

HEITOR EDUARDO FERREIRA CAMPOS MORATO FILPI

**ZONEAMENTO EDAFOCLIMÁTICO EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS PARA A SELEÇÃO DE ESPÉCIES EM PROJETOS DE  
RECOMPOSIÇÃO FLORESTAL EM MINAS GERAIS, BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS –BRASIL  
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

F488z  
2019  
Filpi, Heitor Eduardo Ferreira Campos, 2019-  
Zoneamento edafoclimático em cenários de mudanças  
climáticas para a seleção de espécies em projetos de  
recomposição florestal em Minas Gerais, Brasil / Heitor Eduardo  
Ferreira Campos Filpi. – Viçosa, MG, 2019.  
xi, 57f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Hemlley Maria Acioli Imbuzeiro.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f.50-57.

1. Florestas - Aspectos ambientais. 2. Florestas -  
Conservação. 3. Mudanças climáticas. 4. Conjuntos difusos.  
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia  
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia  
Agrícola. II. Título.


CDO adapt. CDD 634.94

HEITOR EDUARDO FERREIRA CAMPOS MORATO FILPI

**ZONEAMENTO EDAFOCLIMÁTICO EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS PARA A SELEÇÃO DE ESPÉCIES EM PROJETOS DE  
RECOMPOSIÇÃO FLORESTAL EM MINAS GERAIS, BRASIL**

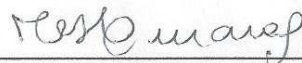
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 22 de fevereiro de 2019.



---

Elpídio Inácio Fernandes Filho



---

Cibele Hummel do Amaral  
(Coorientadora)



---

Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro  
(Orientadora)

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe Sandra Campos Morato e ao meu pai Belchior Ferreira Filpi por me oferecerem tantas oportunidades na vida e me ensinarem valores como compaixão, honestidade e persistência.

Aos meus irmãos Humberto, Leonardo, Tereza por estarem sempre presentes, me proporcionando apoio nas horas difíceis.

À Prof. Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro pela orientação, apoio e confiança. Por me proporcionar crescer como profissional e como ser humano.

À Prof. Cibele Hummel do Amaral pela co-orientação e por me ajudar a tomar decisões importantes.

Ao CNPQ e ao programa de pós-graduação em Meteorologia Aplicada/UFV pela concessão da bolsa.

Ao pesquisador Victor Hugo Benezoli por ter sido tão solícito e presente durante todo este trabalho.

Ao pesquisador Álvaro Javier Ávila Diaz por conceder dados importantes e compartilhar conhecimentos sobre modelagem.

Aos Prof. Elpídio Inácio Fernandes Filho, Haroldo Nogueira de Paiva e Hélio Garcia Leite pelas horas de conversa e por compartilhar seus conhecimentos.

À Prof. Gabrielle Pires pela paciência e por todas as sugestões.

Ao Prof. Gilberto Choaku Sedyama por estar sempre disponível.

Ao pesquisador João Reis pela contribuição intelectual neste trabalho.

Ao pesquisador Marcelo Leandro Bueno por disponibilizar dados importantes e compartilhar conhecimentos sobre ecologia.

Ao pesquisador Hugo Thaner dos Santos por compartilhar suas experiências.

Ao pesquisador Gabriel Medeiros Abrahão por sempre se dispor em ajudar.

À pesquisadora Ana Beatriz Santos pelas dicas importantes.

Aos meus amigos do grupo MICROMET pelos momentos de descontração.

Aos meus amigos da banda GRAMA por me proporcionar inspiração.

Aos meus amigos Lucas, Guido e Ângelo pelo companheirismo.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	iv
LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	vii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	viii
RESUMO .....	ix
ABSTRACT .....	xi
1. Introdução .....	1
2. Materiais e Método.....	4
<b>2.1 Área de estudo</b> .....	4
<b>2.2 Escolha e caracterização das espécies</b> .....	7
2.2.1 <i>Dipteryx alata</i> .....	8
2.2.2 <i>Schinus terebinthifolious</i> .....	8
2.2.3 <i>Joannesia princeps</i> .....	9
2.2.4 <i>Acrocomia aculeata</i> .....	9
2.2.5 <i>Myracrodruon urundeuva</i> .....	9
<b>2.3 Base de dados</b> .....	10
2.3.1 <b>Organização e coleta dos dados de ocorrência das espécies</b> .....	14
<b>2.4 Aplicação da inferência fuzzy e reclassificação das variáveis</b> .....	15
2.4.1 Definição dos pesos e integração das variáveis .....	17
<b>2.5 Zoneamento frente a um cenário de mudanças climáticas</b> .....	18
<b>2.6 Análise da distribuição espacial das unidades regionais do IEF</b> .....	20
<b>2.7 Delimitação das áreas preferenciais para o plantio de cada espécie</b> .....	22
3. Resultados .....	23
<b>3.1 Capacidade de retenção de água dos solos de Minas Gerais</b> .....	23
<b>3.2 Variáveis climáticas</b> .....	24
<b>3.3 Distribuição geográfica das espécies</b> .....	25
<b>3.4 Exigências climáticas de cada espécie</b> .....	26
<b>3.5 Clusterização e definição dos pesos de cada variável</b> .....	27
<b>3.6 Zonas de máxima e mínima adequabilidade para cada espécie</b> .....	29
<b>3.7 Projeção do clima futuro (2021 a 2050) considerando o cenário RCP8.5</b> ....	30
<b>3.8 Zoneamento frente ao cenário de mudanças climáticas RCP8.5</b> .....	32
<b>3.9 Unidades regionais do IEF mais adequadas para cada espécie</b> .....	33
<b>3.10 Áreas preferenciais para o plantio de cada espécie considerando o cenário histórico e projeção</b> .....	34
4. Discussão .....	41
5. Conclusões .....	49
6. Referências .....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição das classes de Índice de Walsh (Walsh e Lawler, 1981)	11
Tabela 2– Agrupamento das classes de solos de Minas Gerais de acordo com a sua CRA (adaptado de Sans et al., 2001)	12
Tabela 3–Propriedades físicas do solo em função da classe textural (adaptado de Allen et al., 1998)	13
Tabela 4– Condições climáticas de máxima adequabilidade e mínima adequabilidade para cada espécie selecionada. T.min equivale a temperatura mínima média anual, Prec equivale a precipitação pluviométrica total anual, I.W equivale ao índice de Walsh e D.H equivale ao déficit hídrico acumulado anual	26
Tabela 5–Raiz do erro quadrático médio (RMSE) obtida para cada variável em função da distribuição espacial de cada espécie	29
Tabela 6 – Unidades regionais do IEF preferenciais para o plantio das espécies <i>Dipteryx alata</i> , <i>Schinus terebinthifolios</i> , <i>Joannesia princeps</i> , <i>Acrocomia aculeata</i> e <i>Myracrodruon urundeuva</i> , considerando o clima atual e considerando a projeção de 2021 a 2050 de acordo com o cenário RCP8.5	34

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Localização geográfica de Minas Gerais e os biomas presentes em seu território (IBGE, 2004) ..... 4
- Figura 2 - Classificação climática de Köppen para o estado de Minas Gerais (Alvares et al., 2013) ..... 6
- Figura 3 - Fluxograma das etapas necessárias para o cálculo do déficit hídrico acumulado anual ( $T_{\text{MENSAL}}$  corresponde a temperatura mensal;  $P_{\text{MENSAL}}$  corresponde a precipitação pluviométrica mensal; CRA corresponde a capacidade de retenção de água do solo; CAD corresponde a capacidade máxima de armazenamento de água no solo;  $\theta_{\text{CC}}$  corresponde a capacidade de campo do solo;  $\theta_{\text{PM}}$  corresponde ao ponto de murcha permanente do solo;  $Z_r$  corresponde a profundidade efetiva do sistema radicular)..... 14
- Figura 4 - Definição das condições climáticas de máxima adequabilidade (1) e de mínima adequabilidade (0) na função sigmoideal simétrica. X corresponde a média dos valores extraídos e s.d. corresponde ao desvio padrão ..... 16
- Figura 5 – Distribuição espacial das regionais do IEF. 1. Alto Médio São Francisco; 2. Alto Paranaíba; 3. Centro Norte; 4. Centro Oeste; 5. Centro Sul; 6. Jequitinhonha; 7. Mata; 8. Metropolitana; 9. Nordeste; 10. Noroeste; 11. Norte; 12. Rio Doce; 13. Sul; 14. Triângulo ..... 21
- Figura 6 - Capacidade de retenção de água dos solos de Minas Gerais (adaptado de Sans et al, 2001). As áreas de afloramento de rocha (AR) e corpos hídricos (CH) foram eliminadas das análises ..... 23
- Figura 7 - Mapas de déficit hídrico acumulado anual, precipitação pluviométrica total anual, temperatura mínima média anual e índice de Walsh de Minas Gerais, referentes a climatologia de 1980 a 2010 ..... 24
- Figura 8 - Distribuição geográfica das espécies *Dipteryx alata* (a), *Schinus terebinthifolius* (b), *Joannesia princeps* (c), *Acrocomia aculeata* (d) e *Myracrodruon urundeuva* (e) no estado de Minas Gerais ..... 25
- Figura 9 - Distribuição espacial das espécies *Dipteryx alata*, *Schinus terebinthifolius*, *Joannesia princeps*, *Acrocomia aculeata* e *Myracrodruon urundeuva* (pontos pretos) nos *clusters* de déficit hídrico acumulado anual, precipitação total anual, temperatura mínima média anual e índice de Walsh no estado de Minas Gerais, Brasil ..... 27
- Figura 10 - Zoneamento edafoclimático para as espécies (a) *Dipteryx alata*, (b) *Schinus terebinthifolius*, (c) *Joannesia princeps*, (d) *Acrocomia aculeata* e (e) *Myracrodruon urundeuva* no estado de Minas Gerais, Brasil. MÁX. ADQ = Máxima adequabilidade. MÍN. ADQ = Mínima adequabilidade ..... 30

Figura 11 - Projeções futuras de déficit hídrico acumulado anual (DH), precipitação pluviométrica total anual (P), temperatura mínima média anual (T) e índice de Walsh (IW) considerando o cenário RCP8.5, para o estado de Minas Gerais, Brasil.....	31
Figura 12 - Anomalias climáticas de déficit hídrico acumulado anual (mm), precipitação pluviométrica total anual (mm), temperatura mínima média anual (°C) e índice de Walsh, projetadas para 2050 para o estado de Minas Gerais, Brasil.....	32
Figura 13 - Zoneamento edafoclimático para as espécies (a) <i>Dipteryx alata</i> , (b) <i>Schinus terebinthifolious</i> , (c) <i>Joannesia princeps</i> , (d) <i>Acrocomia aculeata</i> e (e) <i>Myracrodruon urundeuva</i> no estado de Minas Gerais, Brasil, considerando o cenário RCP8.5. MÁX. ADQ = Máxima adequabilidade. MÍN. ADQ = Mínima adequabilidade.....	33
Figura 14 – Delimitação das áreas em Minas Gerais consideradas preferenciais para o plantio das espécies (a) <i>Dipteryx alata</i> , (b) <i>Schinus terebinthifolious</i> , (c) <i>Joannesia princeps</i> , (d) <i>Acrocomia aculeata</i> e (e) <i>Myracrodruon urundeuva</i> ..	35
Figura 15 – Localização das áreas preferenciais para o plantio da espécie <i>Dipteryx alata</i> no mapa das 14 unidades regionais do IEF de Minas Gerais. ...	36
Figura 16 - Localização das áreas preferenciais para o plantio da espécie <i>Schinus terebinthifolious</i> no mapa das 14 unidades regionais do IEF de Minas Gerais. ....	37
Figura 17 - Localização das áreas preferenciais para o plantio da espécie <i>Joannesia princeps</i> alata no mapa das 14 unidades regionais do IEF de Minas Gerais. ....	38
Figura 18 - Localização das áreas preferenciais para o plantio da espécie <i>Acrocomia aculeata</i> no mapa das 14 unidades regionais do IEF de Minas Gerais. ....	39
Figura 19 - Localização das áreas preferenciais para o plantio da espécie <i>Myracrodruon urundeuva</i> no mapa das 14 unidades regionais do IEF de Minas Gerais .....	40

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

APP	Área de preservação permanente
CAD	Capacidade de armazenamento de água do Solo
CRA	Capacidade de retenção de água
CRIA	Centro de referência em informação ambiental
DH	Déficit hídrico acumulado anual
ETP	Evapotranspiração potencial
ETR	Evapotranspiração real
EXC	Excedente hídrico
GBIF	Global Biodiversity Information Facility
IEF	Instituto Estadual de Florestas
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IW	Índice de Walsh
NEX-GDDP	NASA EARTH Exchange Global Daily Downscaled Projections
P	Precipitação pluviométrica total anual
RL	Reserva Legal
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
SMSA	Sistema de Monção Sul Americana
T	Temperatura mínima média anual
THRH	Terrestrial Hydrology Research Group
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission

**LISTA DE SÍMBOLOS**

$\theta_{CC}$	Capacidade de campo
$\theta_{PM}$	Ponto de murcha permanente
$eg$	Erro de graficismo
$Z_r$	Profundidade efetiva do sistema radicular de espécies florestais
$\Delta T$	Viés da temperatura
$\Delta P$	Viés da precipitação

## RESUMO

FILPI, Heitor Eduardo Ferreira Campos Morato, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Zoneamento edafoclimático em cenários de mudanças climáticas para a seleção de espécies em projetos de recomposição florestal em Minas Gerais, Brasil.** Orientadora: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro. Coorientadora: Cibele Hummel do Amaral.

Em Minas Gerais, extensas áreas de pastagens degradadas têm sido associadas à ocorrência de sérios problemas ambientais. A necessidade de se promover a recuperação dessas áreas e as obrigações previstas na legislação tem aumentado cada vez mais a demanda por projetos de recomposição florestal. No entanto, muitos desses projetos acabam fracassando devido ao pouco conhecimento sobre a biologia e a ecofisiologia das espécies utilizadas. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo realizar um zoneamento edafoclimático para subsidiar a tomada de decisão durante a fase de escolha das espécies, em projetos de recuperação de áreas degradadas e plantios para fins de regularização ambiental em Minas Gerais, Brasil. Para o presente estudo, foram selecionadas as espécies *Dipteryx alata* Vog, *Joannesia princeps* Vell, *Schinus terebinthifoliosus* Raddi, *Acrocomia aculeata* (Jacq) Lodd e *Myracrodruon urundeuva* Fr All. Para o zoneamento, foram utilizados dados climáticos na resolução espacial de 0,25°. As exigências de cada espécie selecionada foram estabelecidas com base nas condições edáficas e climáticas de suas regiões de ocorrência natural. Os mapas de zoneamento edafoclimático foram gerados por meio da inferência *fuzzy* ponderada. Após gerar os mapas de zoneamento edafoclimático para o cenário atual, foi também realizado o zoneamento edafoclimático considerando o cenário RCP8.5 do IPCC. As regiões consideradas preferenciais para o plantio de cada espécie foram delimitadas a partir da sobreposição dos mapas de zoneamento de ambos cenários. Por fim, foi realizada a sobreposição dos mapas de zoneamento edafoclimático com o mapa das 14 unidades regionais do Instituto Estadual de Florestas (IEF), as quais são responsáveis pela coordenação de 75 viveiros florestais em Minas Gerais. Os resultados obtidos indicam que o extremo norte e o extremo sul do estado representam as regiões menos preferenciais para o plantio das espécies selecionadas. Verificou-se que, com exceção da *Acrocomia aculeata*, o déficit hídrico acumulado anual e a distribuição de chuvas ao longo do ano foram as variáveis de maior peso. Em relação a

caracterização do clima futuro frente ao cenário RCP8.5, sugere-se que as regiões norte e nordeste de Minas Gerais serão as mais afetadas. A sobreposição do mapa das unidades regionais do IEF nos mapas de zoneamento edafoclimático demonstrou que nem todas as unidades regionais apresentam condições favoráveis à sobrevivência das espécies. De modo geral, os resultados comprovam que, diante de um clima cada vez mais instável, o zoneamento edafoclimático pode ser uma ferramenta imprescindível ao planejamento de projetos de recomposição florestal.

## ABSTRACT

FILPI, Heitor Eduardo Ferreira Campos Morato, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Edapho-climatic zoning under climate change scenarios as a support tool for forest restoration in Minas Gerais, Brazil**. Adviser: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro. Co-adviser: Cibele Hummel do Amaral.

In Minas Gerais, extensive areas of degraded lands have been associated with serious environmental problems. The urgent need for restoration measures and the environmental obligations have significantly increased the demand for projects focused on reestablishing forests. Nevertheless, several of these projects have been failing due to the lack of knowledge related to the biology and eco-physiology of the species used. In this context, the present study aimed to develop an edapho-climatic zoning to subsidize decision-making during the species selection for restoration projects and environmental regulation in the state of Minas Gerais, Brazil. For this study, we selected five tree species: *Dipteryx alata* Vog, *Joannesia princeps* Vell, *Schinus terebinthifolius* Raddi, *Acrocomia aculeata* (Jacq) Lodd and *Myracrodruon urundeuva* Fr All. For the zoning, we used climatic data in a spatial resolution of 0.25°. The requirements of the selected species were determined based on the climate and soil conditions of their natural occurrence. The edapho-climatic zoning maps were generated through a weighted fuzzy inference system and it was carried out under current and future climate conditions according to RCP8.5 scenario of IPCC. Lastly, the geographic location of the 14 administrative divisions, in which the State Forest Institute (IEF) run tree nurseries, were plotted on the climatic zoning maps for identifying which administrative divisions are climatically more suitable for each species selected. According to the results, the extreme north and extreme south of the state were the least suitable areas to all species. With the exception of *Acrocomia aculeata*, annual water deficit and rainfall seasonality had the greatest weights. Concerning the future projections, we suggest that the north and northeast will be the most affected regions in Minas Gerais by climate change. The overlapping of the IEF administrative divisions on the zoning maps indicated that not all administrative divisions present favorable conditions for the survival of the species. Essentially, as the climate becomes more unpredictable, the results show that edapho-climatic zoning may be an indispensable tool for forest restoration planning.

## 1. Introdução

Ao longo da expansão de atividades produtivas, tanto no setor agrícola como no setor industrial, o território de Minas Gerais vem, por séculos, sendo alvo de grandes impactos ambientais. De toda sua cobertura vegetal nativa, composta pelos domínios Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica, mais de 60% já foi removida (MAPBIOMAS, 2017). As florestas de Mata Atlântica, por exemplo, que no passado compreendiam 41% do Estado, atualmente abrangem apenas cerca de 4,5% (SOS Mata Atlântica; INPE, 2008). Grande parte destas áreas, antes ocupadas por ecossistemas naturais, são hoje ocupadas por pastagens as quais encontram-se em diferentes estágios de degradação (MAPA, 2015; IBGE, 2006; Fernandes et al., 2005). A degradação do solo sob pastagem, além de comprometer o abastecimento dos lençóis freáticos, resulta na diminuição significativa da sua capacidade produtiva e da sua cobertura vegetal, desencadeando processos erosivos que contribuem para o transporte de sedimentos e o assoreamento de cursos d'água (Junior et al., 2013; Lima et al., 2013).

Devido aos onerosos custos ambientais e econômicos associados ao atual cenário de degradação ambiental em que boa parte do estado se encontra, surge a necessidade de se buscar medidas que promovam a recuperação de áreas degradadas em Minas Gerais. Dentre os diferentes métodos utilizados para a recuperação de áreas degradadas, a revegetação a partir de plantios heterogêneos de espécies florestais é uma estratégia fundamental para melhorar os atributos químicos e físicos do solo, estimular a atividade biológica e proporcionar refúgio para a biodiversidade animal (Ricci et al., 2006). Além desses benefícios, as espécies florestais fornecem, por meio da cobertura vegetal, proteção à superfície do solo diminuindo as perdas de sedimentos por erosão (Pereira e Rodrigues, 2011).

