações em cenários

considerados. Mudanças induzidas pelo clima na frequência de eventos anômalos, como o aumento da temperatura, já são observadas, em que se estima que o aquecimento global atinja 1,5°C entre 2030 e 2052, caso continue a aumentar no ritmo atual e uma diminuição dos níveis de precipitação (IPCC, 2018), o que pode alterar a salinidade do solo (KNOWLES e CAYAN, 2002; GONDIM et al., 2010).

Na Caatinga há uma elevada variabilidade do clima aliada a influências de recorrentes eventos climáticos que ocorrem em proporções extremas (El Niño/La Niña) (GUERREIRO et al., 2013; MARENGO et al., 2018). Em algumas áreas mais suscetíveis aos riscos impostos pelas alterações climáticas, como o domínio Caatinga no Nordeste do Brasil, a aridez pode ser intensificada, o que acarreta em processo de desertificação e aumento da salinidade do solo (MARENGO et al., 2016).

Com a degradação do ambiente, a Caatinga se torna susceptível à desertificação (LANDIM et al., 2011), processo que ocorre em função da degradação da terra em áreas áridas, semiáridas e subúmidas secas, como resultado, principalmente, dos fatores climáticos e das ações antrópicas (GALINDO et al., 2008). Cerca de 62% das áreas susceptíveis à desertificação no Brasil estão localizadas em áreas originalmente de Caatinga, mas que atualmente já se encontram bastante alteradas. Mesmo diante desse cenário, apenas aproximadamente 9% do domínio fitogeográfico está assegurado por unidades de conservação, sendo que somente 2% são unidades de proteção integral que são mais restritivas às ações antrópicas (IBGE, 2019).

Ainda de acordo com projeções climáticas globais (IPCC AR5), há indícios de que ainda no século XXI, as áreas de vegetações espinhosas e áreas não vegetadas, que correspondem às fisionomias mais secas da Caatinga, podem aumentar de 55% para até 87% da região (IPCC, 2018). Neste cenário, ocorreria uma diminuição de 30% a 50% da biomassa até o final do século (CASTANHO et al., 2020).

Com o tempo, as condições climáticas tendem a mudar mais rapidamente do que o solo, e as espécies herbáceas de vida curta podem ter uma renovação mais rápida das espécies locais do que as plantas lenhosas de vida longa. Além disso, espera-se que as espécies herbáceas de vida curta se adaptem mais rapidamente do que as espécies lenhosas de crescimento mais lento (SMITH e DONOGHUE, 2008). Assim, a heterogeneidade no crescimento de plantas provavelmente reflete uma variedade de fatores ambientais em diferentes escalas de tempo espaciais ou temporais (MORO et al., 2015).

Seyffarth e Rodrigues (2017) destacaram que o futuro da distribuição da cobertura vegetal desse domínio fitogeográfico poderá ser afetado pela combinação dos impactos da mudança climática e da mudança no uso da terra, levando a crer que tais alterações poderão ter impacto na biodiversidade. Dessa forma, podemos considerar que a biodiversidade da Caatinga pode estar exposta às secas, no presente, devido ao processo de desertificação e poderá estar ainda mais suscetível, no futuro, com o acúmulo dos impactos da desertificação e das mudanças climáticas (SEYFFARTH e RODRIGUES, 2017; CASTANHO et al., 2020).

Dada a enorme diversidade de espécies desse domínio fitogeográfico, a compreensão dos efeitos das mudanças climáticas nos padrões de diversidade é crítica e deve ser analisada o mais rápido possível em escalas mais detalhadas. Visto que, mesmo que a vegetação dessa região apresente estratégias de adaptação ambiental, alguns indivíduos poderão não resistir às condições de seca e morrer, reduzindo a diversidade. Esse tipo de estudo é fundamental para definir as áreas prioritárias para conservação, analisando e buscando medidas de mitigação para a interação das mudanças climáticas e do uso da terra, para estabelecer medidas de prevenção de ameaças à biodiversidade (BARBOSA e GOMES FILHO, 2022).

Sendo assim, a compreensão de tais propriedades em relação às espécies locais e do impacto concomitante na biodiversidade local é crítica para informar a estratégia de conservação (MORO et al., 2015).

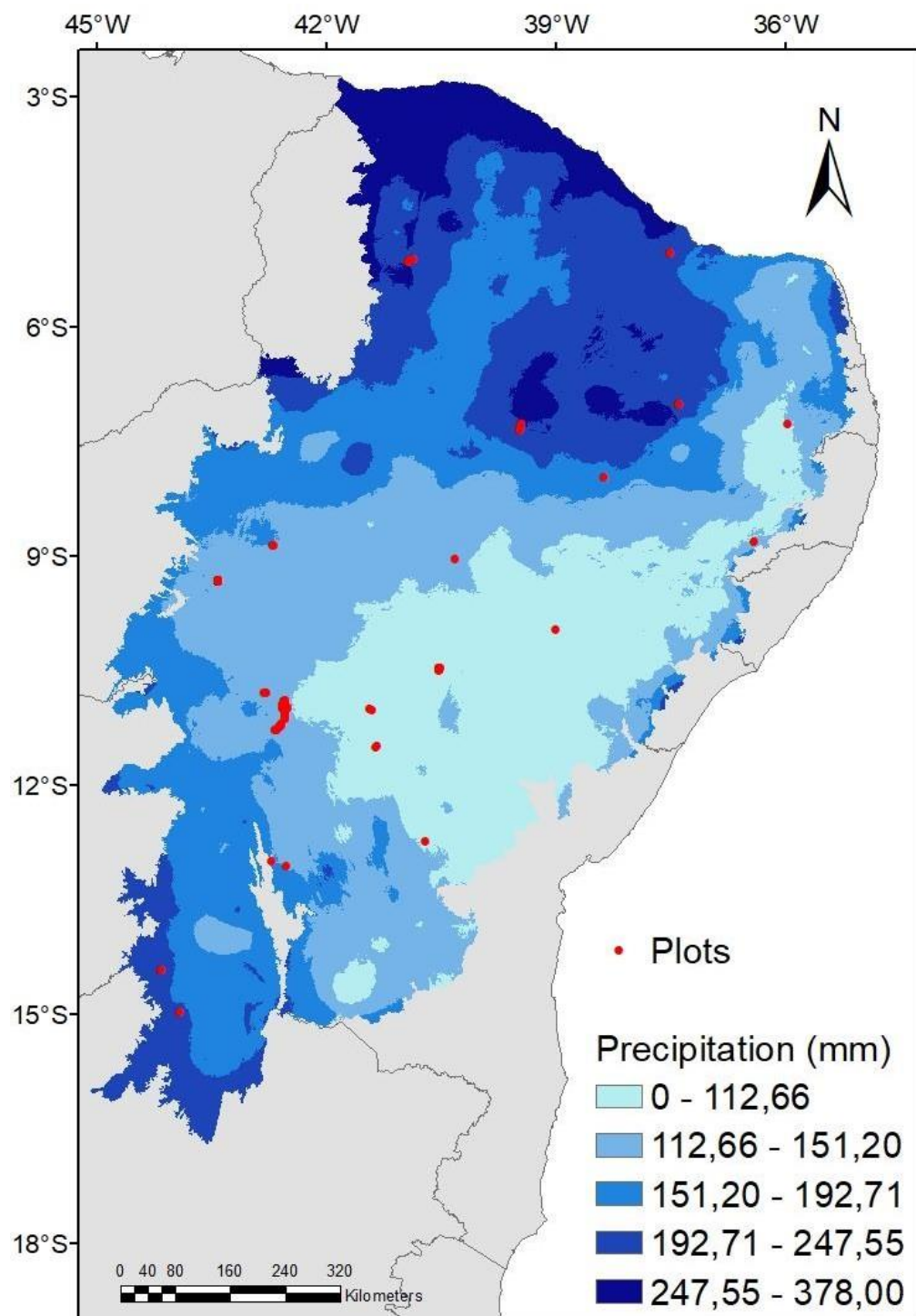
6. CONCLUSÕES

A pesquisa revelou que a diversidade das espécies arbóreas na Caatinga é significativamente influenciada pela interação complexa entre fatores climáticos e topográficos ao longo desse domínio fitogeográfico. Especificamente, as variáveis climáticas associadas à precipitação emergiram como preditores robustos dos padrões de diversidade observados. Esses resultados destacam a importância crucial ao considerar não apenas os fatores climáticos, mas também a topografia, na compreensão da distribuição e da diversidade das espécies arbóreas nesse ecossistema único. Essa abordagem integrada é fundamental para informar estratégias eficazes de conservação e manejo da biodiversidade na Caatinga, especialmente diante dos desafios impostos pelas mudanças ambientais globais.

7. APÊNDICES

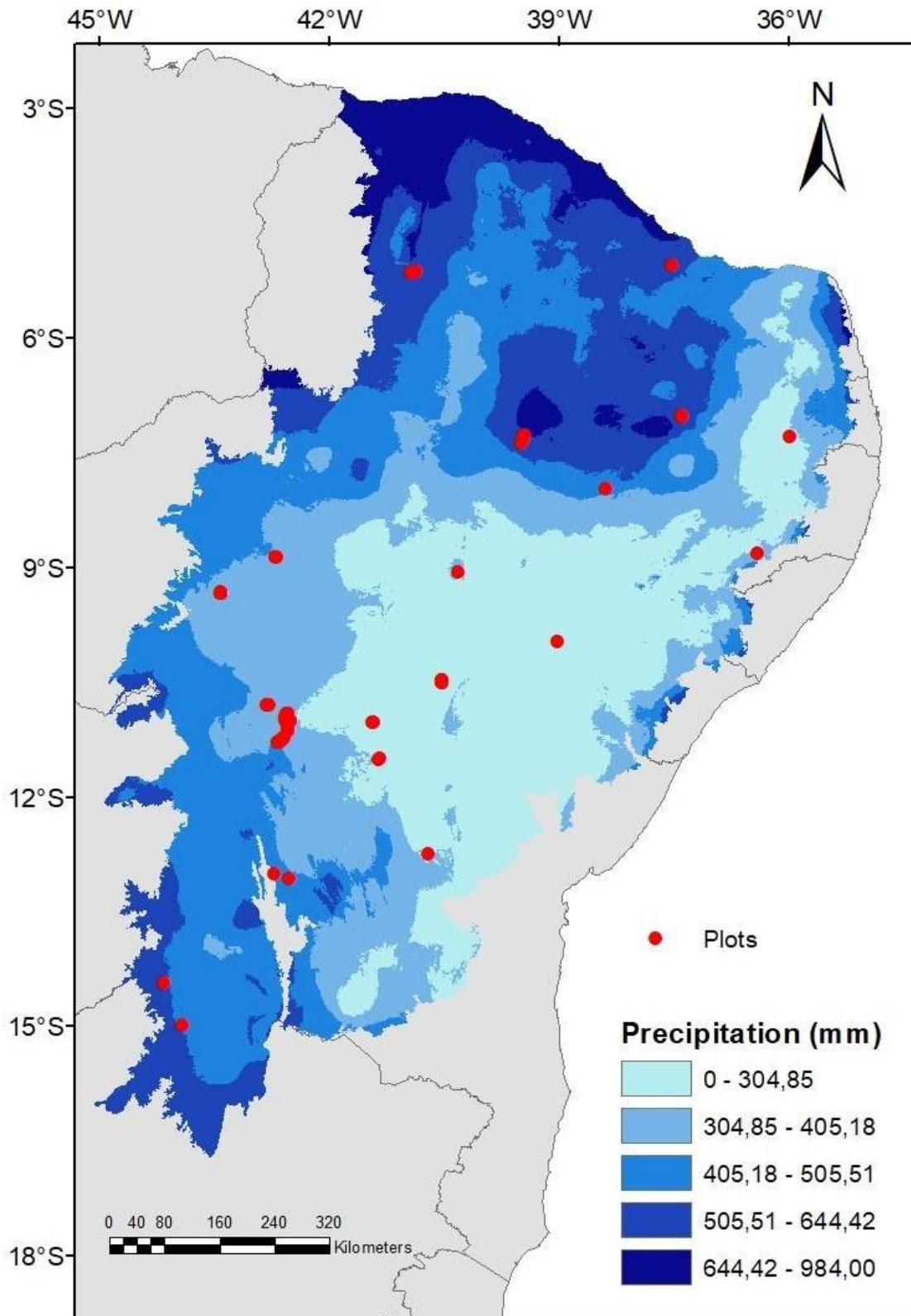
APÊNDICE A

Expressão da variável Precipitação do Mês Mais Úmido ao longo de todo o domínio fitogeográfico da Caatinga.



