



HENRIQUE FARIA DE OLIVEIRA

**ESTRATÉGIA DE MAXIMIZAÇÃO DO SEQUESTRO
DE CARBONO NA SAVANA BRASILEIRA**

**LAVRAS - MG
2019**

HENRIQUE FARIA DE OLIVEIRA

**ESTRATÉGIA DE MAXIMIZAÇÃO DO SEQUESTRO DE CARBONO
NA SAVANA BRASILEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. José Roberto Soares Scolforo
Orientador

**LAVRAS – MG
2019**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Oliveira, Henrique Faria de.

Estratégia de maximização do sequestro de carbono na savana
brasileira/ Henrique Faria de Oliveira. - 2019.

50 p. : il.

Orientador: José Roberto Soares Scolforo.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. Ciências Florestais. 2. Conservação. 3. Modelagem
Florestal. I. Scolforo, José Roberto Soares. II. Título.

HENRIQUE FARIA DE OLIVEIRA

**ESTRATÉGIA DE MAXIMIZAÇÃO DO SEQUESTRO DE CARBONO
NA SAVANA BRASILEIRA**

**STRATEGY FOR MAXIMIZING CARBON SEQUESTRY IN
BRAZILIAN SAVANNA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 17 de abril de 2019.

Dr. Henrique Ferraço Scolforo SUZANO PAPEL E CELULOSE

Dr. Lucas Rezende Gomide UFLA

Prof. Dr. José Roberto Soares Scolforo
Orientador

**LAVRAS – MG
2019**

*Aos meus pais, à Lívia
e a todos que contribuíram em minha
caminhada para que eu pudesse ter chegado até aqui.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, pelo apoio constante para eu pudesse chegar até aqui.

À Lívia, por estar sempre presente, me dando força nos momentos difíceis e compartilhando alegrias dos momentos de comemoração.

À Lurdinha, que me apoiou em diversos momentos, sempre me recebendo de braços abertos.

À República Arapuca, por tantos anos compartilhados em Lavras.

Ao meu orientador, José Roberto Soares Scolforo, por todos os ensinamentos.

Ao Henrique, por todo apoio para construção de uma dissertação com conteúdo relevante.

À Thiza, que durante todo o mestrado me ajudou em diversas situações e foi fundamental para conclusão do processo.

Ao Faustinho, que me apoiou em diversos momentos e foi fundamental para que eu me mantivesse firme no objetivo.

Ao Gomide, que dentre diversas coisas, me ensinou a programar e me deu uma enorme vantagem competitiva no mercado de trabalho.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF) pela oportunidade concedida para a realização da Pós-Graduação.

Aos programas de fomento à pesquisa, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas concebidas para desenvolvimento das pesquisas.

“O surpreendente não é a magnitude de nossos erros de previsão, mas a falta de consciência que temos deles”. (Nassim Nicholas Taleb)

RESUMO

Objetivou-se, através deste estudo, desenvolver uma metodologia pragmática, para ser replicada em grande escala, fornecendo a indicação de espécies para plantio através da aptidão natural das mesmas às condições ambientais de cada local, assim como estimar sua capacidade de desenvolvimento e estocagem de carbono para áreas de passivo ambiental identificadas pelo Cadastro Ambiental Rural no domínio dos Cerrados no estado de Minas Gerais, Brasil. Foi utilizado o método da Regressão Logística, através do ajuste de Regressão Ridge para alocação de espécies, buscando minimizar o efeito de colinearidade presente nas variáveis ambientais e obter um ajuste lógico biológico correspondente a realidade fitogeográfica das mesmas. Quatro espécies foram avaliadas, com dados obtidos no projeto Inventário Florestal de Minas Gerais, escolhidas visando coibir qualquer viés de estimativa, assumindo que as mesmas são abundantes, bem representadas espacialmente e abrangem uma ampla faixa de diâmetros, sendo as espécies testadas a *Astronium fraxinifolium* Schott ex Spreng, *Machaerium opacum* Vogel, *Qualea grandiflora* Mart. e *Qualea parviflora* Mart. Todos os modelos apresentaram boa qualidade no ajuste e correspondência biológica lógica com os fatores ambientais e a distribuição natural das espécies. Foi possível definir a alocação das espécies visando a otimização do sequestro de carbono, e consequentemente o desenvolvimento inicial de plantios. Tal metodologia traz ganhos em relação aos custos, pois plantios monoespecíficos com espécies de rápido desenvolvimento local trazem ganhos no sucesso dos empreendimentos, reduzindo a necessidade de replantio e acelerando o fechamento de dossel, eliminando precocemente a competição com ervas invasoras. Domínios vegetacionais de alta complexidade biológica carecem de métricas para alocação de espécies, pois devido à grande complexidade genotípica, a alocação inadequada para sítios específicos tem alta probabilidade. É possível contribuir com o processo de monetização da conservação ambiental, pois a partir de estimativas precisas sobre a capacidade de estocagem e estoque presente de carbono, é possível criar programas e métodos de negociação para créditos de carbono no mercado de capitais, além de dar precisão ao cálculo do valor justo a ser recebido por serviços ambientais. Todos esses processos são imprescindíveis para que alcancemos nossos objetivos frente ao combate das mudanças climáticas e os efeitos dramáticos que a humanidade sofre e sofrerá com sua intensificação.

Palavras-chave: Savana brasileira. Reflorestamento. Passivo ambiental.