A importância dos plantios heterogêneos de espécies florestais não está vinculada apenas à recuperação de áreas degradadas. O Código Florestal Brasileiro (Lei nº 12.727, de 2012) menciona a utilização de florestas plantadas como meio de manutenção e compensação de Reserva Legal (RL) nas propriedades rurais. Segundo Ranieri (2004), no Brasil, o principal instrumento utilizado para a preservação ambiental é a exigência de manutenção da vegetação nativa nas áreas de preservação permanente (APP) e nas áreas de Reserva Legal (RL).

No entanto, Diniz (2012) ressalta que, ao longo dos anos, a legislação não vem sendo cumprida de forma efetiva, de modo que grande parte das propriedades rurais apresentam déficits de registros de APPs e RLs. Neste contexto, os plantios heterogêneos de espécies florestais são também essenciais para fins de regularização ambiental.

A crescente conscientização nos últimos anos e as obrigações previstas na legislação tem aumentado cada vez mais a demanda por projetos de recomposição florestal (Amazonas et al., 2018; Chazdon et al., 2017). No entanto, embora haja interesse das instituições privadas e de órgãos públicos em implantar projetos efetivos de recuperação ambiental, muitos projetos de reflorestamento heterogêneo acabam fracassando devido ao pouco conhecimento sobre a biologia e a ecofisiologia das espécies utilizadas (Carvalho, 2009; Gatti et al, 2008; Rorato et al, 2017). A falta de eficiência desses projetos acarreta na permanência de ambientes degradados bem como contribui para perdas econômicas significativas.

Neste contexto, identificar os fatores ambientais que influenciam na sobrevivência e estabelecimento das espécies em projetos de recomposição florestal é fundamental para reduzir os prejuízos advindos de plantios malsucedidos. Segundo Yamada (2011), os fatores edáficos e climáticos se destacam como fortes indicadores para delimitar zonas propícias ao desenvolvimento de espécies florestais. As condições de solo, temperatura e umidade, por exemplo, afetam diretamente os processos fisiológicos da planta, como fotossíntese, germinação de sementes e atividade das raízes (Larcher, 2004). Portanto, o conhecimento das exigências edafoclimáticas de cada espécie é de grande importância para que se tenha maior êxito dos plantios.

No planejamento florestal, o zoneamento é uma ferramenta que possibilita dividir uma área em regiões homogêneas, levando em conta as condições ambientais associadas às necessidades ecofisiológicas de uma espécie. Para cada espécie florestal, existe um ambiente ecológico ótimo, onde as condições físicas e biológicas são harmonicamente ajustadas para o seu desenvolvimento (Wang et al, 2016; Chuine e Beaubien, 2001). Tourne et al (2015) ressalta que para aprimorar a gestão e o manejo de florestas naturais e plantadas é necessário identificar as características edafoclimáticas que influenciam na distribuição

geográfica e no crescimento de espécies arbóreas. Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo mapear, para o clima atual e para a projeção de 2021 a 2050, regiões em Minas Gerais onde as condições edafoclimáticas são mais favoráveis à sobrevivência de cinco espécies florestais, nativas da flora mineira, com potencial uso na recuperação de áreas degradadas e em plantios para fins de regularização ambiental.

Os objetivos específicos deste estudo foram: 1) identificar condições edafoclimáticas preferenciais para o plantio das espécies: *Dipteryx alata* Vog, *Joannesia princeps* Vell, *Schinus terebinthifolius* Raddi, *Acrocomia aculeata* (Jacq) Lodd e *Myracrodruon urundeuva* Fr All, baseando-se nos seus respectivos locais de ocorrência em Minas Gerais; 2) delimitar regiões no estado cujas condições edafoclimáticas são mais favoráveis para à sobrevivência das cinco espécies selecionadas; 3) prever possíveis mudanças climáticas nessas regiões frente ao cenário RCP8.5 do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC); 4) identificar as unidades regionais do Instituto Estadual de Florestas (IEF) que apresentam condições edafoclimáticas preferenciais para o plantio de cada espécie.

## 2. Materiais e Método

### 2.1 Área de estudo

A área de estudo é o estado de Minas Gerais (Figura 1) que se encontra na região sudeste do Brasil. Com uma extensão territorial de 586.528 km<sup>2</sup>, Minas Gerais é o quarto maior estado do país. Caracterizado por uma grande diversidade fisiográfica, composta por planaltos, chapadas e depressões, o estado apresenta altitudes variando de 76 metros a 2.892 metros. Devido às suas variações de relevo e de latitude, o território de Minas Gerais está localizado em uma região de transição climática e apresenta diversos tipos de climas.

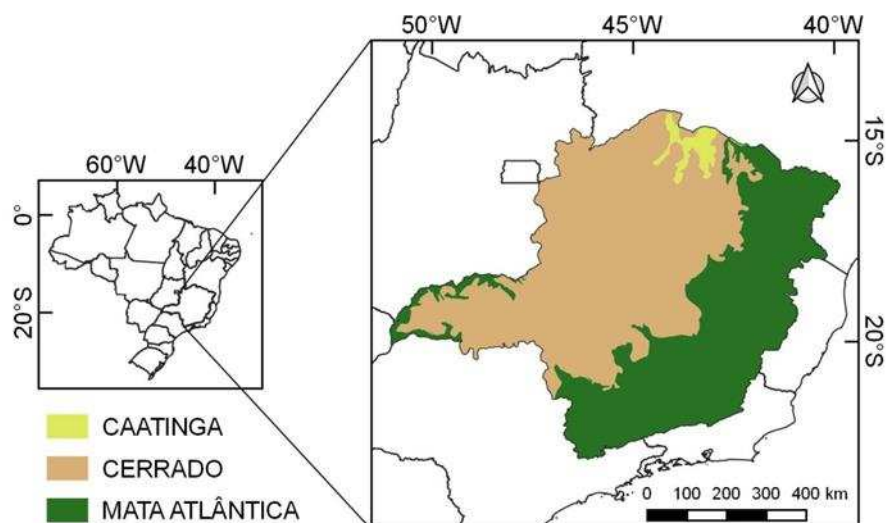


Figura 1 - Localização geográfica de Minas Gerais e os biomas presentes em seu território (IBGE, 2004)

A presença de complexos topográficos como as serras da Mantiqueira, da Canastra e do Espinhaço favorecem o desenvolvimento de circulações de mesoescala, provocando alterações na direção e na intensidade do vento (Reboita et al., 2015). O vento que sopra de encontro às áreas mais elevadas provoca o levantamento do ar e contribui para a formação de chuvas orográficas nas regiões à barlavento. Em contrapartida, ao descer, o ar já desprovido de umidade, aquece adiabaticamente, criando condições mais secas nas regiões à sotavento. Além de influenciar no regime de precipitação, a configuração e a disposição do relevo de Minas Gerais também reflete diretamente nos padrões de temperatura, já que variações na altitude implicam em diferentes trocas de

energia entre a superfície e a atmosfera.

Outro fator responsável pela variabilidade da precipitação e da temperatura em Minas Gerais é a sazonalidade dos sistemas meteorológicos de grande escala (Cavalcanti et al., 2009). Devido à sua posição geográfica, Minas Gerais recebe influência das principais correntes de circulação atmosférica da América do Sul, além de participação importante de condições anticiclônicas. O estado apresenta duas estações bem definidas, uma seca e uma chuvosa. A estação chuvosa tem um regime do tipo monção, com períodos chuvosos em que domina a Zona de Convergência Atlântico Sul (ZCAS), e períodos secos denominados de veranicos, em que o regime de chuvas é mais localizado (Cavalcanti et al., 2009). A Zona de Convergência Atlântico Sul (ZCAS) é caracterizada por uma faixa de nebulosidade orientada de NW para SE e está associada ao escoamento convergente na baixa troposfera do sul da Amazônia ao Atlântico Sul-Central. Durante o verão, ao gerar condições de instabilidade, a ZCAS exerce grande influência nos índices pluviométricos da estação chuvosa na região sudeste do Brasil. Juntamente à atuação da ZCAS, e entrada de frentes frias denominadas de Frente Polar Atlântica também promove à ocorrência de chuvas durante o verão. No inverno, as frentes frias também estão presentes no território mineiro, mas a precipitação a elas associada é muito pequena (Abreu, 1998).

Assim como a distribuição da precipitação, os padrões de temperatura em Minas Gerais também está diretamente relacionada à sua localização geográfica. Em função de sua posição latitudinal, Minas Gerais apresenta ampla exposição à radiação solar. Além disso, o estado compreende diversas faixas latitudinais que vão desde o extremo sul, com temperaturas mais amenas, ao extremo norte, com temperaturas mais quentes (Reboita et al., 2015).

De acordo com a classificação de Köppen (Köppen, 1936), Minas Gerais apresenta quatro tipologias climáticas predominantes: As, Aw, Cwa, Cwb (Figura 2). A subzona Aw ocupa mais de um terço do território do Estado (34,9%) e corresponde ao clima tropical com inverno seco, onde a precipitação pluviométrica anual varia de 1000 mm a 1400 mm e a altitude é inferior a 800 metros. As subzonas Cwa e Cwb ocupam juntas cerca de 50% do Estado, e apresentam climas também com inverno seco, porém com altitudes elevadas e temperaturas menores que na Aw. Apesar de ambas corresponderem ao clima subtropical úmido com inverno seco, na Cwa o verão é mais quente que na Cwb. Por último,

ocupando a menor proporção do estado (12,3%), a subzona As corresponde ao clima tropical com estação seca de verão. A As apresenta os menores índices pluviométricos e abrange principalmente as regiões localizadas ao norte de Minas Gerais (Alvares et al., 2013).

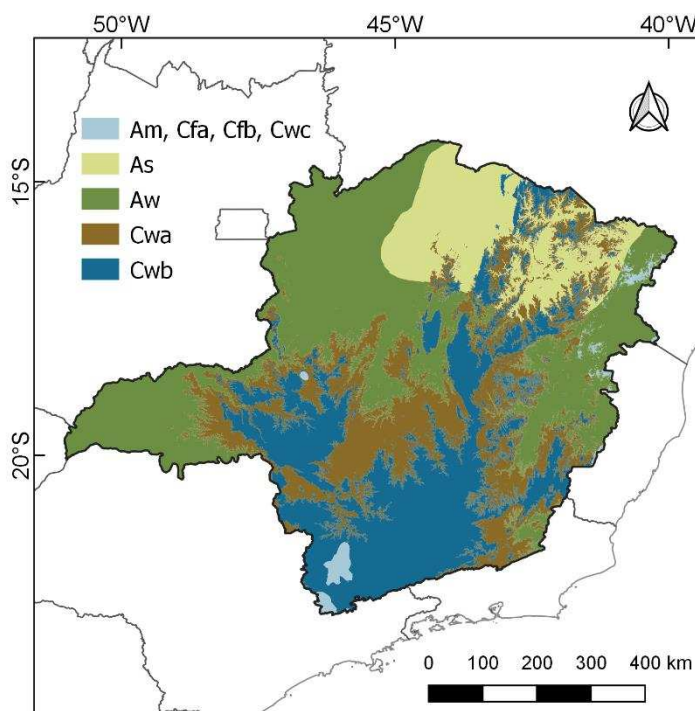


Figura 2 - Classificação climática de Köppen para o estado de Minas Gerais (Alvares et al., 2013)

Em relação a cobertura vegetal, conforme ilustra a Figura 1, em Minas Gerais estão presentes três biomas principais: Cerrado, localizado na porção centro-ocidental, abrange 57% da área total do estado; a Mata Atlântica, localizada na porção oriental, abrange 41% e a Caatinga, restrita ao norte, abrange cerca de 2% do território mineiro (MAPA, 2015). Atualmente, estima-se que os remanescentes de vegetação nativa, compostos por formações florestais, campestres e formações savânicas equivalem, respectivamente, a 18%, 6% e 14% do território do estado (MAPBIOMAS, 2017).

Em Minas Gerais, aproximadamente 350.000 km<sup>2</sup> de vegetação nativa já foram substituídos por outros usos da terra, tais como: agricultura, silvicultura e pecuária. Dentre os diferentes usos, as pastagens ocupam a maior proporção do Estado, o que equivale a 35%. Já a agricultura e silvicultura compreendem, respectivamente, 22% e 3% (MAPBIOMAS, 2017).

## 2.2 Escolha e caracterização das espécies

Um aspecto importante que deve ser levado em conta durante o planejamento de projetos de recomposição florestal diz respeito à escolha adequada das espécies (Silva, 2014; Kremen, 1992). Para que se tenha êxito na recuperação de um ambiente degradado, devem ser selecionadas espécies que se adaptam as condições físicas daquele ambiente. Além disso, espécies cujos atributos sejam favoráveis para acelerar a reestruturação da comunidade vegetal (Ladouceur, 2018; Pilon e Durigan, 2013). Dessa forma, a seleção das espécies para o presente estudo de zoneamento foi realizada de forma criteriosa. Foram selecionadas espécies, nativas da flora de Minas Gerais, que apresentam rápido crescimento, copas amplas e atratividade à fauna, ou seja, espécies que promovem o recobrimento do solo, acúmulo de matéria orgânica, e ainda funcionam como “trampolins” de biodiversidade, proporcionando uma rica oferta de recursos para agentes dispersores e polinizadores, os quais são de grande importância para a regeneração natural da área e de seu entorno (Carlo e Morales, 2016; Felfili et al., 2005; Wunderle, 1997).

Outra característica também observada foi o grupo ecológico ao qual a espécie pertence. Em plantios de recomposição florestal, a combinação de espécies de diferentes estágios sucessionais é fundamental para garantir a manutenção da diversidade biológica e o reestabelecimento dos processos ecológicos (Moraes, 2010). Portanto, para o zoneamento, foram selecionadas espécies pioneiras (*Dipteryx alata* Vog, *Schinus terebinthifolius* Raddi) e espécies secundárias (*Joannesia princeps* Vell, *Acrocomia aculeata* (Jacq) e *Myracrodruon urundeuva* Fr All). As espécies pioneiras são aquelas que demandam maior luminosidade, crescem rapidamente e se desenvolvem em condições ambientais adversas. Essas espécies modificam o ambiente, fornecendo sombreamento e disponibilidade de recursos para o estabelecimento de espécies secundárias, que por sua vez, criam condições para outras espécies de estágios sucessionais ainda mais avançados, até que o sistema atinja o clímax, estágio sucessional de maior estabilidade (Silva, 2014).

Além do comportamento ecológico das espécies, foram também avalia-

dos aspectos econômicos, de modo que foram priorizadas espécies que apresentam potencial para a geração de renda. Segundo estimativas de Rodrigues et al (2011), em regiões do domínio da Mata Atlântica, o custo total médio para restaurar um hectare equivale a cerca de R\$ 5.216,00. Os elevados custos associados à recomposição florestal representam um atual limitante para que a restauração ganhe escala no país (Silva e Ranieri, 2014). Nesse contexto, sistemas que promovam a recomposição florestal e, ao mesmo tempo, possam gerar benefícios socioeconômicos em áreas até então improdutivas, constituem uma ótima saída para estimular a recuperação de áreas degradadas e os plantios para fins de regularização ambiental (Rodrigues et al., 2011).

A seguir estão descritas as principais características relacionadas ao potencial econômico de cada espécie selecionada.

### **2.2.1 *Dipteryx alata***

Popularmente conhecida como baru, apresenta madeira de alta densidade, compacta e de alta durabilidade natural. A castanha obtida de seu fruto tem alto valor comercial e representa uma importante fonte de renda para comunidades tradicionais na região do planalto central (Almeida et al., 2016). A amêndoa do baru destaca-se pela sua rica composição química, a qual apresenta elevado teor de proteína e mais de 75% de ácidos graxos insaturados, entre eles o ômega 3. Cada planta de baru produz em média 2000 a 6000 frutos por ano, os quais no mercado, são comercializados em até R\$70,00/kg (Filho e Sartorelli, 2015).

### **2.2.2 *Schinus terebinthifolius***

Conhecida como aroeira-pimenteira, o óleo presente em seus frutos apresenta diversas propriedades medicinais, tais como antioxidantes, anti-inflamatórias e antissépticas (Velázquez et al, 2003). Atualmente vem sendo utilizado na indústria farmacêutica para a produção de fitoterápicos, e também na indústria de cosméticos, sendo comercializado por até R\$800,00 L<sup>-1</sup> (Clemente, 2006). Além de seus frutos, suas folhas também apresentam óleos essenciais que podem ser utilizados para a produção de inseticidas naturais (Santos et al, 2007).

### **2.2.3 *Joannesia princeps***

Conhecida como boleira, sua madeira leve, branco-amarelada é muito utilizada na marcenaria, caixotaria e indústria de palitos. O óleo extraído das sementes de seu fruto apresenta propriedades como purgante e antimicrobiano (Waibel et al., 2003). Industrialmente, pode também ser utilizado para substituir o óleo de linhaça para pintura e também ser empregado como óleo lubrificante em automóveis (Filho e Sartorelli, 2015).

### **2.2.4 *Acrocomia aculeata***

Conhecida popularmente como macaúba, seu fruto e semente apresentam uma infinidade de usos, podendo ser utilizados como matéria prima na indústria alimentícia, farmacêutica, de cosméticos e até no setor bioenergético (Moura et al., 2010). A polpa dos seus frutos, por exemplo, possui alto valor nutricional e apresenta alta concentração de ácido oleico e carotenoides (Ramos et al., 2008). No norte de Minas Gerais, o fruto da macaúba representa uma importante fonte de renda para comunidades rurais, as quais o utilizam para a fabricação de sabão (Sanjinez-Argandoña e Chuba, 2011).

### **2.2.5 *Myracrodruon urundeuva***

Conhecida como aroeira-do-sertão, sua madeira apresenta alta densidade e durabilidade. Por ser resistente a cupins, está entre as madeiras preferidas para a construção de cercas no Brasil e o valor médio da sua madeira em pé pode chegar até R\$570,00/m<sup>3</sup>. Dormentes comuns de aroeira-do-sertão apresentam duração média de 25 anos (Filho e Sartorelli, 2015).

### 2.3 Base de dados

Para a realização do zoneamento, foram utilizadas quatro variáveis climáticas: temperatura mínima média anual, precipitação pluviométrica total anual, distribuição de chuvas ao longo do ano e déficit hídrico acumulado anual. Para caracterizar o clima atual de Minas Gerais, foram utilizados dados na resolução de 0,25° (~28 km) referentes a uma série histórica de 30 anos (1981 a 2010). Os dados de temperatura e precipitação são provenientes de dois bancos de dados distintos, gerados pelo grupo *Clima*, publicado por Xavier et al (2013), e pelo *Terrestrial Hydrology Research Group* (THRH), publicado por Sheffield et al (2006).

Os dados de Xavier et al (2013) correspondem a dados meteorológicos de alta resolução, espacializados para todo o Brasil e obtidos de estações meteorológicas terrestres operadas por agências federais e estaduais, sendo um total de 9.259 estações pluviométricas e 735 estações meteorológicas. Já os dados de Sheffield et al (2006) se referem a uma reconstrução de dados climáticos a nível global, atualizados em tempo real de 3 em 3 horas, utilizando dados observados, dados de sensores satelitários da missão *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) e reanálises.

De posse dos dados de precipitação, a distribuição de chuvas ao longo do ano foi determinada a partir do índice de Walsh (Walsh e Lawler, 1981; Walsh, 1996), o qual reflete o grau de variabilidade da precipitação mensal ao longo do ano. O índice de Walsh (IW) possibilita comparar de forma quantitativa a sazonalidade da precipitação em diferentes regiões e é calculado pela Equação 1.

$$IW = \frac{1}{R_i} \sum_{n=1}^{n=12} \left| x_{i,n} - \frac{R_i}{12} \right| \quad (1)$$

em que  $R_i$  representa a precipitação total anual e  $x_{i,n}$  corresponde a precipitação mensal no mês  $n$ .

Conforme é demonstrado na Equação 1, quanto maior o IW, maior é a sazonalidade das chuvas em uma determinada região. A Tabela 1 apresenta uma descrição qualitativa da distribuição de chuvas ao longo do ano de acordo

com os intervalos de índice de Walsh (Walsh e Lawler, 1981).

