



Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal

Departamento de Engenharia Florestal

Licenciatura em Engenharia Florestal

Projecto Final

**Modelagem da distribuição espacial da *Brachystegias* spp. em
Moçambique**



Autora: Telma Eduardo Chambule

Supervisor: Mestre Sá Nogueira Lisboa, Eng.

Maputo, Abril de 2025

Modelagem da distribuição espacial da *Brachystegias* spp. em Moçambique

Projecto final submetido à Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal, Departamento de Engenharia Florestal, como parte dos requisitos para obtenção do grau académico de Licenciada em Engenharia Florestal, sob a supervisão do Mestre Sá Nogueira Lisboa (MSc)

RESUMO

Este trabalho teve como objectivo avaliar a distribuição espacial das espécies do género *Brachystegia* nas florestas de Miombo em Moçambique, recorrendo a técnicas de Modelagem de Distribuição de Espécies (SDM). Para a realização do estudo, foram utilizados dados do Inventário Florestal Nacional (IFN), através dos quais se seleccionaram os indivíduos da espécie e as respectivas coordenadas nas parcelas onde foi registada a sua ocorrência. Variáveis ambientais como precipitação, temperatura, cobertura de sombra (hillshade) e características topográficas foram usadas como preditoras na modelagem. Foram testados diferentes modelos (Random Forest, Modelos Lineares Generalizados, Modelos Aditivos Generalizados e Maxent), tendo o modelo Random Forest se destacado pelo seu elevado desempenho, avaliado por métricas como AUC, COR, TSS e Deviance. Com base no modelo seleccionado, foram elaborados mapas de distribuição potencial que permitiram identificar áreas com elevada adequabilidade para a ocorrência das *Brachystegias* spp.. Os resultados demonstraram que variáveis como hillshade, precipitação trimestral, temperatura do mês mais frio e do mês mais quente são determinantes para a distribuição das espécies em estudo. Este trabalho constitui um contributo relevante para o planeamento ambiental, conservação da biodiversidade e gestão sustentável das florestas de Miombo, sobretudo num cenário de crescentes pressões antrópicas e alterações climáticas.

Palavras-chave: Distribuição de espécies; *Brachystegia* spp; Modelagem de distribuição; Floresta de Miombo; Variáveis ambientais; Conservação da biodiversidade.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the spatial distribution of *Brachystegia* species in the Miombo woodlands of Mozambique using Species Distribution Modeling (SDM) techniques. The analysis was based on data from the National Forest Inventory (NFI), selecting individual occurrences of *Brachystegia* spp. and their coordinates across all recorded plots. Environmental variables such as precipitation, temperature, hillshade, and topographic characteristics were used as independent predictors. Several modeling approaches were tested—including Random Forest, Generalized Linear Models (GLM), Generalized Additive Models (GAM), and Maxent—with Random Forest achieving the best performance, as measured by AUC, COR, TSS, and Deviance metrics. The final model enabled the creation of potential distribution maps, identifying environmentally suitable areas for *Brachystegia* spp. occurrence. The most influential variables were hillshade, quarterly precipitation, and the minimum and maximum temperatures. These findings provide valuable insights for forest planning and biodiversity conservation, reinforcing the importance of predictive modeling in the sustainable management of Miombo ecosystems, especially under increasing anthropogenic and climate pressures.

Keywords: Species distribution; *Brachystegia* spp; Species distribution modeling; Miombo forest; Environmental variables; Biodiversity conservation.

DEDICATÓRIA

Aos meus amados pais, Eduardo Chambule e Fátima Serrote, cujo apoio e o amor incondicional foram cruciais durante todo o meu percurso académico.

Á vós dedico!

AGRADECIMENTOS

Ao meu bom Deus, pela força, inspiração e coragem para superar os desafios desta jornada e por me permitir viver experiências que jamais ousei pedir em oração.

Ao meu supervisor, Mestre Sá Nogueira Lisboa por sua paciência, orientação e ensinamentos que me guiaram em cada etapa deste trabalho. Sua dedicação e apoio foram fundamentais para o desenvolvimento deste estudo.

Ao Milton Edmirson da Joana, a quem várias vezes recorri para ajudar-me no processo de elaboração deste trabalho, estendo o meu mais profundo agradecimento. Igualmente agradeço as minhas amigas, Angélica Ngale, Maura Machava e Leia Muhala, que estiveram sempre a disposição para apoiar-me nos momentos que sempre precisei.

Aos meus pais, Eduardo Chambule e Fátima Serrote, pelo amor incondicional e suporte constante. Aos meus irmãos, Artur Chambule, João Chambule, Eugénia Chambule, Luciano Chimate e Eduardo Chambule Júnior, por serem minha maior motivação. Ao meu tio, João Serrote, a quem considero um segundo pai, por seu apoio moral e financeiro, pelas palavras de incentivo e por ser minha inspiração.

Ao professor Agnelo Fernandes, pelo apoio, conselhos e incentivo ao longo da minha formação.

Aos amigos e colegas de curso, Bendita Nhamtumbo, Elton Donça, Taimo Taimo, Paiva Paiva e Rúben Apeste, pelo apoio inestimável. À Séfora Bambo e Márcia Zanqueu, que levarei para a vida, por tornarem essa caminhada mais especial.

A todos que, directa ou indirectamente, colaboraram para a realização desta pesquisa, oferecendo palavras de incentivo, compartilhando conhecimentos ou ajudando na análise dos dados. E a todos que acreditaram no meu potencial e me inspiraram a persistir na busca pelo conhecimento.

Muito obrigada!

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo

Figura 2: Esquema da unidade amostral

Figura3: Gráficos de Importância Relativa das Variáveis nos Diferentes Modelos de SDM

Figura 4: Gráfico da Relação entre Ocorrência das *Brachystegias* e Variáveis Ambientais

Figura 5: Gráficos do Desempenho dos Modelos Random Forest, GLM,GAM e Maxent com Subsampling e Bootstrap (Curvas ROC)

Figura 6: Mapa Da Distribuição espacial das *Brachystegias* em Moçambique

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tabela de Avaliação do Desempenho dos Modelos de distribuição de espécies

Tabela 2: Tabela de Avaliação do Desempenho dos Modelos de distribuição de espécies

LISTA DE ABREVIATURAS

AUC	Área sob a curva
Bio3	Precipitação trimestral
Bio4	Temperatura do mês mais frio
Bio5	Temperatura máxima do mês mais quente
COR	Correlação
CV	Coefficiente de variação
GAM	Modelos aditivos gerais
GLM	Modelos lineares generalizados
Hillshade	Sombreamento do terreno
RF	Random Forest
ROC	Curva característica de operação do receptor
SDM	Modelagem de Distribuição de Espécies
TSS	Estatística de habilidades positiva

Índice

RESUMO.....	i
ABSTRACT	ii
DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	vii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1.Contextualização.....	1
1.2.Problema de estudo e justificação.....	2
1.3. Objectivos.....	3
1.3.1. Objectivo geral.....	3
1.3.2. Objectivos específicos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Tipos de Florestas em Moçambique.....	4
2.1.1. Florestas de Miombo em Moçambique	5
2.1.1.1. Importância da Diversidade de Espécies da floresta de miombo	6
2.1.1.2. Importância Ecológica da Floresta de Miombo.....	6
2.1.1.3. Factores que Influenciam a Distribuição Espacial de Miombo	7
2.1.1.3.1 Distúrbios Naturais e Humanos	10
2.1.1.3.1.1 Incêndios Florestais	10
2.2. Modelagem da Distribuição de Espécies.....	11
2.2.1 Modelos de distribuição de espécies.....	12
2.2.1.2. Modelos Aditivos Generalizados (GAM).....	14
2.2.1.3. Modelo Maxent (Maximum Entropy Modeling).....	14
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
3.1 Descrição da área de estudo.....	17
3.1.1 Localização Geográfica	17
3.1.2 Clima e Vegetação.....	18
3.1.2.1 Biodiversidade	18

3.1.3 Solos	18
3.2 Metodologia	19
3.2.1 Fonte de dados	19
3.2.4. Caracterização das variáveis ambientais seleccionadas	21
3.3.2 Desenvolvimento do modelo	23
3.3.3 Avaliação e selecção do modelo	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1 Identificação das variáveis ambientais mais importantes que influenciam a distribuição das <i>Brachystegias</i> spp.	25
4.1.2 Probabilidade de ocorrência das espécies de acordo com as variáveis	27
4.2 Avaliação do desempenho e selecção do modelo	29
4.3 Mapa de distribuição das <i>Brachystegias</i> spp. em Moçambique	33
5. CONCLUSÕES e RECOMENDAÇÕES	35
5.1 CONCLUSÕES	35
5.2 RECOMENDAÇÕES	35
6. BIBLIOGRAFIA	36

1. INTRODUÇÃO

1.1.Contextualização

A floresta de Miombo constitui um dos maiores ecossistemas de savana tropical da África Austral, estendendo-se por cerca de 2,7 milhões de km² e abrangendo países como Angola, Zâmbia, Tanzânia, Malawi, Zimbabué e Moçambique (Ryan *et al.*, 2016; WWF, 2024). Este ecossistema é dominado por espécies dos géneros *Brachystegia*, *Julbernardia* e *Isoberlinia*, pertencentes à família Fabaceae, e caracteriza-se por uma vegetação maioritariamente caducifólia, adaptada a climas tropicais e subtropicais com marcada sazonalidade. As florestas de Miombo desempenham um papel crucial na conservação da biodiversidade, na regulação dos ciclos climáticos e hidrológicos, bem como no sustento de milhões de pessoas que dependem dos seus recursos para alimentação, energia, saúde e rendimento (Deweese *et al.*, 2011; Lewis *et al.*, 2017).

Em Moçambique, as florestas de Miombo ocupam cerca de 34 milhões de hectares, o que corresponde a aproximadamente 43% da área florestal total do país (FNDS, Relatório de Avaliação das Florestas em Moçambique. Ministério da Terra, Ambiente e Desenvolvimento Rural., 2019) (FNDS, 2019). Estas formações florestais possuem uma importância estratégica tanto do ponto de vista ecológico como socioeconómico, fornecendo produtos lenhosos e não-lenhosos, serviços ecossistémicos essenciais e suporte à subsistência de diversas comunidades locais (Siteo *et al.*, 2020). A vegetação dominante é composta por árvores de folha caduca, resistentes a solos pobres e a longos períodos de seca, sendo *Brachystegia spp.* o género mais representativo e estruturante do ecossistema (Frost, 1996; Ribeiro *et al.*, 2002).

As *Brachystegias* são espécies-chave para a sustentabilidade do Miombo, pois contribuem significativamente para a provisão de serviços ecossistémicos como o sequestro de carbono, a protecção do solo, a manutenção de habitats naturais e a regulação do microclima (Campbell, 1996; Chidumayo & Gumbo, 2010). Para além disso, são fontes importantes de madeira, lenha e produtos de uso tradicional. No entanto, as florestas de Miombo enfrentam uma pressão crescente resultante de actividades humanas como a agricultura extensiva, a produção de carvão vegetal, a exploração madeireira e a expansão urbana desordenada. Estas práticas têm

contribuído para a fragmentação e degradação dos habitats, comprometendo a integridade ecológica destas formações (Ryan *et al.*, 2016; Siteo *et al.*, 2020).

Neste contexto, torna-se fundamental compreender a distribuição espacial das *Brachystegias* e os factores ambientais que influenciam a sua ocorrência, de modo a apoiar estratégias eficazes de conservação e gestão sustentável do ecossistema de Miombo em Moçambique.

1.2. Problema de estudo e justificação

Este trabalho tem como objectivo principal mapear a ocorrência espacial das espécies do género *Brachystegia* em Moçambique e modelar a sua distribuição em função de variáveis ambientais e antropogénicas. As florestas de Miombo, dominadas por estas espécies, constituem ecossistemas vitais para o país, não só pela sua elevada biodiversidade, mas também pelos múltiplos serviços ecossistémicos que oferecem. Entre estes destacam-se a regulação climática, o ciclo de nutrientes, a conservação do solo e a provisão de recursos naturais como madeira, lenha e produtos não-lenhosos (Frost, 1996; Siteo *et al.*, 2020).

Contudo, estas formações florestais enfrentam ameaças crescentes devido à intensificação das actividades humanas, como a agricultura itinerante, a produção de carvão vegetal, a exploração madeireira e a expansão urbana desordenada (Ryan *et al.*, 2016). Estes factores têm contribuído para a degradação e fragmentação dos habitats, comprometendo a integridade ecológica do ecossistema de Miombo e a sobrevivência das *Brachystegias* spp.

A ausência de informação detalhada e actualizada sobre a distribuição espacial das *Brachystegias* e os factores que condicionam a sua ocorrência limita a eficácia das estratégias de conservação e de manejo sustentável. Este défice de conhecimento dificulta a identificação de áreas prioritárias para a conservação, bem como o desenvolvimento de políticas que conciliem as necessidades do desenvolvimento socioeconómico com a protecção ambiental (Lewis *et al.*, 2017).