ABSTRACT

The objective of this study was to develop a pragmatic methodology to be replicated on a large scale, providing the indication of species for planting through the natural aptitude of the same to the environmental conditions of each site, as well as estimating its capacity for development and storage of carbon for environmental passive areas identified by the Cadastro Ambiental Rural in the Cerrado domain in the state of Minas Gerais, Brazil. The Logistic Regression method was used, through the Ridge Regression adjustment for species allocation, aiming to minimize the collinearity effect present in the environmental variables and to obtain a logical biological adjustment corresponding to the phytogeographic reality of the same. Four species were evaluated, with data obtained from the Forest Inventory of Minas Gerais, chosen to curb any bias of estimation, assuming that they are abundant, well represented spatially and cover a wide range of diameters, being the species tested the *Astronium fraxinifolium* Schott ex Spreng, *Machaerium opacum* Vogel, *Qualea grandiflora* Mart. and *Qualea parviflora* Mart. All the models presented good quality in the fit and logical biological correspondence with the environmental factors and the natural distribution of the species. It was possible to define the species allocation in order to optimize carbon sequestration, and consequently the initial development of plantations. Such methodology brings gains in terms of costs, since monospecific plantations with species of rapid local development bring gains in the success of the enterprises, reducing the need for replanting and accelerating the canopy closure, eliminating the competition with invasive weeds early. Vegetational domains of high biological complexity lack metrics for species allocation, because due to the great genotype complexity, inadequate allocation to specific sites has a high probability. It is possible to contribute to the process of monetization of environmental conservation, since from accurate estimates of the storage capacity and present carbon stock, it is possible to create programs and trading methods for carbon credits in the capital market, besides giving precision to the calculation of the fair value to be received for environmental services. All these processes are essential for us to achieve our objectives in the face of the fight against climate change and the dramatic effects that humanity suffers and will suffer with its intensification.

Keywords: Brazilian savanna. Reforestation. Environmental liabilities.

LISTA DE FIGURAS

SEGUNDA PARTE

Figura 1 –	Gradiente ambiental no domínio dos Cerrados no estado de Minas Gerais, Brasil. (a): PPT – ETP e (b) Temperatura.	27
Figura 2 –	Distribuição dos fragmentos do domínio dos Cerrados amostrados no projeto IFMG.	28
Figura 3 –	Fluxograma para maximização do sequestro de carbono.	30
Figura 4 –	Percentual de área desmatada por município frente ao total de desmatamento observado para o domínio dos Cerrados em Minas Gerais, Brasil, entre 2008 e 2011.	35
Figura 5 –	Série histórica do Crédito de Carbono na Bolsa de Valores de Londres. (a) Preço de Fechamento e (b) Volume de Negociações.	37
Figura 6 –	Locais potenciais de ocorrência das espécies no domínio dos Cerrados em Minas Gerais, Brasil. (a) <i>A. fraxinifolium</i> , (b) <i>M. opacum</i> , (c) <i>Q. grandiflora</i> , e (d) <i>Q. parviflora</i>	39
Figura 7 –	Estoque de carbono estimado para o domínio dos Cerrados no estado de Minas Gerais, Brasil. (a) <i>A. fraxinifolium</i> , (b) <i>M. opacum</i> , (c) <i>Q. grandiflora</i> , e (d) <i>Q. parviflora</i>	42
Figura 8 –	Distribuição das espécies embasada na otimização de carbono no domínio dos Cerrados no estado de Minas Gerais, Brasil.	42
Figura 9 –	Estoque de otimizado carbono no domínio dos Cerrados no estado de Minas Gerais, Brasil.	43

LISTA DE TABELAS

SEGUNDA PARTE

Tabela 1 –	Coefficientes ajustados pela equação Ridge logística para as espécies do estudo.	39
Tabela 2 –	Coefficientes fixos e aleatórios para cada espécie.	40
Tabela 3 –	Estatísticas de qualidade de ajuste.	40

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	12
1	INTRODUÇÃO GERAL	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Domínio dos Cerrados em Minas Gerais e seu estoque de carbono.....	13
2.2	Mudanças climáticas e medidas de mitigação naturais	14
2.3	Cadastro Ambiental Rural (CAR)	15
2.4	Modelagem ecológica quantitativa	15
2.4.1	Regressão logística	15
2.4.2	Regressão Ridge	17
2.4.3	Modelos lineares de efeitos mistos.....	18
2.4.4	Modelagem de nicho de ocorrência de espécies	19
	REFERÊNCIAS.....	21
	SEGUNDA PARTE - ARTIGO.....	24
	ESTRATÉGIA DE MAXIMIZAÇÃO DO SEQUESTRO DE CARBONO NA SAVANA BRASILEIRA	24

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

O conhecimento sobre os fatores que moldam a distribuição de espécies em nossos ecossistemas naturais, assim como o desenvolvimento das mesmas ainda são muito incipientes e carecem de intensos esforços, para o alcance de um grau satisfatório para o manejo sustentável e o planejamento em macro escala de nossas paisagens. Tais conhecimentos contribuem para que medidas de reflorestamento sejam feitas de maneira eficiente, com menos riscos e mais qualidade nos resultados. A busca pela efetividade de tais ações caminha, em consonância com a urgente e intensa necessidade de mitigar as causas das mudanças climáticas que assolam nosso planeta. Nesse panorama, o Brasil tem um potencial enorme para implantação de projetos de reflorestamento, visando sequestro de carbono e eliminação de passivos ambientais, porém é necessário o aprimoramento dos métodos para que o insucesso dos projetos seja drasticamente reduzido.

Criar métodos para alocação de espécies em plantios iniciais de áreas que sofreram supressão vegetal ilegal é uma demanda que carece de empenho. Ambientes onde a diversidade de espécies é elevada são propensos ao insucesso de projetos de reflorestamento mal embasados tecnicamente, devido à maior probabilidade de erros na escolha de espécies para sítios específicos devido à complexidade intra e interespecíficas. Por outro lado, monetizar processos conservacionistas é um caminho que traria alta eficiência para tais medidas, com potencial de reduzir drasticamente o estímulo a supressões ilegais e fomentando a implantação de áreas para conservação e estoque de carbono. Para que isso possa se tornar um processo pragmático, são necessárias metodologias que quantifiquem de forma eficaz os resultados em crescimento e estoque de carbono para que possa ser valorado de acordo com os preços praticados no mercado financeiro, assim como para calcular valores justos para o pagamento por serviços ambientais.