Tabela 1 – Descrição das classes de Índice de Walsh (Walsh e Lawler, 1981)

Regime de chuvas	IW
Bem distribuídas	$\leq 0,19$
Bem distribuídas, com estação chuvosa definida	0,20 – 0,39
Sazonal, com curta estação seca	0,40 – 0,59
Sazonal	0,60 – 0,79
Sazonal, com longa estação seca	0,80 – 0,99
Chuvas concentradas em 3 meses ou menos	1,00 – 1,20
Chuvas concentradas em 1 ou 2 meses	$\geq 1,20$

Após calculado o índice de Walsh, a próxima etapa consistiu em gerar o mapa de déficit hídrico acumulado anual através da metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1955) para cálculo do balanço hídrico. O balanço hídrico estima a disponibilidade de água no solo a partir de uma análise conjunta da precipitação, da evapotranspiração potencial (ETP) e da capacidade máxima de armazenamento de água no solo (CAD).

O modelo de Thornthwaite e Mather (1955) considera que o que entra no sistema é apenas a água devido à precipitação, enquanto o que sai é devido a evapotranspiração real (ETR) e à água que percola abaixo do alcance do sistema radicular da planta (EXC). O déficit hídrico é calculado pela diferença entre a ETP e a ETR. A ETP representa a perda potencial de água por uma extensa superfície vegetada com grama, em crescimento ativo e sem restrição por água. Já a ETR representa a evapotranspiração que realmente ocorre em função da disponibilidade de água no solo.

Tendo em vista que locais com a mesma precipitação pluvial podem apresentar diferentes disponibilidades de água no solo, um dos componentes imprescindíveis para o cálculo do déficit hídrico é a capacidade máxima de armazenamento de água no solo (CAD) (Geroy et al, 2011). A CAD pode ser calculada pela diferença de umidade entre a capacidade de campo (máxima quantidade de água que o solo pode reter) e o ponto de murcha permanente (teor de umidade no solo, em que abaixo dele a planta não conseguirá captar água), considerando a profundidade efetiva das raízes.

Para a determinação da CAD, cada classe de solo presente em Minas

Gerais foi reclassificada em função da sua capacidade de retenção de água (CRA). A base de dados utilizada foi o mapa de solos na escala 1:650.000 (UFV et al., 2010) delineado convencionalmente com 303 unidades de mapeamento. No mapa, foram identificadas 19 classes de solos (até o segundo nível categórico), as quais foram agrupadas em quatro categorias: muito alta, alta, média e baixa CRA (Tabela 2). Os quatro grupos de CRA foram definidos levando-se em conta características texturais bem como características mineralógicas de cada classe de solo (Sans et al., 2001).

Tabela 2 – Agrupamento das classes de solos de Minas Gerais de acordo com a sua CRA (adaptado de Sans et al., 2001)

CRA	Classe de solo
Baixa	Areias quartzosas Neossolos litólicos
Média	Latossolos álicos e distróficos, textura média Latossolos eutróficos, textura média Planossolos, textura média Brunizen avermelhado, textura média Cambissolos, textura média Solos concrecionários (Plintossolos) Solos aluviais (Flúvicos), textura arenosa, textura média Podzólicos, textura arenosa/média, textura média
Alta	Cambissolos, textura média/argilosa, argilosa, muito argilosa Latossolos álicos e distróficos, textura argilosa Podzólicos, textura argilosa Nitossolos
Muito Alta	Planossolos, textura argilosa Planossolo sódico (Solonetz Solodizado), textura argilosa Brunizen avermelhado, textura argilosa Latossolos, textura muito argilosa Podzólicos, textura muito argilosa Solos aluviais (Flúvicos), textura argilosa Gleissolos (Háplico e Melânico), textura argilosa Bruno não cálcico, textura média/argilosa

Após a reclassificação do mapa de solos, foram atribuídos valores de capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) e de ponto de murcha permanente ( $\theta_{PM}$ ) para cada classe de CRA, utilizando-se como referência o Boletim 56 da FAO (Allen et al., 1998), o qual apresenta valores de  $\theta_{cc}$  e de  $\theta_{PM}$  para nove classes texturais de solos descritas no sistema de classificação norte americano. Desse modo, para atribuir os valores de  $\theta_{cc}$  e  $\theta_{PM}$ , cada classe de CRA foi associada à uma classe textural de solo descrita no Boletim 56 da FAO (Tabela 3).

Tabela 3 – Propriedades físicas do solo em função da classe textural (adaptado de Allen et al., 1998)

Classe textural	$\theta_{CC}$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	$\theta_{PM}$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	CRA
Arenosa	0,12	0,045	Baixa
Franco-Arenosa	0,23	0,11	Média
Argilo-Siltosa	0,36	0,23	Alta
Argilosa	0,36	0,22	Muito Alta

Para a estimativa da CAD, foi considerado um valor padrão de 200 cm para profundidade efetiva do sistema radicular de espécies florestais ( $Z_r$ ) (Allen et al., 1998; Gonçalves et al., 1990). A CAD foi calculada através da seguinte equação:

$$CAD = 1000 (\theta_{CC} - \theta_{PM}) \times Z_r \quad (2)$$

Após calculada a CAD para os quatro grupos de CRA, o mapa gerado, em formato vetorial, foi rasterizado para a resolução espacial de 130 metros, de acordo com a Equação 3.

$$RESOLUÇÃO = 650.000 \times eg \quad (3)$$

em que  $eg$  corresponde ao erro de graficismo (0,0002) e o valor 650.000 corresponde a escala do mapa de solos utilizado.

Em seguida, para o cálculo do balanço hídrico, os dados de temperatura e precipitação média mensal, obtidos na resolução de 0,25° (~28 km), foram re-amostrados para a mesma resolução do mapa de CAD. Para o cálculo do déficit hídrico acumulado anual, optou-se por manter os dados na resolução de 130 metros, pois a variação espacial do solo na paisagem é consideravelmente maior que a variação espacial dos elementos climáticos (Wassenaar et al., 1999). O fluxograma da Figura 3 apresenta as etapas necessárias para o cálculo do déficit hídrico acumulado anual.

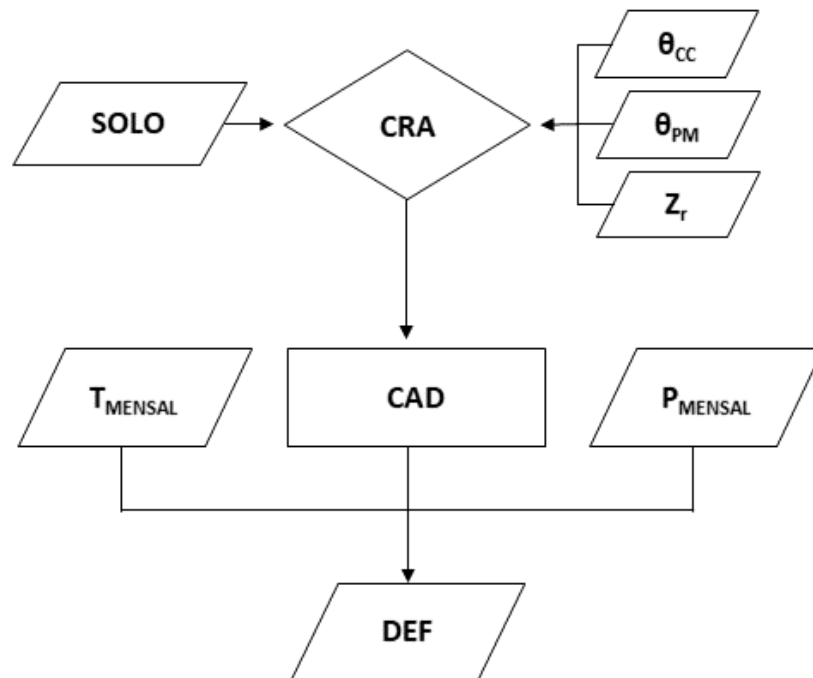


Figura 3 - Fluxograma das etapas necessárias para o cálculo do déficit hídrico acumulado anual ( $T_{MENSAL}$  corresponde a temperatura mensal;  $P_{MENSAL}$  corresponde a precipitação pluviométrica mensal;  $CRA$  corresponde a capacidade de retenção de água do solo;  $CAD$  corresponde a capacidade máxima de armazenamento de água no solo;  $\theta_{CC}$  corresponde a capacidade de campo do solo;  $\theta_{PM}$  corresponde ao ponto de murcha permanente do solo;  $Z_r$  corresponde a profundidade efetiva do sistema radicular).

Para que houvesse compatibilidade espacial entre os dados de déficit hídrico acumulado anual e as demais variáveis propostas para o zoneamento, os dados de temperatura mínima média anual, precipitação pluviométrica total anual e índice de Walsh foram também reamostrados para a resolução de 130 metros. Uma vez gerados os mapas de cada variável, foi calculada a média entre os dados de Sheffield et al. (2006) e de Xavier et al. (2013) para caracterizar o clima atual de Minas Gerais. Segundo Carey e Alexander (2003), a utilização de banco de dados distintos, provenientes de metodologias diferentes, possibilita reduzir as incertezas na caracterização das condições climáticas de um determinado local.

### 2.3.1 Organização e coleta dos dados de ocorrência das espécies

As informações referentes à distribuição geográfica das espécies em Minas Gerais foram provenientes de inventários florestais e de herbários virtuais

que disponibilizam suas bases nos âmbitos nacional e internacional. Foram utilizados dados do projeto “Mapeamento da flora nativa e dos reflorestamentos de Minas Gerais, realizado em 2004 e 2006 pela Universidade Federal de Lavras em parceria com o IEF (Carvalho e Scolforo, 2008) e dados dos herbários: Centro de Referência em Informação Ambiental (CRIA) via *SpecieLink* (<http://www.splink.org.br/index>) e Global Biodiversity Information Facility (GBIF) (<http://www.gbif.org/index>).

## 2.4 Aplicação da inferência fuzzy e reclassificação das variáveis

Para a realização do zoneamento edafoclimático, os mapas de cada variável foram reclassificados por meio da inferência *fuzzy*. A inferência *fuzzy* consiste em uma análise multicritério que tem como objetivo proceder à determinada avaliação de aptidão, combinando variáveis interativas sem estabelecer limites rígidos entre classes (Cheng et al., 2006). Por ser uma metodologia de caracterização de classes que utiliza valores contínuos, e não discretos, torna-se necessário uma representação por conjuntos. Os conjuntos *fuzzy* definem fatores que realçam ou diminuem a adequabilidade de uma alternativa em estudo, havendo uma variação gradual dos valores da imagem de 0 (menos adequado) a 255 (mais adequado) através da transição entre membros e não membros de uma localização (Calijuri, 2000). Dessa forma, a inferência *fuzzy* possibilita reclassificar os mapas de cada variável considerando a pertinência de cada valor em relação às exigências climáticas de cada espécie. O grau de pertinência é definido por um número no intervalo de 0 a 1 que representa “quanto” uma variável pertence a um determinado conjunto.

A metodologia *fuzzy* realiza a padronização dos fatores por meio de funções de pertinência, que podem ser: triangular, trapezoidal, cauchy e sigmoideal. Dentre elas, a função sigmoideal possibilita representar, na escala de 0 a 1, pequenas variações em uma transição gradual, contínua e não linear (Jiang e Eastman, 2000). Na maioria das comunidades vegetais, a densidade de populações e a diversidade de espécies variam de forma contínua ao longo de um gradiente ambiental, e não de forma abrupta, em zonas claramente separadas (Austin, 1985). Nesse contexto, para o presente estudo de zoneamento, foi utilizada a função sigmoideal simétrica.

Para a reclassificação das variáveis, foi necessário, inicialmente, caracterizar as exigências climáticas de cada espécie selecionada. Como na literatura existem poucas informações sobre as necessidades ecofisiológicas de espécies florestais nativas de Minas Gerais, as exigências climáticas de cada espécie foram estabelecidas com base em sua distribuição geográfica no estado. Dessa forma, os pontos georreferenciados referentes à ocorrência de cada espécie, disponibilizados por Carvalho e Scolforo (2008) e pelas redes *SpeciesLink* e *GBIF*, foram plotados nos mapas de cada variável climática utilizada, de modo que os valores armazenados em cada pixel sobreposto aos pontos foram extraídos e identificados.

Para a definição das condições climáticas mais favoráveis à sobrevivência de cada espécie, foram utilizados intervalos entre a média e o desvio padrão dos valores extraídos, conforme ilustra a Figura 4. Os valores compreendidos entre a média e o desvio padrão (média mais o desvio e média menos o desvio) foram definidos como condições de máxima adequabilidade para a espécie. Já os valores equivalentes à média somada a um e meio desvio padrão e a média subtraída a um e meio desvio padrão foram definidos como os limites de mínima adequabilidade para a espécie.

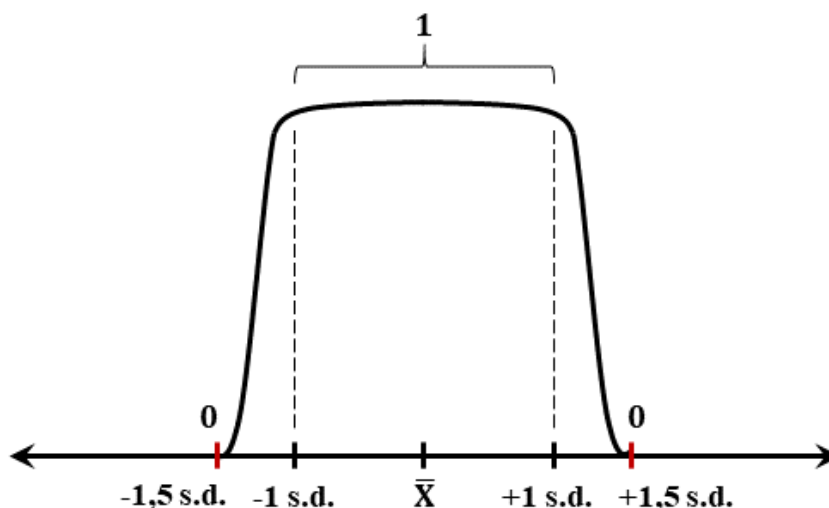


Figura 4 - Definição das condições climáticas de máxima adequabilidade (1) e de mínima adequabilidade (0) na função sigmoide simétrica.  $\bar{X}$  corresponde a média dos valores extraídos e s.d. corresponde ao desvio padrão

### 2.4.1 Definição dos pesos e integração das variáveis

Considerando que cada espécie florestal responde de forma diferente a variações de temperatura, precipitação, sazonalidade e déficit hídrico, após a etapa de reclassificação dos dados, foram atribuídos, para cada espécie, pesos (valores de importância) para cada variável climática utilizada.

Para atribuir os pesos, os mapas de cada variável climática foram divididos em quatro regiões homogêneas a partir do método de *clusterização* K-means (Rubin, 1967). O K-means é um algoritmo de aprendizado não-supervisionado que possibilita particionar um grande número de observações ou conjunto de dados em um número pré-definido de *clusters* (grupos relativamente homogêneos), que deve ser fixado anteriormente a execução do algoritmo. Apesar de ter sido proposto a mais de 50 anos, o algoritmo K-means ainda é amplamente utilizado nas mais diversas áreas, principalmente pela sua simplicidade e fácil aplicação (Jain, 2010). Para a definição do número de *clusters*, utilizou-se como referência a classificação climática de Köppen (Alvares et al., 2013). Como em Minas Gerais existem quatro tipologias climáticas predominantes, optou-se por fixar um número de quatro *clusters* para delimitar as regiões homogêneas.

Em seguida, os pesos de cada variável foram estabelecidos em função da distribuição espacial dos pontos de ocorrência de cada espécie nos mapas regionalizados (*clusterizados*), de modo que, quanto mais homogênea fosse a distribuição dos pontos ao longo das quatro regiões (*clusters*), menos restritiva seria a variável para a sobrevivência da espécie, e, portanto, menor deveria ser o seu peso. Dessa forma, os pesos foram calculados comparando-se a distribuição observada da espécie com uma distribuição hipotética, em que os pontos de ocorrência da espécie estivessem distribuídos de forma homogênea nos mapas regionalizados. Para melhor exemplificar, assumindo-se que o estado de Minas Gerais fosse dividido em quatro regiões de áreas iguais, para que determinada espécie estivesse distribuída de forma homogênea, exatamente 25% dos seus pontos de ocorrência deveriam estar presentes em cada região (*cluster*).

Para comparar ambas as distribuições, hipotética e observada, foi utilizada a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE). A RMSE representa uma medida de dispersão entre valores preditos ou estimados e valores observados (Equa-

ção 4). Após calculada a RMSE das quatro variáveis utilizadas, os valores obtidos foram somados e transformados em porcentagem para, então, dar origem aos pesos de cada variável.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2} \quad (4)$$

em que  $y_j$  corresponde ao número de pontos de ocorrência da espécie  $j$  observados no *cluster*  $n$ ,  $\hat{y}_j$  corresponde ao número de pontos de ocorrência da espécie  $j$  estimados no *cluster*  $n$  assumindo-se uma distribuição homogênea e  $n$  corresponde ao número de *clusters* (agrupamentos).

Uma vez gerados os pesos, a próxima etapa para elaboração dos mapas de zoneamento edafoclimático consistiu na integração das variáveis. A integração das variáveis foi realizada por meio do método de soma ponderada. Neste método, os mapas reclassificados de cada variável foram multiplicados pelos seus respectivos pesos e somados para obtenção do mapa de zoneamento edafoclimático. Nos mapas de zoneamento edafoclimático, o território de Minas Gerais foi hierarquizado em termos de adequabilidade para o plantio de cada espécie, em uma escala gradual de 0 (menos adequado) a 1 (mais adequado).

## 2.5 Zoneamento frente a um cenário de mudanças climáticas

Para caracterizar as alterações decorrentes das mudanças climáticas, foi também realizado o zoneamento considerando a projeção do clima futuro de acordo com o cenário RCP8.5 (Riahi et al., 2011) do IPCC, que sugere um crescimento contínuo da população associado a um desenvolvimento tecnológico lento, resultando em acentuadas emissões de dióxido de carbono até o final do século XXI. Segundo esse cenário, está previsto um aumento na temperatura média global de até 4,8 °C até o ano de 2100. Além de temperaturas mais elevadas, estima-se também um aumento na ocorrência de eventos extremos de modo que fenômenos como ondas de calor, secas prolongadas e inundações causadas por chuvas torrenciais serão cada vez mais frequentes (IPCC, 2014).

Apesar de ser um dos cenários mais pessimistas dentre os quatro cenários do Quinto Relatório de Avaliação do IPCC, o RCP8.5 é um dos cenários que melhor representa as emissões de dióxido de carbono geradas durante o período de 2005 a 2014 (Fuss et al., 2014).

Para reproduzir o clima futuro de acordo com o cenário RCP8.5, inicialmente, foram obtidos dados diários de temperatura e precipitação gerados pelo *downscaling* estatístico de simulações de dois modelos climáticos globais: MRI-CGCM3 e CNRM-CM5. Dentre os diversos modelos climáticos disponíveis, ambos os modelos foram escolhidos, pois simulam de forma satisfatória as condições climáticas da área de estudo (Ávila et al, 2019). Os dados provenientes do *downscaling* estatístico foram disponibilizados pela NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP), na resolução de 0,25°, para o período de 2021 a 2050. Os dados diários provenientes de cada modelo foram reamostrados para 130 metros e convertidos em dados mensais referentes a climatologia de 2021 a 2050.

Apesar dos métodos de *downscaling* estatístico possibilitarem caracterizar alterações climáticas em escalas regionais, devido ao viés dos modelos, os resultados obtidos nem sempre são coerentes com a realidade (Teutschbein e Seibert, 2012). Dessa forma, previamente à utilização dos modelos, é importante que sejam avaliadas as suas simulações para o clima atual de modo que se possa corrigir o viés e, conseqüentemente, obter maior grau de confiança nas simulações elaboradas para o clima futuro (Chou et al., 2016). Nesse contexto, foram obtidos dados de simulações dos modelos também para o período de 1981 a 2010. O viés de cada modelo foi corrigido com base nos dados de temperatura e precipitação observados, referentes à média de Sheffield et al (2006) e Xavier et al (2016). Para corrigir o viés dos dados de temperatura e precipitação, foram utilizadas as Equações 5 e 6.

$$\Delta T = T_{2021-2050} - T_{1980-2010} \quad (5)$$

em que  $T_{2021-2050}$  corresponde aos dados mensais de temperatura projetados para o período de 2021 a 2050 e  $T_{1980-2010}$  corresponde aos dados mensais de temperatura simulados para o presente (1980 a 2010).

$$\Delta P (\%) = \left( \frac{P_{2021-2050} - P_{1980-2010}}{P_{1980-2010}} \right) \times 100 \quad (6)$$

em que  $P_{2021-2050}$  corresponde a precipitação projetada para o período de 2021 a 2050 e  $P_{1980-2010}$  corresponde a precipitação simulada para o presente (1980 a 2010).