Assim, este estudo justifica-se pela necessidade urgente de compreender a distribuição actual das *Brachystegias* em Moçambique e de identificar os principais determinantes ambientais e antropogénicos da sua ocorrência. A utilização de modelos preditivos de distribuição de espécies

permitirá antecipar os impactos de alterações climáticas e da pressão humana, fornecendo uma ferramenta essencial para o planeamento florestal a longo prazo e para o reforço da resiliência dos ecossistemas de Miombo (Malhi *et al.*, 2013; Siteo *et al.*, 2020).

Os resultados deste trabalho fornecerão informações críticas para os decisores políticos, gestores de recursos naturais e organizações de conservação. Estas informações servirão de base para a formulação de estratégias mais eficazes de conservação, uso sustentável dos recursos florestais e definição de áreas prioritárias de intervenção, contribuindo para a preservação dos ecossistemas de Miombo em Moçambique.

1.3. Objectivos

1.3.1. Objectivo geral

- ✓ Analisar a distribuição espacial das espécies *Brachystegia* spp. (*Brachystegia boemi* e *Brachystegia speciformis*) na floresta de Miombo em Moçambique

1.3.2. Objectivos específicos

- ✓ Identificar as variáveis ambientais mais importantes que influenciam a distribuição da *Brachystegia boemi* e *Brachystegia speciformis*.
- ✓ Construir e validar modelos preditivos utilizando técnicas de modelagem de distribuição de espécies.
- ✓ Gerar mapa de distribuição das espécies de *Brachystegia* spp em Moçambique com base no melhor modelo desenvolvido.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tipos de Florestas em Moçambique

Moçambique conta actualmente com uma área de cobertura florestal natural de 34 milhões de hectares que além de benefícios económicos e imediatos bem como agente contribuinte para a economia global do país, também fornecem serviços ecossistêmicos de valor local e global dos quais podem se citar: a regulação do clima através da captura e armazenamento de carbono, protecção das bacias hidrográficas através do controle da erosão do solo, qualidade e quantidade da água, bem como o habitat para espécies importantes a nível global (Aquino, Lim, & Kaechele, 2018).

Moçambique possui uma diversidade significativa de tipos de florestas, cada uma desempenhando um papel crucial na ecologia, economia e cultura do país. Segundo Viana (2015), apesar do marcante histórico de degradação dos recursos naturais, Moçambique é considerado ainda um país rico em recursos da flora e fauna, o que faz com que as principais políticas de desenvolvimento económico da população incluam tais recursos como prioritários. Em 2009, eram estimados pelo MICOA cerca de 5.500 espécies de plantas (incluindo microalgas) distribuídas em cinco regiões fito-geográficas e organizadas como Miombo, Mopane, florestas indiferenciadas e mosaico costeiro.

A floresta de Miombo é a mais extensa vegetação da África Austral e de Moçambique e, se caracteriza principalmente pelas espécies *Brachystegia*, *Julbernardia* e *Pteleopsis*. A floresta de Mopane é a segunda maior vegetação e se caracteriza pela presença de espécies como *Colophospermum mopane*, *Adansonia digitata*, *Azelia quanzensis* e *Sterculia rogersii*.

As florestas indiferenciadas são caracterizadas principalmente por *Acacia spp*, *Azelia quanzensis*, *Sclerocarya birrea*, *Albizia versicolor*, *Terminalia sericea* e *Petophorum africanum*. As zonas com vegetação mosaica costeira são cobertas por diferentes tipos de vegetação que normalmente crescem ao longo da costa, elas incluem florestas de areia, florestas de pântano, florestas de dunas, pastagens e floresta de mangal (MICOA,2009).

O valor social das florestas é também de extrema importância no contexto nacional entendendo e considerando que grande parte das florestas são uma fonte de símbolos culturais e locais sagrados para as comunidades locais (Viana, 2015). Apesar de Moçambique ainda dispor de uma

extensão florestal considerável, é notável o grande e rápido processo de desmatamento, que de acordo com os resultados do último Inventário Florestal Nacional corresponde a uma taxa de 0,79%, com perdas anuais de cerca de 267000 ha de florestas o que significa que por várias razões e causas já conhecidas, a conservação da biodiversidade em Moçambique ainda estão além do desejado (MITADER, 2018).

2.1.1. Florestas de Miombo em Moçambique

As florestas de Miombo são ecossistemas de savana predominantes em Moçambique, estendendo-se principalmente pelas regiões centro e norte do país, abrangendo províncias como Niassa, Cabo Delgado, Nampula, Zambézia, Tete e Manica (Ryan *et al.*, 2016; Ribeiro *et al.*, 2021). Caracterizam-se por uma vegetação dominada por árvores caducifólias dos géneros *Brachystegia*, *Julbernardia* e *Isoberlinia*, formando um mosaico de savana arborizada altamente adaptado a regimes sazonais de chuva e seca (Chidumayo *et al.*, 2019). Estas florestas possuem uma biodiversidade rica, incluindo não só árvores e arbustos como *Combretum spp.*, *Acacia spp.* e *Diospyros spp.*, mas também um sub-bosque diverso em espécies herbáceas com valor ecológico, alimentar e medicinal para as comunidades locais (Timberlake & Chidumayo, 2011).

A fauna das florestas de Miombo inclui uma grande variedade de mamíferos, como o elefante africano (*Loxodonta africana*), búfalo, diversas espécies de antílopes, bem como predadores como o leão (*Panthera leo*), o leopardo (*Panthera pardus*) e a hiena-malhada (*Crocuta crocuta*) (Mittermeier *et al.*, 2017). A avifauna é igualmente notável, com presença de pombos, passeriformes e espécies endémicas associadas a habitats florestais. Adicionalmente, estas florestas albergam uma diversidade de répteis, incluindo serpentes e lagartos, e anfíbios adaptados aos micro-habitats húmidos do sub-bosque (Gonzalez, Smith & Jones, 2021). A importância ecológica do Miombo vai além da biodiversidade. Estes ecossistemas desempenham um papel crucial na regulação climática, conservação do solo e fornecimento de serviços ecossistémicos essenciais às populações humanas.

2.1.1.1. Importância da Diversidade de Espécies da floresta de miombo

De acordo com estudos recentes, a elevada diversidade florística e faunística das florestas de Miombo desempenha um papel crucial na resiliência ecológica destes ecossistemas e na manutenção dos serviços ecossistêmicos essenciais, como o fluxo de nutrientes, a regulação do ciclo hidrológico e a estabilidade climática local (Ryan *et al.*, 2016; Ribeiro *et al.*, 2020). Esta biodiversidade sustenta meios de subsistência locais, através da provisão de alimentos, lenha, madeira para construção, plantas medicinais e outros produtos florestais não lenhosos de elevado valor económico e cultural (Chidumayo *et al.*, 2019). Além disso, a presença de espécies carismáticas e a beleza natural do Miombo constituem um potencial significativo para o ecoturismo sustentável, o que pode contribuir tanto para o desenvolvimento económico das comunidades locais como para os esforços de conservação florestal (Gumbo *et al.*, 2018). A integração do conhecimento ecológico tradicional com estratégias modernas de gestão florestal é apontada como fundamental para garantir a sustentabilidade a longo prazo destes serviços.

2.1.1.2. Importância Ecológica da Floresta de Miombo

As florestas de Miombo têm um alto valor para a conservação da biodiversidade, especialmente por serem o lar de várias espécies endémicas e ameaçadas. Para além disso, prestam serviços ecológicos fundamentais, como a regulação do ciclo da água, o sequestro de carbono e a reciclagem de nutrientes. Estas florestas ajudam ainda a prevenir a erosão dos solos e desempenham um papel importante na regulação do clima local (Ryan *et al.*, 2016; Ribeiro *et al.*, 2021). As comunidades que vivem próximas destas áreas dependem fortemente dos recursos que o Miombo oferece - desde madeira, lenha e carvão vegetal até alimentos como frutos silvestres e mel, sem esquecer as plantas medicinais, que são amplamente utilizadas na medicina tradicional (Chidumayo *et al.*, 2019; Gumbo *et al.*, 2018).

No entanto, apesar da sua importância, estas florestas enfrentam várias ameaças. Uma das mais preocupantes é a conversão de terras florestais para a agricultura, especialmente através da prática de corte e queima, que empobrece os solos e leva à perda de habitat. A exploração madeireira feita sem controlo, muitas vezes ilegal, agrava ainda mais esta degradação. Os incêndios - sejam naturais ou provocados - são comuns e podem ter impactos devastadores na composição e estrutura do ecossistema. Para além disso, o crescimento das cidades e das

infraestruturas está a fragmentar cada vez mais o habitat natural, colocando em risco tanto a biodiversidade como os serviços que estas florestas prestam às populações humanas (Sitoe *et al.*, 2012; Kalaba ., 2013).

Existem várias áreas protegidas que incluem florestas de Miombo em Moçambique, como a Reserva Nacional de Niassa, que é uma das maiores áreas de conservação do país, bem como o envolvimento de Moçambique em programas de REDD+ (Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal), que visam conservar as florestas e promover o desenvolvimento sustentável. Sitoe *et al.* (2012), falam da conservação das florestas de miombo e de sua diversidade de espécies que requer a implementação de políticas de manejo sustentável, monitoramento eficaz, educação ambiental e envolvimento das comunidades locais. Iniciativas para educar as comunidades locais sobre práticas sustentáveis de uso da terra e a importância da conservação florestal são essenciais. As pesquisas contínuas sobre a ecologia das florestas de Miombo, monitoramento de mudanças na cobertura florestal e o desenvolvimento de modelos preditivos são fundamentais para a conservação e manejo efectivo.

2.1.1.3. Factores que Influenciam a Distribuição Espacial de Miombo

Falar da distribuição espacial das florestas de Miombo é, indirectamente, falar da distribuição das espécies do género *Brachystegia*, as mais dominantes e que, por sua vez, dão nome a este ecossistema característico. A ocorrência dessas espécies em Moçambique é influenciada por uma combinação de factores ambientais, geográficos e climáticos. O país apresenta uma ampla variação climática, com zonas que vão desde florestas tropicais húmidas até regiões semiáridas. Estas condições climáticas e os diferentes regimes de precipitação e temperatura são determinantes na distribuição das *Brachystegias spp.* (Ryan *et al.*, 2016; Ribeiro *et al.*, 2021).

As *Brachystegias spp.* prosperam particularmente em regiões tropicais e subtropicais, onde as temperaturas permanecem relativamente altas durante todo o ano. Adaptadas a climas quentes, essas espécies não se desenvolvem bem em áreas com temperaturas muito baixas ou em locais sujeitos a geadas frequentes (Chidumayo *et al.*, 2019; Timberlake *et al.*, 2010).

A precipitação é um dos principais factores que determinam a distribuição das *Brachystegias*, encontradas em áreas com um regime de precipitação anual que varia de 500 mm a 1500 mm,

típicas de regiões com uma estação seca pronunciada (Chidumayo & Gumbo, 2010). As *Brachystegias* estão adaptadas a um ciclo sazonal de estação seca e estação chuvosa. Durante a estação seca, elas perdem suas folhas para conservar água, um processo conhecido como caducifólia, e a estação chuvosa, para seu crescimento, fornecendo a água necessária para o desenvolvimento das folhas, flores e frutos (Timberlake, Chidumayo, & Sawadago, 2010).

A topografia de Moçambique é bastante diversa, variando desde extensas planícies costeiras até cadeias montanhosas no interior. Essa variação altimétrica influencia directamente a distribuição das espécies do género *Brachystegia*, que podem ocorrer em faixas de altitude específicas ou ao longo de diferentes gradientes de elevação. A altitude está intimamente ligada à temperatura, regiões mais elevadas tendem a ser mais frescas e as *Brachystegias spp.* geralmente prosperam em altitudes mais baixas, onde as temperaturas são mais elevadas e constantes (Chidumayo *et al.*, 2019; Ribeiro *et al.*, 2021).

A precipitação também pode variar com a altitude, e em certas regiões, as áreas mais elevadas recebem mais chuva, o que pode beneficiar o crescimento das *Brachystegias*, desde que as temperaturas não sejam demasiado baixas. Altitudes muito elevadas podem, pelo contrário, limitar o desenvolvimento dessas espécies, devido ao frio mais acentuado. Além disso, a inclinação do terreno afecta directamente a drenagem do solo: encostas mais íngremes tendem a favorecer a drenagem, uma característica benéfica para as *Brachystegias*, que preferem solos bem drenados. Já as zonas planas podem reter mais água, favorecendo o encharcamento, o que pode comprometer o desenvolvimento dessas árvores (Gumbo *et al.*, 2018; Kalaba, 2013).

A orientação das encostas, frequentemente referida como aspecto, influencia significativamente o microclima local, especialmente no que diz respeito à exposição solar. No hemisfério sul, as encostas orientadas para o norte recebem maior incidência de radiação solar ao longo do dia, tornando-se mais quentes e secas do que aquelas voltadas para o sul. Este microclima mais seco e quente pode criar condições mais favoráveis ao desenvolvimento das *Brachystegias spp.*, que são adaptadas a ambientes de clima tropical com solos bem drenados e temperaturas elevadas. Por outro lado, encostas voltadas para o Sul tendem a manter-se mais húmidas e frescas, o que pode limitar o crescimento dessas espécies (Saidi, 2006). Assim, o aspecto topográfico constitui

um factor ambiental importante que molda a distribuição espacial das *Brachystegias* nas paisagens das florestas de Miombo.