Buscando suprir tais demandas, este estudo propõe uma metodologia eficaz para indicação de espécies para plantios monoespecíficos buscando reduzir a taxa de insucesso de reflorestamentos, assim como mensurar de maneira eficiente os estoques futuros de carbono que poderão ser obtidos com a implementação de tais projetos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Domínio dos Cerrados em Minas Gerais e seu estoque de carbono

O domínio dos Cerrados está localizado na parte central do país, é o segundo maior em extensão territorial, perdendo apenas para o domínio Amazônico (SCOLFORO et al., 2015). Atua como ligação entre quase todos os biomas brasileiros, criando zonas ecotonais de alta complexidade e biodiversidade, com elevado grau de endemismo, sendo considerado um *hotspot* de biodiversidade mundial (BRASIL, 2014; MYERS et al., 2000).

No estado de Minas Gerais é o mais abrangente, com total de aproximadamente 57% da vegetação. O estrato arbóreo tem um volume médio de 62 m³/ha, com 32,6 Mg/ha de matéria seca, com uma densidade de 1074 N/ha e uma riqueza de 1205 espécies. Em relação às fitofisionomias foram estimados, para o Campo Cerrado, volume médio de 18,6 m³/ha, 11,4 Mg/ha de matéria seca, densidade de 401 N/ha, riqueza na ordem de 202 espécies, para Cerrado Sensu Stricto volume médio de 50 m³/ha, 30,2 Mg/ha de matéria seca, densidade de 1.173 N/ha, riqueza na ordem de 686 espécies e para Cerradão um volume médio de 117,5 m³/ha, 56,3 Mg/ha de matéria seca, densidade de 1,649 N/ha, riqueza na ordem de 317 espécies (SCOLFORO et al., 2015).

Apresenta um gradiente negativo para precipitação e positivo para temperatura no sentido sul-norte (SCOLFORO et al., 2016). As temperaturas médias anuais variam de 14 °C a 26 °C, a precipitação média anual varia entre 700 mm a 1600 mm e a altitude varia de 300 m a 1200 m acima do nível do mar, com alguns locais pontuais superando o limite superior de altitude. Quanto à classificação de Köppen, os climas presentes são Cwa (clima temperado úmido com inverno seco e verão quente), Cwb (clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado), Aw (clima tropical com estação seca de inverno) e As (clima tropical com estação seca de verão) (ALVARES et al., 2013).

Seu estoque de carbono foi estimado em 90.278.939 de Mg, correspondendo aproximadamente a 20% de todo o estoque de Minas Gerais (432.189.104 Mg), com média de 12.4 Mg/ha. Na região Centro do estado foi observada uma média de 11.8 Mg/ha, na região Centro-Sul 21.5 Mg/ha, na região Leste 8.2 Mg/ha, na região Nordeste 15.2 Mg/ha, na região Norte 9.8 Mg/ha e na região Oeste 26.6 Mg/ha. Foi observada uma correlação negativa da ordem de -0,51 com latitude, corroborando com o gradiente climático do estado, e para altitude foi observada uma correlação positiva da ordem de 0.21 (SCOLFORO et al., 2015).

2.2 Mudanças climáticas e medidas de mitigação naturais

A população mundial, estimada em 7,6 bilhões de pessoas no ano 2017, pode chegar a 11,2 bilhões de pessoas até 2100 (ONU, 2017). Tal perspectiva indica que o meio ambiente global terá que suportar uma pressão antrópica crescente. Pesquisas desenvolvidas pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), modelando mudanças climáticas e seus fatores preponderantes, indicam que o aumento do teor de gases de efeito estufa de longa duração (GEE), como o dióxido de carbono (CO₂), foi o principal causador de mudanças climáticas no século XX, trazendo consequências como degelo polar, alteração de regimes pluviométricos, aumento da temperatura média global, aumento do nível do mar entre outros, causando sérias implicações negativas para a ecologia global (MILLER et al., 2014).

As emissões de GEE aumentaram em 50% desde a década de noventa e entre os anos 2000 e 2010 o aumento foi superior ao das três décadas anteriores. Estimativas indicam que as ações antrópicas tenham causado uma elevação de 1,0 °C em relação à média global pré-industrial, e entre os anos 2030 e 2052 este valor poderá atingir o patamar de 1,5 °C se mantida a taxa de aumento atual, equivalente a 1,5%/ano (IPCC, 2018; LE QUÉRÉ et al., 2018). Segundo Mora et al. (2018), esse constante acréscimo dos GEE provocará drásticos problemas humanitários, relacionados a saúde, disponibilidade de água potável, de alimento, problemas econômicos, além de problemas de segurança relacionados a maior incidência de desastres ambientais. O custo atual da emissão de uma tonelada de CO₂ ou seu equivalente, denominado custo social do carbono, é estimado em US\$ 31, corroborando a ideia de que o controle das emissões possui importância também econômica (NORDHAUS, 2017).

O Acordo de Paris, firmado por 195 países através da *United Nations Framework Convention on Climate* (UNFCCC, 2016), estabeleceu metas de redução de emissões de GEE, buscando mitigar tais efeitos negativos, e tendo como objetivo a manutenção do aquecimento abaixo dos 2 °C acima dos níveis pré-industriais (ROBIOU DU PONT; MEINSHAUSEN, 2018). Soluções climáticas naturais são medidas de conservação, restauração e ações mais eficientes do uso da terra, as quais aumentam o estoque de carbono e/ou evitam emissões de GEE. É estimado que tais medidas têm potencial para fornecer 37% da mitigação de CO₂ necessária para se obter uma probabilidade maior que 66% de se manter a temperatura global abaixo dos 2 °C (GRISCOM et al., 2017).

Políticas públicas para redução das emissões de GEE podem ser um componente estratégico para a mitigação do aquecimento global. Dentre tais medidas, os reflorestamentos se destacam com maior potencial sequestro de carbono (GRISCOM et al., 2017).

2.3 Cadastro Ambiental Rural (CAR)

O antigo Código Florestal brasileiro, datado de 1965, apresentava pontos críticos no tocante a implementação prática da regulamentação e fiscalização de crimes ambientais relacionados à supressão de florestas e demais vegetações nativas, além da sua baixa eficiência de atualização frente ao status do cumprimento de suas diretrizes conservacionistas (GOMES; MARTINELLI, 2012).