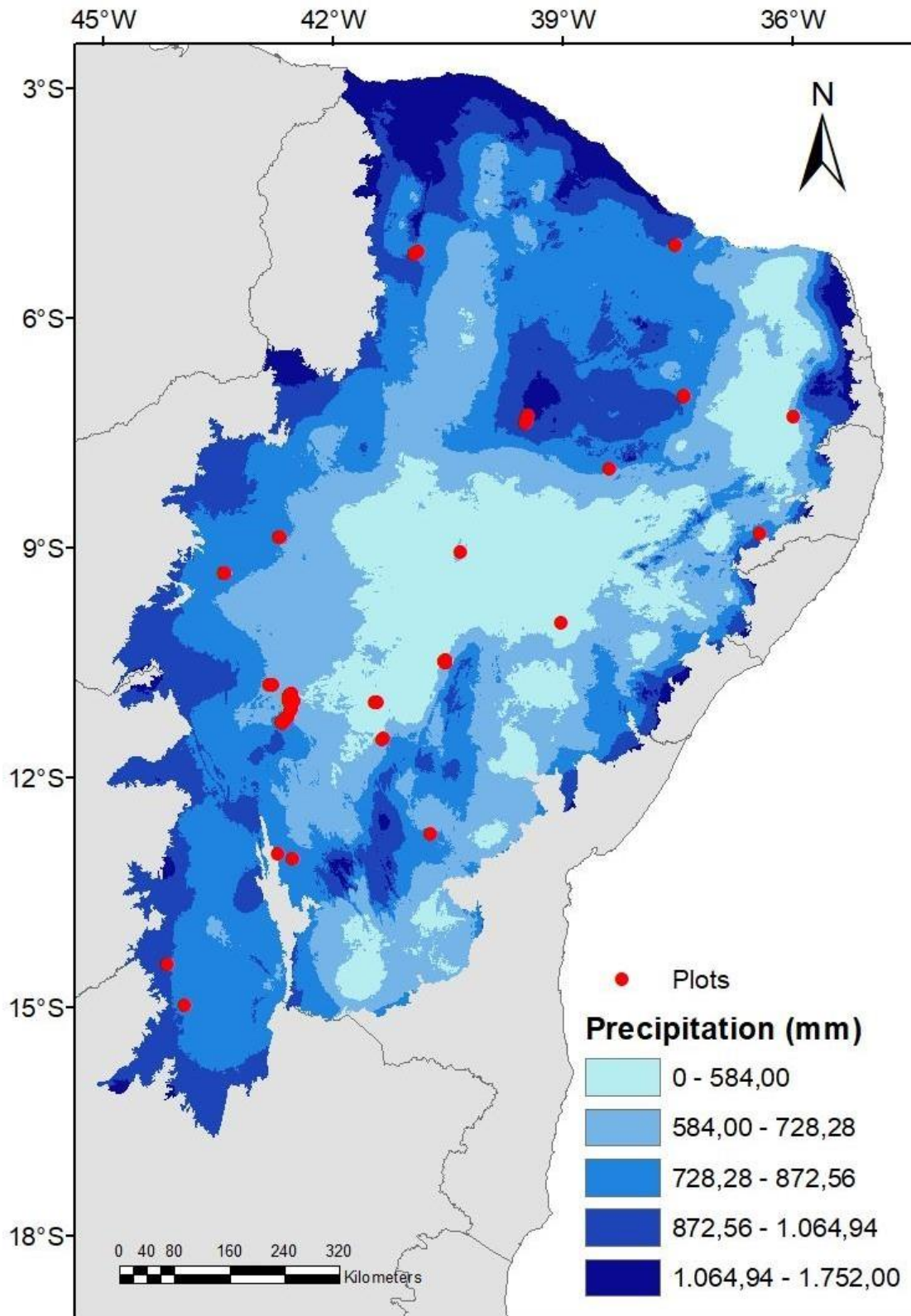
APÊNDICE B

Expressão da variável Precipitação no Período mais úmido ao longo de todo o domínio fitogeográfico da Caatinga.



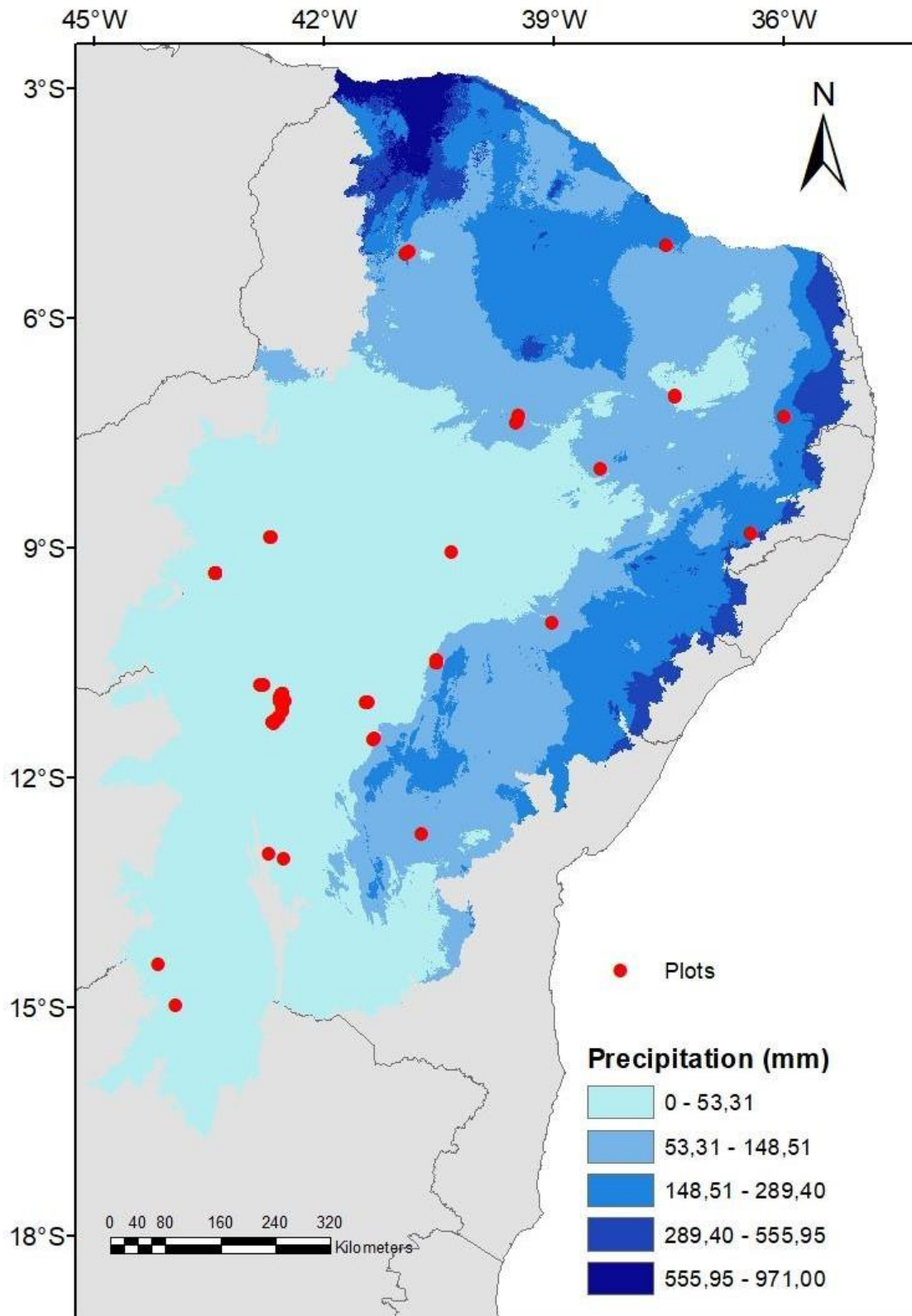
APÊNDICE C

Expressão da variável Precipitação Anual ao longo de todo o domínio fitogeográfico da Caatinga.



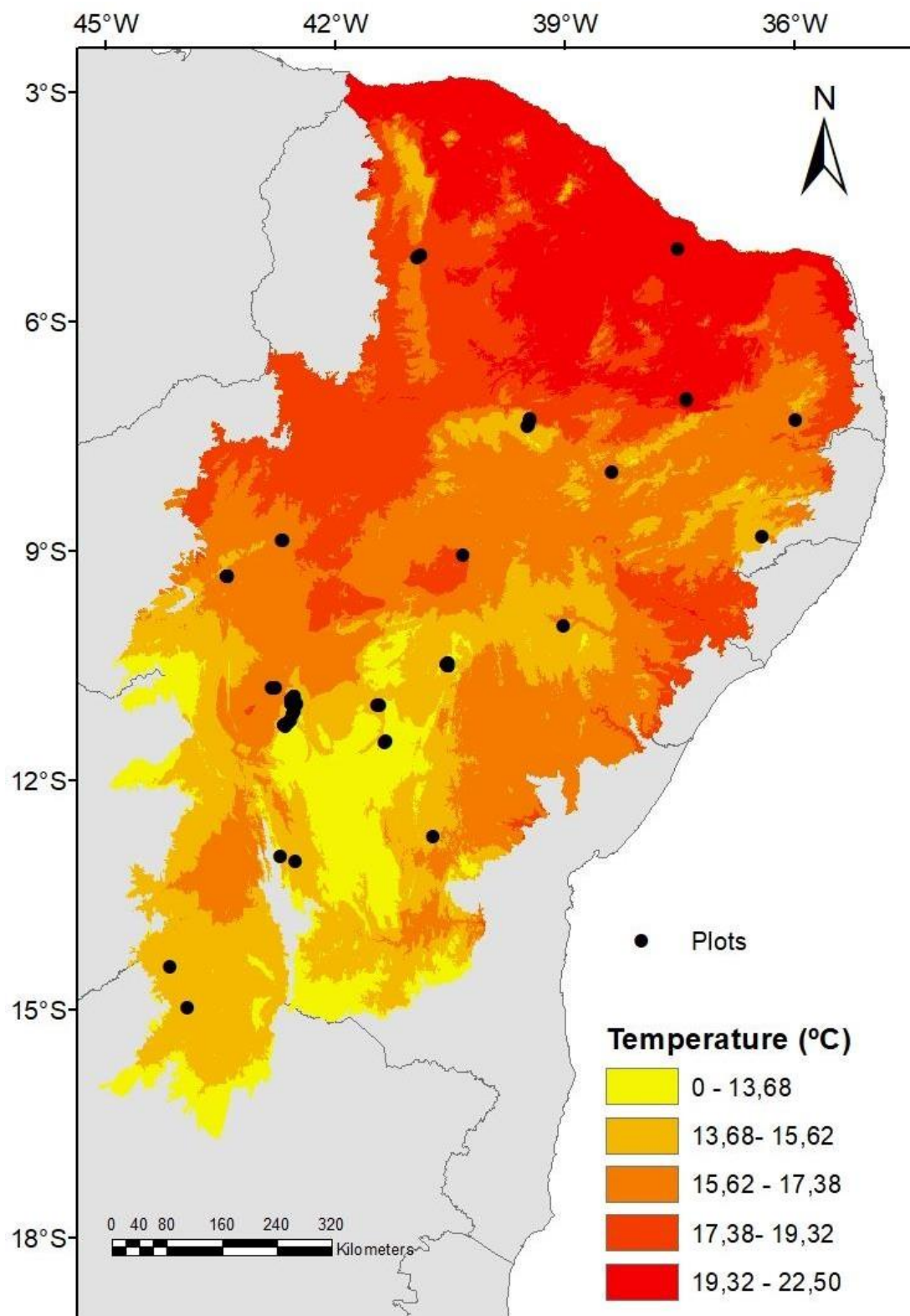
APÊNDICE D

Expressão da variável Precipitação do Quadrimestre Mais Frio ao longo de todo o domínio fitogeográfico da Caatinga.



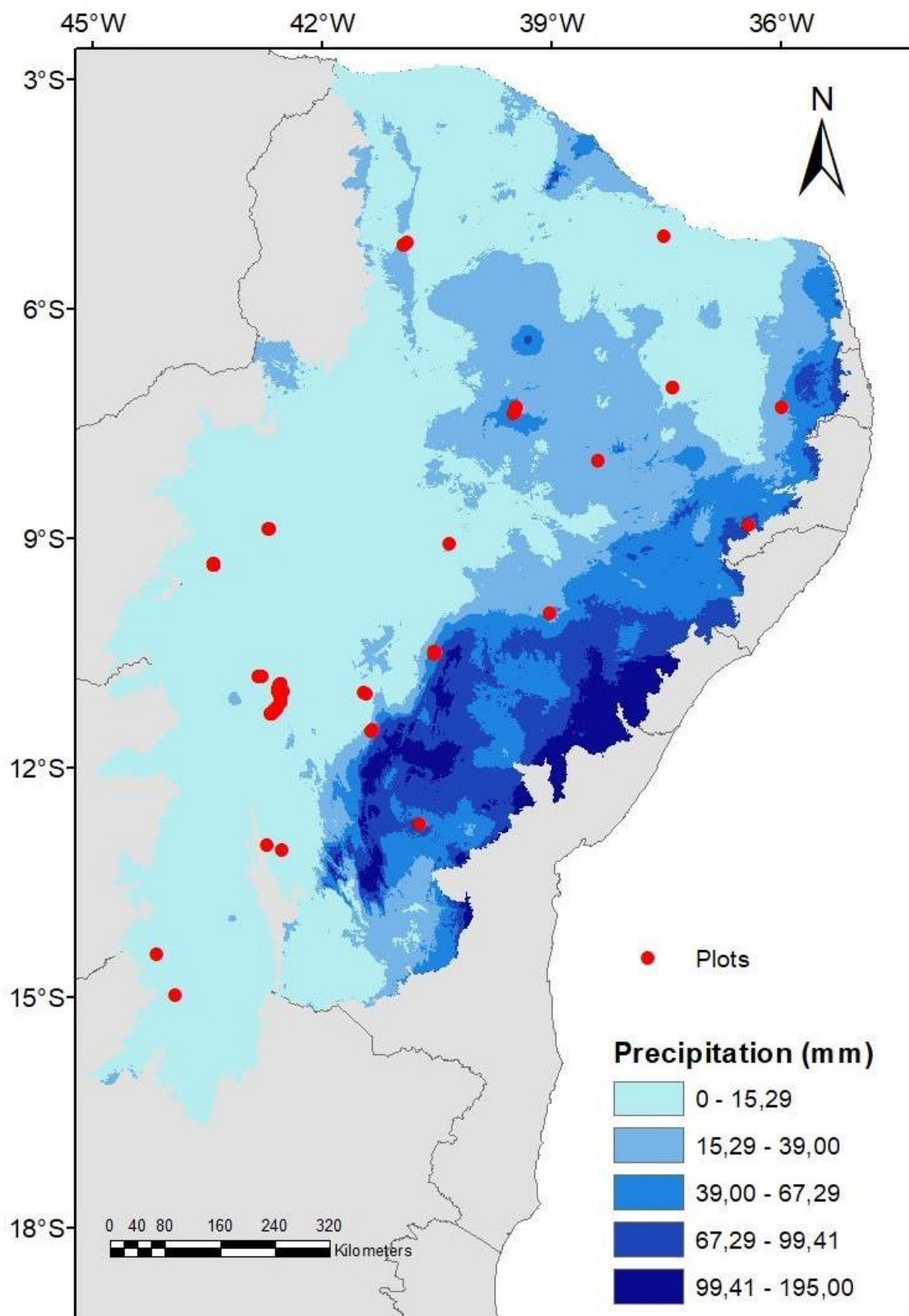
APÊNDICE E

Expressão da variável Temperatura Mínima ao longo de todo o domínio fitogeográfico da Caatinga.