A topografia pode criar microclimas, pequenas áreas com condições climáticas diferentes das regiões circundantes. Vales podem ter microclimas mais húmidos e protegidos, enquanto colinas podem ser mais secas e ventosas. Esses microclimas podem permitir que as *Brachystegias* cresçam em áreas que de outra forma seriam inadequadas (Timberlake, Chidumayo, & Sawadago, 2010).

Em áreas montanhosas ou com forte declive, a erosão do solo pode remover nutrientes essenciais e afectar a capacidade das *Brachystegias* de se estabelecerem. No entanto, a deposição de sedimentos em áreas mais baixas pode criar solos férteis que suportam o crescimento dessas árvores (Frost, 1996).

A composição do solo influencia directamente quais espécies vegetais podem prosperar em determinadas áreas. Solos arenosos, argilosos e calcários podem suportar diferentes comunidades de plantas. As *Brachystegias* são adaptadas a crescer em solos ácidos, comuns nas regiões de savana onde predominam. Esses solos, muitas vezes resultantes da decomposição de rochas graníticas e areníticas, possuem baixa fertilidade natural, mas as *Brachystegias* têm adaptações que lhes permitem prosperar nessas condições (Frost, 1996). Solos pobres em nutrientes, como os solos arenosos, são comuns nas regiões onde as *Brachystegias* se encontram. Essas árvores têm sistemas radiculares extensivos que lhes permitem ter acesso a nutrientes e água em profundidade, o que é uma adaptação importante para sobreviver em solos de baixa fertilidade (Chidumayo & Gumbo, 2010).

As *Brachystegias* preferem solos bem drenados. Em solos com boa drenagem, a água não se acumula, evitando problemas de encharcamento que podem ser prejudiciais às raízes das árvores. Solos arenosos e franco-arenosos, comuns nas savanas, fornecem as condições ideais de drenagem para essas árvores (Campbell & Angelsen, 2007). Solos argilosos, que retêm muita água, são menos favoráveis para as *Brachystegias*, pois podem levar ao encharcamento das raízes. Essas árvores são menos comuns em áreas com solos argilosos pesados, onde a drenagem é pobre (Timberlake, Chidumayo, & Sawadago, 2010).

As *Brachystegias* são adaptadas a solos com baixos níveis de matéria orgânica e nutrientes. Em muitas savanas, a camada superficial do solo é fina e pobre, mas essas árvores conseguem se desenvolver graças às suas adaptações específicas, como a fixação de nitrogênio e a associação com fungos micorrízicos, que ajudam na absorção de nutrientes (Scholes & Archer, 1997). Essas espécies ajudam a prevenir a erosão do solo com suas raízes profundas e extensivas que estabilizam o solo. Isso é especialmente importante em regiões com solos leves e arenosos, onde a erosão pode ser um problema significativo durante a estação chuvosa (Frost, 1996). O mesmo autor afirma que as *Brachystegias* dependem de um regime de precipitação sazonal para seu ciclo de vida, elas são adaptadas a regiões com uma estação chuvosa e uma estação seca bem definidas. A quantidade e a distribuição da precipitação durante a estação chuvosa são cruciais para o crescimento dessas árvores, pois elas dependem da água acumulada durante esse período para sobreviver à estação seca. Chidumayo e Gumbo (2010), em algumas áreas, as *Brachystegias* podem ter acesso a água subterrânea através de suas raízes profundas. Isso é particularmente importante em regiões onde a precipitação anual é baixa, mas a água subterrânea está disponível a uma profundidade acessível. Essas árvores têm raízes extensivas que lhes permitem explorar essa fonte de água

2.1.1.3.1 Distúrbios Naturais e Humanos

2.1.1.3.1.1 Incêndios Florestais

As *Brachystegias* são adaptadas a ambientes onde os incêndios florestais são frequentes. Suas cascas espessas protegem o tronco do calor intenso, e elas têm a capacidade de rebrotar rapidamente após um incêndio. Esse processo de regeneração ajuda a manter sua presença em áreas propensas a queimadas (Mbanze *et al.*, 2023). A frequência e a intensidade dos incêndios podem influenciar a composição das espécies nas savanas e florestas de Miombo. Incêndios frequentes tendem a favorecer as *Brachystegias*, que estão adaptadas ao fogo, em detrimento de outras espécies menos resistentes (Scholes & Archer, 1997; Gandiwa, 2011).

2.1.1.3.1.2 Secas

As *Brachystegias* spp são adaptadas a períodos de seca, característicos das savanas africanas. Elas perdem suas folhas durante a estação seca para reduzir a perda de água e têm raízes

profundas que lhes permitem ter acesso reservas de água subterrânea (Chidumayo & Gumbo, 2010).

2.1.1.3.1.3 Desmatamento e Conversão de Terras

A actividade humana, como a agricultura e a exploração madeireira, leva ao desmatamento das florestas de Miombo, resultando na redução das áreas onde as *Brachystegias* spp podem crescer. A remoção das árvores não só diminui a população de *Brachystegias* spp, mas também afeta a biodiversidade local que depende dessas árvores (Campbell & Angelsen, 2007). A conversão de terras para uso agrícola altera o habitat natural das *Brachystegias* spp, substituindo-as por culturas agrícolas. Isso resulta em uma perda significativa de habitat para essas árvores e as espécies que dependem delas (Chidumayo & Gumbo, 2010).

2.1.1.3.1.4. Urbanização

O crescimento das áreas urbanas resulta na fragmentação dos habitats naturais, criando pequenos blocos de florestas isoladas que podem não ser suficientes para suportar populações saudáveis de *Brachystegia* spp. A fragmentação reduz a conectividade entre populações, afectando a diversidade genética e a resiliência das espécies (Timberlake & Chidumayo, 2011).

2.2. Modelagem da Distribuição de Espécies

São ferramentas quantitativas que relacionam ocorrências conhecidas de uma espécie com variáveis ambientais, a fim de prever a sua distribuição potencial no espaço e/ou tempo. Estes modelos são amplamente utilizados em ecologia, conservação e gestão ambiental, permitindo inferir áreas adequadas para a presença de espécies com base em condições ambientais (Elith & Leathwick, 2009).

O conhecimento da distribuição geográfica é fundamental para apoiar estudos evolutivos e ecológicos das espécies. Porém, a sua delimitação é um desafio devido à existência de concentração espacial desigual de informação de distribuição das espécies, alto custo de trabalhos de campo, e às variações que ocorrem nessa distribuição ao longo do tempo (Pereira, De Rezendel, Koch, Kortz, & Dannati, 2012). Tendo em vista essa problemática, os métodos de Modelagem de Distribuição de Espécies (MDE) surgiram como uma grande contribuição para os estudos realizados nessas áreas. Os MDEs são muito utilizados, para priorizar áreas para conservação (Nobrega & De Marco Junior, 2011), discutir padrões biogeográficos (Werneck,

2012) e, com a disponibilização de dados modelados de clima passado e futuro, prever mudanças na distribuição dos organismos ao longo do tempo (Bonnacorso , Koch , & Peterson , 2006).

2.2.1 Modelos de distribuição de espécies

Os modelos lineares generalizados (GLM) e os modelos aditivos generalizados (GAM) são extensões da regressão linear que permitem modelar relações mais complexas entre variáveis dependentes e independentes. Ambos são amplamente utilizados na modelagem da distribuição de espécies devido à sua flexibilidade e capacidade de lidar com diferentes tipos de dados (Hastie, Tibshirani, & Friedman, 2009).

Diversos estudos têm utilizado modelos de distribuição de espécies (SDMs) como o GLM e o GAM para analisar e prever a distribuição espacial de espécies vegetais em diferentes regiões ecológicas, incluindo ecossistemas tropicais e florestas africanas. Esses modelos permitem avaliar como factores ambientais influenciam a ocorrência das espécies, sendo ferramentas essenciais na conservação e planeamento do uso da terra.

No contexto africano, Sosef *et al.* (2017) utilizaram modelos de distribuição, incluindo GLMs, para mapear a diversidade de árvores tropicais em África, com o objectivo de apoiar estratégias de conservação baseadas em dados ambientais e de ocorrência. O estudo revelou que a diversidade de espécies está fortemente associada a factores climáticos e edáficos, e mostrou que os GLMs fornecem resultados robustos em regiões com boa cobertura de dados.

Outro exemplo relevante é o estudo de De Cauwer *et al.* (2016), que aplicaram GAMs para modelar a distribuição de espécies características do Miombo em Angola, incluindo *Brachystegia* spp., *Julbernardia* spp. e *Isoberlinia* spp. Os autores demonstraram que o GAM, por sua flexibilidade em modelar relações não lineares, foi particularmente eficaz em capturar padrões complexos de resposta das espécies à precipitação, temperatura e tipos de solo, sendo mais adequado para espécies com nichos ecológicos variáveis.

Estes exemplos evidenciam que tanto os GLMs quanto os GAMs são amplamente aplicados em estudos africanos, contribuindo significativamente para a compreensão dos factores que determinam a distribuição das espécies florestais, como as *Brachystegia* spp., e para a identificação de áreas prioritárias para conservação.

2.2.1.1 Modelos Lineares Generalizados (GLM)

Os GLMs são uma generalização dos modelos de regressão linear que permitem que a variável dependente Y tenha uma distribuição diferente da normal, como a binomial, Poisson, gama, entre outras (Dobson & Barnett, 2008). Eles são compostos por três componentes principais:

Função de Ligação: transforma a média da variável dependente para a escala linear dos preditores.

Distribuição da Família Exponencial: especifica a distribuição da variável dependente (ex.: binomial para dados binários, Poisson para dados de contagem).

Modelo Linear: expressa a relação linear entre os preditores e a variável dependente transformada.

Fórmula:

$$g(E(Y)) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

onde:

g é a função de ligação,

$E(Y)$ é a média esperada de Y , e

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ são os coeficientes do modelo.

Exemplos de Aplicação:

Regressão Logística: Para modelar a presença/ausência de uma espécie:

$$\text{logit}(p) = \ln \frac{p}{1-p} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

Regressão de Poisson: Para modelar a contagem de indivíduos de uma espécie:

$$\ln(\lambda) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

2.2.1.2. Modelos Aditivos Generalizados (GAM)

Os GAMs são uma extensão dos GLMs que permitem modelar relações não lineares entre a variável dependente e as variáveis independentes usando funções suaves (splines). Eles são especialmente úteis quando se espera que a relação entre as variáveis seja complexa e não linear (Hastie & Tibshirani, Generalized Additive Models, 1990).

$$g(E(Y)) = \beta_0 + f_1(X_1) + f_2(X_2) + \dots + f_n(X_n)$$

Onde: f_i são funções suaves das variáveis X_i , em vez de coeficientes lineares.

Exemplo de Aplicação:

Modelar a relação não linear entre a abundância de uma espécie e variáveis ambientais complexas como temperatura e precipitação.

Comparação entre GLM e GAM

O GLM é adequado para relações lineares ou quando a relação entre a variável dependente e as independentes é bem conhecida, considerada a mais simples e interpretável. Enquanto o GAM é adequado para relações complexas e não lineares, mais flexível, mas pode ser mais difícil de interpretar devido à complexidade das funções suaves (Hastie, Tibshirani, & Friedman, 2009).

2.2.1.3. Modelo Maxent (Maximum Entropy Modeling)

O modelo Maxent é baseado na teoria da entropia máxima e é utilizado para modelar a distribuição potencial de espécies, utilizando apenas os dados de presença da espécie e variáveis ambientais correlacionadas (Phillips, 2006). Este método é especialmente adequado para conjuntos de dados com poucos registros de ocorrência, que é uma característica comum em regiões tropicais e subtropicais como Moçambique, onde as *Brachystegias* spp são predominantes. O algoritmo de Maxent busca a distribuição de probabilidade que maximiza a entropia, sujeita às restrições impostas pelos dados de ocorrência e pelas variáveis ambientais disponíveis (Elith, 2011). Como resultado, Maxent estima a distribuição potencial da espécie, proporcionando mapas detalhados sobre onde a espécie pode ocorrer, mesmo em áreas não amostradas. Este método tem sido amplamente utilizado para prever a distribuição de árvores em

florestas tropicais, dada a sua alta precisão e facilidade de uso com dados de presença apenas (Merow, 2013).

Em África, Pfeifer *et al.* (2012) aplicaram o MaxEnt para modelar a distribuição de espécies-chave de árvores do Miombo, incluindo *Brachystegia* spp., *Julbernardia globiflora* e outras espécies dominantes, com o objectivo de compreender os impactos das mudanças climáticas na distribuição dessas florestas. O estudo mostrou que a distribuição futura destas espécies poderá ser significativamente alterada devido ao aumento das temperaturas e à variação nos padrões de precipitação. O MaxEnt demonstrou elevada precisão na projecção de áreas ambientalmente adequadas, mesmo em contextos com limitações de dados.