Com o intuito de dar eficiência na aplicação e fiscalização das políticas de conservação ambiental, através do Novo Código Florestal (BRASIL, 2012), no domínio do Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (SINIMA), foi criado o Cadastro Ambiental Rural (CAR), projeto pioneiro que busca construir uma base de dados estratégica desburocratizada e regularmente atualizada, eficiente no controle, fiscalização e monitoramento de supressões vegetais ilegais (LAUDARES; SILVA; BORGES, 2014).

Tal mecanismo foi implementado via sensoriamento remoto, através de um cadastro eletrônico obrigatório para todos os imóveis rurais, com a finalidade de delimitar as classes de uso da terra, quantificar suas proporções e assim estabelecer diretrizes para adequação das propriedades rurais à legislação, fazendo-se cumprir métricas conservacionistas, fomentando a criação e manutenção de corredores ecológicos e contribuindo para qualidade ambiental em macro escala (LAUDARES; SILVA; BORGES, 2014).

Antes de sua implementação, o cumprimento das métricas conservacionistas não era satisfatório, pois os mecanismos anteriores não contemplavam conceitos cruciais para implementação de medidas práticas de conservação e planejamento territorial (DELALIBERA et al., 2008). O CAR cria ainda um novo segmento, onde propriedades que excedam os valores impostos pela legislação em vegetação nativa possam comercializá-los via Cotas de Reserva Ambiental (CRA) com propriedades deficitárias (LAUDARES; SILVA; BORGES, 2014). A monetização dos processos conservacionistas é crucial para que tais medidas sejam eficientes, pois agregam atratividade frente à agropecuária.

2.4 Modelagem ecológica quantitativa

2.4.1 Regressão logística

Métodos classificadores são aqueles que atuam no sentido de prever respostas qualitativas através de um conjunto de observações, ou seja, atribuir uma variável categórica a

uma determinada observação baseada em um conjunto de variáveis (JAMES et al., 2013). O método da regressão logística é um classificador eficiente e flexível, com possibilidade de trabalhar conjuntamente variáveis contínuas e categóricas, assim como variáveis que não apresentem distribuição normal (CHANG et al., 2013).

Temos a modelagem de $\Pr(Y = 1 | X)$, e a partir da resposta, determina-se qual valor de porcentagem é satisfatório para inclusão da variável dependente à categoria analisada, de acordo com o rigor e conhecimento de causa do modelador (EKSTRÖM et al., 2018). O modelo logístico se faz necessário para predição da probabilidade frente à regressão linear devido a inconsistências obtidas com resultados lineares. Observações extremas podem gerar respostas percentuais de probabilidade acima dos limites (0% e 100%), tornando a regressão linear descrita a seguir imprópria (JAMES et al., 2013).

$$p(X) = \beta_0 + \beta_1 X \quad (1)$$

Para resolver a problemática é necessário o emprego de uma função que forneça valores entre 0 e 1 para qualquer valor de X, descrita a seguir, denominada Função Logística.

$$p(X) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 X}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 X}} \quad (2)$$

Na equação, $p(X)$ diz respeito a probabilidade predita para uma dada observação, X corresponde a variável independente e β_i diz respeito aos parâmetros à serem ajustados. Para obtenção dos parâmetros, o método utilizado é o da máxima verossimilhança, função que atua no sentido de obter a menor probabilidade possível para observações que não se encaixem na condição e a maior possível para aquelas que se encaixam (EKSTRÖM et al., 2018). A equação matemática a seguir representa a função de verossimilhança, com descrição análoga de variáveis e parâmetros para equação anterior.

$$l(\beta_0, \beta_1) = \prod_{i: y_i=1} p(x_i) \prod_{i': y_{i'}=0} (1 - p(x_{i'})) \quad (3)$$

Assim como na regressão linear, podemos medir a precisão das estimativas dos coeficientes por meio do erro padrão. O intercepto no modelo tem como função apenas o ajuste da média das probabilidades preditas à média das que estão contidas nos dados (JAMES et al., 2013).

2.4.2 Regressão Ridge

Métodos de penalização em regressão são aqueles que visam uma redução da variância dos coeficientes através da restrição e regularização de suas estimativas. A regressão Ridge é uma das técnicas mais utilizadas para penalizações e tem o intuito de reduzir a variância das estimativas dos coeficientes quando seus preditores não são ortogonais, proporcionando ganhos significativos em precisão (JAMES et al., 2013).

Ajustes através do método dos mínimos quadrados ordinários (MQO) podem gerar resultados inconsistentes com o comportamento dos dados em casos de vetores preditores não ortogonais, o que torna sua interpretação difícil ou até mesmo equivocada. Portanto, através da penalização dos coeficientes via pequenos valores (λ), é observada redução na colinearidade, fornecendo estimativas com maior grau de confiabilidade e precisão. (SCOLFORO et al., 2017).

O método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) estima os coeficientes β_i buscando minimizar a soma de quadrados dos resíduos (SQR), dada pela formula a seguir.

$$SQR = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij})^2 \quad (4)$$

A diferença entre o ajuste dos MQO de Ridge consiste na formulação a ser minimizada, a qual para Ridge é dada pela formula a seguir.

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij})^2 + \lambda \sum_{j=1}^p \beta_j^2 = SQR + \lambda \sum_{j=1}^p \beta_j^2 \quad (5)$$

O termo λ é maior ou igual a zero e diz respeito a um parâmetro de ajuste (λ), determinado separadamente, β_j são parâmetros a serem ajustados no modelo, y_i é referente a observação da variável dependente utilizada para ajuste e x_{ij} corresponde à variável independente de observação i relacionada a cada β_j . Como no método dos MQO, Ridge busca minimizar a SQR, porém possui um termo penalizador, definido por $\sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij}$, o qual se torna menor a medida que os valores dos coeficientes são próximos de zero, tendo como efeito geral a diminuição dos mesmos em direção a 0 (JAMES et al., 2013).