Para obtenção dos dados corrigidos do viés, os dados mensais de temperatura e precipitação referentes à média de Sheffield et al (2006) e Xavier et al (2016) foram, respectivamente, somados com o  $\Delta T$  e multiplicados pelo  $\Delta P$ . Após corrigido o viés de cada modelo, foram calculados dados de precipitação pluviométrica total anual, temperatura mínima média anual, distribuição de chuvas ao longo do ano, expressa pelo Índice de Walsh e déficit hídrico acumulado anual. Seqüencialmente, para caracterizar o clima futuro, foi realizada a média entre os dados de cada modelo para as quatro variáveis propostas para o zoneamento. Por fim, o zoneamento de cada espécie para a projeção do clima futuro foi realizado por meio da inferência *fuzzy*, seguindo os mesmos procedimentos que o zoneamento edafoclimático realizado anteriormente para o clima atual (cenário histórico).

## 2.6 Análise da distribuição espacial das unidades regionais do IEF

Após gerados os mapas de zoneamento edafoclimático para o cenário atual e para o cenário futuro, os resultados obtidos para cada espécie foram analisados juntamente com a distribuição espacial das 14 unidades regionais do IEF (Figura 5). As unidades regionais do IEF são responsáveis pela coordenação e apoio técnico-administrativo de 75 viveiros florestais em Minas Gerais. Cada unidade regional atende seus respectivos municípios, atuando em projetos de extensão, fomento e recomposição florestal (IEF, 2018).

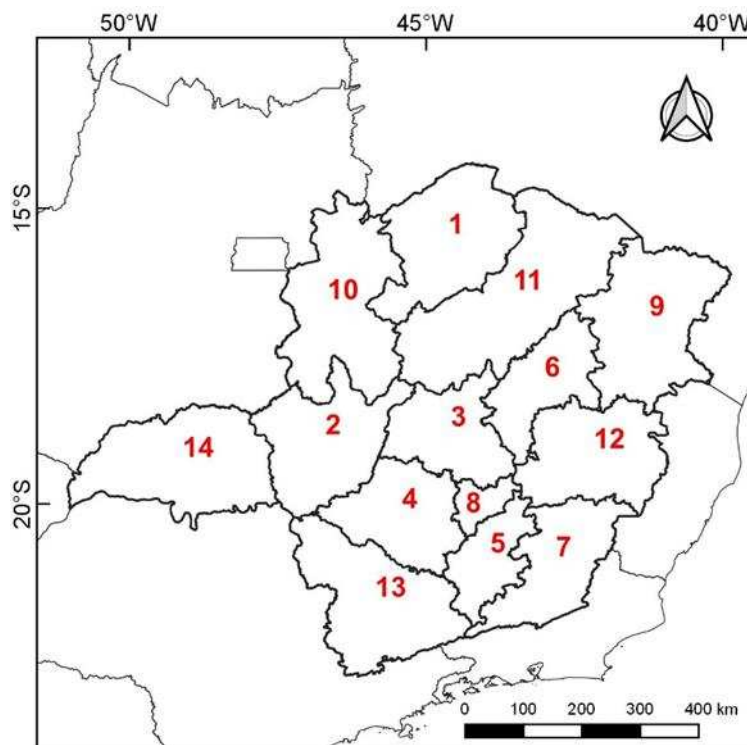


Figura 5 – Distribuição espacial das regionais do IEF. 1. Alto Médio São Francisco; 2. Alto Paranaíba; 3. Centro Norte; 4. Centro Oeste; 5. Centro Sul; 6. Jequitinhonha; 7. Mata; 8. Metropolitana; 9. Nordeste; 10. Noroeste; 11. Norte; 12. Rio Doce; 13. Sul; 14. Triângulo

Tendo em vista que as unidades regionais do IEF desempenham papel estratégico para subsidiar e estimular projetos de recomposição florestal em Minas Gerais, foram identificadas, com base nos mapas de zoneamento edafoclimático, as espécies mais adequadas para cada unidade regional, considerando o clima atual e clima futuro. Inicialmente, os mapas de zoneamento edafoclimático, padronizados na escala de 0 a 1, foram reclassificados em áreas mais favoráveis e menos favoráveis à sobrevivência de cada espécie, em função do grau de adequabilidade de cada local. As áreas cujo grau de adequabilidade estivesse entre 0,7 e 1 foram classificadas como mais favoráveis à sobrevivência da espécie e, portanto, denominadas de áreas preferenciais para o seu plantio. Já as demais áreas cujo grau de adequabilidade fosse menor que 0,7 foram classificadas como menos favoráveis à sobrevivência da espécie e definidas como áreas menos preferenciais para o seu plantio.

Após a etapa de reclassificação, os polígonos referentes as unidades regionais do IEF foram sobrepostos aos mapas de zoneamento edafoclimático de cada espécie de modo que foram identificadas todas as unidades regionais que apresentassem 70% ou mais de sua área classificada como mais favorável à

sobrevivência da espécie em questão. Dessa forma, foram descritas, para o cenário atual e para a projeção do clima futuro, quais unidades regionais apresentam condições climáticas preferenciais para o plantio de cada espécie selecionada.

## **2.7 Delimitação das áreas preferenciais para o plantio de cada espécie**

Considerando que as espécies selecionadas são perenes e sobrevivem durante décadas, é importante que durante a delimitação das áreas preferenciais para o plantio de cada espécie, fossem levadas em conta as alterações climáticas previstas para 2050. Dessa forma, os mapas de zoneamento edafoclimático referentes ao cenário histórico foram sobrepostos aos mapas de zoneamento edafoclimático referentes à projeção de 2021 a 2050, de modo que foram delimitadas as áreas em Minas Gerais que apresentam condições climáticas preferenciais para o plantio das espécies em ambos os cenários.

### 3. Resultados

#### 3.1 Capacidade de retenção de água dos solos de Minas Gerais

Na Figura 6 é apresentada a classificação dos solos de Minas Gerais em função da sua capacidade de retenção de água (CRA).

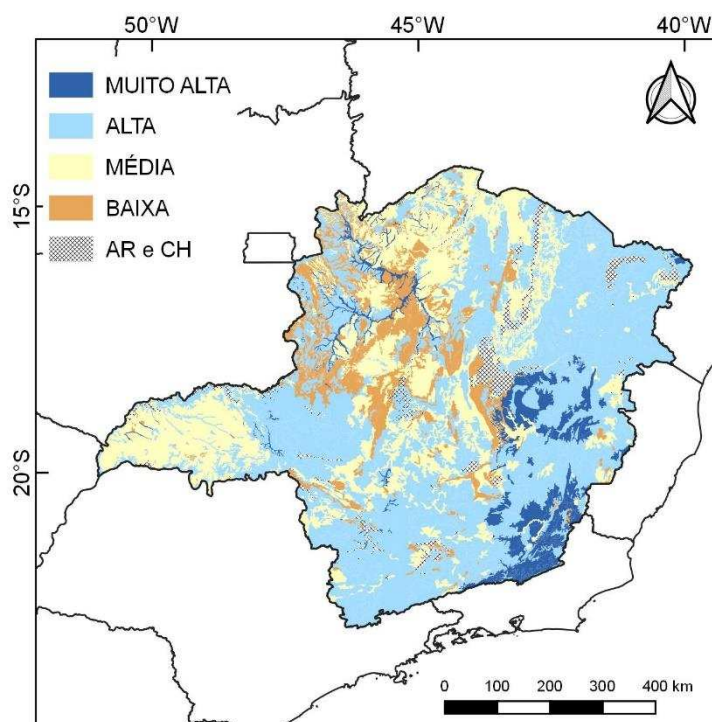


Figura 6 - Capacidade de retenção de água dos solos de Minas Gerais (adaptado de Sans et al, 2001). As áreas de afloramento de rocha (AR) e corpos hídricos (CH) foram eliminadas das análises

Do total de 586.528 km<sup>2</sup>, cerca de 3,6% corresponde a áreas ocupadas por afloramento de rocha e corpos hídricos. Dentre as quatro classes de capacidade de retenção de água, ocupando o equivalente a 6,6% do estado, a classe “muito alta” foi a menos predominante. A segunda classe menos representativa foi a classe “baixa,” representada pelos Neossolos Litólicos e as areias quartzosas (11,8%). Em contrapartida, a classe “média” obteve a segunda maior proporção (26%), seguida apenas pela classe “alta”, a qual, ocupando mais da metade do território mineiro (52%), foi a classe mais predominante. Os valores calculados de CAD para as quatro classes: baixa, média, alta e muito alta CRA foram, respectivamente, 140, 240, 260 e 280 mm.

### 3.2 Variáveis climáticas

Na Figura 7 são apresentados os mapas de cada variável proposta para o zoneamento, gerados a partir dos dados de Sheffield et al (2006), Xavier et al (2013) e da média de ambas as bases de dados, referentes a climatologia de 1981 a 2010.

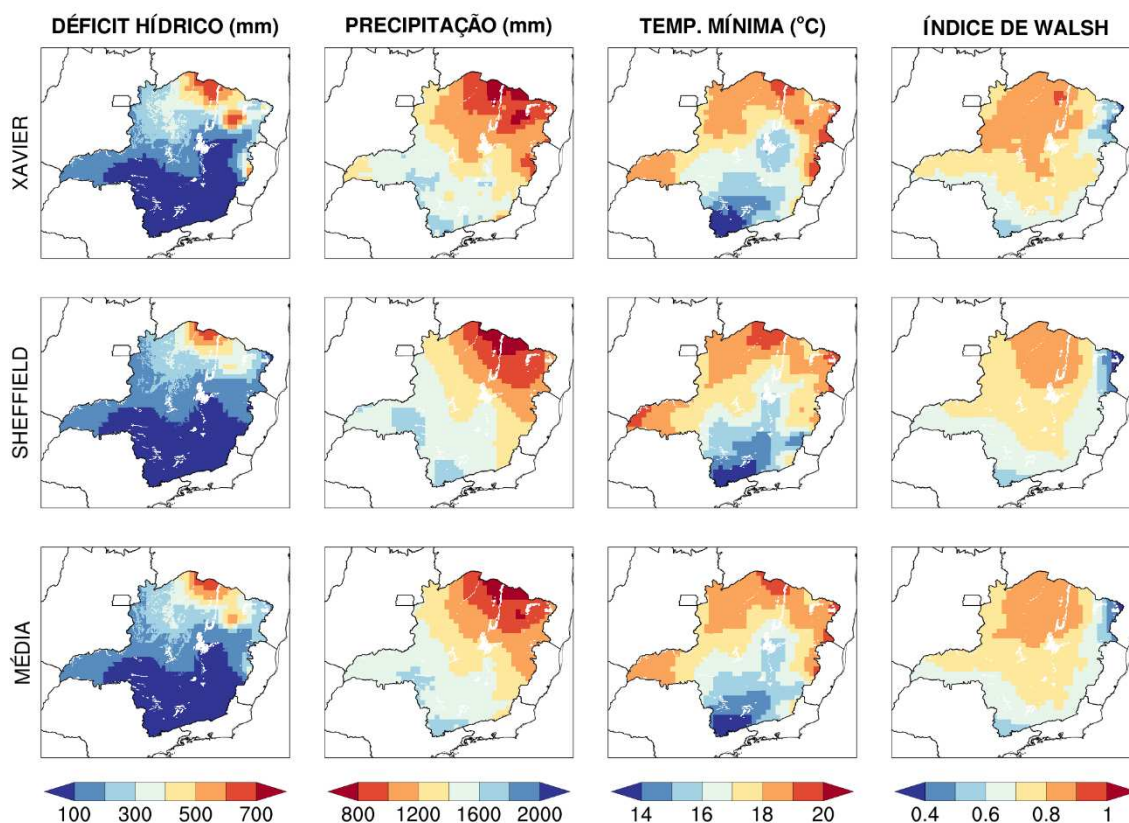


Figura 7 - Mapas de déficit hídrico acumulado anual, precipitação pluviométrica total anual, temperatura mínima média anual e índice de Walsh de Minas Gerais, referentes a climatologia de 1980 a 2010

A partir dos mapas gerados, verificou-se que a amplitude dos valores máximos e mínimos de temperatura mínima, precipitação pluviométrica, índice de Walsh e déficit hídrico variaram pouco entre as duas bases de dados utilizadas. No entanto, ao comparar os mapas provenientes de Sheffield et al (2006) com os mapas provenientes de Xavier et al (2013), observou-se notáveis diferenças em relação ao padrão de variação espacial dos dados.

De acordo com a caracterização do clima atual realizada com base na média de ambas as bases de dados, a temperatura mínima média anual de Minas Gerais varia de 13,3°C a 20,6°C. A precipitação total anual varia de 680 a 1860 mm e o déficit hídrico acumulado anual de 0 a cerca de 880 mm. O índice

de Walsh, o qual expressa a distribuição de chuvas ao longo do ano, varia de 0,29 (chuvas bem distribuídas, com estação chuvosa definida) a 0,87 (sazonal, com longa estação seca).

### 3.3 Distribuição geográfica das espécies

Na Figura 8 é apresentada a distribuição geográfica das espécies *Dipteryx alata*, *Schinus terebinthifolius*, *Joannesia princeps*, *Acrocomia aculeata* e *Myracrodruon urundeuva* no estado de Minas Gerais. O número total de pontos de ocorrência variou entre as cinco espécies. Foram encontrados 77 pontos de ocorrência para a *Joannesia princeps*, 116 para a *Dipteryx alata*, 181 para a *Schinus terebinthifolius*, 278 para a *Myracrodruon urundeuva* e 319 para a *Acrocomia aculeata*. Dentre as espécies selecionadas, todas apresentaram ocorrência nos biomas Cerrado e Mata Atlântica. Apenas as espécies *Schinus terebinthifolius*, *Acrocomia aculeata* e *Myracrodruon urundeuva* apresentaram ocorrência também no bioma Caatinga.

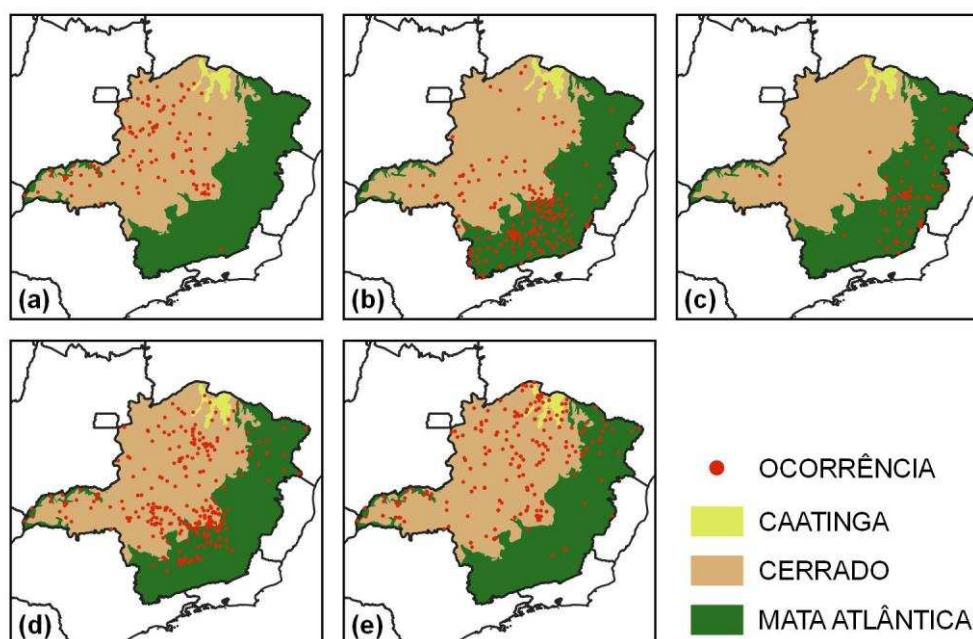


Figura 8 - Distribuição geográfica das espécies *Dipteryx alata* (a), *Schinus terebinthifolius* (b), *Joannesia princeps* (c), *Acrocomia aculeata* (d) e *Myracrodruon urundeuva* (e) no estado de Minas Gerais

Em relação a distribuição espacial dos pontos de ocorrência, as espécies apresentaram comportamentos diferentes. Enquanto algumas espécies como a

*Acrocomia aculeata* mostraram-se amplamente distribuídas em todo território do estado, outras apresentaram ocorrência predominante apenas em um bioma. A espécie *Joannesia princeps*, por exemplo, apesar de estar presente no Cerrado, mostrou-se ocorrer predominantemente no bioma Mata Atlântica. Já as espécies *Dipteryx alata* e *Myracrodruon urundeuva* mostraram-se ocupar predominantemente áreas do bioma Cerrado.

### 3.4 Exigências climáticas de cada espécie

Na Tabela 4 são apresentados os limites superior e inferior de temperatura mínima média anual, precipitação pluviométrica total anual, índice de Walsh (IW) e déficit hídrico acumulado anual estabelecidos para caracterizar as condições de máxima adequabilidade e mínima adequabilidade para cada espécie selecionada. Verificou-se que as exigências climáticas de cada espécie varia. Os resultados obtidos indicam que *Schinus terebinthifolious*, por exemplo, apresenta a maior tolerância às baixas temperaturas, enquanto que *Myracrodruon urundeuva* apresenta a maior tolerância à escassez hídrica.

Tabela 4– Condições climáticas de máxima adequabilidade e mínima adequabilidade para cada espécie selecionada. T.min equivale a temperatura mínima média anual, Prec equivale a precipitação pluviométrica total anual, I.W equivale ao índice de Walsh e D.H equivale ao déficit hídrico acumulado anual

Espécie	T.min (°C)	Prec (mm)	I.W	D.H (mm)
<i>D. alata</i>	16,8 -18,6*	1193 -1500*	0,74-0,83*	107 - 265*
	16,3- 19,0 <sup>+</sup>	1116-1577 <sup>+</sup>	0,72-0,85 <sup>+</sup>	67- 304 <sup>+</sup>
<i>S. terebinth.</i>	14,5 - 17,0*	1277 - 1606*	0,65 - 0,78*	0 - 157*
	13,9- 17,6 <sup>+</sup>	1195- 1688 <sup>+</sup>	0,61- 0,81 <sup>+</sup>	< 199 <sup>+</sup>
<i>J. princeps</i>	15,7 - 17,9*	1143 - 1452*	0,61 - 0,75*	20 -167*
	15,1- 18,4 <sup>+</sup>	1066- 1530 <sup>+</sup>	0,57- 0,78 <sup>+</sup>	0-203 <sup>+</sup>
<i>A. aculeata</i>	15,4-17,8*	1141-1565*	0,70- 0,83*	22-253*
	14,7- 18,4 <sup>+</sup>	1035- 1672 <sup>+</sup>	0,66- 0,86 <sup>+</sup>	0-311 <sup>+</sup>
<i>M. urundeuva</i>	16,5- 18,8*	940 -1443*	0,72- 0,86*	84-408*
	15,9- 19,3 <sup>+</sup>	815- 1569 <sup>+</sup>	0,68- 0,89 <sup>+</sup>	3- 489 <sup>+</sup>

\*Limites de máxima adequabilidade

<sup>+</sup>Limites de mínima adequabilidade

### 3.5 Clusterização e definição dos pesos de cada variável

O agrupamento dos dados por meio do algoritmo K-means apresentou resultados diferentes para cada variável. A Figura 9 apresenta a distribuição espacial dos pontos de ocorrência de cada espécie nos *clusters* das quatro variáveis propostas para o zoneamento.