2.2.1.4. Modelo Random Forest

é um algoritmo de aprendizagem automática baseado em árvores de decisão, que utiliza uma abordagem de *ensemble* para construir múltiplas árvores a partir de subconjuntos aleatórios dos dados e das variáveis predictoras, combinando os seus resultados para melhorar a precisão e robustez das previsões. Esta técnica reduz o risco de sobre ajuste, um problema comum quando se utiliza apenas uma árvore de decisão, e é altamente eficaz em contextos com muitas variáveis ou relações complexas entre predictores e a variável resposta (Oppel *et al.*, 2012). O Random Forest pode trabalhar com dados de presença/ausência ou de presença apenas, e permite incorporar variáveis ambientais contínuas ou categóricas, o que o torna particularmente adequado para modelar a distribuição de espécies em ecossistemas diversos (Zhang *et al.*, 2019).

Ao contrário do Maxent, que se baseia exclusivamente em dados de presença, o Random Forest pode lidar tanto com dados de presença quanto de ausência, o que permite uma análise mais completa e precisa da distribuição potencial das *Brachystegias* spp, especialmente em áreas onde a ausência de dados pode ser indicativa da real ausência da espécie (Cutler D. R., 2007). Este modelo também oferece a possibilidade de analisar a importância de cada variável predictor, permitindo entender melhor quais factores ambientais são mais relevantes para a distribuição das espécies (Rodriguez-Galiano, Ghimire, Rogan, Chica-Olmo, & Rigol-Sanchez, 2012).

Ambos os modelos podem ser usados de forma complementar, o Maxent para prever áreas potenciais de distribuição com base em registos de ocorrência e o Random Forest para incorporar

dados de ausência e variáveis ambientais mais complexas, permitindo um entendimento mais completo da ecologia e dos padrões de distribuição das *Brachystegias* spp em Moçambique.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição da área de estudo

3.1.1 Localização Geográfica

Moçambique é um país localizado na região sudeste da África (Figura 1), banhado pelo Oceano Índico a leste. Faz fronteira ao norte com a Tanzânia, a noroeste com o Malawi e Zâmbia, a oeste com o Zimbábue e a sudoeste com a África do Sul e a Essuatíni (antiga Suazilândia). Latitude aproximadamente entre $10^{\circ} 27' S$ e $26^{\circ} 52' S$ e Longitude aproximadamente entre $30^{\circ} 12' E$ e $40^{\circ} 51' E$ (MITADER M. d., 2015)

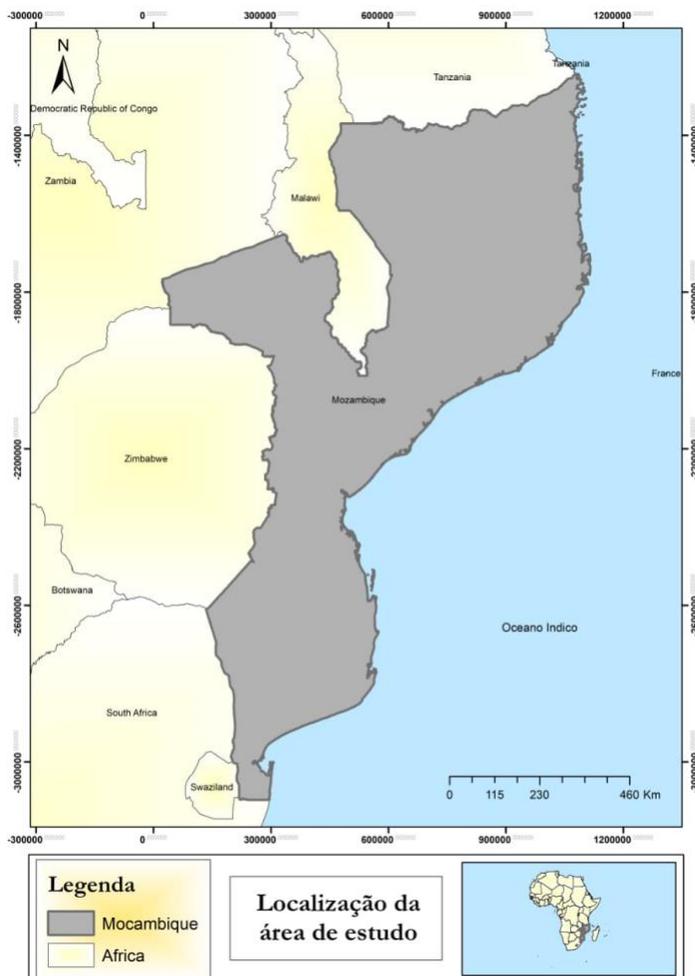


Figura 1: Localização da área de estudo.

3.1.2 Clima e Vegetação

Moçambique possui um clima tropical, com uma estação chuvosa que vai de Novembro a Abril e uma estação seca de Maio a Outubro. A variação climática influencia directamente os diferentes tipos de vegetação no país, que incluem florestas tropicais, savanas, zonas húmidas e áreas costeiras com floresta de mangal. As florestas tropicais estão localizadas principalmente nas regiões norte e central, caracterizadas por alta biodiversidade. A savana, predominantes no Sul e no Centro do país, com vegetação de gramíneas e árvores esparsas. As zonas húmidas, são áreas ricas em biodiversidade, especialmente nas bacias dos rios Zambeze e Limpopo. E florestas de mangal, encontrados ao longo da costa, desempenham um papel crucial na protecção costeira e na biodiversidade marinha (MICOA, 2007).

3.1.2.1 Biodiversidade

Moçambique é um país de alta diversidade biológica, com uma vasta gama de ecossistemas que abrigam uma rica biodiversidade. A fauna inclui grandes mamíferos como elefantes, leões, leopardos, búfalos e hipopótamos, além de uma diversidade de aves, répteis e anfíbios. A flora é igualmente diversa, com várias espécies endémicas e economicamente importantes (Smith & Boal, 2009).

3.1.3 Solos

Moçambique possui solos ácidos, que são solos profundos, bem drenados, de cor avermelhada, ricos em óxidos de ferro e alumínio, mas geralmente pobres em nutrientes, encontrados principalmente nas regiões norte e centro do país (INE, 2020). Encontramos igualmente solos arenosos, bem drenados, com baixa capacidade de retenção de água e nutrientes, adequados para culturas como mandioca e caju, comuns ao longo da faixa costeira (FAO, 2021). Solos aluviais, ricos em nutrientes devido aos depósitos de sedimentos, muito férteis e ideais para a agricultura, encontrados nas planícies aluviais dos principais rios, como o Zambeze (MASA, 2019). Os solos argilosos solos com boa capacidade de retenção de água e nutrientes, mas podem ser difíceis de manejar, presentes em várias partes do país, especialmente no interior (CIDS, 2018). E solos

calcários, caracterizados pela presença de carboneto de cálcio, encontrados em áreas específicas como a região de Tete (CIDS, 2018).

3.1.4 Topografia

Planícies costeiras, terrenos baixos e relativamente planos, estendem-se ao longo da costa do Oceano Índico. Predominante ao longo da costa (FAO, 2021). Planaltos e terras altas, as altitudes variam entre 200 a 1000 metros, incluem planaltos como o de Niassa e Tete, encontrados principalmente no interior e nas regiões centro e norte (INE, 2020). Áreas montanhosas com altitudes que podem ultrapassar os 2000 metros, incluem a Serra da Gorongosa e a Serra do Chimanimani, presente no centro e norte do país (MASA, 2019). Ainda encontram-se também os vales fluviais, solos férteis devido ao sedimento aluvial, presentes ao longo dos principais rios, como o Zambeze, Limpopo e Rovuma, ao longo dos principais cursos de água (CIDS, 2018).

3.2 Metodologia

A metodologia adaptada para a realização do trabalho, consistiu na revisão da literatura para compreender a ecologia das *Brachystegias* spp. e os factores que afectam sua distribuição. Foram consultados livros, artigos científicos e relatórios técnicos de instituições de pesquisa. A seguir é apresentada a bordagem metodológica aplicada para cada objectivo específico para o alcance dos resultados preconizados neste estudo.

3.2.1 Fonte de dados

O presente estudo utilizou dados secundários que foram obtidos do inventário nacional de florestas de 2018, que inclui informações sobre a localização geográfica, características das espécies e dados ambientais. Segundo o inventário nacional 2018, uma grelha de pontos de 4 km × 4 km sobreposto ao mapa da área de estudo (população alvo), exceptuando as províncias de Gaza e Cabo Delgado, foi definido como o quadro amostral, em que cada ponto da grelha representa a localização potencial da unidade amostral. Para as províncias de Gaza e Cabo Delgado onde decorreram os inventários florestais provinciais (IFP) levados a cabo pela JICA, usou-se uma grelha de 1 km x 1 km.

Foi usado como desenho amostral a amostragem aleatória estratificada restrita. Pois para as províncias de Cabo Delgado e Gaza a distância mínima potencial entre as unidades amostrais era de 1 km e para as restantes províncias era de 4 km. O esquema do conglomerado utilizado no IFN para a recolha de dados é apresentado na Figura 2.

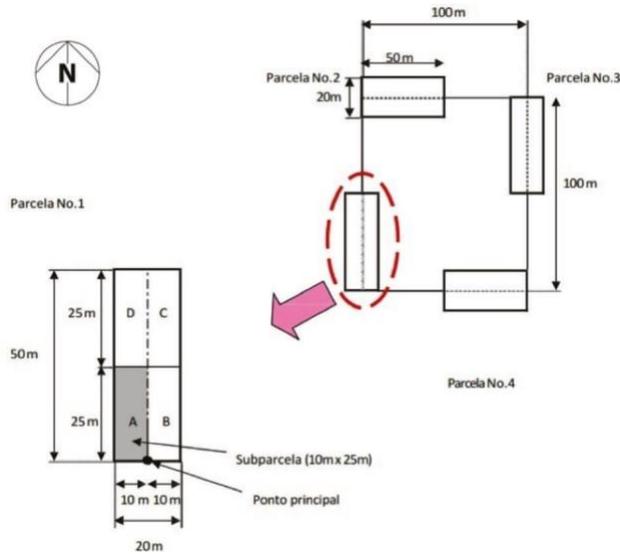


Figura 2: Esquema da unidade amostral. Fonte: FNDS (2018)

A estratificação adoptada foi a tipológica, em que os tipos florestais considerados como os estratos foram Mopane, Mecrusse, FSD (Miombo) e FSSV. Adoptou-se a alocação óptima das unidades amostrais aos estratos. Portanto, a distribuição das unidades amostrais aos estratos foi feita de forma proporcional à variabilidade de cada estrato, ponderada com a área (FNDS, 2018). Dentro de cada estrato usou-se a Amostragem Aleatória Simples Restrita com reposição, culminando em população infinita. O número total de unidades amostrais foi determinado de tal modo que o erro amostragem relativo do volume total não excedesse os 10% a um nível de significância de 5%. Para amostragem aleatória estratificada com alocação óptima e considerando população infinita, totalizando 992 unidades amostrais. A prior, foram definidas como unidades amostrais clusters compostos por 4 unidades de registo de dados (parcelas) de 50 m × 20 m (0.1 ha), distando 50 m uma da outra e subdivididas em 4 sub-parcelas de 25 m × 10 m (0.025 ha), adoptado dos inventários provinciais de Gaza e Cabo Delgado (FNDS, 2018).

3.2.2. Justificativa para o uso de dados secundários

O uso de dados secundários neste estudo se justifica pela viabilidade e disponibilidade de bases de dados climáticos e topográficos de alta resolução. Esses dados, quando bem tratados, proporcionam uma ampla cobertura espacial e temporal a um custo reduzido, viabilizando o estudo de áreas extensas como a região de ocorrência das *Brachystegias* spp. Dados primários seriam inviáveis devido ao custo elevado e ao tempo necessário para colecta em campo, especialmente em áreas remotas e de difícil acesso (Brown, White, & Smith, 2021). Além disso, fontes de dados secundários como CHELSA e SRTM são amplamente utilizadas e validadas, o que contribui para a confiabilidade dos resultados (Miller, Nelson, & Martinez, 2020).

3.2.3. Colecta de dados ambientais

Os dados ambientais utilizados neste estudo foram obtidos de fontes globais, como bases de dados climáticos e topográficos amplamente aceitos, incluindo o CHELSA e o SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Os dados de CHELSA têm uma resolução espacial de 100 m e foram obtidos através do seguinte link: <https://chelsa-climate.org/>. Enquanto os dados de SRTM ostentam uma resolução espacial de 90 m. Esses dados passaram por uma verificação inicial para remover inconsistências, como valores em falta e dados duplicados, e foram ajustados para garantir a correspondência espacial com a área de estudo. A resolução espacial dos dados foi padronizada para coincidir com a precisão necessária para modelagem, estabelecendo uma grade de 100 m x 100 m como base para interpolação (Smith & Lee, 2020). Esse processo visou garantir a integridade e a precisão dos dados para minimizar erros durante a modelagem (Oliveira & Silva, 2018).