Quando o valor de $\lambda = 0$ os valores obtidos por Ridge são análogos aos obtidos por MQO, e à medida que os valores de λ progridam sentido ao infinito, as estimativas dos parâmetros tenderão a 0. O método produz um conjunto de diferentes ajustes para os

parâmetros do modelo, sendo um ponto crucial para obtenção de eficiência do método a determinação do melhor valor de λ (JAMES et al., 2013).

A validação cruzada é uma ferramenta eficiente para escolha do valor mais adequado de λ para cada base de dados. Um grid com valores contínuos de λ é escolhido, e em seguida são calculados os erros de validação cruzada para cada valor do grid, e a seleção do parâmetro será baseada no menor valor de erro encontrado. Após tal processo o modelo é reajustado com a base de dados completa e o valor de λ mais adequado ao conjunto de observações (SCOLFORO et al., 2017).

Ao contrário das estimativas dos coeficientes do MQO que são invariantes a escala dos preditores, as estimativas de Ridge podem mudar substancialmente quando um dado preditor é alterado em escala, ou seja, os coeficientes dependem não só do valor λ mas também da escala das variáveis independentes. Para uma melhor qualidade de ajuste, deve ser feita uma padronização dos preditores, de acordo com a formulação a seguir (JAMES et al., 2013).

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}} \quad (6)$$

À medida que os valores de λ aumentam, as estimativas se distanciam das obtidas por MQO, e a um aumento no viés das estimativas e redução da sua variância. Esse ponto é chave para o método, pois através dele é possível encontrar um valor de λ que traga reduções significativas na variância sem ocasionar um viés que prejudique o modelo, fornecendo resultados mais robustos nas suas estimativas (JAMES et al., 2013).

2.4.3 Modelos lineares de efeitos mistos

Modelos de efeitos fixos, comumente ajustados através do método dos MQO são descritos como modelos de média populacional por apresentarem parâmetros de estrutura média interpretáveis como efeitos de covariáveis sobre o valor médio da variável dependente (GALECKI; BURZYKOWSKI, 2013).

Esses modelos consideram que todas as observações são independentes e aleatórias, suposição inválida para dados com hierarquia multinível, o que ocasiona inconsistências preditivas devido à falta de capacidade de equacionar as autocorrelações presentes (FU et al., 2017; GALECKI; BURZYKOWSKI, 2013).

Modelos de efeitos mistos são uma alternativa eficaz para incorporar as autocorrelações hierárquicas, gerando modelos de média populacional que captam as especificidades dos agrupamentos. Tais modelos consideram os efeitos fixos da população assim como os efeitos aleatórios presentes em cada agrupamento, resultando em ganhos significativos na qualidade preditiva (FU et al., 2017; ÖZÇELIK et al., 2018). Além disso, nos permite elucidar e quantificar de maneira efetiva a variação global da variável dependente em componentes correspondentes a cada nível hierárquico presente nos dados (GALECKI; BURZYKOWSKI, 2013).

Para um conjunto de dados hierárquicos com um único nível de agrupamento, a formulação do modelo linear de efeitos mistos clássico pode ser descrita como explicitado a seguir.

$$y_i = X_i\beta + Z_i b_i + \varepsilon_i \quad (7)$$

O termo y_i representa um vetor de variáveis resposta ou dependentes, X_i uma matriz de variáveis independentes ou preditoras e ε_i um vetor de erros residuais, os quais são comuns aos modelos lineares de efeito fixo. Os termos adicionais à metodologia de efeitos fixos são Z_i , correspondente a uma matriz de covariáveis e b_i definido como um vetor que representa os efeitos aleatórios (GALECKI; BURZYKOWSKI, 2013).

2.4.4 Modelagem de nicho de ocorrência de espécies

Pesquisas ecológicas de longa duração são importantes para o entendimento dos ecossistemas. Dentre outras variáveis, dados de presença e ausência de espécies são obtidos, os quais podem ser modelados via classificadores, buscando prever locais potenciais para ocorrência. Modelos estatísticos consistentes podem trazer avanços significativos na identificação e mensuração dos fatores que influenciam a ocorrência de espécies (EKSTRÖM et al., 2018).

Segundo Soberón e Peterson (2005), existem quatro fatores principais que condicionam a distribuição espacial de espécies, os fatores abióticos, representados pelas condições ambientais, os fatores bióticos, representados pelas interações intra e interespecíficas, fatores de acessibilidade, relacionados a capacidade de dispersão, e fatores evolucionários, relacionados a plasticidade fenotípica da espécie em resposta a alterações nos fatores anteriores.

Dentre os fatores elucidados, os correspondentes as condições ambientais tem grande potencial para modelagem do nicho ecológico, devido à relativa facilidade de obtenção e mensuração, frente aos demais. Modelos de nicho ecológicos que tem como entrada fatores ambientais predizem locais potenciais para ocorrência e desenvolvimento de espécies, podendo não corresponder exatamente com locais de ocorrência observada (SOBERÓN; PETERSON, 2005).

Esta metodologia é essencial para desenvolvimento de estratégias de recuperação e manejo florestal, tanto no momento presente, quanto em cenários futuros, com alterações potenciais na distribuição geográfica frente às mudanças climáticas. Permite criar modelos de reflorestamento e manejo adaptativos, fornecendo informações para seleção de espécies que se adequem as características de cada sítio, dando eficiência a reflorestamentos e programas de manejo, principalmente em áreas de elevada biodiversidade (CARVALHO et al., 2017; COELHO; CARVALHO; GOMIDE, 2016; WANG et al., 2016).

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

BRASIL. Lei n.º 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis n.ºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis n.ºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória n.º 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União, Brasília**, DF, 25 de mai. 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm>. Acesso em: 14 fev. 2019.

BRASIL. **Projeto “apoio a estratégias nacionais de redução do desmatamento e dos incêndios florestais no cerrado brasileiro”**. 1. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2014.

CARVALHO, M. C. et al. Modeling Ecological Niche of Tree Species in Brazilian Tropical Area. **Cerne**, Lavras, v. 23, n. 2, p. 229–240, 2017.