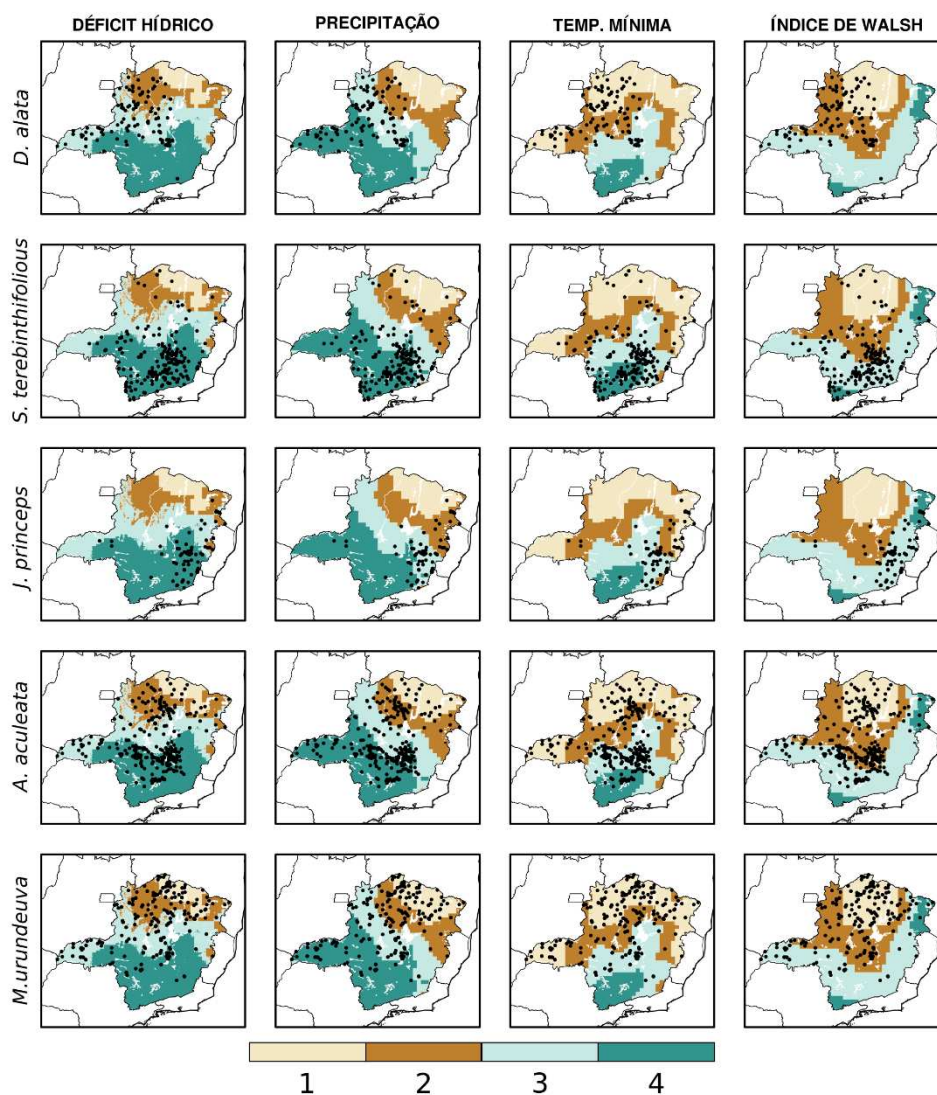


Figura 9 - Distribuição espacial das espécies *Dipteryx alata*, *Schinus terebinthifolios*, *Joannesia princeps*, *Acrocomia aculeata* e *Myracrodruon urundeuva* (pontos pretos) nos *clusters* de déficit hídrico acumulado anual, precipitação total anual, temperatura mínima média anual e índice de Walsh no estado de Minas Gerais, Brasil

Para o déficit hídrico acumulado anual (DH), o *cluster* 3 e o *cluster* 4 foram os mais representativos enquanto que os *clusters* 2 e 1 foram os menos representativos. Os *clusters* 3 e 4 ocuparam juntos cerca de 72% do estado e

representam as regiões de menor DH. As regiões pertencentes ao *cluster 3* apresentam DH variando de 101 a 240 mm e as regiões pertencentes ao *cluster 4* (39%) apresentam DH variando de 0 a 105 mm. Já o *cluster 2* (19%) e o *cluster 1* (9%) representam as regiões de maior escassez hídrica, onde o DH varia, respectivamente, de 220 a 398 mm e de 400 a 652 mm.

Para a precipitação total anual (P), o *cluster 4* também foi o mais representativo (39%) e corresponde as regiões de maior P, onde os valores variam entre 1424 a 1762 mm. Em seguida, ocupando respectivamente 26% e 20% do estado, o *cluster 2* e o *cluster 3* representam as regiões onde a P varia de 957 a 1196 mm e de 1198 a 1421 mm. Por último, ocupando apenas 15%, o *cluster 1* representa as regiões mais secas, onde a P varia de 690 a 967 mm.

Em relação a temperatura mínima média anual (T), a maior parte do estado foi representada pelo *cluster 1* (38%), onde a T varia de 17,8 a 19,7°C. Os *clusters 2* (26%) e *3* (25%) representam, respectivamente, as regiões onde a T varia de 16,6 a 17,9°C e de 15,1 a 16,3°C. Dentre os quatro *clusters*, o menos representativo foi a *cluster 4* (10%), o qual representa as regiões mais frias, onde a T varia de 12,2 a 15,1°C.

Por fim, para o IW, o *cluster 3* obteve a maior proporção (41%) e representa regiões onde o clima é sazonal, caracterizado por uma estação seca e uma estação chuvosa bem definida, onde os valores de IW variam de 0,61 a 0,73. Os *clusters 2* (33%) e *1* (20%), bem como o *cluster 3*, representam regiões também de clima sazonal, porém com chuvas ainda mais concentradas em um determinado período do ano (0,73 a 0,81) e (0,81 a 0,89). Já o *cluster 4* (6%) representa as regiões onde as chuvas são bem distribuídas (0,26 a 0,60).

A Tabela 5 apresenta, para as cinco espécies, os valores de RMSE e os pesos atribuídos a cada variável. Com exceção da *Acrocomia aculeata*, para todas as espécies a distribuição de chuvas ao longo do ano (IW) obteve o maior peso. A segunda variável de maior peso foi o DH. Em seguida, para três das cinco espécies selecionadas, o terceiro maior peso foi atribuído a P, o qual obteve pouca variação entre as espécies. A T foi a variável de menor peso para *Dipteryx alata* e *Myracrodruon urundeuva* e obteve o maior peso para a espécie *Acrocomia aculeata*.

Tabela 5—Raiz do erro quadrático médio (RMSE) obtida para cada variável em função da distribuição espacial de cada espécie

Espécie	RMSE			
	T.min (°C)	Prec (mm)	I.W	D.H (mm)
<i>D. alata</i>	12,35 0,18 <sup>W</sup>	15,53 0,22 <sup>W</sup>	21,36 0,31 <sup>W</sup>	19,99 0,29 <sup>W</sup>
<i>S. terebinthifolious</i>	40,6 0,19 <sup>W</sup>	42,5 0,19 <sup>W</sup>	82,1 0,37 <sup>W</sup>	53,9 0,25 <sup>W</sup>
<i>J. princeps</i>	12,9 0,23 <sup>W</sup>	13,0 0,23 <sup>W</sup>	15,1 0,27 <sup>W</sup>	15,5 0,27 <sup>W</sup>
<i>A. aculeata</i>	51,0 0,37 <sup>W</sup>	30,8 0,22 <sup>W</sup>	21,8 0,16 <sup>W</sup>	35,5 0,25 <sup>W</sup>
<i>M. urundeuva</i>	26,5 0,20 <sup>W</sup>	30,4 0,23 <sup>W</sup>	43,0 0,32 <sup>W</sup>	33,2 0,25 <sup>W</sup>

<sup>W</sup>Pesos atribuídos a cada variável

### 3.6 Zonas de máxima e mínima adequabilidade para cada espécie

Na Figura 10 são apresentados os mapas de zoneamento edafoclimático das cinco espécies selecionadas. Nos mapas, a cor verde-escura representa as regiões onde as condições climáticas apresentam máxima adequabilidade (1) para a espécie e a cor vermelha representa as regiões de mínima adequabilidade (0).

Conforme ilustram os mapas, a proporção de áreas classificadas como máxima adequabilidade e mínima adequabilidade variaram entre as espécies. Para a maioria das espécies selecionadas, as áreas de menor adequabilidade concentraram-se no extremo sul ou no extremo norte do estado. As regiões consideradas preferenciais para o plantio de *Dipteryx alata* totalizaram 26% da área total de Minas Gerais e estão localizadas predominantemente na porção centro-oeste. Para as espécies *Schinus terebinthifolious* e *Joannesia princeps*, tais regiões ocuparam, respectivamente, 48% e 38%. Já para *Acrocomia aculeata* e para *Myracrodruon urundeuva*, as regiões preferenciais para o plantio de ambas espécies foi equivalente a mais da metade do território do estado, cerca de 51%.

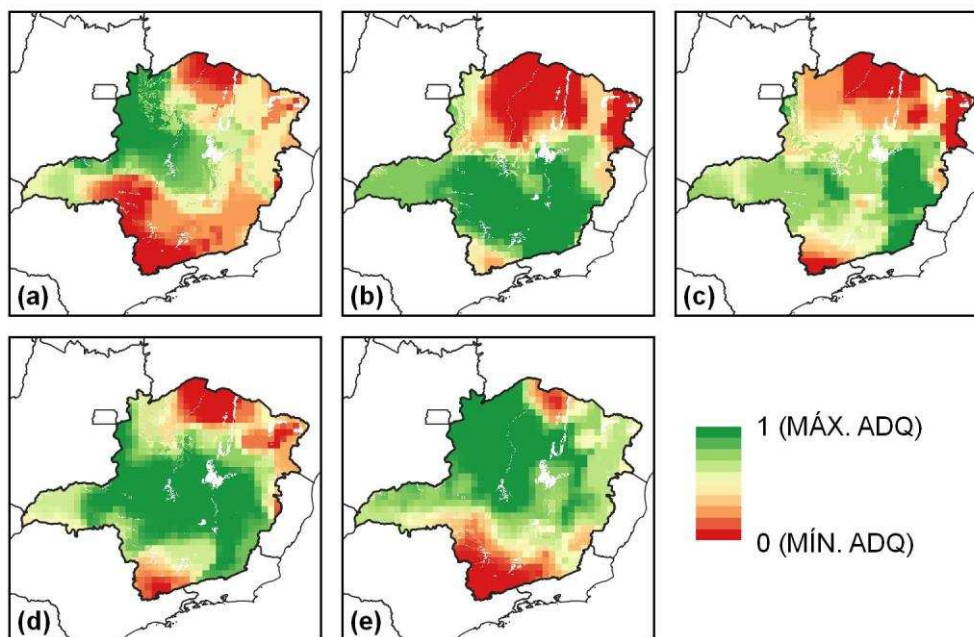


Figura 10 - Zoneamento edafoclimático para as espécies (a) *Dipteryx alata*, (b) *Schinus terebinthifolios*, (c) *Joannesia princeps*, (d) *Acrocomia aculeata* e (e) *Myracrodruon urundeuva* no estado de Minas Gerais, Brasil. MÁX. ADQ = Máxima adequabilidade. MÍN. ADQ = Mínima adequabilidade

### 3.7 Projeção do clima futuro (2021 a 2050) considerando o cenário RCP8.5

Na Figura 11 são apresentadas as projeções futuras para as quatro variáveis climáticas utilizadas no zoneamento, geradas a partir do *downscaling* estatístico dos dados de temperatura e precipitação pluviométrica provenientes dos modelos MRI-CGCM3, CNRM-CM5 e da média de ambos os modelos, referentes a climatologia de 2021 a 2050. Nos mapas, nota-se que os resultados obtidos em cada modelo foram diferentes, apesar de ambos apresentarem semelhanças no padrão de variação espacial dos dados. Dentre as variáveis utilizadas, o IW apresentou o maior contraste entre os modelos e a T apresentou a maior conformidade.

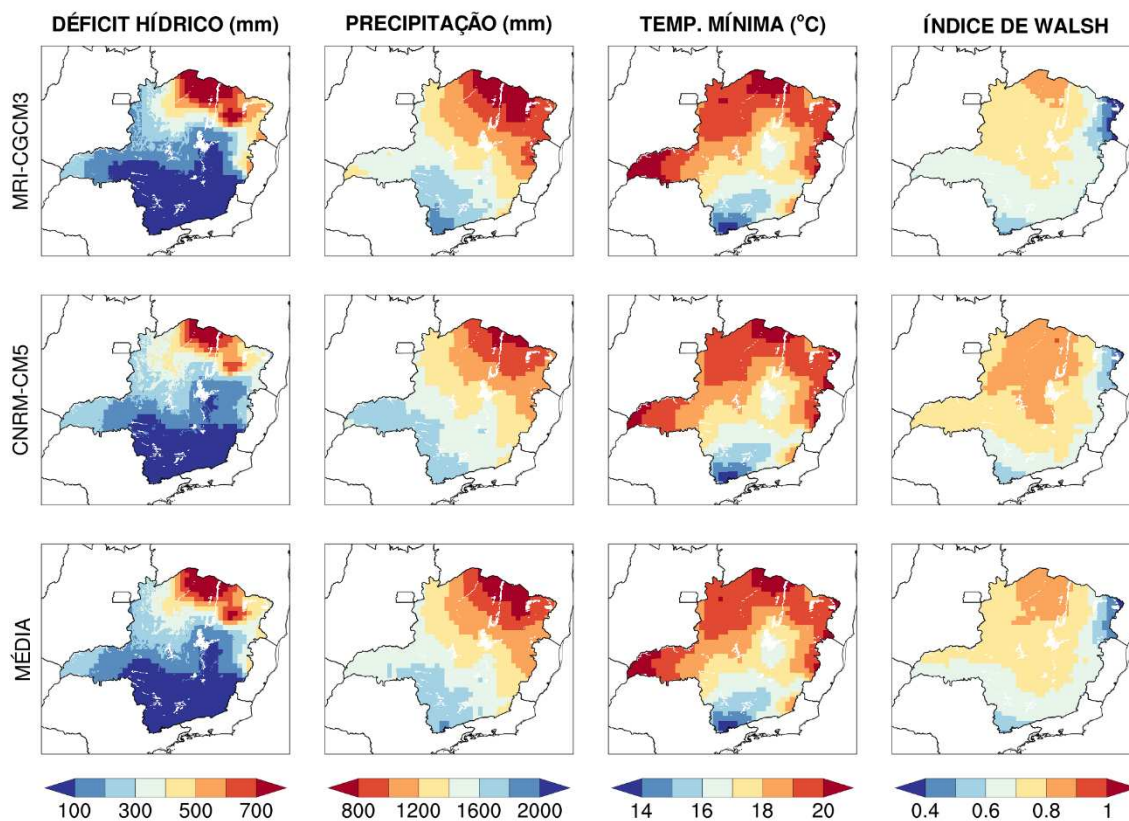


Figura 11 - Projeções futuras de déficit hídrico acumulado anual (DH), precipitação pluviométrica total anual (P), temperatura mínima média anual (T) e índice de Walsh (IW) considerando o cenário RCP8.5, para o estado de Minas Gerais, Brasil

De acordo com a média dos modelos MRI-CGCM3 e CNRM-CM5, até 2050, estão previstas alterações para as quatro variáveis climáticas em Minas Gerais. Na região norte, o DH, por exemplo, irá aumentar em até 240 mm. Para a P, verificou-se que nas regiões sul, sudoeste e do triângulo mineiro o volume total de chuvas no ano irá aumentar de 40 a 120 mm, enquanto que nas demais regiões irá diminuir em até 40 mm. O maior decréscimo nos volumes de P irá ocorrer nas regiões norte e nordeste do estado. Em relação a T, todas as regiões ficarão mais quentes. Os maiores aumentos de T estão previstos para a região noroeste e oeste de Minas Gerais, onde a T irá aumentar em até 1,5°C. Dentre as quatro variáveis, o IW apresentou as menores alterações. Na região norte e nordeste do estado os valores de IW irão diminuir em até 0,03, indicando que a distribuição de chuvas ficará um pouco mais homogênea nessas regiões. Na Figura 12 são apresentadas as anomalias climáticas projetadas para 2050, referentes a cada variável utilizada no zoneamento.

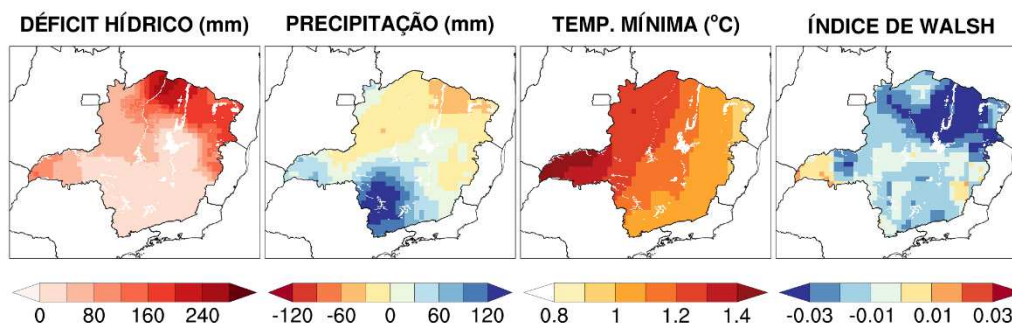


Figura 12 - Anomalias climáticas de déficit hídrico acumulado anual (mm), precipitação pluviométrica total anual (mm), temperatura mínima média anual (°C) e índice de Walsh, projetadas para 2050 para o estado de Minas Gerais, Brasil

### 3.8 Zoneamento frente ao cenário de mudanças climáticas RCP8.5

Na Figura 13 são apresentados os mapas de zoneamento edafoclimático das cinco espécies selecionadas considerando o cenário RCP8.5 do IPCC. De acordo com as projeções futuras, para todas as espécies haverá redução das áreas consideradas preferenciais para o seu plantio. A espécie mais afetada será a *Acrocomia aculeata* cuja as áreas preferenciais para o seu plantio irão diminuir em até 19%. A segunda espécie mais afetada será a *Schinus terebinthifolious*, cuja redução dessas áreas será em torno de 14%. Em seguida, para a *Myracrodruon urundeuva* haverá uma redução de 10%. As menores alterações estão previstas para as espécies *Dipteryx alata* e *Joannesia princeps* de modo que as áreas preferenciais para o seu plantio irão reduzir cerca de 5%.

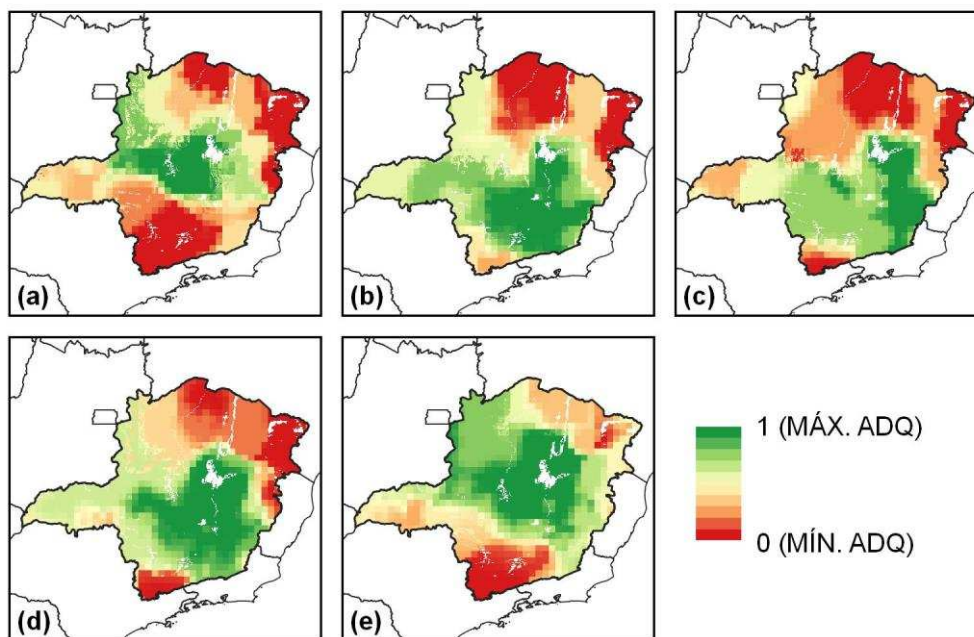


Figura 13 - Zoneamento edafoclimático para as espécies (a) *Dipteryx alata*, (b) *Schinus terebinthifoliosus*, (c) *Joannesia princeps*, (d) *Acrocomia aculeata* e (e) *Myracrodruon urundeuva* no estado de Minas Gerais, Brasil, considerando o cenário RCP8.5. MÁX. ADQ = Máxima adequabilidade. MÍN. ADQ = Mínima adequabilidade

### 3.9 Unidades regionais do IEF mais adequadas para cada espécie

Na Tabela 6 são apresentadas, para o cenário atual e para o cenário futuro, as unidades regionais do IEF preferenciais para a produção de mudas de cada espécie selecionada. Nota-se que para ambos os cenários, atual e futuro, o número de unidades regionais preferenciais para a produção de mudas das espécies variou significativamente. A espécie com o menor número de unidades regionais consideradas preferenciais para a produção de mudas foi a *Dipteryx alata* (2), seguida pela espécie *Joannesia princeps* (5). As espécies *Schinus terebinthifoliosus*, *Acrocomia aculeata* e *Myracrodruon urundeuva* apresentaram o maior número de unidades regionais preferenciais para a produção de mudas (7). Dentre as 14 unidades regionais, a regional 3 (Centro Norte) foi a única considerada preferencial para a produção de mudas das cinco espécies selecionadas.