3.2.4. Caracterização das variáveis ambientais seleccionadas

As variáveis ambientais utilizadas no modelo de distribuição das *Brachystegias* spp incluem características climáticas, e topográficas. A variável hillshade, por exemplo, reflecte a densidade de sombreamento no habitat, o que pode afectar o desenvolvimento das espécies de *Brachystegias* spp, uma vez que elas possuem uma relação particular com a luz solar (Jones H. T., 2019). Variáveis climáticas como Bio3 (Isotermalidade), Bio4 (Sazonalidade de temperatura), Bio5 (Temperatura máxima do mês mais quente), Bio9 (Temperatura do trimestre mais seco), Bio10 (Temperatura média do trimestre mais quente), Bio13 (Precipitação do mês

mais húmido), Bio14 (Precipitação do mês mais seco) e Bio18 (Precipitação do trimestre mais quente) fornecem uma descrição detalhada das condições climáticas que influenciam a sobrevivência e crescimento das *Brachystegias* spp (Hijmans, 2005). A variável aspecto fornece informações sobre a orientação do terreno, o que pode afectar factores como a exposição solar e o microclima da região. A Tabela 1 ilustra a lista de dados utilizados neste estudo.

Tabela 1: Lista de dados climáticos e topográficos utilizados para a modelagem de distribuição espacial de *Brachystegia* spp. em Moçambique

Categoria	Variável	Resolução	Fonte
Climático	Isotermalidade (Bio 3)	100 m	CHELSA
	Sazonalidade da temperatura (Bio 4)	100 m	CHELSA
	Temperatura máxima do mês mais quente (Bio 5)	100 m	CHELSA
	Temperatura do trimestre mais seco (Bio 9)	100 m	CHELSA
	Temperatura média do trimestre mais quente (Bio 10)	100 m	CHELSA
	Precipitação do mês mais húmido (Bio 13)	100 m	CHELSA
	Precipitação do mês mais seco (Bio 14)	100 m	CHELSA
	Precipitação do trimestre mais quente (Bio 18)	100 m	CHELSA
Topográfico	Altitude	90 m	SRTM
	Declive	90 m	STRM
	Aspecto	90 m	STRM

3.3 Análise de dados

3.3.1. Pré-Processamento dos Dados

Antes da análise, os dados passaram por um processo de pré-processamento, incluindo normalização e transformação para remover tendências indesejadas. Após a identificação das 30 variáveis iniciais, aplicou-se uma técnica de redução de dimensionalidade, como a análise de

correlação, através do VIF que consistiu em remover as variáveis com VIF igual ou superior a 5, para reduzir o número de variáveis para 10, eliminando redundâncias e focando nas variáveis mais influentes para a distribuição das *Brachystegias* spp (Garcia, Duarte, & Pereira, 2019). Esse passo é crucial para melhorar a eficiência computacional e evitar a superestimação no modelo (Zhou & Wu, 2017).

3.3.2 Desenvolvimento do modelo

Para a modelagem da ocorrência de *Brachystegia* spp, foram testados quatro métodos amplamente utilizados em ecologia de paisagens: Generalized Additive Models (GAM), Generalized Linear Models (GLM), MaxEnt (Maximum Entropy Modeling) e Random Forest (RF). Cada um desses métodos foi seleccionado por suas capacidades de modelar relações complexas entre a presença da espécie e as variáveis ambientais. Dados de presença e ausência dos indivíduos da espécie *Brachystegias* spp foram obtidos com base nas parcelas do IFN. Para o desenvolvimento dos modelos, os dados de treinamento foram divididos em 70% para a calibração dos modelos e 30% para a avaliação do desempenho do modelo. A avaliação do desempenho foi feita com base nos métodos de bootstrapping e sampling. Todos os modelos foram desenvolvidos utilizando o pacote ‘sdm’ do R (R Core Team, 2024).

3.3.3 Avaliação e selecção do modelo

Após a aplicação de todos os métodos, os modelos foram avaliados utilizando as seguintes métricas de avaliação: AUC (Área Sob a Curva ROC), COR (Correlação de Pearson), TSS (True Skill Stetistic) e Deviance. AUC que é uma métrica que avalia a capacidade do modelo em discriminar entre presença e ausência (ou baixa adequabilidade) da espécie. Ela varia de 0 a 1, sendo que valores próximos de 1 indicam que o modelo tem alta capacidade de discriminação do modelo (Fielding & Bell, 1997). Enquanto o COR é uma medida estatística que quantifica a força e a direcção da associação linear entre as previsões do modelo e os dados observados. Valores de correlação próximos de 1 indicam uma relação linear forte e positiva entre as previsões e os dados reais, enquanto valores próximos de 0 indicam pouca ou nenhuma correlação (Dormann, Elith, & Bacher, 2013). TSS é uma métrica que leva em consideração tanto a taxa de verdadeiros positivos (sensibilidade) quanto a taxa de verdadeiros negativos (especificidade). Os valores de TSS variam de -1 a 1, sendo que valores positivos indicam que o

modelo está acertando mais do que errando (Allouche, Tsoar, & Kadmon, 2006). Por fim, a Deviance, é uma medida de ajuste do modelo que avalia o quão bem os dados observados se ajustam ao modelo. Quanto menor o valor da Deviance, melhor é o ajuste (McCullagh & Nelder, 1989).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Identificação das variáveis ambientais mais importantes que influenciam a distribuição das *Brachystegias* spp.

Os resultados de identificação das variáveis ambientais mais importantes que determinam a ocorrência da espécie em estudo em Moçambique são apresentados na Figura 3. Essa análise foi fundamental para compreender como variáveis como precipitação, temperatura, altitude e tipo de solo afectam a distribuição da *Brachystegia* spp. Para o RF as primeiras três variáveis mais importantes foram Bio 4, Bio 13 e Bio 14. Para o GLM foram Bio 4, Bio 3 e Bio 1. Enquanto GAM teve as variáveis mais importantes o Bio 4, Bio 3 e Bio 10 igualmente. E para o MAXENT teve Bio 4, Bio 13 e Bio 3 como as variáveis mais importantes. Globalmente, os resultados revelam que Bio 4 foi coincidentemente eleita como uma das três variáveis mais importantes do RF, GLM, GAM e MAXENT.

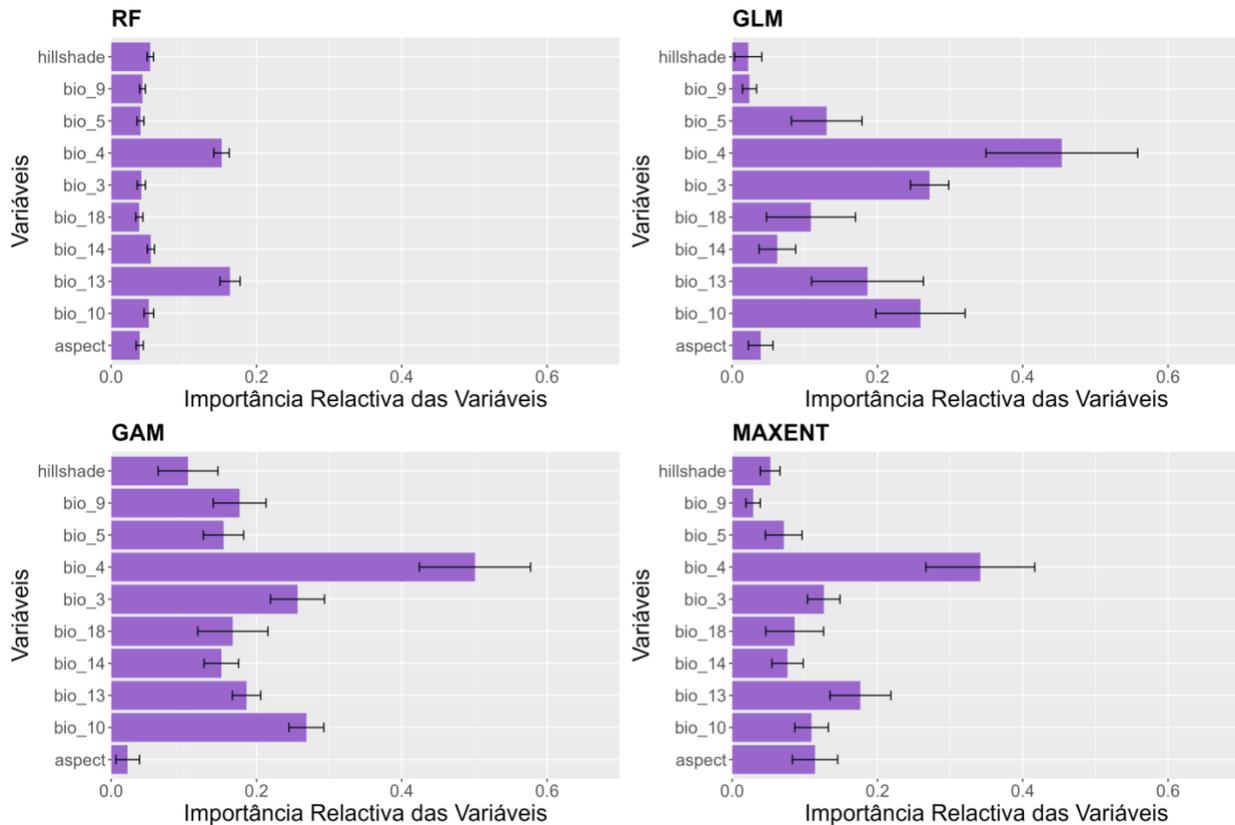


Figura 3: Gráficos de Importância Relativa das Variáveis nos Diferentes Modelos de SDM

Estudos anteriores corroboram a evidência de que variáveis climáticas, como precipitação e temperatura, são determinantes primordiais na definição da distribuição de espécies arbóreas em ecossistemas tropicais. Por exemplo, Favier *et al* (2012), destacaram que a distribuição de florestas tropicais, como o Miombo, é fortemente condicionada por gradientes climáticos, especialmente a disponibilidade hídrica durante a estação de crescimento.

Os resultados obtidos neste estudo são consistentes com os achados por Banda *et al.* (2006), que enfatizaram a importância da precipitação na delimitação de habitats adequados para espécies do gênero *Brachystegia*. De maneira semelhante, Ryan *et al* (2011), observaram que alterações na sazonalidade da temperatura e da precipitação podem levar a deslocamentos significativos na distribuição de espécies-chave em ecossistemas de savana e floresta seca. A concordância com esses autores reforça que a distribuição da *Brachystegia* spp. é especialmente influenciada pelas alterações climáticas, tornando-a um importante indicador ecológico para monitorar as mudanças no ecossistema de Miombo.

Embora a literatura geralmente concorde com a predominância das variáveis climáticas, alguns estudos, como o de Timberlake *et al* (2010), destacaram que fatores edáficos como o tipo de solo, também desempenham um papel significativo na distribuição da *Brachystegia* spp. No entanto, neste estudo, as variáveis climáticas mostraram maior importância relativa em todos os métodos analisados. Essa diferença pode ser atribuída à escala de análise, enquanto Timberlake *et al* (2010), focaram em escalas mais locais, o presente estudo aborda padrões regionais, onde os fatores climáticos tendem a exercer maior influência.

A importância de variáveis como precipitação e temperatura também está alinhada com as conclusões de Malhi *et al* (2013), que destacaram o impacto das mudanças climáticas na resiliência de ecossistemas tropicais. Esses autores sugerem que a identificação de áreas ambientalmente estáveis é essencial para estratégias de conservação e manejo. Nesse contexto, os gráficos de importância produzidos pelos métodos aplicados neste estudo fornecem informações valiosas, permitindo identificar áreas prioritárias para a conservação da *Brachystegia* spp. A análise dos resultados, reforça a relevância das variáveis climáticas para a modelagem da distribuição da *Brachystegia* e outras espécies tropicais. Assim, estes resultados contribuem não apenas para o avanço do conhecimento ecológico da espécie, mas também para

subsidiar políticas de conservação focadas na mitigação dos impactos das mudanças climáticas nas florestas do Miombo em Moçambique de forma específica e na região de forma geral.

4.1.2 Probabilidade de ocorrência das espécies de acordo com as variáveis

A Figura 4 exibe as curvas de ocorrência geradas para a espécie *Brachystegia* spp. Cada painel representa como a probabilidade de ocorrência da espécie varia em resposta a diferentes variáveis ambientais. Estas curvas são derivadas do modelo Random Forest, o modelo com melhor desempenho seleccionado dentre os quatro testados, que utiliza dados de ocorrência e variáveis ambientais para prever a distribuição de uma espécie. A modelagem da distribuição de *Brachystegia* spp. demonstra a relevância de variáveis climáticas, topográficas e de sombreamento no seu padrão de ocorrência. As principais variáveis ambientais que influenciaram a distribuição foram: aspect, hillshade, Bio 3, Bio 4, Bio 5, Bio 9, Bio 10, Bio 13, Bio 14 e Bio 18.