CHANG, Y. et al. Predicting fire occurrence patterns with logistic regression in Heilongjiang Province, China. **Landscape Ecology**, Dordrecht, v. 28, n. 10, p. 1989–2004, 2013.

COELHO, G. L. N.; CARVALHO, L. M. T. DE; GOMIDE, E. L. R. Modelagem preditiva de distribuição de espécies pioneiras no estado de minas gerais. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 3, p. 207–214, 2016.

DELALIBERA, H. C. et al. Alocação de reserva legal em propriedades rurais: do cartesiano ao holístico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, João Pessoa, v. 12, n. 3, p. 286–292, 2008.

EKSTRÖM, M. et al. Logistic regression for clustered data from environmental monitoring programs. **Ecological Informatics**, Amsterdam, v. 43, p. 165–173, 2018.

FU, L. et al. A generalized nonlinear mixed-effects height to crown base model for Mongolian oak in northeast China. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 384, p. 34–43, 2017.

GALECKI, A.; BURZYKOWSKI, T. **Linear Mixed-Effects Models Using R: A Step-by-Step Approach**. 1. ed. New York: Springer, 2013. 542 p.

GOMES, D.; MARTINELLI, D. M. C. O código florestal e o uso da propriedade rural na perspectiva da (in)constitucionalidade da reserva legal. **Cadernos de Direito**, Piracicaba, v. 12, n. 23, p. 215–233, 2012.

GRISCOM, B. W. et al. Natural climate solutions. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 114, n. 44, p. 11645–11650, 2017.

IPCC. Summary for Policymakers. In: Masson-Delmotte et al (Orgs.). **Global warming of 1.5°C**. Geneva: World Meteorological Organization, 2018. 32 p.

JAMES, G. et al. **An Introduction to Statistical Learning**: with Applications in R. 1. ed. New York: Springer, 2013. 426 p.

LAUDARES, S. S. A.; SILVA, K. G.; BORGES, L. A. C. Cadastro Ambiental Rural: uma análise da nova ferramenta para regularização ambiental no Brasil. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 31, p. 111–122, 2014.

LE QUÉRÉ, C. et al. Global Carbon Budget 2015. **Earth System Science Data**, Gottingen, v. 7, n. 2, p. 349–396, 2018.

MILLER, R. L et al. CMIP5 historical simulations (1850–2012) with GISSModelE2 Ron. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, Washington, v. 6., n. 2, p. 441–478, 2014.

MORA, C. et al. Broad threat to humanity from cumulative climate hazards intensified by greenhouse gas emissions. **Nature Climate Change**, London, v. 8, p. 1062–1071, 2018.

MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, London, v. 403, p. 853–858, 2000.

NORDHAUS, W. D. Revisiting the social cost of carbon. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 114, n. 7, p. 1518–1523, 2017.

ONU. **World population prospects: The 2017 Revision – Volume II: Demographic profiles**. New York: United Nations, 2017. 883 p. (Serie ST/ESA/SER.A/400).

ÖZÇELİK, R. et al. Predicting tree height from tree diameter and dominant height using mixed-effects and quantile regression models for two species in Turkey. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 419–420, p. 240–248, 2018.

ROBIOU DU PONT, Y.; MEINSHAUSEN, M. Warming assessment of the bottom-up Paris Agreement emissions pledges. **Nature Communications**, London, v. 9, n. 1, p. 4810, 2018.

SCOLFORO, H. F. et al. Spatial distribution of aboveground carbon stock of the arboreal vegetation in Brazilian Biomes of Savanna, Atlantic Forest and Semi-arid woodland. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 10, n. 6, p. 1–20, 2015.

SCOLFORO, H. F. et al. Spatial interpolators for improving the mapping of carbon stock of the arboreal vegetation in Brazilian biomes of Atlantic forest and Savanna. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 376, p. 24–35, 2016.

SCOLFORO, H. F. et al. Incorporating rainfall data to better plan eucalyptus clones deployment in eastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 391, p. 145–153, 2017.

SOBERÓN, J.; PETERSON, A. T. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. **Biodiversity Informatics**, Lawrence, v. 2, p. 1–10, 2005.

UNFCCC. **Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015**. 2016. Disponível em: <<https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a03.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2019.

WANG, T. et al. 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**, Amsterdam, v. 360, p. 357–366, 2016.

SEGUNDA PARTE - ARTIGO

ESTRATÉGIA DE MAXIMIZAÇÃO DO SEQUESTRO DE CARBONO NA SAVANA BRASILEIRA

Norma NBR 6022 (ABNT 2003)

1 INTRODUÇÃO

Pesquisas desenvolvidas pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), modelando mudanças climáticas e seus fatores preponderantes, indicam que o aumento do teor de gases de efeito estufa de longa duração (GEE), como o dióxido de carbono (CO₂), foi o principal causador de mudanças climáticas no século XX, trazendo consequências como degelo polar, alteração de regimes pluviométricos, aumento da temperatura média global, aumento do nível do mar entre outros, causando sérias implicações negativas para a ecologia global (MILLER, 2014).

Nas últimas décadas foi observado um constante acréscimo nas emissões de GEE, principalmente com aumento do uso de combustíveis fósseis (LE QUÉRÉ et al., 2018). Segundo Mora et al. (2018), esse constante acréscimo dos GEE provocará drásticos problemas humanitários, relacionados a saúde, disponibilidade de água potável, de alimento, problemas econômicos, além de problemas de segurança relacionados a maior incidência de desastres ambientais. Por outro lado, o Acordo de Paris, firmado por 195 países através da *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), estabeleceu metas de redução de emissões de GEE, buscando mitigar tais efeitos negativos, e tendo como objetivo a manutenção do aquecimento abaixo dos 2 °C acima dos níveis pré-industriais (ROBIOU DU PONT; MEINSHAUSEN, 2018). Postulado ainda que as partes envolvidas devem fomentar medidas de redução de emissões por desmatamento e degradação florestal, fortalecendo o papel da conservação e do manejo sustentável de florestas, incrementando estoques de carbono em países em desenvolvimento (UNFCCC, 2016).