Tabela 6 – Unidades regionais do IEF preferenciais para o plantio das espécies *Dipteryx alata*, *Schinus terebinthifolious*, *Joannesia princeps*, *Acrocomia aculeata* e *Myracrodruon urundeuva*, considerando o clima atual e considerando a projeção de 2021 a 2050 de acordo com o cenário RCP8.5

Espécie	UNIDADE REGIONAL DO IEF	
	Clima Atual	Clima Futuro
<i>D. alata</i>	3, 10	3
<i>S. terebinthifolious</i>	2, 3, 4, 5, 7, 8, 14	4, 5, 7, 8
<i>J. princeps</i>	2, 3, 4, 7, 12	4, 5, 7
<i>A. aculeata</i>	2, 3, 4, 6, 7, 8, 12	3, 4, 5, 6, 7, 8
<i>M. urundeuva</i>	1, 2, 3, 6, 10, 11, 12	3, 6, 8, 10

Em relação às alterações decorrentes do cenário de mudanças climáticas RCP8.5, para todas as espécies está prevista uma redução no número de unidades regionais consideradas preferenciais para o seu plantio. A maior alteração está prevista para a regional 2 (Alto Paranaíba), a qual deixará de ser preferencial para a produção de mudas das espécies *Schinus terebinthifolious*, *Joannesia princeps*, *Acrocomia aculeata* e *Myracrodruon urundeuva*. Em contraste a regional 2, a regional 5 se tornará preferencial para a produção de mudas de *Acrocomia aculeata*.

### 3.10 Áreas preferenciais para o plantio de cada espécie considerando o cenário histórico e projeção

Na figura 14 são apresentados os mapas referentes a localização geográfica das áreas em Minas Gerais cujas condições climáticas são preferenciais para o plantio das espécies *Dipteryx alata*, *Schinus terebinthifolious*, *Joannesia princeps*, *Acrocomia aculeata* e *Myracrodruon urundeuva*, considerando ambos cenários utilizados: histórico e projeção. Nota-se que a proporção dessas áreas variou entre as cinco espécies selecionadas. A espécie *Dipteryx alata* obteve a menor proporção (16%), enquanto que as espécies *Joannesia princeps* e *Acrocomia aculeata* obtiveram, respectivamente, 23% e 28%. A maior proporção foi obtida pelas espécies *Schinus terebinthifolious* e *Myracrodruon urundeuva*,

cerca de 33% do território do estado.

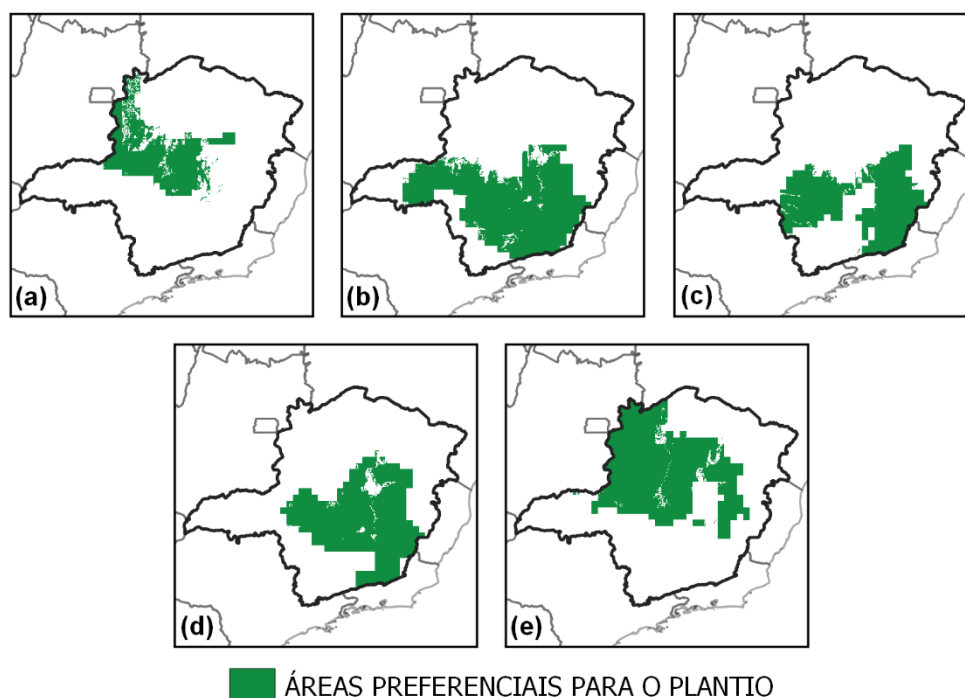


Figura 14 – Delimitação das áreas em Minas Gerais consideradas preferenciais para o plantio das espécies (a) *Dipteryx alata*, (b) *Schinus terebinthifolius*, (c) *Joannesia princeps*, (d) *Acrocomia aculeata* e (e) *Myracrodruon urundeuva*

As figuras 15 a 19 apresentam a localização das áreas preferenciais para o plantio de cada espécie, considerando cenário histórico e projeção, sobrepostas às 14 unidades regionais do IEF de Minas Gerais.

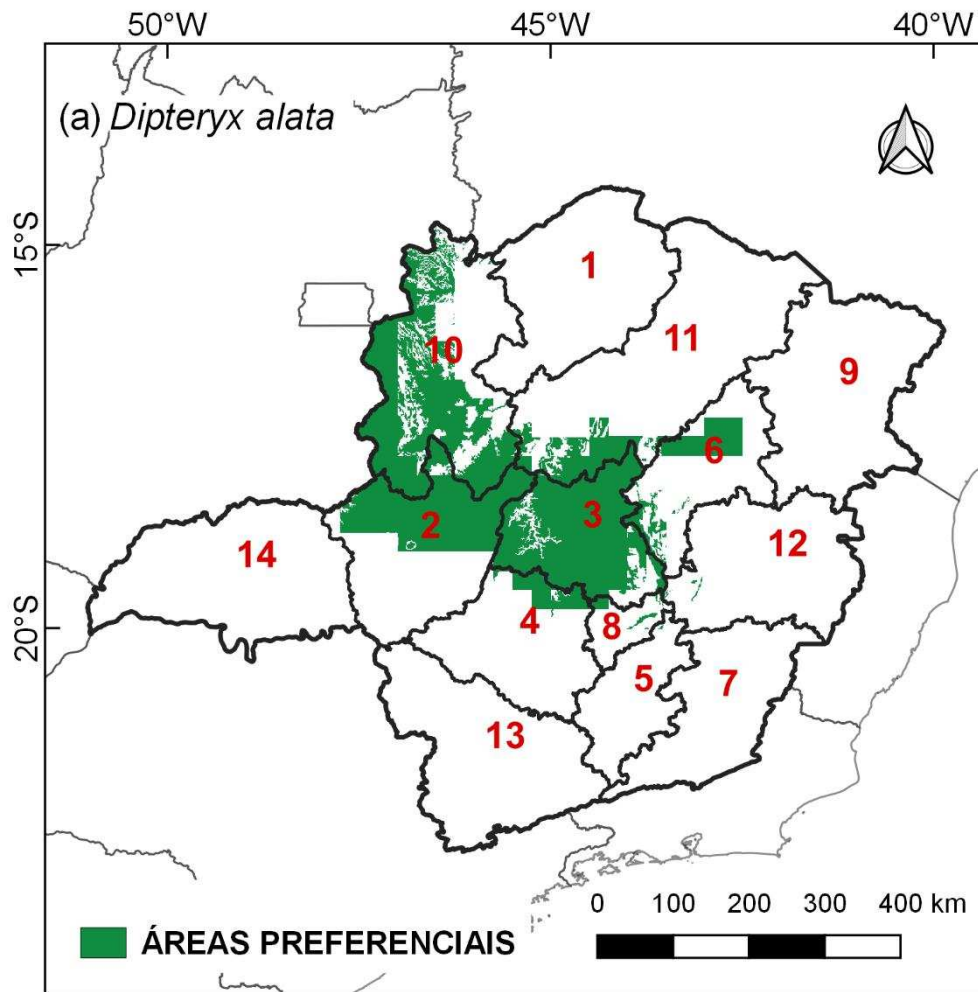


Figura 15 – Localização das áreas preferenciais para o plantio da espécie *Dipteryx alata* no mapa das 14 unidades regionais do IEF de Minas Gerais.

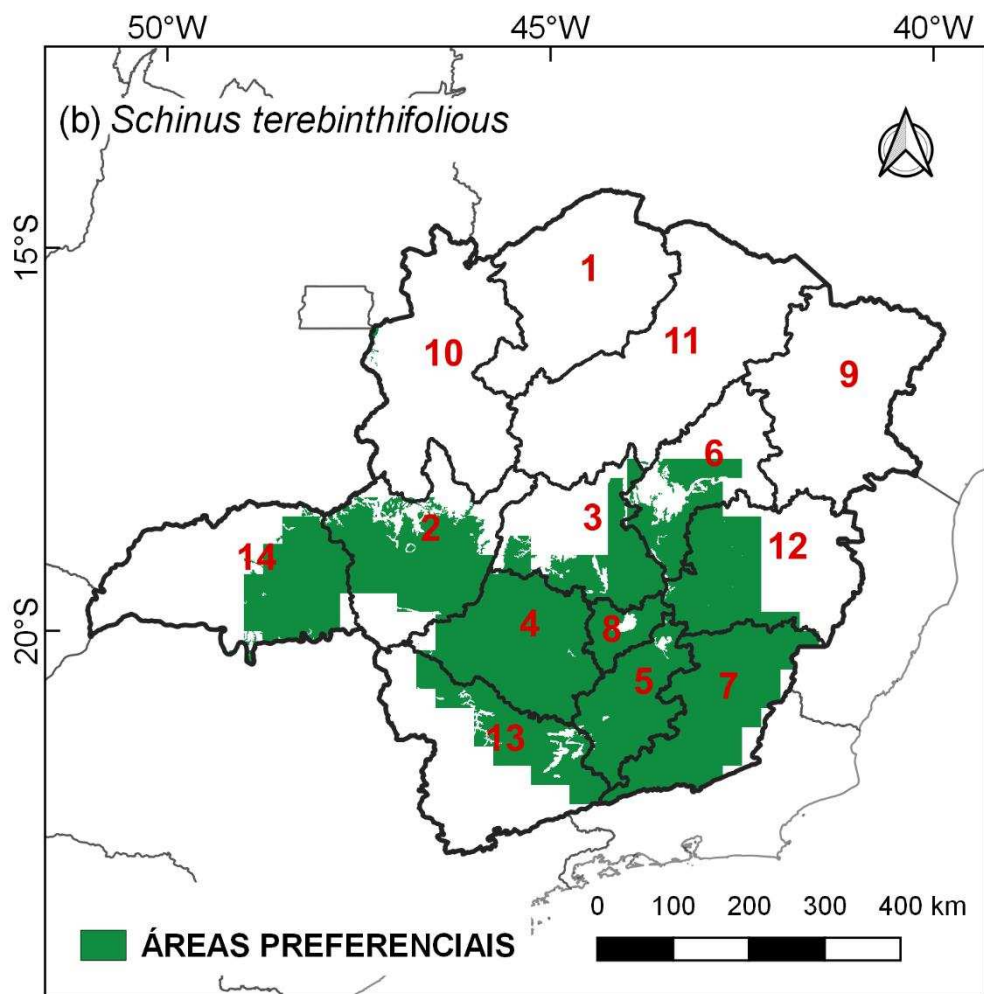


Figura 16 - Localização das áreas preferenciais para o plantio da espécie *Schinus terebinthifolius* no mapa das 14 unidades regionais do IEF de Minas Gerais.

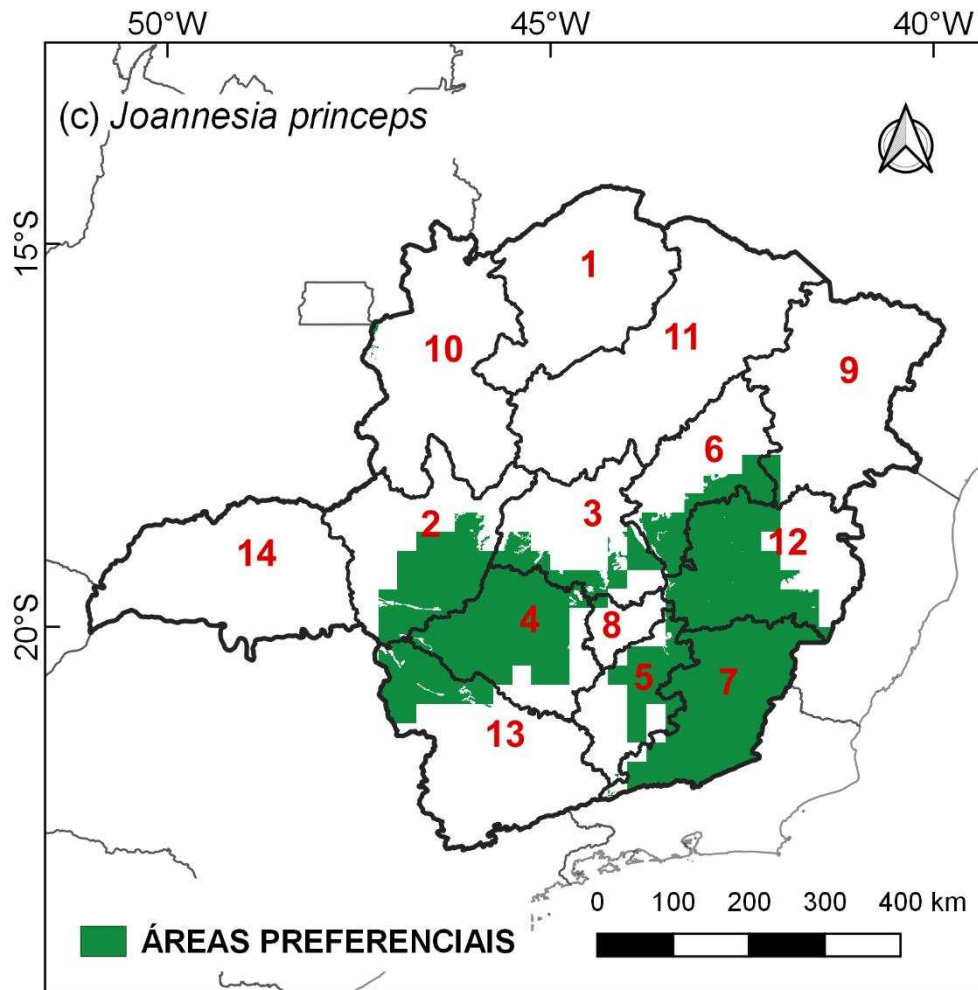


Figura 17 - Localização das áreas preferenciais para o plantio da espécie *Joannesia princeps* alata no mapa das 14 unidades regionais do IEF de Minas Gerais.

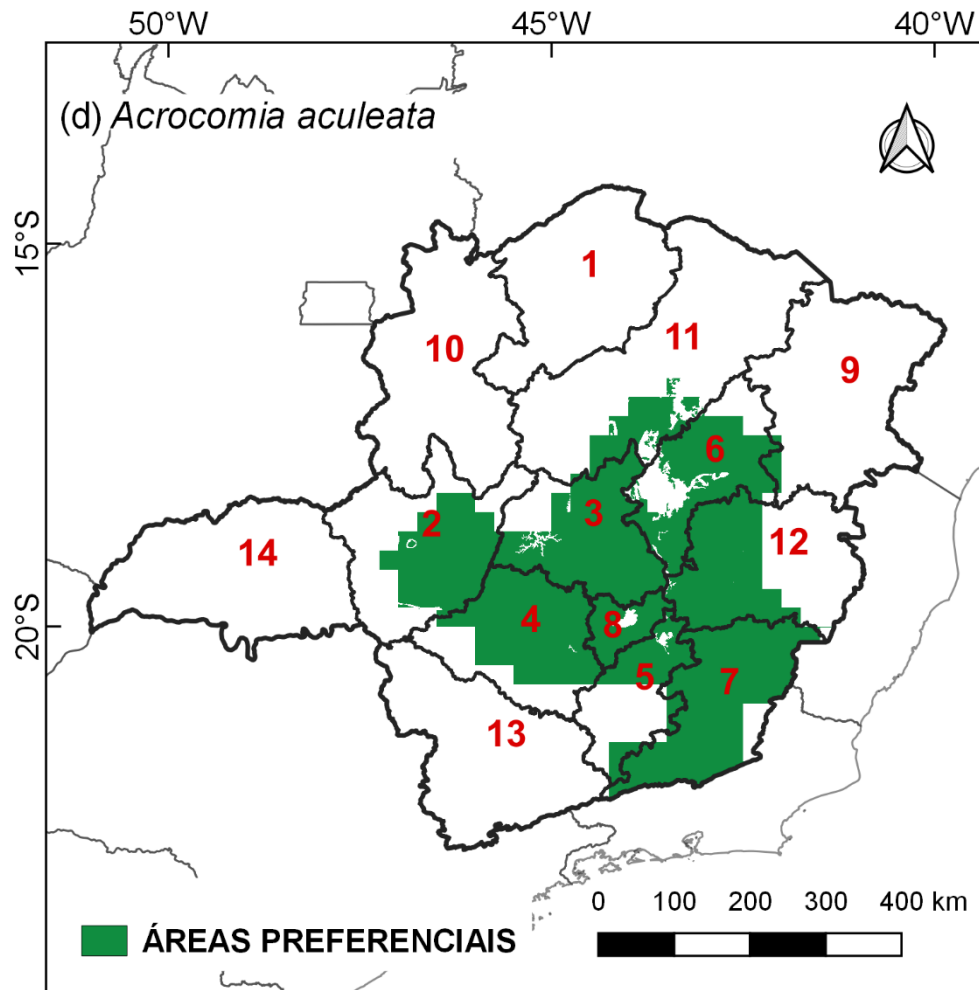


Figura 18 - Localização das áreas preferenciais para o plantio da espécie *Acrocomia aculeata* no mapa das 14 unidades regionais do IEF de Minas Gerais.