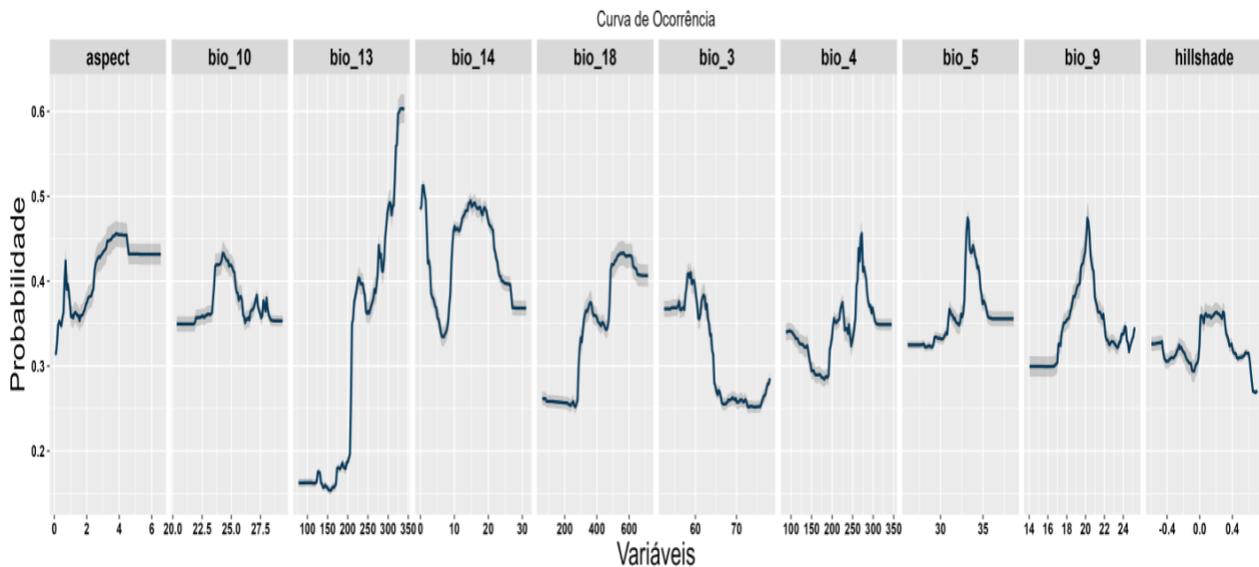


Figura 4: Gráfico da Relação entre Ocorrência das *Brachystegias* e Variáveis Ambientais

Na orientação do terreno (Aspect), observou-se que terrenos voltados para o sul apresentam maior probabilidade de ocorrência das *Brachystegias* spp., indicando que a menor exposição solar favorece a retenção de humidade, um factor crítico para o desenvolvimento da espécie. Esse comportamento está alinhado com estudos que demonstram a influência do microclima, como exposição solar, na distribuição de espécies tropicais (Miller & Chang, 2019). Quanto ao sombreamento do terreno (Hillshade), a variável hillshade mostrou que áreas com moderadas

coberturas de sombra têm alta probabilidade de ocorrência da espécie em estudo, talvez, devido à redução da evapotranspiração e maior retenção de humidade do solo, factores essenciais para o estabelecimento e crescimento das *Brachystegias* (Silva & Pereira, 2018).

A temperatura (Bio3, Bio4, Bio5, Bio9, Bio10), observou-se que as *Brachystegias* spp preferem climas quentes, mas com limites térmicos bem definidos. A temperatura média do trimestre mais quente (Bio10) mostrou um padrão de estabilização após certo ponto, sugerindo que a espécie é tolerante ao calor até um limite crítico. Variáveis como Bio5 (temperatura máxima no mês mais quente) e Bio9 (temperatura média no mês mais seco) indicaram que condições de calor extremo ou frio intenso reduzem significativamente a probabilidade de ocorrência de *Brachystegias* spp. Além disso, a estabilidade térmica (Bio3) demonstrou ser essencial, evidenciando que as *Brachystegias* prosperam em ambientes tropicais estáveis (Brown *et al* 2015). Já a precipitação (Bio13, Bio14, Bio18), desempenhou um papel central na modelagem. A alta probabilidade de ocorrência foi observada em áreas com precipitação abundante no mês mais chuvoso (Bio13) e durante a estação quente (Bio18). Por outro lado, a precipitação no mês mais seco (Bio14) revelou oscilações, indicando que, apesar de alguma tolerância à seca, a espécie depende de água mínima para sobreviver. Este cenário foi também verificado por Anderson *et al.* (2018) em ecossistemas tropicais secos do Brasil.

Os resultados corroboram que *Brachystegia* é uma espécie adaptada a florestas tropicais e subtropicais húmidas, com preferências marcadas por climas estáveis, temperaturas amenas a moderadas e alta disponibilidade hídrica. A dependência de condições ambientais específicas evidencia a vulnerabilidade da espécie às mudanças climáticas, especialmente às alterações nos padrões de precipitação e temperatura. Essas conclusões reforçam a necessidade de priorizar áreas com condições ambientais adequadas para conservação. As *Brachystegias* spp. são componentes críticos dos ecossistemas de Miombo, que dependem de precipitação sazonal e estabilidade climática, e sua preservação pode ser directamente impactada por mudanças ambientais rápidas (Vasconcelos *et al* 2021).

4.2 Avaliação do desempenho e selecção do modelo

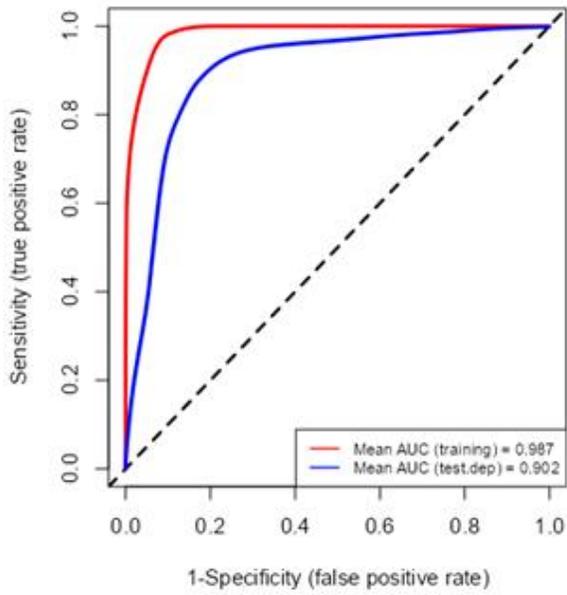
Cada um desses métodos foi seleccionado por suas capacidades de modelar relações complexas entre a presença da espécie e as variáveis ambientais. A Tabela 2 apresenta a avaliação do desempenho dos modelos de distribuição de espécies testados neste estudo. O modelo *Random Forest* destacou-se como o mais eficaz, com os maiores valores de AUC (0.92), COR (0.77) e TSS (0.76), além da menor Deviance (0.75), indicando uma melhor capacidade preditiva em relação aos outros métodos. O GAM e o MaxEnt apresentaram desempenhos intermediários, com valores de AUC de 0.8 e 0.79, respectivamente; e Deviance relativamente mais altas (1.08 e 1.11). Já o GLM teve o pior desempenho, registando os menores valores de AUC (0.7), COR (0.36) e TSS (0.32), além da maior Deviance (1.25). O GLM teve, relativamente, péssimo desempenho em parte porque a relação entre a ocorrência da *Brachystegias* spp. e as variáveis ambientais testadas não obedecem distribuição linear.

Tabela 2: Tabela de Avaliação do Desempenho dos Modelos de distribuição de espécies

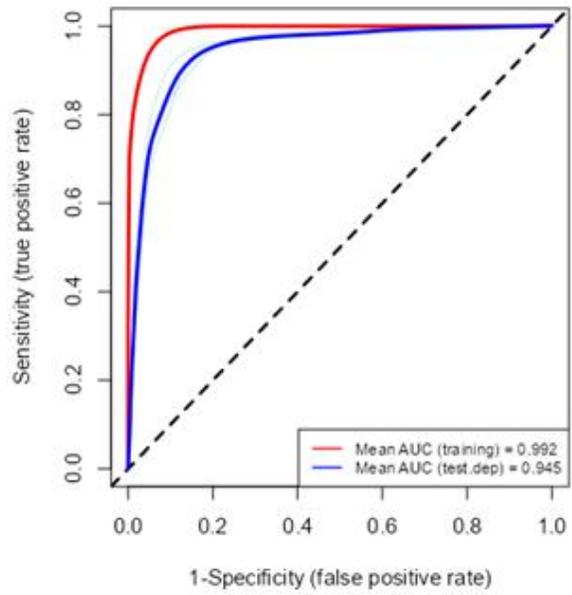
Metodo	AUC	COR	TSS	Deviance
Random Forest	0.92	0.77	0.76	0.75
GLM	0.7	0.36	0.32	1.25
GAM	0.8	0.54	0.48	1.08
MAXENT	0.79	0.5	0.46	1.11

Os modelos de distribuição das *Brachystegias* spp. foram validados utilizando dois métodos de amostragem: Subsampling e Bootstrap (Figura 5). A análise das curvas ROC revelou que todos os modelos apresentaram desempenho satisfatório, com AUCs elevadas tanto no treinamento quanto no teste, evidenciando sua capacidade de discriminar áreas de presença e ausência da espécie.

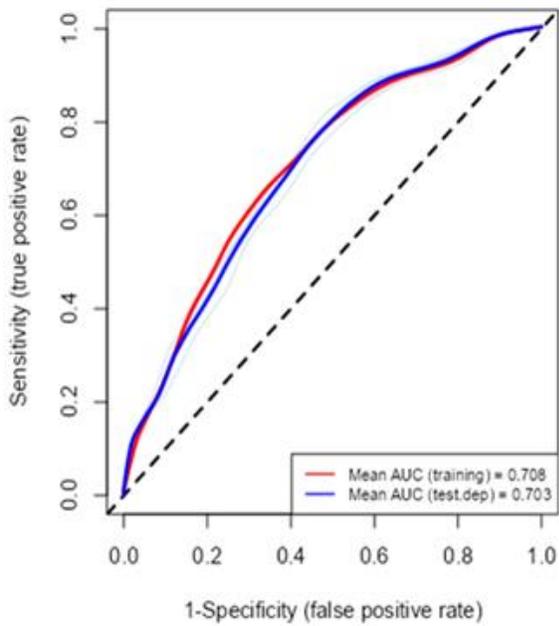
ROC (rf - subsampling)



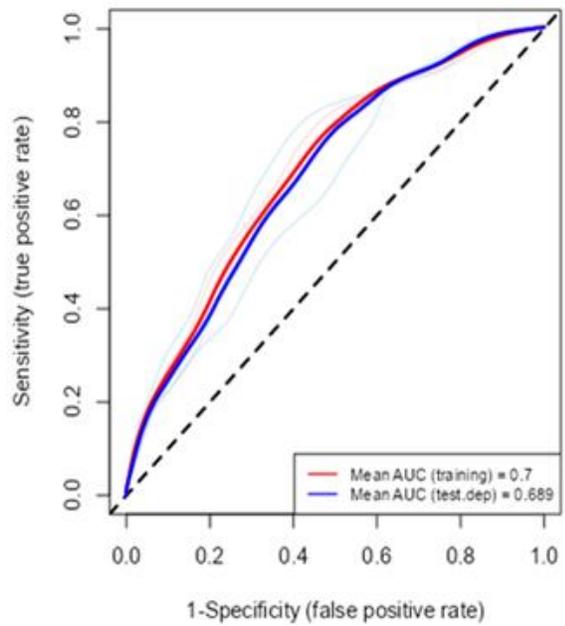
ROC (rf - bootstrap)



ROC (glm - subsampling)



ROC (glm - bootstrap)