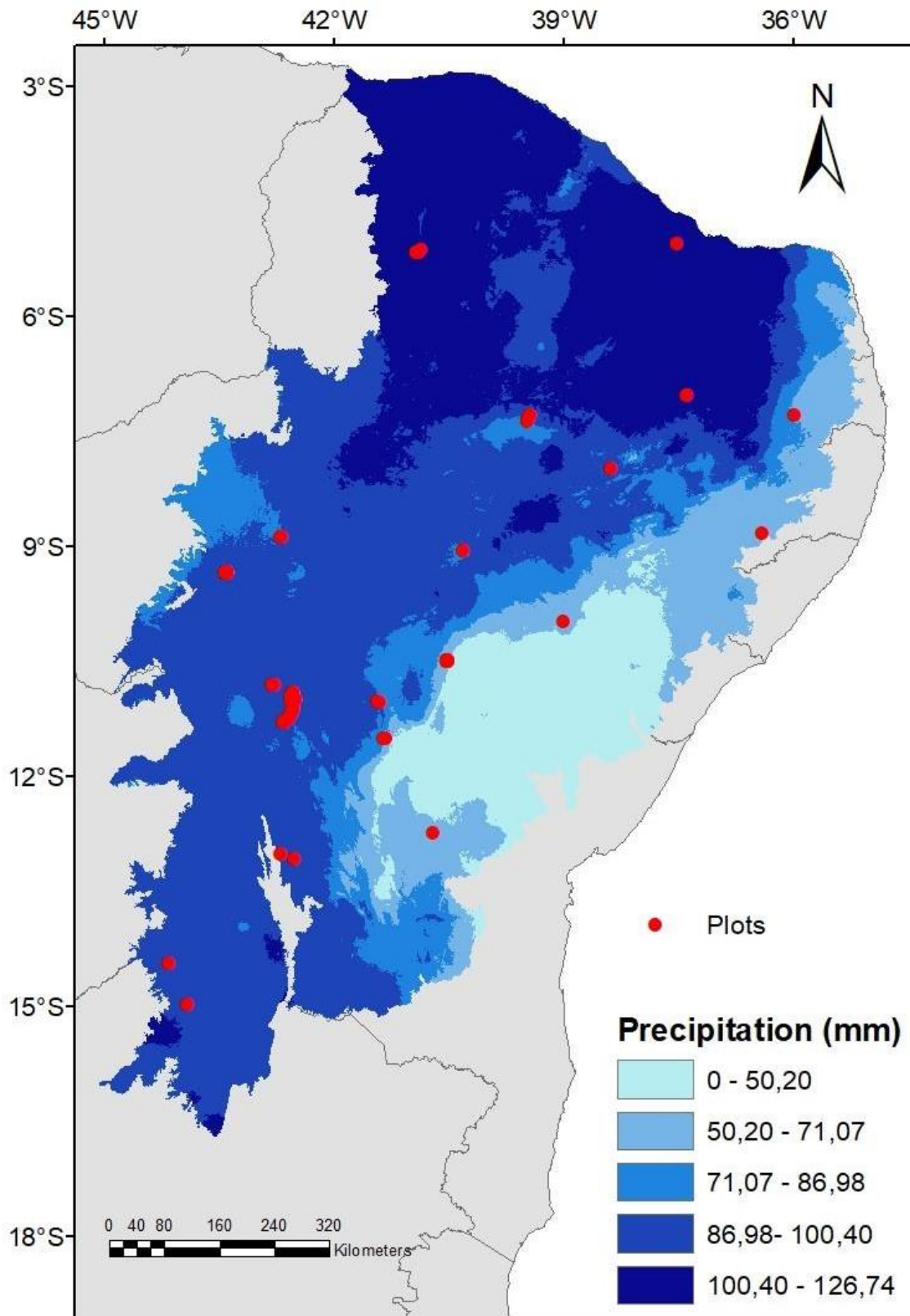
APÊNDICE F

Expressão da variável Precipitação do Período Seco ao longo de todo o domínio fitogeográfico da Caatinga.



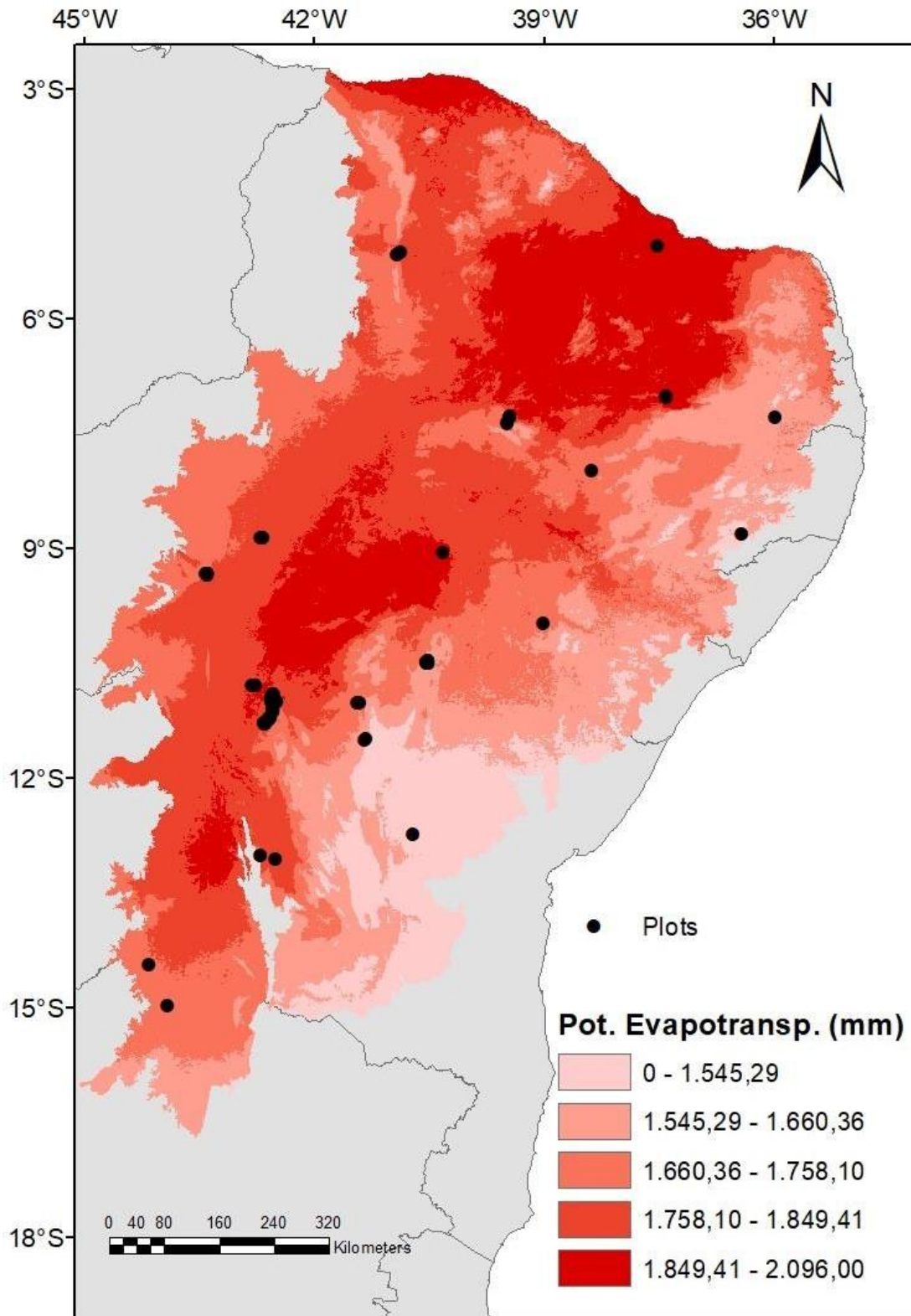
APÊNDICE G

Expressão da variável Sazonalidade da Precipitação ao longo de todo o domínio fitogeográfico da Caatinga.



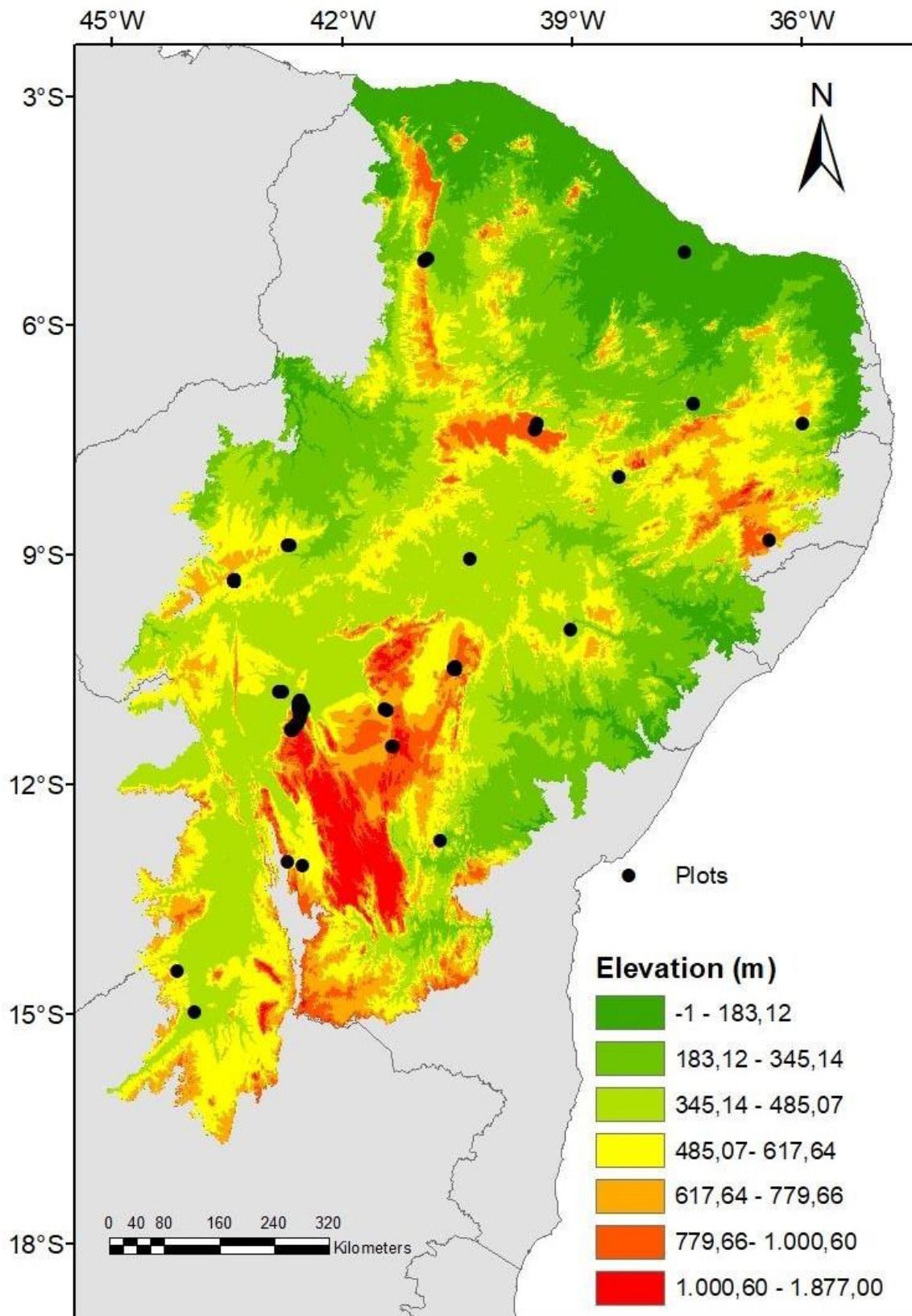
APÊNDICE H

Expressão da variável Evapotranspiração Potencial ao longo de todo o domínio fitogeográfico da Caatinga.



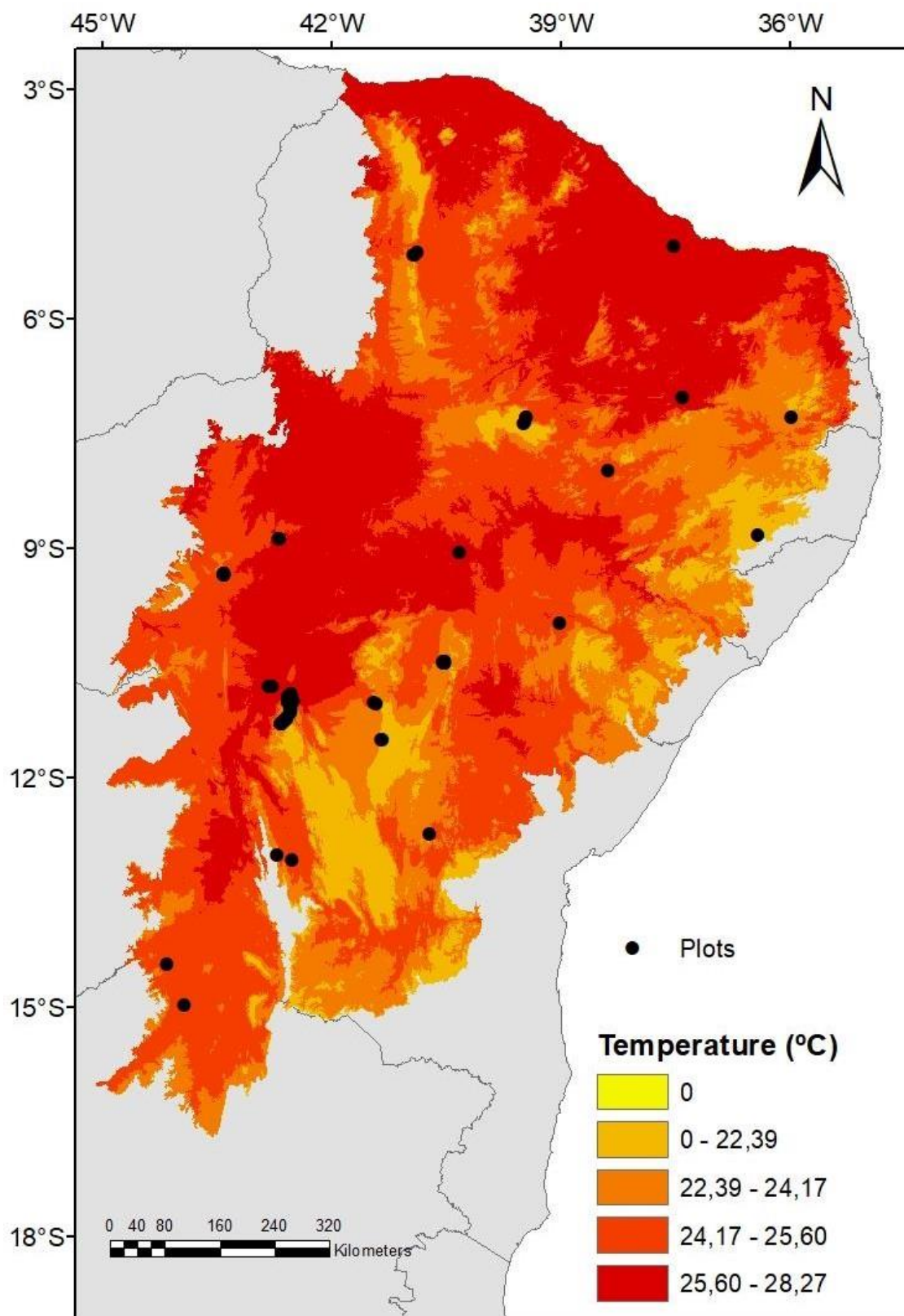
APÊNDICE I

Expressão da variável Elevação ao longo de todo o domínio fitogeográfico da Caatinga.