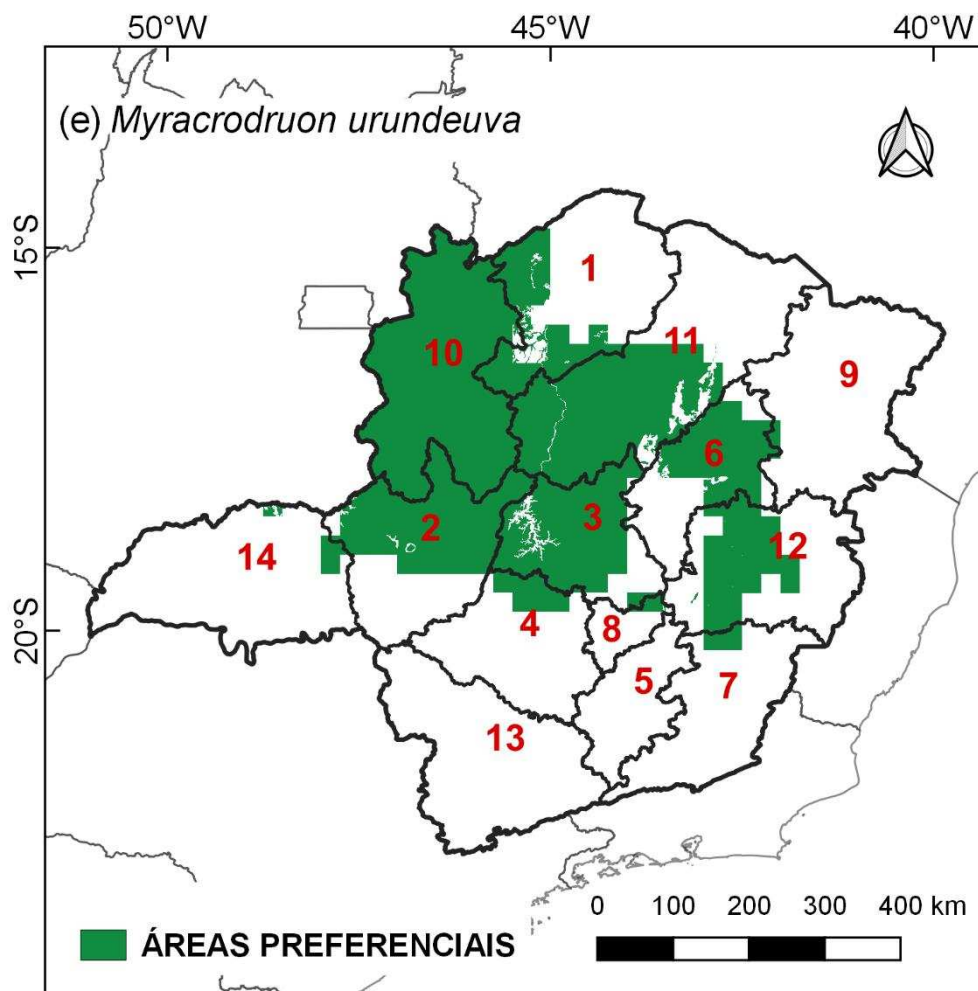


Figura 19 - Localização das áreas preferenciais para o plantio da espécie *Myracrodruon urundeuva* no mapa das 14 unidades regionais do IEF de Minas Gerais

#### 4. Discussão

Embora o objetivo geral deste estudo seja a elaboração dos mapas de zoneamento edafoclimático, a organização da base de dados necessária para a realização do zoneamento também apresentou importantes resultados a serem discutidos. A classificação dos solos de Minas Gerais em função da CRA demonstrou que mais da metade do estado apresenta solos de alta CRA. A predominância da classe alta está relacionada principalmente à maior proporção de Latossolos e Cambissolos de textura argilosa, os quais encontram-se amplamente distribuídos ao longo do território mineiro. Durante períodos de baixa precipitação pluviométrica, solos de alta CRA possibilitam maior quantidade de água disponível para as plantas. Em regiões ocupadas por formações de Cerrado, por exemplo, o teor de água do solo reflete diretamente na estrutura da vegetação (Pinheiro e Monteiro, 2006). Sabe-se que, na escala regional, o clima atua como um dos principais determinantes da fisionomia e composição florística das comunidades vegetais (Arruda et al, 2013). Porém, na escala local, tais variações estão intimamente relacionadas às propriedades físico-químicas do solo (Hawkins et al, 2003).

Os valores de CAD obtidos para as quatro classes de CRA variaram de 140 a 280 mm. Pereira et al. (2002) encontraram resultados similares e sugerem que, para espécies florestais, a CAD varia de 150 a 300 mm. Nos mapas de DH, nota-se que em algumas regiões, quanto maior a CAD, menor é o DH. Na porção noroeste de Minas Gerais, por exemplo, as regiões ocupadas por Neossolos Quartzarênicos, cuja CAD calculada foi de 140 mm, apresentaram valores de DH consideravelmente maiores que as regiões ocupadas por Latossolos ou Cambissolos de textura média, cuja CAD calculada foi de 240 mm. Em contrapartida, no extremo norte do estado, devido as condições de baixa precipitação pluviométrica e elevada temperatura, tal relação não foi tão evidente de modo que, para solos com diferentes valores de CAD, o DH foi o mesmo. Como nessa região, as chuvas concentram-se em um curto período do ano e os valores de precipitação dificilmente atingem os valores de CAD do solo, outros fatores como a cobertura vegetal e a topografia acabam exercendo mais influência no teor de água do solo que a própria CAD (Gómez-Plaza et al, 2000).

Em relação à distribuição de chuvas em Minas Gerais expressa pelo índice de Walsh, verificou-se que, com exceção de alguns locais na região nordeste e no extremo sul, todas as regiões do estado apresentam clima sazonal, caracterizado por uma estação seca e uma estação chuvosa. A sazonalidade da precipitação em Minas Gerais está associada, principalmente, à atuação do Sistema de Monção Sul Americana (SMSA) que resulta em altos índices pluviométricos no verão e baixos no inverno (Reboita et al., 2010). No verão, o aumento da atividade convectiva local somado ao transporte de umidade da Amazônia e do oceano Atlântico para a região sudeste contribui para a ocorrência de chuvas em quase todo território do estado. Já no inverno, como a convecção local enfraquece e não há SMSA, a ocorrência de chuvas diminui (Marengo et al., 2012).

De acordo com o mapa de índice de Walsh, chuvas bem distribuídas nem sempre estão associadas à elevados índices pluviométricos. Na região leste, por exemplo, os menores valores de índice de Walsh foram encontrados em locais onde a precipitação total anual é inferior a 1000 mm. Nesses locais, a distribuição de chuvas ao longo do ano mostrou-se mais homogênea que na região oeste de Minas Gerais, onde a precipitação total anual ultrapassa 1500 mm. Os menores valores de índice de Walsh na região leste de Minas Gerais pode estar associado a maior proximidade com o oceano Atlântico, de modo que os ventos úmidos vindos do litoral do Rio de Janeiro e do Espírito Santo favorecem a ocorrência de chuvas e contribuem para o aumento da estação chuvosa nessa região (Mello e Viola, 2012). Segundo Neto (2005), após ultrapassar o imenso paredão formado pela serra do mar, os ventos vindos do oceano atlântico perdem umidade gradativamente na direção leste/oeste em função da continentalidade e rugosidade do relevo.

Ao estudar a influência do clima nos padrões de diferenciação florística da Mata Atlântica, Oliveira-Filho e Fontes (2000) também identificaram, na região sudeste do Brasil, uma correlação positiva entre a duração da estação seca e a distância com o oceano. Nesse mesmo estudo, ambos autores ressaltam que a ocorrência dos ecossistemas da Mata Atlântica está mais associada à sazonalidade das chuvas que a precipitação total anual. No mapa de índice de Walsh, essa relação também foi observada de modo que, em Minas Gerais, a localização do domínio da Mata Atlântica coincide exatamente com as áreas onde a

distribuição de chuvas é mais homogênea. A medida que a sazonalidade aumenta, ocorre a transição para o domínio do Cerrado. Oliveira-Filho e Fontes (2000) ainda constataram que a maior similaridade florística entre a Mata Atlântica e o Cerrado ocorre, predominantemente, em regiões onde a duração da estação seca é maior que 160 dias.

A sazonalidade da precipitação expressa pelo índice de Walsh, assim como as demais variáveis climáticas, não só influencia nos tipos de vegetação presentes em cada bioma como também exerce grande influência nos padrões de distribuição geográfica das espécies (Pearson e Dawson, 2003). Ao comparar os mapas referentes a distribuição geográfica de cada espécie selecionada, observou-se que a *Acrocomia aculeata* e a *Myracrodruon urundeuva* possuem o maior número de registros de ocorrência em Minas Gerais. Além disso, seus pontos de ocorrência encontram-se distribuídos por quase todo território do estado o que evidencia, possivelmente, uma maior tolerância dessas espécies diante das variações climáticas. A espécie *Myracrodruon urundeuva*, por exemplo, apresentou a maior tolerância ao déficit hídrico acumulado anual enquanto que a espécie *Schinus terebinthifolius*, por ocorrer de forma predominante na região sul e sudeste, apresentou a maior limitação em relação a essa variável. Segundo Esquivel-Muelbert et al. (2017), a distribuição de uma determinada espécie ao longo de um gradiente climático de umidade pode ser um forte indicador da sua vulnerabilidade ou tolerância à seca.

É importante destacar que, em escala regional, o número de pontos de ocorrência de uma espécie nem sempre está relacionado apenas à fatores físicos, como solo e clima. Outros fatores como interações bióticas e a perda de habitat causada por atividades humanas também influenciam diretamente na distribuição geográfica de espécies florestais (Phillips et al, 2006; Araújo e Luoto, 2007). Dessa forma, a ocorrência mais restrita apresentada por espécies típicas da Mata Atlântica, como por exemplo a *Joannesia princeps*, pode estar, supostamente, associada à grande perda e fragmentação da cobertura vegetal deste bioma em Minas Gerais. Nesse contexto, apesar dos dados de ocorrência serem essenciais na caracterização do comportamento ecofisiológico de espécies nativas, dificilmente são suficientes para identificar todas as condições ambientais em que elas sobrevivem na natureza, o que corresponde, eventualmente, a uma limitação deste tipo de estudo (Phillips et al, 2006).

Ainda que existam limitações, os dados de ocorrência provenientes de inventários e de herbários virtuais apresentam inúmeras aplicações na modelagem da distribuição e sobrevivência de espécies florestais (Graham et al, 2008). Ao plotar os pontos de ocorrência das espécies selecionadas nos dados climáticos agrupados (*clusterizados*), foi possível verificar, por exemplo, quais variáveis climáticas, aparentemente são mais restritivas ao desenvolvimento de cada espécie. Com base na distribuição espacial da *Joannesia princeps* nos agrupamentos (*clusters*) de déficit hídrico acumulado anual e índice de Walsh, nota-se que, para ambas as variáveis, seus pontos de ocorrência concentram-se em um único *cluster*, o que sugere que o déficit hídrico acumulado anual e a sazonalidade da precipitação sejam fatores mais limitantes para a sua sobrevivência.

A partir dos valores obtidos de RMSE, verificou-se que, com exceção da *Acrocomia aculeata*, para todas as espécies, o déficit hídrico acumulado anual e o índice de Walsh foram as variáveis de maior peso. Esquivel-Muelbert et al. (2017), estudando os efeitos da escassez hídrica em ecossistemas florestais, sugerem que, em regiões tropicais, a disponibilidade de água, particularmente a intensidade e duração da estação seca, representa um dos fatores mais limitantes à sobrevivência de espécies arbóreas. Além de estar associada a escassez hídrica, a duração da estação seca também influencia em processos fenológicos importantes para a reprodução e consequente estabelecimento da espécie em um dado ambiente, como florescimento e frutificação (Morellato et al, 2000). Southwick e Davenport (1986) constataram que longos períodos de estresse hídrico podem induzir picos de floração em espécies frutíferas como a *Citrus latifolia* Tan. Dessa forma, como a *Dipteryx alata* ocorre predominantemente em regiões de estação seca prolongada, o maior peso da variável índice de Walsh pode, neste caso, estar relacionado à maior influência da sazonalidade da precipitação no seu ciclo reprodutivo.

Diferente de *Dipteryx alata*, para a *Acrocomia aculeata*, o maior peso foi atribuído à variável temperatura mínima média anual. Segundo Goldel et al (2015), a temperatura atua com um dos principais fatores reguladores da distribuição geográfica de palmáceas no globo terrestre. Ao plotar os pontos de ocorrência da *Acrocomia aculeata* nos agrupamentos (*clusters*) de temperatura mínima média anual, observou-se que, apesar da sua ampla distribuição em Minas Gerais, houve menor número de registros de sua ocorrência no *cluster* 4, o que

indica que, nessas regiões, as baixas temperaturas e a incidência de geadas podem ser fatores limitantes à sua sobrevivência (Oliveira et al., 2018). Falasca et al (2017) enfatiza que a *Acrocomia aculeata* não deve ser cultivada em regiões cuja temperatura mínima média anual é inferior a 14°C.

Ao comparar os mapas de zoneamento edafoclimático de cada espécie selecionada, verificou-se que a *Schinus terebinthifolios* foi a espécie mais tolerante as condições de baixas temperaturas, o que condiz com os resultados obtidos por Rorato et al. (2017), que demonstram que essa espécie apresenta alta resiliência a ocorrência de geadas. Na região sul de Minas Gerais, o plantio de espécies não tolerantes a geada pode acarretar em prejuízos econômicos significativos. Portanto, nessa região, para que se tenha êxito nos plantios, deve-se priorizar por espécies que sejam tolerantes a esse tipo de condição.

Nos mapas de zoneamento edafoclimático, verificou-se que, para a maioria das espécies, as áreas de menor adequabilidade concentram-se no extremo norte ou no extremo sul do estado. A menor adequabilidade dessas regiões pode estar relacionada às condições adversas de escassez hídrica e de temperatura. No extremo norte, por exemplo, estão presentes as regiões mais secas de Minas Gerais enquanto que no extremo sul, estão localizadas as regiões mais frias, onde a ocorrência de geadas é mais frequente. Hagger et al (2018) ressalta que, em projetos de recomposição florestal, a ocorrência de geadas ou de secas prolongadas estão entre as principais causas de mortalidade de mudas no campo.

De modo geral, os mapas de zoneamento edafoclimático demonstram que cada espécie selecionada apresenta comportamentos diferentes em relação às condições de T, P, DH e IW. Espécies de ampla distribuição geográfica em Minas Gerais, como *Acrocomia aculeata* e *Myracrodruon urundeuva*, por apresentarem menor restrição às variações climáticas, obtiveram a maior proporção de áreas preferenciais para o seu plantio. Já as espécies *Dipteryx alata* e *Joannesia princeps*, devido à sua ocorrência mais restrita no estado, apresentaram comportamento oposto e obtiveram a menor proporção de áreas preferenciais para o seu plantio. Tais resultados sugerem que, dentre as espécies selecionadas, algumas apresentam comportamento mais generalista e outras apresentam comportamento mais especialista climaticamente. De acordo com Wilson e Hayek (2015), as espécies generalistas são capazes de sobreviver em uma maior

diversidade de condições ambientais enquanto que as espécies mais especializadas sobrevivem somente em determinados tipos de ambientes.

Os resultados obtidos a partir dos mapas de zoneamento edafoclimático reforçam a ideia de que, para cada espécie, existem condições ideais para o seu desenvolvimento (Wang et al., 2015). Engelbrecht et al. (2007) observaram que, em ecossistemas florestais, as necessidades ecofisiológicas das espécies estão diretamente relacionadas à sua distribuição geográfica. Dessa forma, as condições climáticas sob as quais uma determinada espécie ocorre na natureza representam fortes indicadores para delimitar regiões mais favoráveis à sua sobrevivência.

Em projetos de recomposição florestal, o uso de espécies de ocorrência local (autóctones), se mostra, inicialmente, como o mais desejável. No entanto, em ambientes degradados, limitações como o desconhecimento das espécies nativas e a baixa disponibilidade de sementes contribuem para que isso nem sempre seja possível. Nessas situações, o zoneamento edafoclimático pode servir como uma importante ferramenta de tomada de decisão, a medida que possibilita identificar outras espécies (alóctones) que também sobrevivem em tais regiões.

No que se refere a caracterização do clima futuro segundo o cenário RCP8.5 do IPCC, ambos modelos utilizados apontam que, em todas as regiões de Minas Gerais, haverá aumento na temperatura mínima média anual até 2050. As maiores alterações estão previstas para a região oeste do estado, onde a temperatura mínima média anual poderá aumentar em até 1,5°C. Marengo e Carmargo (2008), analisando dados de temperatura do ar de 1960 a 2002, observaram, na região sudeste do Brasil, uma tendência de aumento na temperatura mínima média anual de 0,5°C/década, o que converge com a média das projeções geradas pelos modelos. Com o aumento da temperatura, ocorre o aumento do déficit de pressão de vapor, resultando em uma maior perda de água do solo por evaporação e, conseqüentemente, um maior déficit hídrico acumulado anual.

De acordo com a média dos modelos, o déficit hídrico acumulado anual, assim como a temperatura mínima média anual, também irá aumentar em todas as regiões de Minas Gerais. O aumento mais expressivo no déficit hídrico acumulado anual será na região norte, a qual já apresenta os menores índices pluviométricos do estado. Dai (2012) sugere que, até a metade do século XXI, a

redução da precipitação, juntamente com o aumento da temperatura, poderá acarretar na expansão significativa das regiões semiáridas na América do Sul. Além disso, estudos realizados por Salazar et al (2007) indicam que formações florestais poderão ser gradativamente substituídas por fisionomias mais abertas de Cerrado. Na região nordeste de Minas Gerais, por exemplo, o aumento da escassez hídrica em áreas ocupadas por florestas de Mata Atlântica poderá causar drásticas alterações nas comunidades vegetais (Colombo e Joly, 2010).

Em contraste à região nordeste que ficará mais seca, as regiões sul e sudoeste ficarão mais úmidas. Nessas regiões, o aumento da precipitação somado ao aumento da temperatura poderá contribuir para que haja maior quantidade de vapor d'água na atmosfera. Segundo Bengtsson (2001), o acréscimo de 1°C na temperatura do ar deve induzir um aumento no teor de umidade de cerca de 6%, tornando os eventos de chuvas extremas mais frequentes. Durante eventos de chuvas extremas, parte da água precipitada pode acumular na superfície do solo ou ser perdida por escoamento superficial. Dessa forma, o aumento da precipitação total anual deve ser analisado com ponderação, já que maiores volumes de precipitação nem sempre resultam em maior quantidade de água disponível para as plantas.

Com relação à distribuição de chuvas ao longo do ano, expressa pelo índice de Walsh, observou-se pequenas diferenças entre o cenário atual e as projeções futuras. Tais resultados sugerem que, para a resolução utilizada, o *downscaling* estatístico dos modelos não seja capaz de prever de forma precisa as variações mensais da precipitação (Rummukainen, 2010). Apesar dessa limitação, a média dos modelos aponta uma diminuição nos valores de índice de Walsh no nordeste do estado, o que significa que, nessa região, a distribuição de chuvas ao longo do ano ficará um pouco mais homogênea. Neste caso, os menores valores de índice de Walsh podem estar relacionados à redução da precipitação nos meses de novembro a março, que fará com que o volume de precipitação na estação chuvosa fique mais próximo do volume de precipitação na estação seca.

Diante das alterações previstas para 2050, é importante destacar que o zoneamento edafoclimático não deve ser utilizado como uma ferramenta estática. Como o clima está sempre sujeito a modificações, os mapas de zoneamento edafoclimático devem ser periodicamente atualizados. Nesse contexto, de

acordo com os mapas de zoneamento edafoclimático frente ao cenário RCP8.5, verificou-se que, para todas as espécies selecionadas, haverá redução das áreas preferenciais para o seu plantio. Siqueira e Peterson (2003), estudando os efeitos das mudanças climáticas no Cerrado, estimam que até 2070, haverá um declínio de mais de 50% nas áreas de distribuição geográfica de espécies arbóreas. Colombo e Joly (2010), obtiveram resultados similares e também preveem reduções significativas na distribuição de espécies da Mata Atlântica.

Nota-se que, enquanto algumas regiões irão se tornar menos favoráveis à sobrevivência de determinadas espécies, outras poderão se tornar mais favoráveis. Devido ao aumento na temperatura mínima média anual, estima-se que a região sudoeste de Minas Gerais, por exemplo, terá maior grau de adequabilidade para *Acrocomia aculeata* até 2050. Segundo Walther et al (2002), em um cenário de mudanças climáticas, espécies alóctones (não nativas) poderão expandir a sua distribuição geográfica e se estabelecer em novos ambientes. Por outro lado, mecanismos fisiológicos como plasticidade fenotípica poderão conferir a espécies nativas maior capacidade de adaptação. Portanto, tendo em vista que cada espécie florestal responderá de forma diferente às variações climáticas, as alterações previstas nos mapas de zoneamento representam apenas tendências de como a adequabilidade de cada região poderá variar em um cenário futuro.