O alcance das metas carece, no entanto, de estabelecer programas de sequestro de carbono em larga escala. O reflorestamento para fins de conservação é uma alternativa eficaz (GRISCOM et al., 2017). Dentre os domínios vegetacionais brasileiros, o dos Cerrados é estratégico para sua implementação. Processos antrópicos já degradaram aproximadamente 40% de sua área original e estima-se que até 2050 ocorra um aumento de 13,5%, resultando

em uma média de 40.000 km² (equivalente ao território da Suíça) de desmatamentos a cada década (FERREIRA et al., 2013).

O mesmo está localizado na parte central do país, sendo o segundo maior em extensão territorial, perdendo apenas para o domínio Amazônico (SCOLFORO et al., 2015). Atua como ligação entre quase todos os biomas brasileiros, criando zonas ecotonais de alta complexidade e biodiversidade, com elevado grau de endemismo, sendo considerado um *hotspot* de biodiversidade mundial (BRASIL, 2014; MYERS et al., 2000). Representa cerca de 14% da produção hídrica nacional, o que lhe confere elevada significância estratégica (LIMA; SILVA, 2005). No estado de Minas Gerais, possui predomínio em extensão territorial, e forma zonas de transição com os domínios Atlântico e das Caatingas, abrangendo 57% da área do estado (SCOLFORO et al., 2015).

Após a aprovação da nova legislação ambiental brasileira (BRASIL, 2012) áreas de passivo ambiental foram definidas, assim como os prazos para o cumprimento de suas diretrizes. Antes de sua implementação, o cumprimento das métricas conservacionistas não era satisfatório, pois os mecanismos anteriores não contemplavam conceitos cruciais para medidas de conservação e planejamento territorial (DELALIBERA et al., 2008), com pontos críticos no tocante a implementação prática de processos de regulamentação e fiscalização de crimes ambientais relacionados a supressão florestal (GOMES; MARTINELLI, 2012).

O Brasil reduziu em área suas florestas entre 2010 e 2015 mais que o dobro da média mundial, mesmo apresentando uma constante redução na taxa de redução desde 1990. O ligeiro acréscimo de volumetria citado para América do Sul é contrastante a situação do Brasil, que mantém constante decréscimo desde 1990. Quanto ao estoque de carbono acima do solo o Brasil vem de uma série histórica de decréscimos desde 1990, não tendo apresentado balanço positivo desde os inícios das estimativas (FAO, 2016).

Com o intuito de dar eficiência na aplicação e fiscalização das políticas de conservação ambiental, através do Novo Código Florestal (BRASIL, 2012), foi criado o Cadastro Ambiental Rural (CAR), projeto pioneiro que busca construir uma base de dados estratégica, desburocratizada e constantemente atualizada, eficiente no controle, fiscalização e monitoramento de supressões vegetais ilegais (LAUDARES; SILVA; BORGES, 2014).

Tal mecanismo foi implementado via sensoriamento remoto, através de um cadastro eletrônico obrigatório para todos os imóveis rurais, com a finalidade de delimitar as classes de uso da terra, quantificar suas proporções e assim estabelecer diretrizes para adequação das propriedades rurais à legislação (LAUDARES; SILVA; BORGES, 2014).

As áreas de passivo ambiental, quando recuperadas, atuarão no sequestro de carbono significativamente, e otimizar os métodos de regeneração é fundamental para viabilizar e dar eficiência. Para que isso ocorra de maneira satisfatória é necessário identificar espécies de rápido crescimento com foco em programas de reflorestamento de áreas degradadas (SCOLFORO et al., 2017b), assim como locais potenciais de ocorrência das mesmas (CARVALHO et al., 2017; COELHO; CARVALHO; GOMIDE, 2016; WANG et al., 2016).

Há quadros problemáticos referentes a tal método focado na otimização do sequestro de carbono, como a falta de embasamento técnico para seleção de espécies adequadas a cada etapa em cada local e o mau desenvolvimento inicial ou até mesmo o insucesso dos projetos, demandando excessivos tratos silviculturais iniciais, como controle de plantas invasoras e replantios (ALVINO-RAYOL; ROSA; RAYOL, 2011). Modelos estatísticos consistentes, aplicados aos dados de pesquisas de larga escala, podem trazer avanços significativos na compreensão da dinâmica de nossos ecossistemas e na identificação e mensuração de fatores que influenciam a ocorrência de espécies (EKSTRÖM et al., 2018; WANG et al., 2016). Torna-se então necessário o empenho científico para que sejam desenvolvidos métodos mais eficazes, alocando corretamente cada espécie em cada etapa, reduzindo custos de manutenção e replantio (ALVINO-RAYOL; ROSA; RAYOL, 2011; REZENDE et al., 2018). Há ainda muitas lacunas à serem preenchidas para no entendimento da distribuição e do sequestro de carbono em macro escala (SCOLFORO et al., 2015).

Buscando contribuir com a temática, este estudo objetivou identificar espécies nativas do domínio dos Cerrados, em Minas Gerais, que apresentem rápido crescimento, nichos ecológicos potenciais para sua implantação, quantidade potencial de estoque de carbono para plantios monoespecíficos com fins de ocupação e estabilização de áreas de passivo ambiental. O estudo buscou desenvolver uma sequência de modelos e método que podem ser largamente aplicados no Brasil para maximizar o sequestro de carbono no curto prazo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização de área de estudo

Minas Gerais é o segundo estado mais populoso do Brasil, com 21 milhões de habitantes e densidade demográfica de 33,41 habitantes/km². É o quarto maior em extensão territorial, superando em área a soma de Inglaterra, Portugal e Suíça (CIA, 2019). Em termos econômicos apresenta elevada relevância nacional, com PIB na ordem de 175,7 bilhões de

dólares (9,3% do PIB do Brasil) (SCOLFORO et al., 2015), valor superior ao PIB do Uruguai (49,9 bilhões de dólares) em mais de três vezes para o mesmo período (WB, 2019).