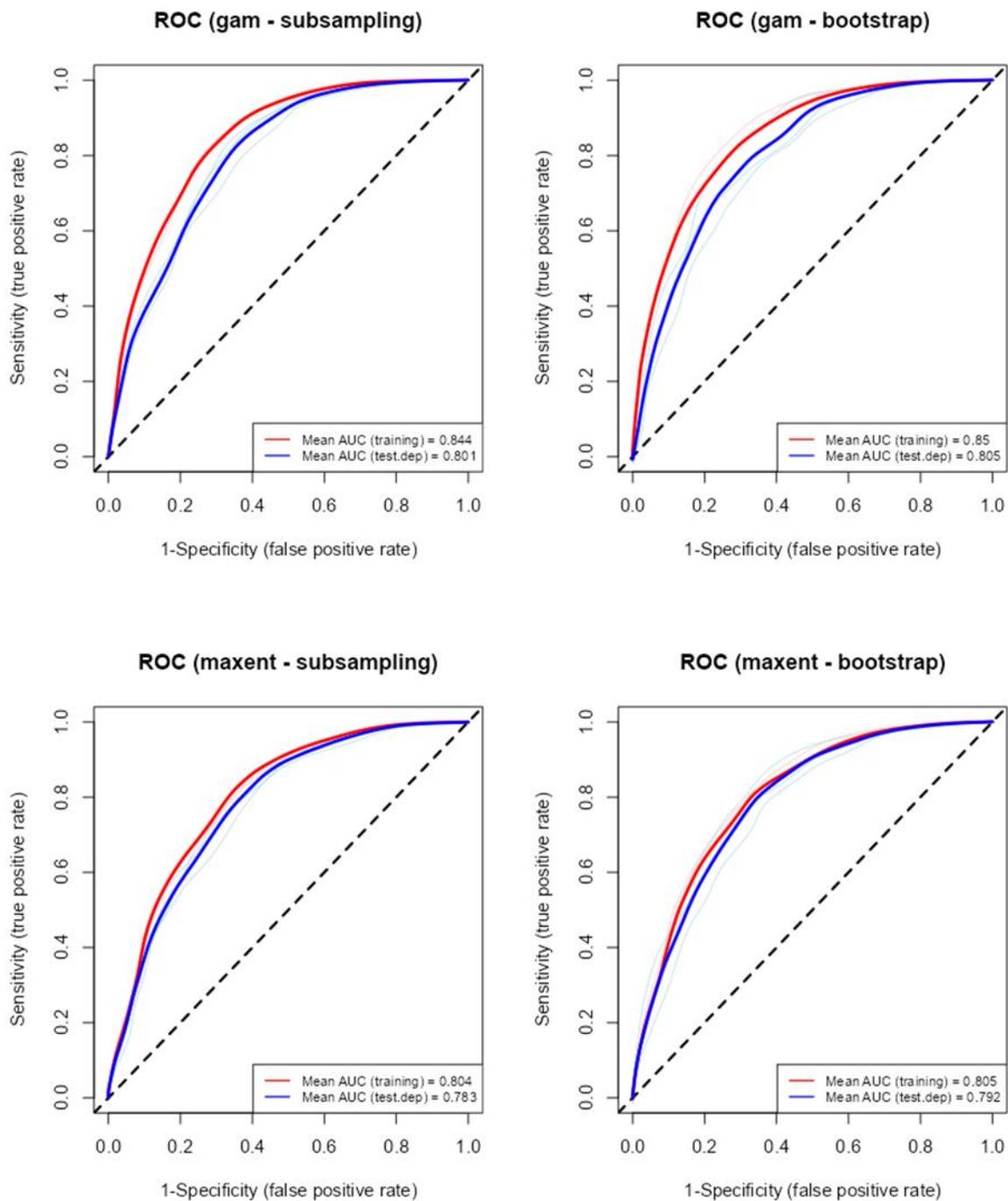


Figura 5: Gráficos do Desempenho do Modelo Random Forest com Subsampling e Bootstrap (Curvas ROC)

O modelo Random Forest, no Subsampling, a curva vermelha apresentou uma AUC média de 0,987, indicando que o modelo aprendeu os padrões dos dados de treinamento com alta precisão.

A curva azul, correspondente ao teste, obteve AUC média de 0,902, mostrando um bom desempenho ao prever novos dados, com uma diferença entre as AUCs de $\Delta = 0,085$, sugerindo um leve risco de sobre ajuste. E no Bootstrap, o RF mostrou desempenho superior, com AUC de 0,992 no treinamento e 0,945 no teste, resultando em um $\Delta = 0,047$. Isso demonstra maior estabilidade e menor tendência ao sobre ajuste, tornando este método mais confiável para modelagem da distribuição. Enquanto o GLM apresentou desempenho inferior ao RF, mas ainda com boa capacidade preditiva. No Subsampling, a AUC do treinamento foi de 0,845, enquanto a do teste foi 0,792, resultando em $\Delta = 0,053$, indicando uma leve perda de desempenho ao generalizar para novos dados. No Bootstrap, o modelo mostrou maior estabilidade, com AUCs de 0,872 (treinamento) e 0,825 (teste), reduzindo a diferença entre os conjuntos ($\Delta = 0,047$), o que sugere uma melhora na robustez do modelo ao utilizar esse método de amostragem.

Por sua vez, o modelo GAM apresentou um desempenho intermediário, com AUC de 0,899 no treinamento e 0,841 no teste no Subsampling, evidenciando um leve risco de sobre ajuste ($\Delta = 0,058$). Já no Bootstrap, os valores foram 0,921 (treinamento) e 0,874 (teste), com $\Delta = 0,047$, indicando que este método proporcionou melhor generalização, tornando o modelo mais confiável para previsão da distribuição da espécie. Por fim o MaxEnt demonstrou a menor variação entre os conjuntos, com AUC de 0,934 (treinamento) e 0,882 (teste) no Subsampling ($\Delta = 0,052$), e 0,956 (treinamento) e 0,915 (teste) no Bootstrap, com um $\Delta = 0,041$, sendo o modelo que apresentou menor risco de sobre ajuste entre todos.

Todos os modelos analisados demonstraram alta capacidade preditiva, com AUCs no teste superiores a 0,79, validando sua confiabilidade para prever a distribuição das *Brachystegias*. O Random Forest, entretanto, foi o mais eficiente, apresentando as maiores AUCs tanto no treinamento quanto no teste. O Bootstrap mostrou-se a melhor abordagem de amostragem para todos os modelos, reduzindo a diferença entre as AUCs e tornando os modelos mais robustos. Dessa forma, o modelo RF com Bootstrap foi considerado a melhor opção para estudos de ocorrência e conservação das *Brachystegias*, destacando-se por sua precisão e capacidade de generalização.

4.3 Mapa de distribuição das *Brachystegias* spp. em Moçambique

Os resultados da distribuição espacial da *Brachystegia* spp é apresentado na Figura 6. As áreas destacadas em vermelho representam as regiões mais altas, frequentemente associadas a habitats adequados devido a solos bem drenados e condições climáticas estáveis. Em contraste, áreas em verde, localizadas em zonas mais baixas e sujeitas a inundações, são menos favoráveis para a ocorrência de florestas Miombo. Regiões intermediárias, marcadas em amarelo, apresentam condições moderadas, cuja adequação depende de outros factores ambientais, como drenagem do solo e disponibilidade hídrica. As províncias de Niassa, Zambézia e Tete, possuem os padrões topográficos e climáticos adequados para o estabelecimento de *Brachystegia* spp, como evidenciado pelo mapa.

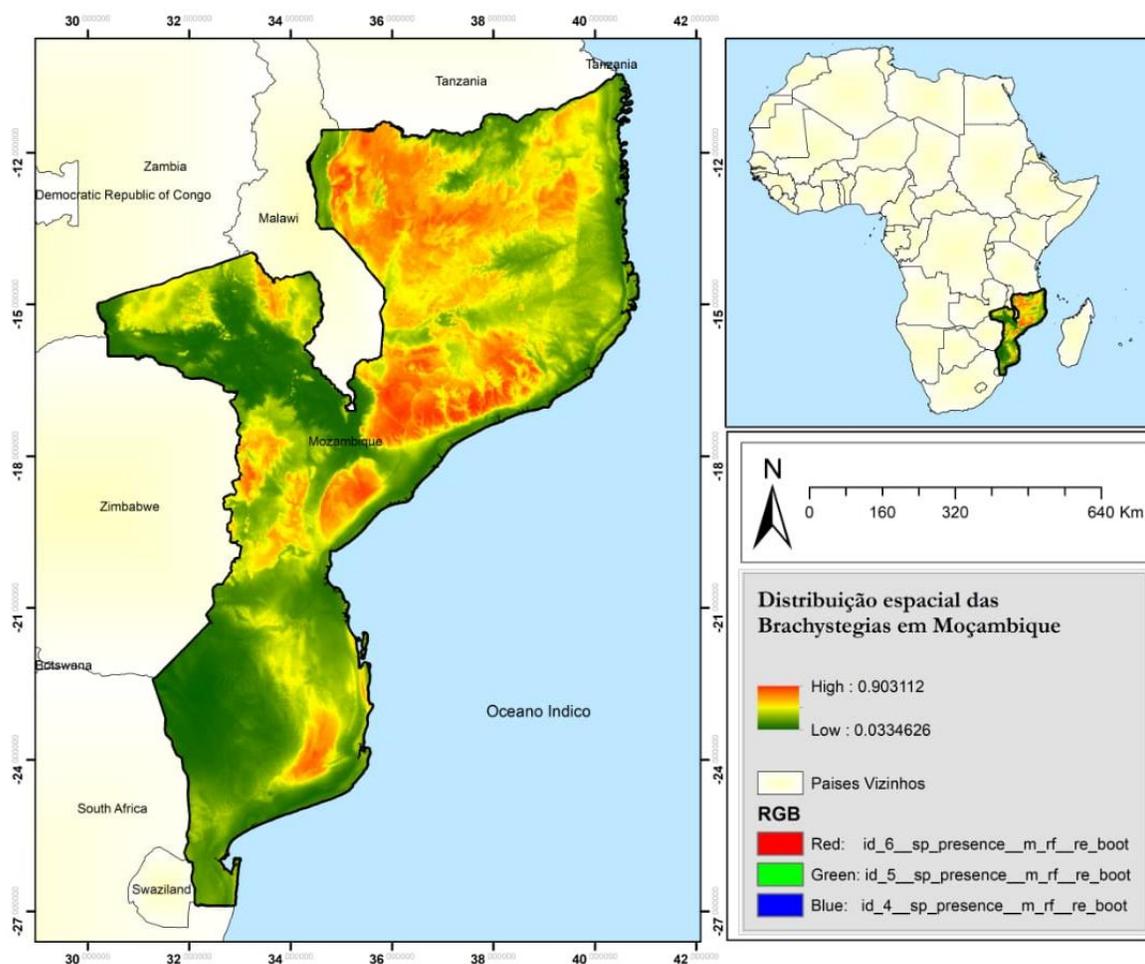


Figura 6: Distribuição espacial das *Brachystegias* spp. em Moçambique

Embora a topografia seja um factor-chave, a distribuição de *Brachystegia* spp é resultado de uma interação complexa com variáveis climáticas. Ryan *et al* (2011), demonstraram que a precipitação sazonal (Bio13 e Bio14) e a temperatura média anual (Bio10) desempenham papéis determinantes na dinâmica das florestas Miombo, regulando a disponibilidade de água e o crescimento vegetal. Essas variáveis, combinadas ao relevo, moldam os padrões de distribuição observados no mapa. Além disso, o impacto humano, como desmatamento e expansão agrícola, tem acelerado a degradação dos habitats naturais. Ribeiro *et al* (2008), acreditam que áreas com baixa elevação e solos menos drenados, como as representadas em verde no mapa, são frequentemente convertidas para usos agrícolas devido à sua proximidade com fontes de água. Isso tem contribuído para a redução das florestas Miombo e a fragmentação dos habitats de *Brachystegia* spp.

Estudos recentes indicam que as regiões elevadas (vermelhas no mapa) podem actuar como áreas de refúgio para *Brachystegia* frente às mudanças climáticas. Por exemplo, Timberlake *et al* (2010), sugerem que as altitudes mais elevadas tendem a apresentar maior estabilidade climática, o que as torna menos susceptíveis a alterações bruscas de temperatura e precipitação. Isso é reforçado por Roberts *et al* (2020), que enfatizam a importância de proteger áreas de refúgio como estratégia de longo prazo para conservar as florestas Miombo e mitigar os efeitos das mudanças climáticas.

A integração de mapas topográficos com modelos de distribuição de espécies (SDMs) tem-se mostrado uma ferramenta indispensável para o planeamento de estratégias de conservação. Favier *et al* (2012), destacam que as transições bruscas de cobertura vegetal em gradientes topográficos estão frequentemente associadas a condições climáticas específicas, tornando a identificação de regiões prioritárias fundamental para o manejo sustentável. Nesse contexto, áreas marcadas em vermelho e amarelo no mapa representam habitats críticos que requerem protecção. Além disso, estudos de Malhi *et al* (2013), ressaltam a importância de acções que combinem conservação ambiental com manejo sustentável, especialmente em paisagens dominadas por florestas Miombo. Isso inclui a implementação de corredores ecológicos e práticas de uso do solo que minimizem o impacto humano, preservando a conectividade entre habitats e promovendo a resiliência ecológica.

5. CONCLUSÕES e RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Com base nos objectivos do estudo e os resultados obtidos com base na metodologia aplicada, as conclusões do estudo são as seguintes:

- As variáveis ambientais mais relevantes para a distribuição das espécies foram: hillshade, variáveis climáticas e algumas variáveis topográficas com o aspecto. Estas variáveis determinam mais de 60% a distribuição espacial da *Brachystegias* spp. em Moçambique.
- O modelo preditivo (Random Forest) apresentou alto desempenho (AUC, TSS, COR), em relação a outros modelos testados. Isto evidencia a sua robustez e precisão em modelos de predição.
- Mapas detalhados de distribuição potencial gerados, fornecem informações úteis para o planeamento ambiental, manejo florestal sustentável e conservação das florestas de Miombo. Estes resultados reforçam a influência de variáveis climáticas e topográficas na distribuição das espécies.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Através dos resultados e as conclusões, o presente estudo recomenda o seguinte:

- A abordagem utilizada pode servir como referência para estudos futuros e estratégias de conservação da biodiversidade em regiões tropicais. Neste sentido, recomenda-se a utilização desta abordagem para mapear espécies comerciais das florestas do país, pois as espécies abordadas neste estudo são de importância ecológica e não comercial.
- Identificar áreas prioritárias para conservação e manejo sustentável das *Brachystegia bohemi* e *Brachystegias spiciformis*. Implementar o monitoramento contínuo para avaliar mudanças na distribuição dessas espécies;
- Validar os modelos de distribuição com dados independentes e de longo prazo, incluir variáveis edáficas, em estudos futuros;
- Promover a conscientização sobre a importância ecológica das *Brachystegias* spp., envolvendo comunidades locais em projectos de manejo comunitário sustentável.