Por fim, a sobreposição das unidades regionais do IEF nos mapas de zoneamento mostrou que, para cada espécie selecionada, existem regionais cujas condições edafoclimáticas são mais favoráveis à sua sobrevivência. Como apresentado anteriormente, o fato de uma espécie pertencer a flora nativa de Minas Gerais não significa que ela sobreviva em todas as regiões do estado. Dessa forma, durante a produção de mudas, cada viveiro do IEF deve priorizar por espécies que sejam mais adaptadas às condições edafoclimáticas de sua respectiva região. Nesse contexto, os mapas de zoneamento edafoclimático representam uma ferramenta simples e eficiente para que viveiristas e gestores tenham acesso a tais informações.

## 5. Conclusões

- As exigências em relação à temperatura mínima média anual, precipitação total anual, déficit hídrico acumulado anual e índice de Walsh (sazonalidade da precipitação) variaram entre as espécies estudadas. *Acrocomia aculeata* e *Myracrodruon urundeuva* foram as mais generalistas em relação às condições climáticas de Minas Gerais.
- O déficit hídrico acumulado anual e a sazonalidade da precipitação foram as variáveis mais restritivas à ocorrência das espécies;
- Em Minas Gerais, existem regiões mais preferenciais para o plantio de *Dipteryx alata*, *Joannesia princeps*, *Schinus terebinthifoliosus*, *Acrocomia aculeata* e *Myracrodruon urundeuva*;
- As regiões norte e nordeste de Minas Gerais serão as mais afetadas frente ao cenário de mudanças climáticas RCP8.5 do IPCC;
- Os impactos decorrentes das mudanças climáticas serão diferentes para cada espécie;
- Os mapas de zoneamento edafoclimático podem auxiliar gestores e viveiristas do IEF, e de outros órgãos, na identificação das espécies mais adequadas para cada unidade regional.

## 6. Referências

- ABREU, M. L. Climatologia da estação chuvosa de Minas Gerais: de Nimer (1977) à Zona de Convergência do Atlântico Sul. **Revista Geonomos**, v. 6, n. 2, p. 17-22, 1998.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage, 56).
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L. DE; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALMEIDA, E. L.; GOULART, G. A. S.; NETO, S. C.; CHIERICE, G. O.; SIQUEIRA, A. B. Preparação e caracterização de poliuretanos contendo diferentes quantidades de óleo de baru. **Polímeros**, v. 26, n. 2, p. 176–184, 2016.
- ARAÚJO, M. B.; LUOTO, M. The importance of biotic interactions for modelling species distributions under climate change. **Global Ecology and Biogeography**, v. 16, n. 6, p. 743–753, 2007.
- ARRUDA, D. M.; FERREIRA-JÚNIOR, W. G.; DUQUE-BRASIL, R.; SCHAEFER, C. E. R. Phytogeographical patterns of dry forests *sensu stricto* in northern Minas Gerais State, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 85, p. 623–634, 2013.
- AUSTIN, M. P. Continuum concept, ordination methods, and niche theory. **Annual Review of Ecology**, v. 16, p. 39–61, 1985.
- BENGTSSON, L. Uncertainties of global climate predictions. In: Ed.: Schulze, E.D.; Heimann, M.; Harrison, S.; Holland, E.; Lloyd, J.; Prentice, I.C.; Schimel, D. (Eds.). *Global biogeochemical cycles in the climate system*. San Diego: **Academic Press**, p.15–30, 2001.
- CARVALHO, A. S. R. **Ecofisiologia da Germinação de Sementes de Espécies Ombrófilas e Heliófilas da Floresta Tropical Atlântica**. Rio de Janeiro, 2009. 72 f. Tese (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, Escola Nacional de Botânica Tropical, 2009.
- CALIJURI, M. L. **Treinamento em Sistemas de Informações Geográficas**. Núcleo SIGEO. Universidade Federal de Viçosa, 2000.156 p.
- CAREY, C.; ALEXANDER, M. A. Climate change and amphibian declines: Is there a link? **Diversity and Distributions**, v. 9, n. 2, p. 111–121, 2003.
- CARLO, T. A.; MORALES, J. M. Generalist birds promote tropical forest regeneration and increase plant diversity via rare-biased seed dispersal. **Ecology**, v. 97, n. 7, p. 1819–1831, 2016.

CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; DIAS, M.A.F.S.; SILVA, M.G.A.J. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 463.

CHAZDON, R. L.; BRANCALION, P. H. S.; LAMB, D.; LAESTADIUS, L.; CALMON, M.; KUMAR, C. A Policy-Driven Knowledge Agenda for Global Forest and Landscape Restoration. **Conservation Letters**, v. 10, n. 1, p. 125–132, 2017.

CHENG, C.; CHAN, C. H.; LIN, K. Intelligent agents for e-marketplace: Negotiation with issue trade-offs by fuzzy inference systems. **Decision Support Systems**, v. 42, n. 2, p. 626–638, 2006.

CHOU, S. C.; RODRIGUES, D. C.; GOMES, L. G.; BUSTAMANTE, J. F. **Modelagem climática e vulnerabilidades setoriais à mudança do clima no Brasil**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016. 589 p.

CHUINE, I.; BEAUBIEN, E. G. Phenology is a major determinant of tree species range. **Ecology Letters**, v. 4, n. 5, p. 500–510, 2001.

COLOMBO, A.; JOLY, C. Brazilian Atlantic Forest lato sensu: the most ancient Brazilian forest, and a biodiversity hotspot, is highly threatened by climate change. **Brazilian Journal of Biology**, v. 70, n. 3 suppl, p. 697–708, 2010.

CRIA - Centro de Referência e Informação Ambiental. **Specieslink**. Disponível em <<http://www.splink.org.br/index>>. Acesso em: 15 de Set. 2016.

DAI, A. Increasing drought under global warming in observations and models. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 1, p. 52–58, 2013.

DINIZ, T.; FERREIRA FILHO, J. B. Impactos Econômicos do Código Florestal Brasileiro: uma discussão à luz de um modelo computável de equilíbrio geral. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 53, n. 2, p. 229–250, 2015.

ENGELBRECHT, B. M. J.; COMITA, L. S.; CONDIT, R.; KURSAR, T. A.; TYREE, M. T.; TURNER, B. L.; HUBBELL, S. P. Drought sensitivity shapes species distribution patterns in tropical forests. **Nature**, v. 447, n. 7140, p. 80–82, 2007.

ESQUIVEL-MUELBERT, A.; GALBRAITH, D.; DEXTER, K. G.; BAKER, T. R.; LEWIS, S. L.; MEIR, P.; ROWLAND, L.; COSTA, A. C. L. DA; NEPSTAD, D.; PHILLIPS, O. L. Biogeographic distributions of neotropical trees reflect their directly measured drought tolerances. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1–11, 2017.

FALASCA, S.; ULBERICH, A.; PITTA-ALVAREZ, S. Development of agroclimatic zoning model to delimit the potential growing areas for macaw palm (*Acrocomia aculeata*). **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3–4, p. 1321–1333, 2017.

FELFILI, J. M.; FAGG, C. W.; PINTO, J. R. Modelo nativas do bioma stepping stones na formação de corredores ecológicos, pela recuperação de áreas degradadas no Cerrado. **Gestão integrada de ecossistemas aplicada a corredores ecológicos**. Brasília: IBAMA, 2005. p. 187–209.

FERNANDES, E. A.; CUNHA, N. R. D. S.; SILVA, R. G. D. Degradação ambiental no estado de Minas Gerais. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 43, n. 1, p. 179–198, 2005.

FILHO, E. M. C.; SARTORELLI, P. A. R. **Guia de árvores com valor econômico**. São Paulo: Agroicone, 2015. 141 p.

FUSS, S.; CANADELL, J.G.; PETERS, G.P.; TAVONI, M.; ANDREW, R.M.; CIAIS, P.; JACKSON, R.B.; JONES, C.D.; KRAXNER, F.; NAKICENOVIC, N.; LE QUÉRÉ, C.; RAUPACH, M.R.; SHARIFI, A.; SMITH, P.; YAMAGATA, Y. Betting on negative emissions. **Nature Climate Change**, v. 4, p. 850–853, 2014.

GBIF – Global Biodiversity Information Facility. **GBIF occurrence download**. Disponível em <<http://www.gbif.org/index>>. Acesso em: 20 de Set. 2016.

GÖLDEL, B.; KISSLING, W. D.; SVENNING, J. C. Geographical variation and environmental correlates of functional trait distributions in palms (Arecaceae) across the New World. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 179, n. 4, p. 602–617, 2015.

GONÇALVES, J. L. M.; DEMATTÊ, J. L. I.; COUTO, H. T. Z. Relações entre a produtividade de sítios florestais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* com as propriedades de alguns solos de textura arenosa e média no Estado de São Paulo. **IPEF**, Piracicaba n. 43/44, p. 24–39. 1990.

GRAHAM, C. H. et al. The influence of spatial errors in species occurrence data used in distribution models. **Journal of Applied Ecology**, v. 45, n. 1, p. 239–247, 2008.

GEROY, I. J.; GRIBB, M. M.; MARSHALL, H. P.; CHANDLER, D. G.; BENNER, S. G.; MCNAMARA, J. P. Aspect influences on soil water retention and storage. **Hydrological Processes**, v. 25, p. 3836–3842, 2011.

HAGGER, V.; DWYER, J.; SHOO, L.; WILSON, K. Use of seasonal forecasting to manage weather risk in ecological restoration. **Ecological Applications**, v. 28, n. 7, p. 1797–1807, 2018.

JAIN, A. K. Data clustering: 50 years beyond K-means. **Pattern Recognition Letters**, v. 31, n. 8, p. 651–666, 2010.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Pecuária Municipal**: revisão 2013. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 08 Jun. 2017.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de biomas do Brasil; primeira aproximação**. Rio de Janeiro: IBGE. 2004.

IEF – Instituto Estadual de Florestas. **Mapa das unidades regionais do IEF**. Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.ief.mg.gov.br>>. Acesso em: 09 Jun. 2018.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. Geneva, Switzerland, p. 151, 2014.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RiMa, 2004. 531 p.

LADOUCEUR, E.; JIMÉNEZ-ALFARO, B.; MARIN, M.; VITIS, M. DE; ABBANDONATO, H.; IANNETTA, P. P. M.; BONOMI, C.; PRITCHARD, H. W. Native Seed Supply and the Restoration Species Pool. **Conservation Letters**, v. 11, n. 2, p. 1–9, 2018.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Estado da Arte das Pastagens em Minas Gerais**. 2015. Belo Horizonte. Disponível em: <<http://www.sistemaafaemg.org.br>>. Acesso em: 10 Jun. 2017.

MAPBIOMAS. **Coleções MapBiomas**. Disponível em < <http://mapbiomas.org>>. Acesso em: Março, 2018.

MARENGO, J. A.; LIEBMANN, B.; GRIMM, A. M.; MISRA, V.; SILVA DIAS, P. L.; CAVALCANTI, I. F. A.; CARVALHO, L. M. V.; BERBERY, E. H.; AMBRIZZI, T.; VERA, C. S.; SAULO, A. C.; NOGUES-PAEGLE, J.; ZIPSER, E.; SETH, A.; ALVES, L. M. Review recent developments on the South American monsoon system. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 1, p. 1–21, 2012.

MORAES, L. F. D.; CAMPELLO, E. F. C.; FRANCO, A. A. Restauração florestal: do diagnóstico de degradação ao uso de indicadores ecológicos para o monitoramento das ações. **Oecologia Australis**, v. 14, n. 2, p. 437–451, 2010.

MARTÕ, M.; ALBALADEJO, J.; CASTILLO, V. M.; GOMEZ-PLAZA, A. Factors regulating spatial distribution of soil water content in small semiarid catchments. **Journal of Hydrology**, v. 253, p. 211–226, 2001.

MELLO, D.; ROGÉRIO, C.; VIOLA, R. Mapeamento de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 37, p. 37–44, 2013.

MORELLATO, L. P. C.; TALORA, D. C.; TAKAHASI, A.; BENCKE, C. C.; ELIANE, C.; MORELLATO, L. P. C.; TALORA, D. C.; TAKAHASI, A.; BENCKE, C. C.; ROMERA, E. C. Phenology of Atlantic Rain Forest Trees: A Comparative Study. **Biotrópica**, v. 32, n. 4, p. 811–823, 2000.

MOURA, E. F.; VENTRELLA, M. C.; MOTOIKE, S. Y. Anatomia, histoquímica e ultra-estrutura da semente e do embrião somático de *Acrocomia aculeata* (Arecaceae). **Scientia Agricola**, v. 67, n. 4, p. 399–407, 2010.

OLIVEIRA-FILHO; FONTES. Patterns of Floristic Differentiation among Atlantic Forests in Southeastern Brazil and the Influence of Climate. **Biotropica**, v. 32, n. 4, p. 793–810, 2000.

PEARSON, R. G.; DAWSON, T. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful. **Global Ecology & Biogeography**, v. 12, p. 361–371, 2003.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba, 2002. 478p.

PHILLIPS, S. B.; ANEJA, V. P.; KANG, D.; ARYA, S. P. Modelling and analysis of the atmospheric nitrogen deposition in North Carolina. **International Journal of Global Environmental Issues**, v. 6, n. 3, p. 231–252, 2006.

PINHEIRO, M. H. O.; MONTEIRO, R. Contribution of forest species to the floristic composition of a forested savanna in Southeastern Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 49, n. 5, p. 763–774, 2006.

PILON, L. N. A.; DURIGAN, G. Critérios para indicação de espécies prioritárias para a restauração da vegetação de cerrado. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 99, p. 389–399, 2013.

RAMOS, M. I. L.; FILHO, M. M. R.; HIANE, P. A.; NETO, J. A. B.; SIQUEIRA, E. M. A. Qualidade nutricional da polpa de bocaiúva *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, p. 90–94, 2008.

RANIERI, V. E. L. **Reservas legais: critérios para localização e aspectos de gestão**. São Carlos, 2004. 144 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 2, p.185–204, 2010.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L. F.; ALVES, M. A. Aspectos Climáticos do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, p. 206-226, 2015.

RIahi, K.; RAO, S.; KREY, V.; CHO, C.; CHIRKOV, V.; FISCHER, G.; KINDERMANN, G.; NAKICENOVIC, N.; RAFAJ, P. RCP-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. **Clim. Change**, v. 109, p.33–57, 2011.

RICCI, M. D. S. F.; COSTA, J. R.; PINTO, A. N.; SANTOS, V. L. D. S. Cultivo orgânico de cultivares de café a pleno sol e sombreado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 4, p. 569–575, 2006.

RODRIGUES, R. R.; GANDOLFI, S.; NAVE, A. G.; ARONSON, J.; BARRETO, T. E.; VIDAL, C. Y.; BRANCALION, P. H. S. Large-scale ecological restoration of high-diversity tropical forests in SE Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 261, n. 10, p. 1605–1613, 2011.

RORATO, D. G.; ARAUJO, M. M.; TABALDI, L. A.; TURCHETTO, F.; GRIEBELER, A. M.; BERGHETTI, Á. L. P.; BARBOSA, F. M. Tolerance and resilience of forest species to frost in restoration planting in southern Brazil. **Restoration Ecology**, v. 26, n. 3, p. 537–542, 2018.

RUMMUKAINEN, M. State-of-the-art with regional. **WIREs Climate Change**, v. 1, n. 1, p. 82–96, 2010.

SANJINEZ-ARGANDOÑA, E. J.; CHUBA, C. A. M. Caracterização biométrica, física e química de frutos da palmeira bocaiuva *Acrocomia aculeata* (Jacq) Lodd. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, n. 3, p. 1023–1028, 2011.

SANTOS, M. R. A.; LIMA, R. A.; FERNANDES, C. F.; SILVA, A. G.; LIMA, D. K. S.; TEIXEIRA, C. A. D.; FAOUNDO, V. A. Atividade inseticida do óleo essencial de *Schinus terebinthifolius* Raddi sobre *Acanthoscelides obtectus* Say e *Zebrottes subfasciatus* Boheman. **Fitos**, v. 3, p. 77–84, 2007.

SHEFFIELD, J.; GOTETI, G.; WOOD, E. F. Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modelling. **Journal of Climate**, v. 19, p. 1–13, 2006.

SILVA, C. H. D. **Análise do processo de restauração de ecossistema florestal aos quatro anos**. 2014. 110 f. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

SIQUEIRA, M. F.; PETERSON, A. T. Consequences of global climate change for geographic distributions of Cerrado tree species. **Biota Neotropica**, v. 3, p. 1–14, 2003.

SOS Mata Atlântica; Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica, período de 2000 a 2005**. 2008. Disponível em <<http://www.sosmatatlantica.org.br>>. Acesso em: 15 de Jun. 2017.

SOUTHWICK, S. M.; DAVENPORT, T. L. Characterization of water stress and low temperature effects on flower induction in citrus. **Plant Physiology**, v. 81, p. 26–29, 1986.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. **Journal of Hydrology**, v. 456, p. 12–29, 2012.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Publications in Climatology**, v. 8, p. 1–104, 1955.

TOURNE, D. C. M.; MARTORANO, L. G.; BRIENZA, J. S.; DIAS, C. T. S.; LISBOA, A. L. S.; SARTORIO, S. D.; VETORAZZI, C. A. Potential topoclimatic zones as support for forest plantation in the Amazon: Advances and challenges to growing Paricá (*Schizolobium amazonicum*). **Environment Development**, v. 18, p. 26–35, 2015.

UFV – Universidade Federal de Viçosa; CETECMG – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais; UFLA – Universidade Federal de Lavras; FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais: legenda expandida**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 51 p.

VELÁZQUEZ E.; TOURNIER H. A.; MORDUJOVICH DE BUSCHIAZZO P.; SAAVEDRA G.; SCHINELLA. G. R. Antioxidant activity of Paraguayan plant extracts. **Fitoterapia**, v.74, p. 91–97, 2003.

XAVIER, A. C.; King, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 2659, p. 2644–2659, 2015.

WAIBEL, R.; BENIRSCHKE, G.; ACHENBACH, H. Sesquiterpene lactones and other constituents from the seeds of *Joannesia princeps*. **Phytochemistry**, v. 62, p. 805–811, 2003.

WALSH, R. P. **The tropical rain forest**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 205 p.

WALSH, R. P. D.; LAWLER, D. M. Rainfall Seasonality: Description, spatial patterns and change through time. **Weather**, v. 36, p. 201–208, 1981.

WALTER, G.; POST, E.; CONVEY, P.; MENZEL, A.; PARMESANI, C.; BEEBEE, T. J. C.; FROMENTIN, J.; HOEGH-GULDBERG, O.; BAIRLEIN, F. Ecological responses to recent climate change. **Nature**, v. 416, p. 389–395, 2002.

WANG, T.; WANG, G.; INNES, J.; NITSCHKE, C.; KANG, H. Climatic niche models and their consensus projections for future climates for four major forest tree species in the Asia-Pacific region. **Forest Ecology and Management**, v. 360, p. 357–366, 2016.

WASSENAAR, T.; LAGACHERIE, P.; LEGROS, J. P.; ROUNSEVELL, M. D. A. Modelling wheat yield responses to soil and climate variability at the regional scale. **Climate Research**, v. 11, p. 209–220, 1990.

WILSON, B.; HAYEK, C. Distinguishing relative specialist and generalist species in the fossil. **Marine Micropaleontology**, v. 119, p. 7–16, 2015.

WUNDERLE JR, J. M. The role of animal seed dispersal in accelerating native forest regeneration on degraded tropical lands. **Forest Ecology and Management**, v. 99, n. 1–2, p. 223–235, 1997.

YAMADA, E. S. M. **Zoneamento agroclimático da *Jatropha curcas* L. como subsídio ao desenvolvimento da cultura no Brasil visando à produção de biodiesel.** Piracicaba, 2011. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2011.