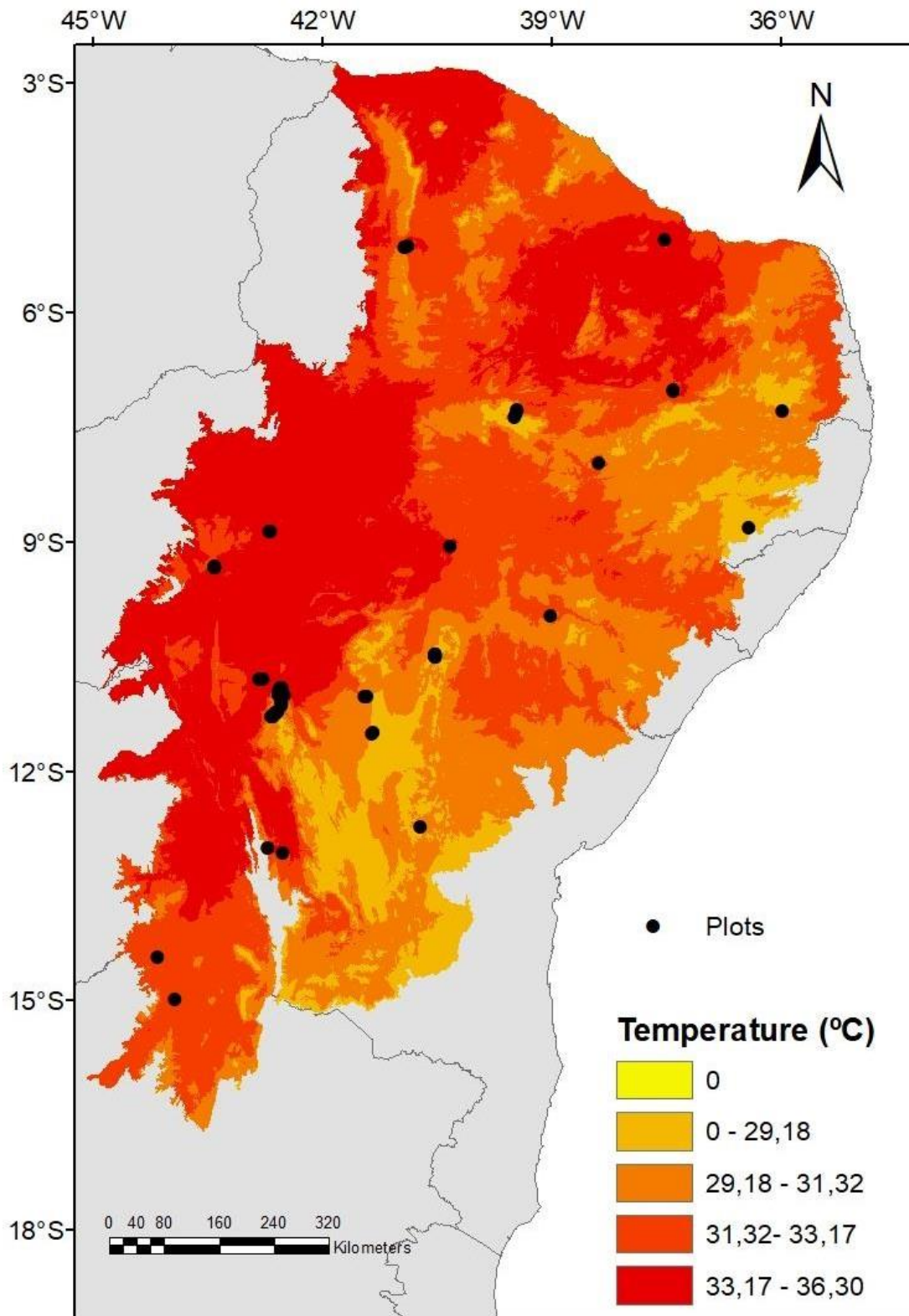
APÊNDICE J

Expressão da variável Temperatura do Período Mais Úmido ao longo de todo o domínio fitogeográfico da Caatinga.



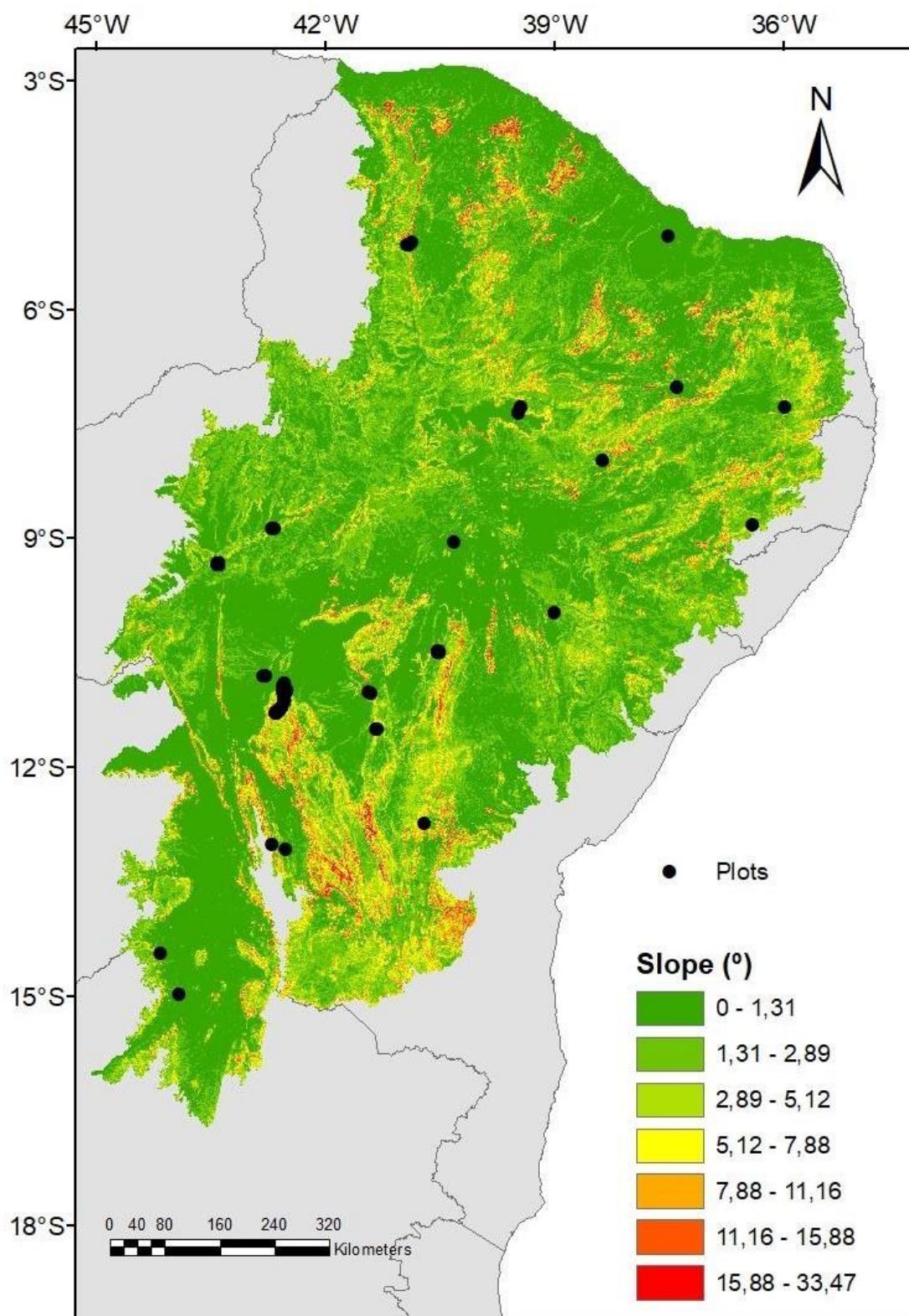
APÊNDICE K

Expressão da variável Temperatura Máxima ao longo de todo o domínio fitogeográfico da Caatinga.



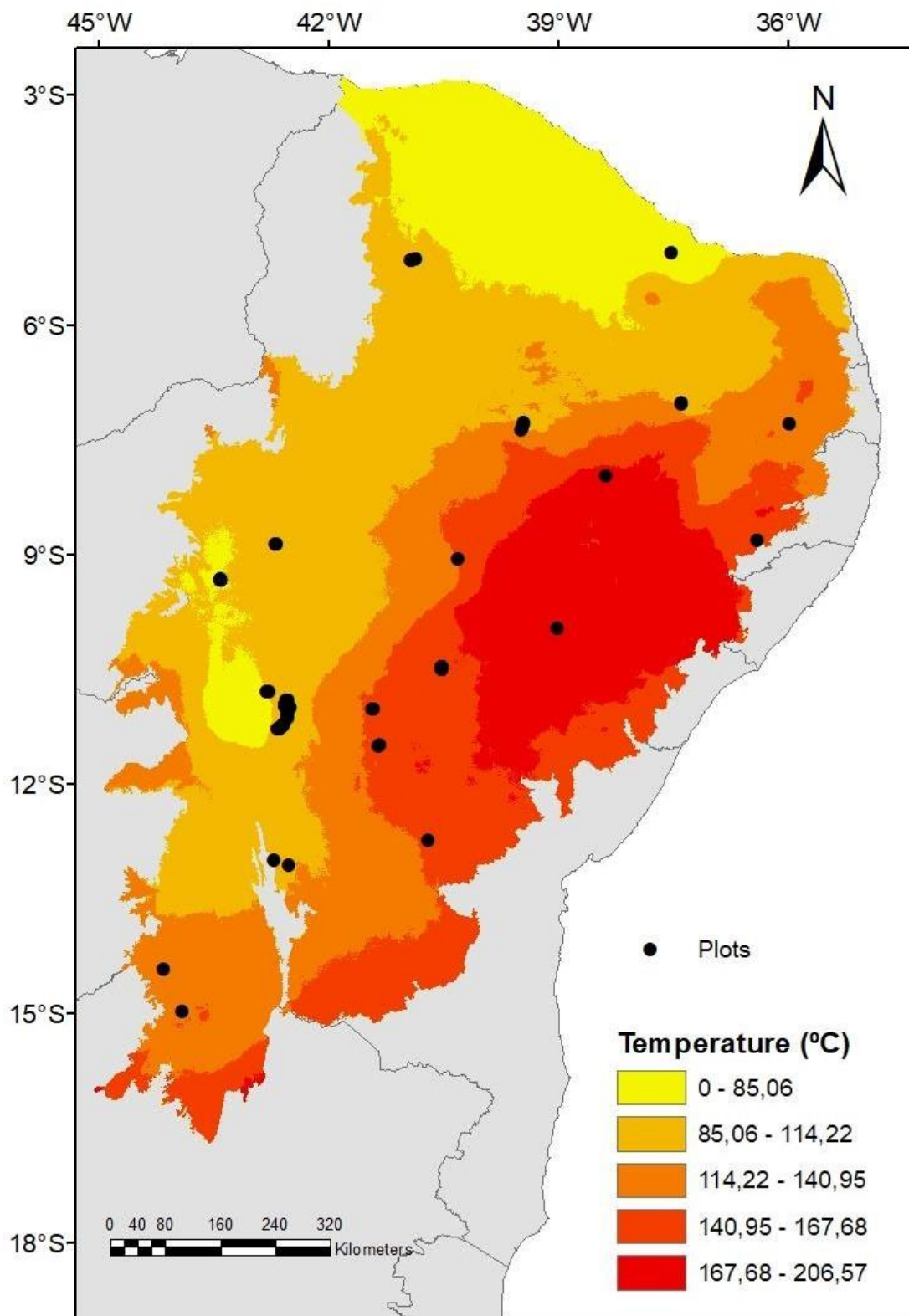
APÊNDICE L

Expressão da variável Inclinação ao longo de todo o domínio fitogeográfico da Caatinga.