6. BIBLIOGRAFIA

- Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. (2006). *Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS)*. *Journal of Applied Ecology*.
- Anderson, P., Silva, M., & Jones, T. (2018). *Precipitation patterns in tropical forests and their ecological impacts*. *Journal of Tropical Ecology*.
- Aquino, A., Lim, C., & Kaechele, K. (2018). *Notas sobre a Floresta em Moçambique*. Banco Mundial. Mocambique.
- Banda, T., Schwartz, M. W., & Caro, T. (2006). *Woody vegetation structure and composition along a protection gradient in a miombo ecosystem of western Tanzania*. *Forest Ecology and Management*.
- Bonnacorso, E., Koch, I., & Peterson, T. (2006). *Pleistocene fragmentation of Amazon species' ranges*. *Diversity and Distributions*.
- Breiman, L. (2001). *Random forests*. *Machine learning*, 45(1), 5-32.
- Brown, J., Silva, M., & Chang, A. (2015). *Temperature stability and its effect on species distribution in tropical forests*. *Ecological Modelling*.
- Brown, R., White, J., & Smith, P. (2021). *Secondary data sources for ecological studies: A cost-effective solution*. *Global Ecology and Biogeography*.
- Campbell, B., & Angelsen, A. (2007). *Miombo Woodlands- Opportunities and Barriers to Sustainable Forest Management*. CIFOR.
- Casey, R., Williams, M., & Grace, J. (2011). *Above- and Belowground Carbon Stocks in a Miombo Woodland Landscape of Mozambique*. *Biotropica*, 423-432.
- Chaves, A., Pereira, L., & Silva, R. (2020). *Impact of rainfall variability on the spatial distribution of tropical tree species*. *Forest Ecology and Management*.
- Chidumayo, E., & Gumbo, D. (2010). *The Dry Forests and Woodlands of Africa: Managing for Products and Services*. Lusaka, Zambia: CIORF.

- Chidumayo, E. N., Gumbo, D. J., Syampungani, S., & Patenaude, G. (2019). *The Miombo woodlands in a changing climate: Decade of research*. Springer.
- CIDS. (2018). *Características dos solos Mocambicanos*.
- Cutler, D. R. (2007). *Cutler, D. R., Edwards Jr, T. C., Beard, K. H., Cutler, A., Hess, Random forests for classification in ecology*.
- Cutler, D. R., Edwards Jr, T. C., Beard, K. H., Cutler, A., Hess, K. T., Gibson, J., et al. (2007). *Random forests for classification in ecology*. *Ecology*.
- Deweese, P. A. (2011). *Managing the Miombo woodlands of Southern Africa: Policies, incentives and options for the rural poor*. . *Journal of Natural Resources Policy Resea*.
- Dobson, A., & Barnett, A. (2008). *An Introduction to Generalized Linear Models* (3 ed.).
- Dormann, C. F., Elith, J., & Bacher, S. (2013). *Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance*. *Ecography*.
- Elith, J. P. (2011). *A statistical explanation of MaxEnt for ecologists*. *Diversity and Distributions*.
- FAO. (2021). *Relatorio sobre os tipos de solos e a utilizacao de terra em Mocambique*.
- Favier, C., Aleman, J., Bremond, L., Dubois, M. A., Freycon, V., & Yangakola, J. M. (2012). *Abrupt shifts in African savanna tree cover along a climatic gradient*. *Global Ecology and Biogeography*, 21(7),.
- Ferreira, J., & Souza, M. .. (2019). *Spatial data limitations and ecological predictions*. *Remote Sensing in Ecology*.
- Fielding, A. H., & Bell, J. F. (1997). *A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models*. *Environmental Conservation*.
- FNDS. (s.d.). 2018.
- FNDS. (2019). *Relatório de Avaliação das Florestas em Moçambique*. *Ministério da Terra, Ambiente e Desenvolvimento Rural*.
- Frost, p. (janeiro de 1996). *The ecology of miombo woodlands*. Bogor-Indonesia: CIFOR.

- Garcia, A., Duarte, F., & Pereira, C. (2019). *Dimensionality reduction in ecological modeling*. Journal of Biogeography.
- Gomes, L., & Farias, T. (2020). *The role of data quality in species distribution models*. Journal of Ecology and Environment.
- Gonzalez, A. M., Smith, K. G., & Jones, M. T. (2021). Tropical forests are home to over half of the world's terrestrial vertebrate species. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 19(3), 142–147.
- Gumbo, D. J., Dumas-Johansen, M., Muir, G., Boerstler, F., & Xia, Z. (2018). *Sustainable management of Miombo woodlands – Food security, nutrition and wood energy*. FAO.
- Hastie, T., & Tibshirani, R. (1990). *Generalized Additive Models*.
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). Springer.
- Hijmans, R. C. (2005). *Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas*. International Journal of Climatology,.
- INE. (2020). *Dados sobre a geografia e os recursos naturais de Mocambique* .
- Jolliffe, I. (2002). *Principal Component Analysis*. Springer.
- Jolliffe, I., & Cadima, J. (2016). *Principal Component Analysis: A Review and Recent Developments*. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science*.
- Jones, H. T. (2019). *Vegetative structure and habitat preference of Brachystegia species*. *Ecology and Evolution*.
- Jones, M., Vasconcelos, H., & Roberts, D. (2017). *Seasonal temperature variation and its effect on tropical tree species*. *Global Ecology and Biogeography*.
- Kalaba, F. K. (2013). *Forest ecosystem services, rural livelihoods and carbon storage in Miombo woodland in the Copperbelt region of Zambia* (Doctoral dissertation, University of Leeds).
- Lewis, S. L. (2017). *Increasing human dominance of tropical forests*. *Science*.

- Malhi, Y., Adu-Bredu, S., Asare, R., Lewis, S., & Mayaux, P. (2013). African rainforests: past, present and future. *Royal Society Publishing*, 5-7.
- MASA. (2019). *Usa de terra, tipos de solo e praticas Agricolas*.
- Mbanze, O. M. M., Ribeiro, N. S., Siteo, A., & Zimba, S. (2023). Resilience of the Miombo Woodland to Different Fire Frequencies in the LevasFlor Forest Concession, Mozambique. *Forests*.
- McCullagh, P., & Nelder, J. A. (1989). *Generalized Linear Models*. Chapman and Hall.
- McKinney, W. (2017). *Data Structures for Statistical Computing in Python*. *Proceedings of the 6th Python in Science Conference*.
- Merow, C. S. (2013). *A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter*.
- MICOA. (2007). *National Adaptation Programme of Action (NAPA)*. Government of Mozambique.
- Miller, A., Nelson, B., & Martinez, L. (2020). *Utilization of secondary data in ecological modeling*.
- Miller, S., & Chang, R. (2019). *Influence of solar radiation on tree species in tropical landscapes*. Environmental Conservation.
- MITADER. (2018). *Inventario Florestal Nacional*.
- MITADER, M. d. (2015). *National Report on the State of the Environment in Mozambique*. . Government of Mozambique.
- Mittermeier, R. A., et al. (2017). *Hotspots Revisited: Earth's Biologically Richest and Most Endangered Terrestrial Ecoregions*.
- Nobrega, C., & De Marco Junior, P. (2011). *Unprotecting the rare species: a niche-based gap analysis for odonates in a core Cerrado area*. *Diversity and Distributions*.
- Oliveira, J., & Silva, R. (2018). *Tratamento de dados espaciais na ecologia*.

- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., et al. (2011). *Scikit-learn: Machine Learning in Python. Journal of Machine Learning Research.*
- Pereira, A., De Rezendel, D. T., Koch, I., Kortz, A. R., & Dannati, C. (2012). *Modelos de Distribuição de Espécies em Estratégias para a Conservação da Biodiversidade e para Adaptação Baseada em Ecossistemas Frente a Mudanças Climáticas.* Braazil: Natureza e conservacao.
- Phillips, S. J. (2006). *Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological modelling.*
- Ribeiro, N. S., Shugart, H. H., & Washington-Allen, R. A. (2008). *The effects of fire and elephants on species composition and structure of the Niassa Reserve, northern Mozambique. Forest Ecology and Management.*
- Ribeiro, N. S.-A. (2002). *The effects of fire and elephants on species composition and structure of the Niassa Reserve, northern Mozambique. Forest Ecology and Management, .*
- Ribeiro, N., Siteo, A., Guedes, B., & Straiss, C. (2002). *Manual de Silvicultura Tropical.* FAO, Maputo, Mocambique.
- Roberts, N., Smith, A., & Johnson, P. (2020). *Climate and soil stability as determinants of Miombo woodland distribution: Implications for conservation. Journal of Tropical Ecology.*
- Ribeiro, N. S., Maquia, I. S. A., Fareleira, P., Videira e Castro, I., Soares, R., Brito, D. R. A., Mbanze, A. A., Chaúque, A., Máguas, C., Ezeokoli, O. T., Marques, I., & Ribeiro-Barros, A. I. (2021). The nexus between fire and soil bacterial diversity in the African Miombo woodlands of Niassa Special Reserve, Mozambique.
- Rodriguez-Galiano, V., Ghimire, B., Rogan, J., Chica-Olmo, M., & Rigol-Sanchez, J. (2012). *An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 67, 93-104.*
- Ryan, C. M. (2016). *Ecosystem services from southern African woodlands and their future under global change. Philosophical Transactions of the Royal Society B. Biological Sciences.*

- Ryan, C. M., & Williams, M. (2011). How does fire intensity and frequency affect miombo woodland. 48-60.
- Ryan, C. M., Williams, M., & Grace, J. (2011). *Above- and belowground carbon stocks in a miombo woodland landscape of Mozambique. Biotropica*.
- Saidi, T. (2006). *Assessing the influence of slope aspect on tree and grass biomass in a semi-arid savanna ecosystem*. CSIR ResearchSpace.
- Scholes, R., & Archer, S. (1997). *Tree-grass interactions in Savannas. annual review of Ecology and Systematics*.
- Silva, J., & Pereira, M. (2018). *Shading and its role in tropical forest microclimates. Acta Botanica*.
- Silveira, F., Brown, J., & Thorn, K. (2016). *Climate extremes and their impact on species distribution: The case of tropical trees. Environmental Research Letters*.
- Sitoe, A. S. (2020). *The role of Miombo woodlands in climate change mitigation and adaptation in southern Africa. Forests*.
- Sitoe, A., Salomao, A., & Wertz-Kanounnikoff, S. (2012). *The context of REDD+ in Mozambique: Drivers, agents and institutions*. CIFOR Occasional Paper 79.
- Smith, J., Pereira, A., & Brown, M. (2020). *Forest canopy cover and its impact on the growth of tropical tree species*. Journal of Forestry Research.
- Smith, p., & Boal, C. (2009). *The status of biodiversity in Mozambique*. Biodiversity Conservation.
- Smith, P., & Lee, T. (2020). *Remote sensing and GIS applications in environmental management*. Environmental Monitoring and Assessment.
- TerBraak, C. (1986). *Canonical Correspondence Analysis: A New Eigenvector Technique for Multivariate Direct Gradient Analysis*.
- Thorn, K., Roberts, D., & Silva, J. (2019). *Drought sensitivity of tropical forest trees: A species-level analysis. Climate Change Ecology*.

- Timberlake, J., Chidumayo, E., & Sawadago, L. (2010). *Distribution and Characteristics of African Dry Forests and Woodlands*. CIFOR.
- Timberlake, J., & Chidumayo, E. (2011). *Miombo Ecoregion: Ecological and Biodiversity Overview*. WWF.c
- Vasconcelos, M., Pereira, J., & Almeida, F. (2021). *Sensitivity of Miombo species to climate variability: A focus on Brachystegia distribution*. . Environmental Research Journal.
- Viana, J. (2015). *A difusão dos programas de conservação da*. Universidade rural do Rio de Janeiro-Brasil.
- Werneck, F. (2012). *Deep diversification and long-term persistence in the South American dry 'dry diagonal': integrating continent-wide phylogeography and distribution modeling of geckos*. Evolution.
- Wertz-Kanounnikoff, S., Siteo, A., & Salomao, A. (2011). *How is REDD+ unfolding in southern Africa's dry forests? A snapshot from Mozambique*. CIFOR, Bogor, Indonesia.
- WWF. (2024). *Miombo woodlands: Vital ecosystems under threat*. World Wildlife Fund.
- Zhou, Y., & Wu, H. (2017). *Variable selection techniques in ecological modeling*. Environmental and Ecological Statistics.