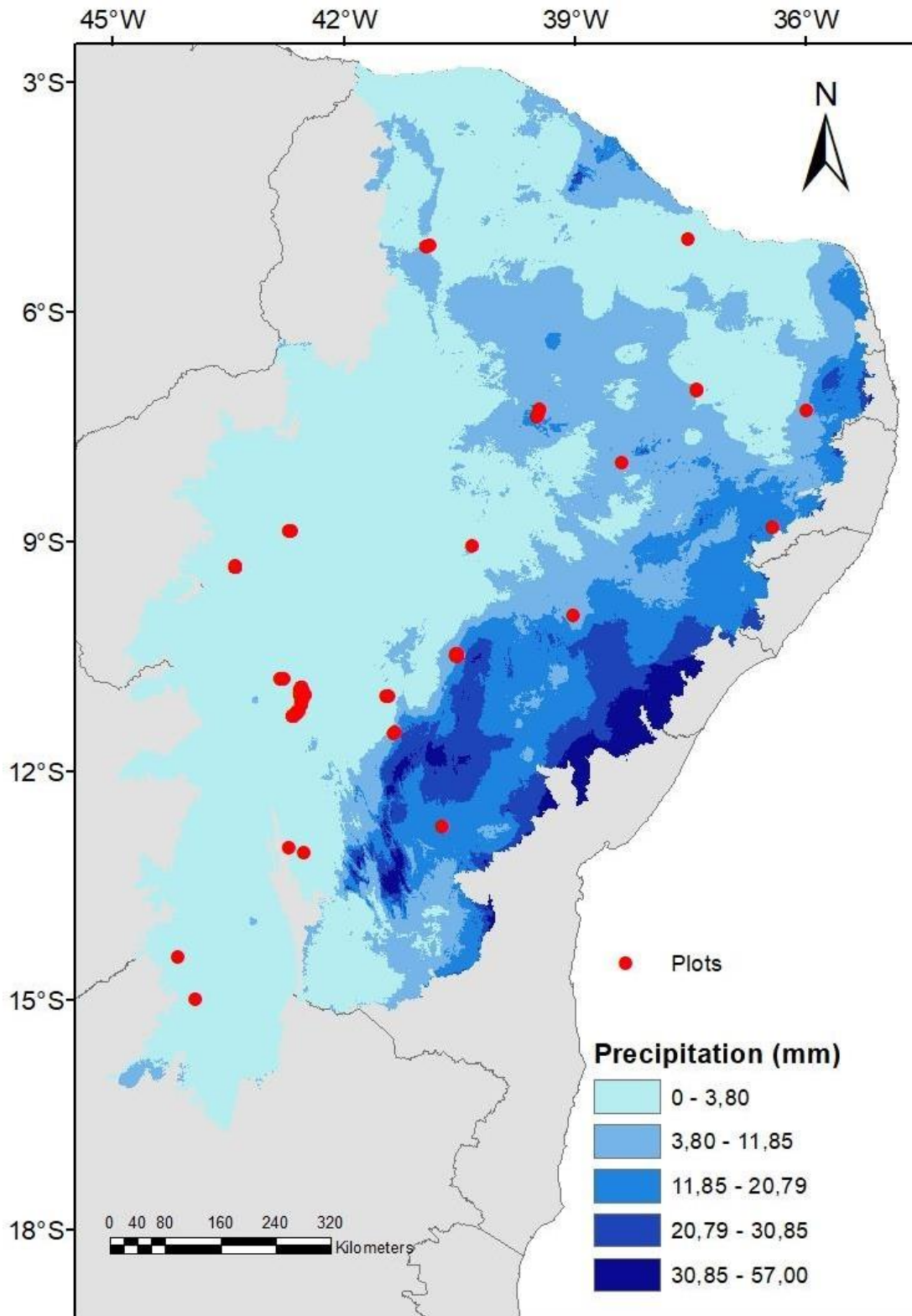
APÊNDICE M

Expressão da variável Sazonalidade da Temperatura ao longo de todo o domínio fitogeográfico da Caatinga.



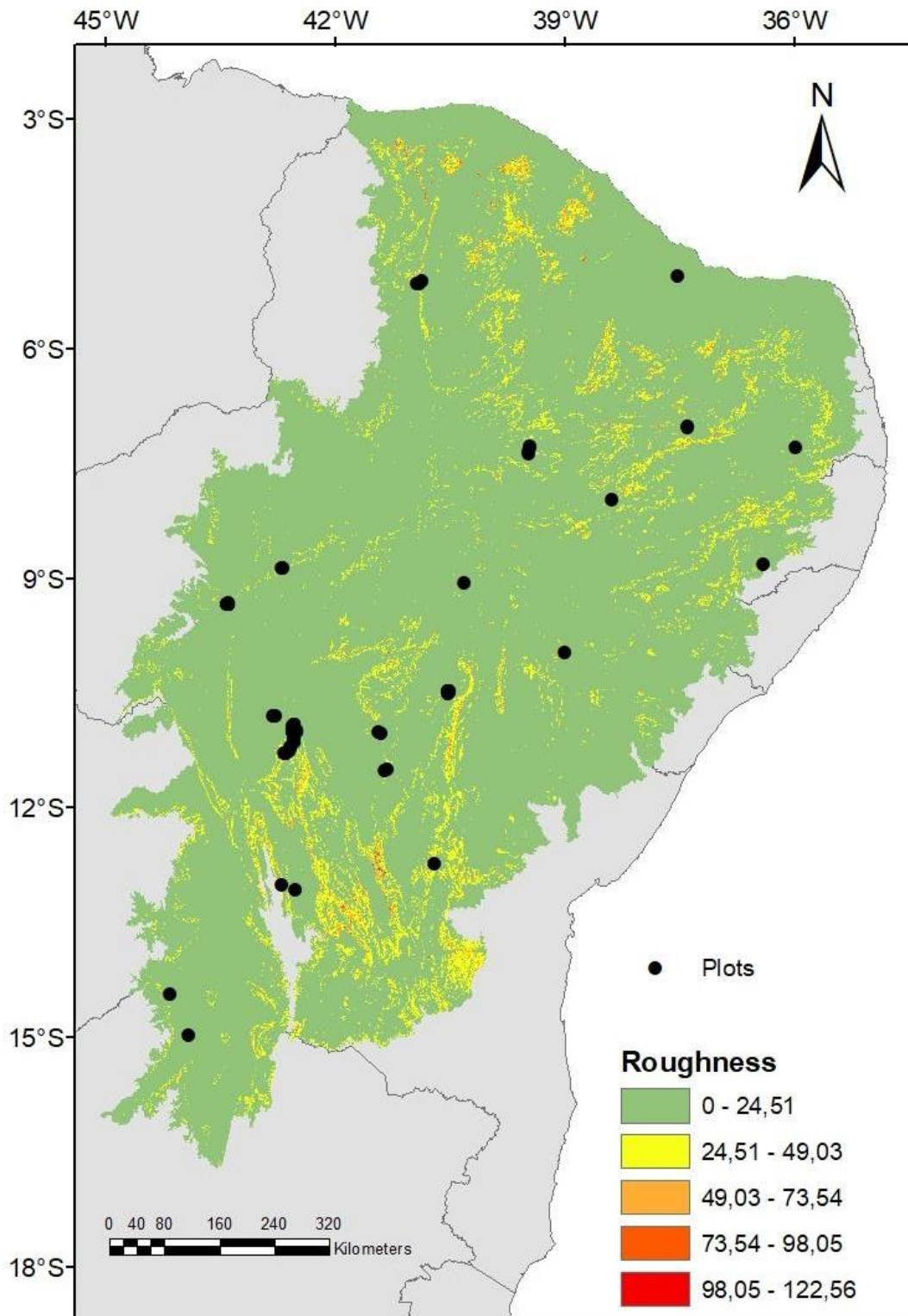
APÊNDICE N

Expressão da variável Precipitação do Mês Mais Seco ao de todo o domínio fitogeográfico da Caatinga.



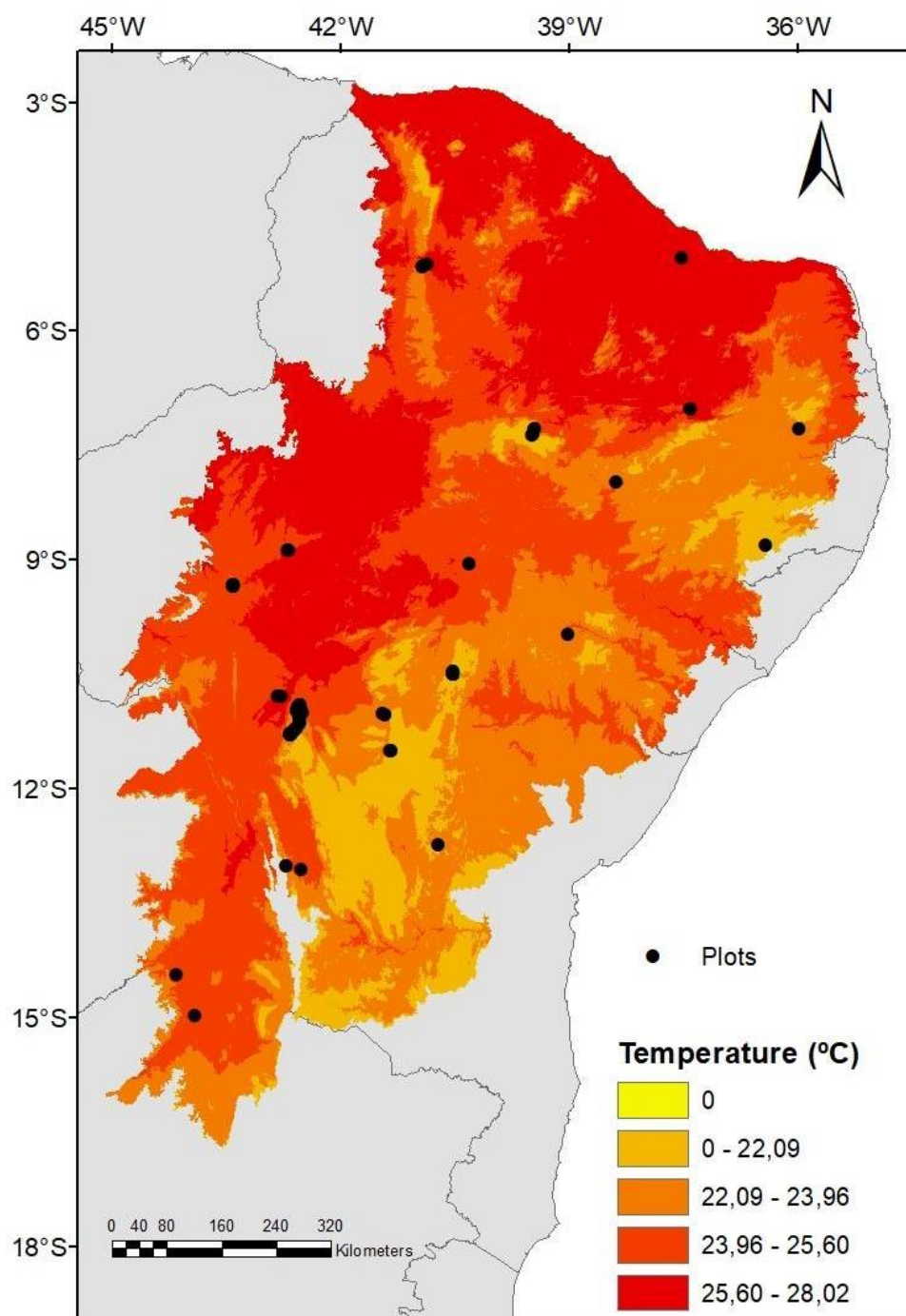
APÊNDICE O

Expressão da variável Rugosidade ao longo de todo o domínio fitogeográfico da Caatinga.



APÊNDICE P

Expressão da variável Temperatura Anual ao longo de todo o domínio fitogeográfico da Caatinga.



8. REFERÊNCIAS

ALI, S.; GANAI, B. A.; KAMILI, A. N.; BHAT, A. A.; MIR, Z. A.; BHAT, J. A.; MIR, Z. A.; BHAT, J. A.; TYAGI, A.; ISLAM, S. T.; MUSHTAQ, M.; YADAV, P.; RAWAT, S.; GROVER, A. Pathogenesis-related proteins and peptides as promising tools for engineering plants with multiple stress tolerance. **Microbiological research**, v. 212, p. 29-37, 2018.

ALLENDORF, F. W.; LUIKART, G.; AITKEN, S. N. Conservation and the genetics of populations. **The Atrium**, Southern Gate, Chichester, v. 19, n. 8, 2013.

ALVARADO, S.T.; SILVA, T.S.F.; ARCHIBALD, S. Management impacts on fire occurrence: A comparison of fire regimes of African and South American tropical savannas in different protected areas. **Environmental Management**, v. 218, p. 79–87, 2018.

ANDRADE, E. M. D.; PEREIRA, O. J.; DANTAS, F. **Semiárido e o manejo dos recursos naturais: Uma proposta de uso adequado do capital natural**. Fortaleza: UFC, p. 57-65, 2016.

ANDRADE, E. M.; GUERREIRO, M. J. S.; PALÁCIO, H. A. Q.; CAMPOS, D. A. Ecohydrology in a Brazilian tropical dry forest: thinned vegetation impact on hydrological functions and ecosystem services. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 27, p. 100649, 2020.

ANDRADE, E. M.; RODRIGUES, R. N.; PALÁCIO, H. A. Q.; BRASIL, J. B.; RIBEIRO FILHO, J. C. HYDROLOGICAL. Responses of a watershed of vegetation changes in a tropical semiarid region. **Revista Caatinga**, v. 31, p. 161-170, 2018.

ANDRADE, M. C. D. Geografia de Pernambuco: Ambiente e sociedade. João Pessoa–PB. **Grafset**, p. 35, 2009.

ANTONGIOVANNI, M.; VENTICINQUE, E. M.; FONSECA, C. R. Fragmentation patterns of the Caatinga drylands. **Landscape Ecology**, v. 33, n. 8, p. 1353-1367, 2018.

ANTONGIOVANNI, M.; VENTICINQUE, E. M.; MATSUMOTO, M.; FONSECA, C. R. Chronic anthropogenic disturbance on Caatinga dry forest fragments. **Journal of Applied Ecology**, v. 57, n. 10, p. 2064-2074, 2020.

ARAGÃO, L. E. O. C.; ANDERSON, L. O.; CAMPAHARO, W. A.; LOPES, A. P.; NEVES, A. K.; DUTRA, A. C.; SCALIONI, D. C. C.; PEREIRA, V. P. B. **Padrões e impactos dos incêndios florestais nos biomas brasileiros**. São José dos Campos: INPE, p. 264-273, 2019.

ATHEY, S.; TIBSHIRANI, J.; WAGER, S. Generalized random forests. **The Annals of Statistics**, v. 47, n. 2, p. 1148-1178, 2019.

ATMAR, W.; PATTERSON, B. D. Measure of order and disorder in the distribution of species in fragmented habitats. **Oecologia**, v. 96, p. 373-382, 1993.

BARBOSA, D. C. A. Estratégias de germinação e crescimento de espécies lenhosas da caatinga com germinação rápida. In: LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. (Ed.). **Ecologia e conservação da caatinga**, p. 625-656, 2003.

BARBOSA, T. A.; GOMES FILHO, R. R. Biodiversidade e conservação da Caatinga: revisão sistemática. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 7, n. 4, p. 177-189, 2022.

BAREA, J.; AZCÓN-AGUILAR, C. Microbial co-operation in the rhizosphere. **Journal of experimental botany**, v. 56, n. 417, p. 1761-1778, 2005.

BARROSO, G. M. Sistemática das angiospermas do Brasil. Viçosa: UFV - **Ciências Biológicas**, v. 5, n. 1, p. 20-28, 1992.

BASHIR, S.; QAMAR, U.; KHAN, F. H.; JAVED, M. Y. MV5: a clinical decision support framework for heart disease prediction using majority vote based classifier ensemble. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 39, n. 11, p. 7771- 7783, 2014.

BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; PASSOS, E. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais: Fundamentos geológico-geográficos, alteração química e física das rochas**. Ed. da Univ. Federal de Santa Catarina, p. 94-112, 1994.

BISPO, P. D. C.; VALERIANO, M. D. M.; KUPLICH, T. M. Relação da vegetação de caatinga com a condição geomorfométrica local. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p. 523-530, 2010.

BREIMAN, L. Random forests. **Machine learning**, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001.

BUNDY, R. A. ESRI: **Community Map of the University of Redlands**. 2012.

CAI, L.; KREFT, H.; TAYLOR, A.; DENELLE, P.; SCHRADER, J.; ESSL, F.; VAN KLEUNEN, M.; PERGL, J.; PYŠEK, P.; STEIN, A.; WINTER, M.; BARCELONA, J.; FUENTES, N.; KARGER, D. N.; KARTESZ, J.; KUPRIJANOV, A.; NISHINO, M.; NICKRENT, D.; WEIGELT, P. Machine learning improves global models of plant diversity. **BioRxiv**, v. 8, n. 487610, p. 2022.04, 2022.

CARDOSO, P. V.; DA SILVA SEABRA, V.; XAVIER, R. A.; DE MORAIS RODRIGUES, E.; GOMES, A. S. Mapeamento de Áreas de Caatinga Através do

Random Forrest: Estudo de caso na Bacia do Rio Taperoá. **Revista Georaguia**, v. 11, n. esp, p. 55-68, 2021.

CASTANHO, A. D. A., COE, M., BRANDO, P., MACEDO, M., BACCINI, A., WALKER, W., ANDRADE, E. M. Potential shifts in the aboveground biomass and physiognomy of a seasonally dry tropical forest in a changing climate. **Environmental Research Letters**, v. 15, p. 034-053, 2020.

CAVEDON, A. D. Classificação, características morfológicas, físicas e químicas dos principais solos que ocorrem no semiárido brasileiro. **Simpósio sobre caatinga e sua exploração racional**, Feira de Santana, Bahia, Brasil, p. 73-91, 1986.

CHASE, M. W., CHRISTENHUSZ, M. J. M., FAY, M. F., BYNG, J. W., JUDD, W. S., SOLTIS, D. E., STEVENS, P. F. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 181, n. 1, p. 1-20, 2016.

CHEN, D.; PEREIRA, J. M.; MASIERO, A.; PIROTTI, F. Mapping fire regimes in China using MODIS active fire and burned area data. **Applied Geography**, v. 85, p. 14–26, 2017.

COHEN, J. D.; LI, L.; WANG, Y.; THOBURN, C.; AFSARI, B.; DANILOVA, L., et al. Detection and localization of surgically resectable cancers with a multi-analyte blood test. **Science**, v. 359, n. 6378, p. 926-930, 2018.

COIMBRA-FILHO, A. F.; CÂMARA, I. G. **Os limites originais do bioma Mata Atlântica na região nordeste do Brasil**. FBCN (Fundação Brasileira para a Conservação da Natureza), Rio de Janeiro, 1996.

COUSINS, J. R.; HOPE, D.; GRIES, C.; STUTZ, J. C. Preliminary assessment of arbuscular mycorrhizal fungal diversity and community structure in an urban ecosystem. **Mycorrhiza**, v. 13, n. 6, p. 319-326, 2003.

CROWTHER, T. W.; GLICK, H. B.; COVEY, K. R.; BETTIGOLE, C.; MAYNARD, D. S.; THOMAS, S. M.; SMITH, J. R.; HINTLER, G.; DUGUID, M. C.; AMATULLI, G.; TUANMU, M. N.; JETZ, W.; SALAS, C.; STAM, C.; PIOTTO, D.; TAVANI, R.; GREEN, S.; BRUCE, G.; WILLIAMS, S. J.; WISER, S. K.; HUBER, M. O.; HENGEVELD, G. M.; NABUURS, G. J.; TIKHONOVA, E.; BORCHARDT, P.; LI, C. F.; POWRIE, L. W.; FISCHER, M.; HEMP, A.; HOMEIER, J.; CHO, P.; VIBRANS, A. C.; UMUNAY, P. M.; PIAO, S. L.; ROWE, C. W.; ASHTON, M. S.; CRANE, P. R.; BRADFORD, M. A. Mapping tree density at a global scale. **Nature**, v. 525, p. 201–205, 2015.

CUTLER, F.; WIENER, R. **RandomForest: Breiman and Cutler's Random Forests for Classification and Regression**. v.4, n. 7, 2022.

DA FONSECA, M. T. Áreas e ações prioritárias para a conservação da biodiversidade na Caatinga. **Biodiversidade da Caatinga**, v. 7, p. 349, 2003.

DA SILVA GOMES, D.; DOS SANTOS, S. K.; SILVA, J. H. C. S.; DE MEDEIROS, T.; SANTOS, E. D. V. S.; DA SILVA BARBOSA, A. CO₂flux e temperatura da superfície edáfica em áreas de caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 04, p. 1898-1908, 2021.

DAUBENMIRE, R. F. **Plants and Environment**. 3 ed. Wiley, New York. p. 228 - 235, 1974.

DE FARIAS, D. T.; DA SILVA BARRETO, F. R.; DE MIRANDA SOUZA, M. R.; DA SILVA, C. J. Serapilheira em fragmento florestal de caatinga arbustivo-arbórea fechada. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 14, n. 2, p. 331-337, 2019.

DE OLIVEIRA, C. L.; DE SOUSA LIMA, J. R.; SOUZA, R. M. S.; DANTAS, A. C.; DE SOUZA, E. S.; FERREIRA, R. C. A Caatinga Emite ou Sequestra Carbono? **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 02, p. 791-804, 2023.

DENISKO, D.; HOFFMAN, M. Classificação e interação em florestas aleatórias. **Anais da Academia Nacional de Ciências**, v. 115, n. 8, p. 1690-1692, 2018.

DRAGUT, L.; DORNIK, A. Land-surface segmentation as a method to create strata for spatial sampling and its potential for digital soil mapping. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 30, n. 7, p. 1359-1376, 2016.

DU, Y.; FU, Y.; WANG, L. Skeleton based action recognition with convolutional neural network. In: **2015 3 rd IAPR Asian conference on pattern recognition (ACPR)**. IEEE, p. 579-583, 2015.

DVORETT, D.; BIDWELL, J.; DAVIS, C.; DUBOIS, C. Developing a hydrogeomorphic wetland inventory: reclassifying national wetlands inventory polygons in geographic information systems. **Wetlands**, v. 32, n.1, p. 83-93, 2012.

ECHTERNACHT, L.; TROVÓ, M.; OLIVEIRA, C. T.; PIRANI, J. R. Areas of endemism in the Espinhaço range in Minas Gerais, Brazil. **Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, v. 206, n. 9, p. 782-791, 2011.

ERICKSON, B. J; KORFIATIS, P.; AKKUS, Z.; KLINE, T. L. Machine learning for medical imaging. **Radiographics**, v. 37, n.15, p. 505, 2017.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Trees, forests and land use in drylands: the first global assessment.** Rome: FAO, 2016.

FEI, X.; SONG, Q.; ZHANG, Y.; LIU, Y.; SHA, L.; YU, G.; ZHANG, L.; DUAN, C.; DENG, Y.; WU, C.; LU, Z.; LUO, K.; CHEN, A.; XU, K.; LIU, W.; HUANG, H.; JIN, Y.; ZHOU, R.; LI, J.; LIN, Y.; ZHOU, L.; FU, Y.; BAI, X.; TANG, X.; GAO, J.; ZHOU, W.; GRACE, J. Carbon exchanges and their responses to temperature and precipitation in forest ecosystems in Yunnan, Southwest China. **Science of the Total Environment**, v. 616, p. 824-840, 2018.

FERNANDES, M. F.; QUEIROZ, L. P. Vegetação e flora da Caatinga. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 70, n. 4, p. 51-56, 2018.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos pacífico e atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.

FERRI, M. G. **A Vegetação Brasileira.** EDUSP, São Paulo, p. 114 - 126, 1980.

Ferri, M. G. **Fisiologia Vegetal.** EDUSP, São Paulo, v. 01, p. 255- 298, 1979.

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

FILATOV, D.A.; OSBORNE, O.G.; PAPADOPULOS, A.S.T. Demographic history of speciation in a *Senecio* altitudinal hybrid zone on Mt. Etna. **Molecular Ecology**, 25:2467–2481, 2016.

FISHER, R. A.; CORBET, A. S.; WILLIAMS, C. B. The Relation Between the Number of Species and the Number of Individuals in a Random Sample of an Animal Population. **Journal of Animal Ecology**, v. 12, p. 42–58, 1943.

FLORA DO BRASIL. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>>. Acesso em: 28 out. 2022.

FLORES, A. V.; BORGES, E. E. D. L.; GUIMARÃES, V. M.; ATAÍDE, G. D. M.; CASTRO, R. V. O. Germinação de sementes de *Melanoxylon brauna schott* em diferentes temperaturas. **Revista Árvore**, v. 38, p.1147-1154, 2014.

FORMAN, R. T. T. **Land mosaics: the ecology of landscape and regions.** Cambridge University Press, Cambridge, London, 1999.

FRYIRS, K. A.; BRIERLEY, G. J.; PRESTON, N. J.; KASAI, M. Buffers, barriers and blankets: the (dis) connectivity of catchment-scale sediment cascades. **Catena**, v. 70, n. 1, p. 49-67, 2007.

GALINDO, I. C. L.; RIBEIRO, M. R.; SANTOS, M. DE F. DE A.V.; LIMA, J. F. W. F.; FERREIRA, R. F. DE A. E L. Relações solo-vegetação em áreas sob processo de desertificação no município de Jataúba, PE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1283-1296, 2008.

GALVÍNCIO, J. D.; PEREIRA, J. A. DOS S.; FRANÇA, L. M. DE A.; LINS, T. M. P. Analysis of vegetation variation of dry and rainy periods through SAVI and surface reflectance in Belo Jardim-PE municipality. REDE, **Revista Eletrônica**, v. 7, n. 2, 2016.

GANEM, K. A.; DUTRA, A. C.; DE OLIVEIRA, M. T.; DE FREITAS, R. M.; CRISTINA, R. Mapeamento da Vegetação da Caatinga a partir de Dados Ópticos de Observação da Terra-Oportunidades e Desafios. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, p. 829-854, 2020.

GANEM, R. S. Caatinga: estratégias de conservação. Brasília: Câmara dos Deputados, **Consultoria Legislativa**, p. 105, 2017.

GARDA, E. C. **Atlas do meio ambiente do Brasil**. Terra Viva, Brasília, 1996.

GASTAUER, M., SARMENTO, P.S. DE M., CALDEIRA, C.F., CASTRO, A.F., RAMOS, S.J., TREVELIN, L.C., JAFFÉ, R., ROSA, G.A., CARNEIRO, M.A.C., VALADARES, R.B. DA S., OLIVEIRA, G., SOUZA FILHO, P.W.M. Shannon tree diversity is a surrogate for mineland rehabilitation status. **Ecological Indicators**, v. 130, p. 108100, 2021.

GENUER, R.; POGGI, J. Random forests. In: Random Forests with R. **Springer**, Cham, p. 33-55, 2020.

GERSTNER, K.; MORENO-MATEOS, D.; GUREVITCH, J.; BECKMANN, M.; KAMBACH, S.; JONES, H. P.; SEPPELT, R. Will your paper be used in a meta-analysis? Make the reach of your research broader and longer lasting. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 8, n. 6, p. 777–784, 2017.

GIROLAMO NETO, C. D. **Identificação de fitofisionomias de cerrado no Parque Nacional de Brasília utilizando Random Forest aplicado a imagens de alta e média resoluções espaciais**. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

GOBEL, I. W. J.; TONDOBALA, L.; SELA, R. L. Sebaran Spasial Emisi Gas Karbon Dioksida (CO₂) pada Kawasan Permukiman di Kecamatan Singkil Kota Manado. **Spacial**, v. 6, n. 3, p. 628-636, 2019.

GOMES, C. S.; MAGALHÃES Jr, A. P. Aparato conceitual sobre áreas úmidas (wetlands) no brasil: Desafios e opiniões de especialistas. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 37, n. 3, p. 484-508, 2017.

GONDIM, A. R. D. O.; FLORES, M. E. P.; MARTINEZ, H. E. P.; FONTES, P. C. R.; PEREIRA, P. R. G. Condutividade elétrica na produção e nutrição de alface em sistema de cultivo hidropônico NFT. **Bioscience journal**, v. 5, p. 894-904, 2010.

GONZALEZ, OTTO J.; ZAK, DONALD, R. Tropical dry forests of St. Lucia, West Indies: vegetation and soil properties. **Biotropica**, p. 618-626, 1996.

GRACE, J. B.; ANDERSON, T. M.; SEABLOOM, E. W.; BORER, E. T.; ADLER, P. B.; HARPOLE, W. S.; HAUNTIER, Y.; HILLEBRAND, H.; LIND, E. M.; PARYEL, M.; BAKKER, J. D.; BUCKLEY, Y. M.; GRAWLEY, M. J.; DAMSCHEN, E. I.; DAVIES, K.F.; FAY, P. A.; FIRN, J.; GRUNER, D. S.; HECTOR, A.; KNOPS, J. M. H.; MACDOUGALL, A. S.; MELBOURNE, B. A.; MORGAN, J. W.; ORROCK, J. L.; PROBER, S. M.; SMITH, M. D. Integrative modelling reveals mechanisms linking productivity and plant species richness. **Nature**, v. 529, n. 7586, p. 390-393, 2016.

GRAF, W. L.; LECCE, S. A. **Fluvial processes in dryland rivers**. New York: Springer-Verlag. p. 346, 1988.

GUERINI FILHO, M.; KUPLICH, T. M.; QUADROS, F. L. F. Estimating natural grassland biomass by vegetation indices using Sentinel 2 remote sensing data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, n. 8, p. 2861–2876, 2020.

GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A.; JORGE, M. C. O.; ALEXANDRE, S. T. Soil erosion and conservation in Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 37, n. 1, p. 81-91, 2014.

GUERREIRO, M. J. S.; ANDRADE, E.M.; ABREU, I.; LAJINHA, T. Long-term variation of precipitation indices in Ceará State, Northeast Brazil. **International Journal Climatol**, n. 33. p. 2929-2939, 2013.

HERRMANN, P. B.; NASCIMENTO, V. F.; DE FREITAS, M. W. D. Sensoriamento Remoto Aplicado à Análise de Fogo em Formações Campestres: Uma Revisão Sistemática. *Revista Brasileira Cartografia*, v. 74, n. 2, 2022.

HIJMANS, R. J.; ETEN, J.; SUMNER, M.; CHENG, J.; BASTON, D.; BEVAN, A.; BIVAND, R.; BUSETTO, L.; CANTY, M.; FASOLI, B.; FORREST, D.; GHOSH, A.;

GOLICHER, D.; GRAY, J.; GREENBERG, J.A., HIEMSTRA, P., HINGEE, K., GEOSCIENCES, I. FOR M.A., KARNEY, C., MATTIUZZI, M.; MOSHER, S.; NAIMI, B.; NOWOSAD, J.; PEBESMA, E.; LAMIGUEIRO, O. P.; RACINE, E. B.; ROWLINGSON, B.; SHORTRIDGE, A.; VENABLES, B.; WUEEST, R. **Geographic data analysis and modeling**. R package version, 2021.

HILL, M. O. Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences. **Ecology**, v. 54, n. 2, p. 427-432, 1973.

HOFHANSL, F.; CHACÓN-MADRIGAL, E.; FUCHSLUEGER, L.; JENKING, D.; MORERA BEITA, A.; PLUTZAR, C.; SILLA, F.; ANDERSEN, K.; BUCHS, D.; DULLINGER, S.; FIEDLER, K.; FRANKLIN, O.; HIETZ, P.; HUBER, W.; QUESADA, C.; RAMMIG, A.; SCHRODT, F.; VINCENT, A.; WEISSENHOFER, A.; WANEK, W. Climatic and edaphic controls over tropical forest diversity and vegetation carbon storage. **Scientific Reports**, v. 10, 2020.

HOMEIER, J.; LEUSCHNER, C. Factors controlling the productivity of tropical Andean forests: Climate and soil are more important than tree diversity. **Biogeosciences**, v. 18, n. 4, p. 1525–1541, 2021.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Biomass e sistema costeiro-carinho do Brasil: compatível com a escala 1:250. 000**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

ICMBIO - INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Unidades de Conservação por bioma**. Brasília: ICMBio, 2019.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, 2020. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). Brasil. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso: 11 jun. 2022.

IPCC. The Intergovernmental Panel on Climate Change. Global Warming of 1.5°C. **Cambridge University Press**, Cambridge, p. 49-92, 2018.

JACKSON, C. R.; THOMPSON, J. A.; KOLKA, R. K. Wetland Soils, Hydrology, and Geomorphology. **Wetlands**, v. 2. p. 23-60, 2014.

JOST, L. Entropy and diversity. **Oikos**, v. 113, p. 363–375, 2006.

KEMPTON, R. A.; TAYLOR, L. R. Models and statistics for species diversity. **Nature**, v. 262, n. 5571, p. 818–820, 1976.

KINDT, R. **BiodiversityR: Package for Community Ecology and Suitability Analysis**. 2022.

KNOWLES, N.; CAYAN, D. R. Potential effects of global warming on the Sacramento/San Joaquin watershed and the San Francisco estuary. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 18, p. 38-1, 2002.

KRAFT, N. J. B.; ADLER, P. B.; GODOY, O. E. C.; FULLER, S. J. M. Community Assembly, Coexistence and the Environmental Filtering Metaphor. **Functional Ecology**, v. 29, p. 592–599, 2015.

LACERDA, E. R.; VICENS, R. S. Detecção de áreas de florestas invariantes em séries temporais utilizando random forest. **GEOgraphia**, v. 23, n. 50, 2021.

LAI, P.; ZHANG, M.; GE, Z.; HAO, B.; SONG, Z.; HUANG, J.; MA, M.; YANG, H.; HAN, X. Responses of seasonal indicators to extreme droughts in Southwest China. **Remote Sensing**, v. 12, n. 5, 2020.

LANDIM, R. B. T. V.; DA SILVA, D. F.; DE CARVALHO ALMEIDA, H. R. R. Desertificação em Irauçuba (CE): Investigação de Possíveis Causas Climáticas e Antrópicas. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 4, p. 1- 21, 2011.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. E.P.U., São Paulo. P. 211 - 221, 1986.

LEGER, S; ZWANENBURG, A.; PILZ, K.; LOHAUS, F.; LINGE, A.; ZÖPHEL, K.; RICHTER, C. A comparative study of machine learning methods for time-to-event survival data for radiomics risk modelling. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 13206, 2017.

LESCURE, J.; BOULET, R. Relationships between soil and vegetation in a tropical rain forest in French Guiana. **Biotropica**, p. 155-164, 1985.

LI, Z.; REN, W.; LIU, X.; XIE, L. Distributed consensus of linear multi-agent systems with adaptive dynamic protocols. **Automatica**, v. 49, n. 7, p. 1986-1995, 2013.

LINHUI, L.; WEIPENG, J.; HUIHUI, W. Extracting the forest type from remote sensing images by random forest. **IEEE Sensors Journal**, v. 21, n. 16, p. 17447- 17454, 2020.

LINS, R. C. Áreas de exceção do agreste de Pernambuco. **Sudene**, v. 20, 1989.

LOPEZ-GONZALEZ, G.; LEWIS, S.L.; BURKITT, M.; PHILLIPS, O.L. ForestPlots.net: a web application and research tool to manage and analyse tropical forest plot data. **Journal of Vegetation Science**, v. 22, p. 610-613, 2011.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova Odessa: Plantarum, 1992.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**, 03. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2009.

LOURENÇO RODRIGUES, A.; FARINHA WATZLAWICK, L.; MARQUES GENÚ, A.; FELIPE HESS, A.; AUGUSTO EBLING, Â. ATRIBUTOS DE UM SOLO FLORESTAL EM UMA TOPOSSEQUÊNCIA E RELAÇÕES COM A COMUNIDADE ARBÓREA. **Floresta**, v. 46, n.2, 2016.

LUCENA, R. L.; STEINKE, E. T. Fatores geográficos e padrões de circulação atmosférica como base à compreensão do clima semiárido quente da região Nordeste. **Revista Workshop Internacional sobre Água no Semiárido Brasileiro**, v. 1, p. 01-07, 2015.

LUDERMIR, T. B. Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina: estado atual e tendências. **Estudos Avançados**, v. 35, p. 85-94, 2021.

MAGRIN, G.; MARENGO, J.; BOULANGER, J. P.; BUCKERIDGE, M. S.; CASTELLANO, E.; POVEDA, G.; SCARANO, F. R.; VICUNA, S.; ALFARO, E.; ANTHELME, F.; BARTON, J.; BECKER, N.; BERTRAND, A.; CONFALONIERI, U.; DEMIGUEL, C.; FRANCOU, B.; GARREAUD, R.; LOSADA, I.; MCFIELD, M.; NOBRE, C.; LANKAO, P. R.; SALDIVA, P.; SAMANIEGO, J. L.; SOUZA, A. P.; TRAVASSO, M.; VIGLIZZO, E. F.; VILLAMIZAR, A. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. **Central and South America**, Cambridge University Press, v. 2, p. 1499-1566, 2014.

MAGURRAN, A. E. **Ecological diversity and its measurement**. Princeton university press, 1988.

MAHARJAN, B.; PARK, J.; KALIANNAGOUNDER, V. K.; AWASTHI, G. P.; JOSHI, M. K.; PARK, C. H.; KIM, C. S. Regenerated cellulose nanofiber reinforced chitosan hydrogel scaffolds for bone tissue engineering. **Carbohydrate polymers**, v. 251, p. 117023, 2021.

MAHARJAN, S. K.; STERCK, F. J.; RAES, N. E.; POORTER, L. Temperature and soils predict the distribution of plant species along the Himalayan elevational gradient. **Journal of Tropical Ecology**, v. 38, n. 2, p. 58-70, 2022.

MAIA, A. R. S.; LOPES, F. B.; ANDRADE, E. M. Influence of Climatic Seasonality on a Survey of Land Use and Cover in the Semi-arid Region. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, p. 311- 325, 2018.

MAPBIOMAS, Projeto. Coleção 4.1 da série anual de mapas de cobertura e uso de solo do Brasil. v. 12, n. 06, 2020. Disponível em: <Available at: <http://mapbiomas.org>>. Acesso em: 24 nov. 2022.

MARCA-ZEVALLOS, M. J.; MOULATLET, G. M.; SOUSA, T. R.; SCHIETTI, J.; COELHO, L. DE S.; RAMOS, J. F.; LIMA FILHO, D. DE A.; AMARAL, I. L.; DE ALMEIDA MATOS, F. D.; RINCÓN, L. M.; CARDENAS REVILLA, J. D.; PANSONATO, M. P.; GRIBEL, R.; BARBOSA, E. M.; MIRANDA, I. P. DE A.; BONATES, L. C. DE M.; GUEVARA, J. E.; SALOMÃO, R. P.; FERREIRA, L. V.;

COSTA, F. R. C. Local hydrological conditions influence tree diversity and composition across the Amazon basin. **Ecography**, v. 2022, n. 11, p. e06125, 2022.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, p. 1973-1985, 2017.

MARENGO, J. A.; SOUZA JUNIOR, C. **Mudanças Climáticas: impactos e cenários para a Amazônia**. São Paulo, Alan, p. 101-118, 2018.

MARQUES, F. A.; NASCIMENTO, A. F.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SILVA, A. B. Solos do Nordeste. **Embrapa Solos**, Recife, p. 8, 2014.

MARTINS, F. R.; SANTOS, F. D. Técnicas usuais de estimativa da biodiversidade. **Revista Holos**, n. 1, v.1, p. 236-267, 1999.

MAYES, M. T.; MUSTARD, J. F.; MELILLO, J. M. Forest cover change in Miombo Woodlands: modeling land cover of African dry tropical forests with linear spectral mixture analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 165, p. 203–215, 2015.

MCGOVERN, A.; LAGERQUIST, R.; GAGNE, D. J.; JERGENSEN, G. E.; ELMORE, K. L.; HOMEYER, C. R.; SMITH, T. Making the black box more transparent: Understanding the physical implications of machine learning. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 100, n. 11, p. 2175-2199, 2019.

MEENA, B.; TIWARI, V.; SINGH, N.; MAHAR, K. S.; SHARMA, Y. K.; RAN, T. S. Estimation of genetic variability and population structure in *Ephedra gerardiana* Wall. ex Stapf (Ephedraceae). **Agri Gene**, v 1, p. 116–125, 2016.

MELO, F. P. L. The socio-ecology of the Caatinga: understanding how natural resource use shapes an ecosystem. **Caatinga: The largest tropical dry forest region in South America**, p. 369-382, 2017.

MENDES, K. R.; GRANJA, J. A.; OMETTO, J. P.; ANTONINO, A. C.; MENEZES, R. S.; PEREIRA, E. C.; POMPELLI, M. F. Croton blanchetianus modulates its morphophysiological responses to tolerate drought in a tropical dry forest. **Functional Plant Biology**, v. 44, n. 10, p. 1039-1051, 2017.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo, Oficina de Textos, 2007.

MEYER, H.; PEBESMA, E. Machine learning-based global maps of ecological variables and the challenge of assessing them. **Nature Communications**, v. 13, n. 1, p. 2208, 2022.

MITCHELL, T. **Machine Learning**. S. I.: McGraw Hill, 1997.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Relatório de Atualização e Complementação do Diagnóstico do Meio Biofísico da BHSF**, 2016.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Anais do fórum de iniciação científica do UNIFUNEC**, v. 1, n. 1, 2010.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Avaliação e identificação de áreas e ações prioritárias para a conservação, utilização sustentável e repartição dos benefícios da biodiversidade nos biomas brasileiros**. Brasília: MMA/ SBF, 2002.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.17, n.1, p. 1-10, 2002.

MORO, M. F.; MACEDO, M. B.; MOURA-FÉ, M. M. D.; CASTRO, A. S. F.; COSTA, R. C. D. Vegetação, unidades fitoecológicas e diversidade paisagística do estado do Ceará. **Rodriguésia**, v. 66, p. 717-743, 2015.

MORO, M. F.; NIC LUGHADHA, E.; ARAÚJO, F. S.; MARTINS, F. R. A. Phytogeographical Metaanalysis of the Semiarid Caatinga Domain in Brazil. **Botanical Review**, v. 82, n. 2, p. 91–148, 2016.

MOURA, P. M.; ALTHOFF, T. D.; OLIVEIRA, R. A.; SOUTO, J. S.; SOUTO, P. C.; MENEZES, R. S.; SAMPAIO, E. V. Carbon and nutrient fluxes through litterfall at four succession stages of Caatinga dry forest in Northeastern Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 105, n. 1, p. 25-38, 2016.

MUTTI, P. R.; DA SILVA, L. L.; MEDEIROS, S. D. S.; DUBREUIL, V.; MENDES, K. R.; MARQUES, T. V.; LÚCIO, P. S.; SILVA, C. M. S.; BEZERRA, B. G. Basin scale rainfall-evapotranspiration dynamics in a tropical semiarid environment during dry and

wet years. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 75, p. 29-43, 2019.

NAZAR, T. I. S. M.; RODRIGUES, S. C. Relevô do Chapadão do Diamante, Serra da Canastra/MG, Brasil: compartimentação e análise a partir dos aspectos geomorfométricos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 1, 2019.

NGUYEN, U.; GLENN, E. P.; DANG, T. D.; PHAM, L. T. Mapping vegetation types in semi-arid riparian regions using random forest and object-based image approach: a case study of the Colorado River Ecosystem, Grand Canyon, Arizona. **Ecological Informatics**, v. 50, p. 43-50, 2019.

NUNES, Y. R. F.; FAGUNDES, M.; ALMEIDA, H. D. S.; VELOSO, M. D. D. M. Aspectos ecológicos da aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Allemão-Anacardiaceae): fenologia e germinação de sementes. **Revista Árvore**, v. 32, p. 233-243, 2008.

NUNES, Y. R. F.; FAGUNDES, M.; SANTOS, M. R.; BRAGA, R. F.; GONZAGA, A. P. D. Germinação de sementes de *Guazuma ulmifolia* Lam.(Malvaceae) e *Heteropterys byrsonimifolia* A. Juss (Malpighiaceae) sob diferentes tratamentos de escarificação tegumentar. **Revista Unimontes Científica**, v.8, n.1, p. 43-52, 2006.

O'DONNELL, M. S.; IGNIZIO, D. A. Bioclimatic predictors for supporting ecological applications in the conterminous United States. **US Geological Survey**, n. 691, 2012.

OKSANEN, J.; SIMPSON, G. L.; BLANCHET, F. G.; KINDT, R.; LEGENDRE, P.; MINCHIN, P. R.; O'HARA, R. B.; SOLYMOS, P.; STEVENS, M. H. H.; SZOECS, E.; WAGNER, H.; BARBOUR, M.; BEDWARD, M.; BOLKER, B.; BORCARD, D.; CARVALHO, G.; CHIRICO, M.; CACERES, M. D.; DURAND, S.; EVANGELISTA, H. B. A.; FITZJOHN, R.; FRIENDLY, M.; FURNEAUX, B.; HANNIGAN, G.; HILL, M. O.; LAHTI, L.; MCGLINN, D.; OUELLETTE, M. H.; CUNHA, E. R.; SMITH, T.; STIER, A.; BRAAK, C. J. F. T.; WEEDON, J. **Vegan: Community Ecology Package**, 2022.

OLIVEIRA, S. M. **Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil**. Ministério do Meio Ambiente - MMA, Belém, 2008.

ORTOLANI, A. A; CAMARGO, M. B. P. Influência dos fatores climáticos na produção. In: CASTRO RC et al. *Ecofisiologia da produção agrícola*. Piracicaba: **Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato**. p. 71-81, 1987.

PELLISSIER, P.; DRAY, S.; SABATIER, D. Within-plot relationships between tree species occurrences and hydrological soil constraints: an example in French Guiana investigated through canonical correlation analysis. **Plant Ecology**, v. 162, n. 2, p.143-156, 2001.

PEREIRA, M. D. B. **Dinâmica climática e as chuvas na região da Zona da Mata, Nordeste do Brasil**. 2018. 208 f. Dissertação (Mestrado em Geografia)- Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

PESCADOR, D. S.; BELLO, F.; VALLADARES, F.; ESCUDERO, A. Plant Trait Variation along na Altitudinal Gradient in Mediterranean High Mountain Grasslands: Controlling the Species Turnover Effect. **PLoS ONE**, v. 10, p. 1–16, 2015.

PHAM, L. T. H.; BRABYN, L. Monitoring mangrove biomass change in Vietnam using SPOT images and an object-based approach combined with machine learning algorithms. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 128, p. 86-97, 2017.

PIELOU, E.C. **Ecological diversity**. New York: Wiley, 1975.

PINTO, G. C. P. Manejo ecológico da caatinga. **Simpósio sobre caatinga e sua exploração racional**. Feira de Santana, Bahia, Brasil, p. 193 - 204,1986.

POULTER, B.; FRANK, D.; CIAIS, P.; MYNENI, R. B.; ANDELA, N.; BI, J.; BROQUET, G.; CANADELL, J. G.; CHEVALLIER, F.; LIU, Y. Y.; RUNNING, S. W. Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle. **Nature**, v. 509, n. 7502, p. 600, 2014.

PROBST, P.; BOULESTEIX, A. L. To tune or not to tune the number of trees in a random forest? **Journal of Machine Learning Research**, v.18, p.1–18, 2017.

PROBST, P.; WRIGHT, M. N.; BOULESTEIX, A. Hyperparameters and tuning strategies for random forest. **Wiley Interdisciplinary Reviews: data mining and knowledge discovery**, v. 9, n. 3, p. e1301, 2019.

QI, M.; LIU, S.; YAO, X.; XIE, F.; GAO, Y. Monitoring the ice phenology of Qinghai lake from 1980 to 2018 using multisource remote sensing data and Google Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 14, 2020.

QUEIROZ, L. P. D. **Leguminosas da caatinga**. Universidad Estadual de Feira de Santana, 2009.

RADAMBRASIL. **Levantamento de recursos naturais**. Aracaju - Recife. v. 30, p. 24-25, 1983.

RAMOS, C. M. C.; da SILVA, A. F.; SARTORI, A. D. C.; BASSOI, L. H.; ZIMBACK, C. Variabilidade temporal da temperatura em Petrolina-PE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRICOLA, 38., 2009, Juazeiro, Petrolina. Planejamento da bacia hidrográfica e o desenvolvimento da agricultura: anais. Juazeiro, Petrolina: UNIVASF: Embrapa Semiárido: CEFET: SBEA, 2009.

RAMOS, G. G.; ALVES, J. B.; DE ARAÚJO, M. D. F.; FERREIRA, V. S. G.; PINTO, M. G. C.; DE HOLANDA LEITE, M. J.; VASCONCELOS, A. D. M.; RIBEIRO, I.

R. Levantamento dos impactos ambientais de um trecho de mata ciliar em região de Caatinga no sertão paraibano. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 52848-52859, 2020.

REDO, D.; AIDE, T. M.; CLARK, M. L. Vegetation change in Brazil's dryland ecoregions and the relationship to crop production and environmental factors: Cerrado, Caatinga, and Mato Grosso, 2001–2009. **Journal of Land Use Science**, v.8, n. 2, p.123-153, 2013.

RENGASAMY, P. World salinization with emphasis on Australia. **Journal of experimental botany**, v. 57, n.5, p. 1017-1023, 2006.

RIBEIRO, E. M. S.; SANTOS, B. A.; ARROYO-RODRÍGUEZ, V.; TABARELLI, M.; SOUZA, G.; LEAL, I. R. Phylogenetic impoverishment of plant communities following chronic human disturbances in the Brazilian Caatinga. **Ecology**, v. 97, p. 1583–1592, 2016.

RIGATTI, S. J. Random forest. **Journal of Insurance Medicine**, v. 47, n. 1, p. 31-39, 2017.

RIPLEY, B.; VENABLES, B.; BATES, D.; HORNIK, K.; GEBHARDT, A.; FIRTH, D.; RIPLEY, M. Package 'mass'. **R package version**, 2022.

ROSWELL, M.; DUSHOFF, J.; WINFREE, R. A conceptual guide to measuring species diversity. **Oikos**, v.130, n. 3, p. 321–338, 2021.

RUSSELLO, M. A.; WATERHOUSE, M. D.; ETTER, P. D.; JOHNSON, E. A. From promise to practice: pairing non-invasive sampling with genomics in conservation. **Peer Journal**, v. 21, n. 1106, 2015.

SAMPAIO, E. D. S., SALCEDO, I. H.; KAUFFMAN, J. B. Effect of different fire severities on coppicing of caatinga vegetation in Serra Talhada, PE, Brazil. *Biotropica*, p. 452-460, 1993.

SAMPAIO, Y.; MAZZA, J. E. Diversidade sócio econômica e pressão antrópica na caatinga nordestina. Pp. 2-8 in: in: J. M. C. Silva & M. Tabarelli (coord.) Workshop Avaliação e identificação de ações prioritárias para a conservação, utilização sustentável e repartição de benefícios da biodiversidade do bioma Caatinga. Petrolina, Pernambuco. Disponível em: <www.biodiversitas.org.br/caatinga>. Acesso em 20 jan. 2023).

SANTOS, A. M. D. S.; BRUNO, R. D. L. A.; CRUZ, J. D. O.; SILVA, I. D. F. D.; ANDRADE, A. P. D. Variabilidade espacial do banco de sementes em área de Caatinga no Nordeste do Brasil. **Ciência Florestal**, v. 30, p. 542-555, 2020.

SANTOS, F. A. M.; MARTINS, F. R. Técnicas usuais de estimativa da biodiversidade. **Revista Holos**, Rio Claro, p. 236-267, 2004.

SCHMIT, C.; ROUNSEVELL, M.; LA JEUNESSE, I. The limitations of spatial land use data in environmental analysis. **Environmental Science & Policy**, v. 9, p. 174–188, 2006.

SEYFFARTH, J. A., RODRIGUES, V. A seca 2010- 2017 no Semiárido brasileiro. **Parcerias Estratégicas**, v. 22, p. 41-62, 2017.

SHANNON, C. E.; WEAVER, W. **The mathematical theory of communication**. Urbana: University of Illinois Press. 1949.

SHARMA, B.; JHA, D. K. The Role Played by Mycorrhizal Fungi in Ecorestoration. **Mycorrhiza-Nutrient Uptake, Biocontrol, Ecorestoration**, p. 435- 449, 2017.

SIDHU, N.; PEBESMA, E.; CÂMARA, G. Using Google Earth Engine to detect land cover change: Singapore as a use case. **European Journal of Remote Sensing**, v. 51, n. 1, p. 486–500, 2018.

SILVA, A. C. D. C.; PRATA, A. P. D. N.; SOUTO, L. S.; MELLO, A. A. D. Aspectos de ecologia de paisagem e ameaças à biodiversidade em uma unidade de conservação na Caatinga, em Sergipe. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 479- 490, 2013.

SILVA, B. B. D.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; DE OLIVEIRA, L. M.; MONTENEGRO, S. M.; BARBOSA JUNIOR, B. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 3-8, 2016.

SILVA, J. B.; DANTAS, E. W.; CAVALCANTE, T. Geografia do Ceará: um novo olhar geográfico. Fortaleza. **Demócrito Rocha**, v. 01, p. 169-188, 2005.

SILVA, J. M. C. D.; BARBOSA, L. C. F.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. The Caatinga: understanding the challenges. **Caatinga**. Springer, Cham, p. 3-19, 2017.

SLIK, J. W. F.; RAES, N.; AIBA, S.-I.; BREARLEY, F. Q.; CANNON, C. H.; MEIJAARD, E.; NAGAMASU, H.; NILUS, R.; PAOLI, G.; POULSEN, A. D.; SHEIL, D.; SUZUKI, E.; VAN VALKENBURG, J. L. C. H.; WEBB, C. O.; WILKIE, P.;

WULFFRAAT, S. Environmental correlates for tropical tree diversity and distribution patterns in Borneo. **Diversity and Distributions**, v. 15, n. 3, p. 523–532, 2009.

SLINGSBY, J. A.; MONCRIEFF, G. R.; WILSON, A. M. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Near-real time forecasting and change detection for an open ecosystem with complex natural dynamics. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 166, n. December 2019, p. 15–25, 2020.

SMITH, S. A.; DONOGHUE, M. J. Rates of molecular evolution are linked to life history in flowering plants. **Science**, v. 322, n. 5898, p. 86-89, 2008.

SOBRINHO, M. S.; TABARELLI, M.; MACHADO, I. C.; SFAIR, J. C.; BRUNA, E. M.; LOPES, A. V. Land use, fallow period and the recovery of a Caatinga forest. **Biotropica**, v. 48, n. 5, p. 586–597, 2016.

SOUZA, T. A. F. D.; RODRIGUEZ-ECHEVERRÍA, S.; ANDRADE, L. A. D.; FREITAS, H. Arbuscular mycorrhizal fungi in *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Brazilian semi-arid. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 47, p. 359-366, 2016.

SUDENE, Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Semiárido. Disponível em: < https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/8-relatoriometodologia_semiarido2021_v9-versaodefinitiva_1_.pdf/view >. Acessado em: 10 Jan. 2023.

SYFERT, M. M.; BRUMMITT, N. A.; COOMES, D. A.; BYSTRIAKOVA, N.; SMITH, M. J. Inferring diversity patterns along an elevation gradient from stacked SDMs: A case study on Mesoamerican ferns. **Global Ecology and Conservation**, v. 16, p. 00433, 2018.

TABARELLI, M.; LEAL, I. R.; SCARANO, F. R.; SILVA, J. Caatinga: legado, trajetória e desafios rumo à sustentabilidade. **Ciência e Cultura**, v. 70, n. 4, p. 25-29, 2018.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. Artmed, p. 163 - 171, 2017.

TAKETANI, R. G.; KAVAMURA, V. N.; DOS SANTOS, S. N. Diversity and technological aspects of microorganisms from semiarid environments. **Diversity and Benefits of Microorganisms from the Tropics**, p. 3-19, 2017.

TEAM, R. C. R: **A language and environment for statistical computing**. Supplemental Information References, v.1, p. 371-78, 2021.

TERRA, M. DE C. N. S.; SANTOS, R. M.; PRADO JÚNIOR, J. A.; DE MELLO, J. M.; SCOLFORO, J. R. S.; FONTES, M. A. L.; SCHIAVINI, I.; DOS REIS, A. A.; BUENO, I. T.; MAGNAGO, L. F. S.; TER STEEGE, H. Water availability drives gradients of tree diversity, structure and functional traits in the Atlantic–Cerrado– Caatinga transition, Brazil. **Journal of Plant Ecology**, v. 11, n. 6, p. 803–814, 2018.

TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M. S. P.; BARBOSA, A. A.; RODRIGUEZ, D. A.; DE OLIVEIRA SANTANA, M.; SESTINI, M. F. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 197-206, 2018.

TROVÃO, D. M. D.; FERNANDES, P. D.; ANDRADE, L. A. D.; DANTAS NETO, J. Variações sazonais de aspectos fisiológicos de espécies da Caatinga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 307-311, 2007.

VAN DEN HOOGEN, J.; ROBMANN, N.; ROUTH, D.; LAUBER, T.; VAN TIEL, N.; DANYLO, O.; CROWTHER, T. W. A geospatial mapping pipeline for ecologists (preprint). **BioRxiv**, v. 07, n. 451145, p. 2021.07, 2021.

VIOLA, F.; CARACCILOLO, D.; FORESTIERI, A.; PUMO, D.; NOTO, L. V. Annual runoff assessment in arid and semiarid Mediterranean watersheds under the Budyko's framework. **Hydrology Processes**, v. 31, n. 10, p. 1876–1888, 2017.

WEB OF SCIENCE. Analytics, Clarivate. 2020.

WHITTAKER, R. H. **Evolution and measurement of species diversity**. **Taxon**, v. 21, n. 2-3, p. 213-251, 1972.

ZAIDAN, L. B. P.; BARBEDO, C. J. Quebra de dormência em sementes. Germinação: do básico ao aplicado. Porto Alegre, **Artmed**, p. 135-146, 2004.

ZHANG, P.; CAI, Y.; YANG, W.; YI, Y.; YANG, Z.; FU, Q. Contributions of climatic and anthropogenic drivers to vegetation dynamics indicated by NDVI in a large dam-reservoir-river system. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 120477, 2020.