Pela análise climática é possível perceber que as florestas dos Cerrados em Minas Gerais estão distribuídas em regiões que apresentam um gradiente negativo para precipitação e positivo para temperatura no sentido sul-norte (SCOLFORO et al., 2016) (Figura 01). Nas áreas do domínio dos Cerrados as temperaturas médias anuais variam de 14 °C a 26 °C, a precipitação média anual varia entre 700 mm a 1600 mm e a altitude varia de 300 m a 1200 m acima do nível do mar, com alguns locais pontuais superando o limite superior de altitude. Quanto à classificação de Köppen, os climas presentes são Cwa (clima temperado úmido com inverno seco e verão quente), Cwb (clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado), Aw (clima tropical com estação seca de inverno) e As (clima tropical com estação seca de verão) (ALVARES et al., 2013).

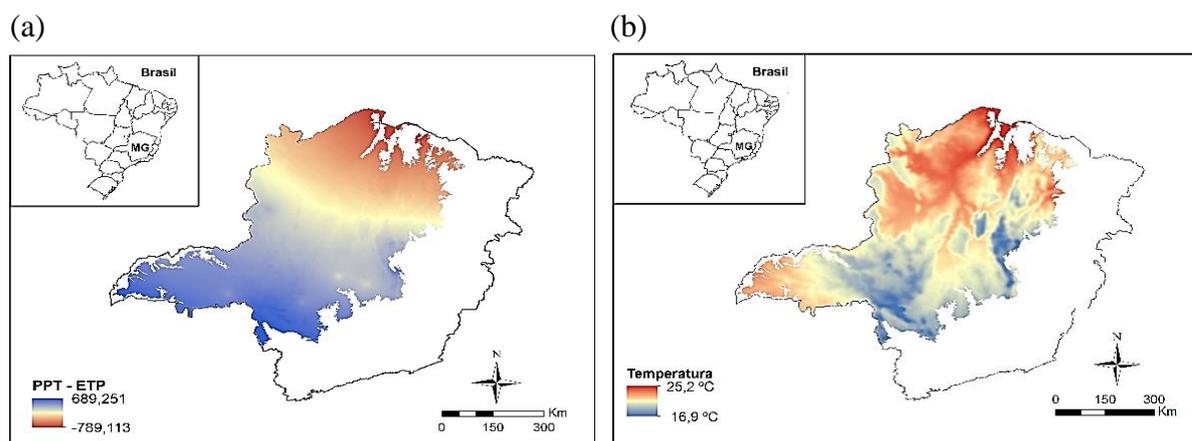


Figura 1 – Gradiente ambiental no domínio dos Cerrados no estado de Minas Gerais, Brasil. (a): PPT – ETP e (b) Temperatura.

Quanto aos solos das fitofisionomias, Campo Cerrado apresenta maiores teores de matéria orgânica e argila, em comparado a Cerradão e Cerrado sensu stricto, porém Cerradão apresenta os maiores valores de fertilidade e menor pH, já Cerrado sensu stricto apresenta características intermediárias entre Campo Cerrado e Cerradão (SKORUPA et al., 2012).

2.2 Caracterização da base de dados de inventário florestal

Os dados advêm de 22 fragmentos florestais (Campo Cerrado, Cerrado Sensu Stricto e Cerradão), amostrados no projeto Inventário Florestal de Minas Gerais (IFMG) (UFLA) e inseridos no domínio vegetacional dos Cerrados (Figura 1). O IFMG foi concebido com

intuito de mapear a flora nativa e dos reflorestamentos no estado de Minas Gerais, buscando dados qualitativos e quantitativos, como lista de espécies da flora nativa, volumetria, carbono e caracterização dos reflorestamentos. Informações em macro escala permitem gerar diretrizes para instrumentos de política, planejamento e gestão florestal em diversos âmbitos do setor público (OLIVEIRA FILHO et al., 2006). Os pormenores do processo amostral foram descritos por Scolforo et al. (2008a) e a distribuição das áreas está contida na Figura 2.

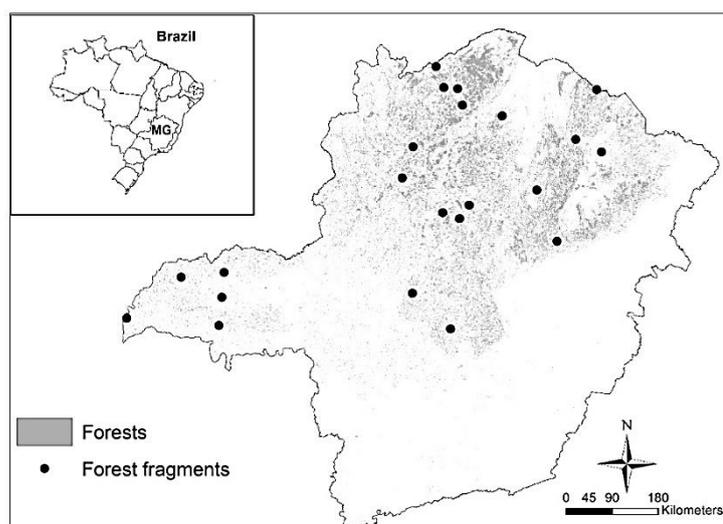


Figura 2 – Distribuição dos fragmentos do domínio dos Cerrados amostrados no projeto IFMG.

A amostragem foi realizada em um design de múltiplos estágios. No primeiro estágio, foram selecionados os fragmentos, distribuídos em todas as bacias hidrográficas do domínio dos Cerrados em MG. A área dos fragmentos variou de 56 ha a 1.479 ha, com média de 407 ha, com níveis de sucessão florestal variados, desde recentemente regenerados a fragmentos em estágio clímax. No segundo estágio, clusters (unidades primárias de amostragem) foram sistematicamente distribuídos dentro de cada um dos fragmentos, sendo a quantidade de clusters variada em função do tamanho dos fragmentos (SCOLFORO et al., 2017b). Em cada cluster foram mensuradas 3 unidades amostrais (unidades secundárias de amostragem) com área de 250 m², separadas por 25 m de distância, todas devidamente georreferenciadas. As 561 parcelas permanentes, distribuídas nos 22 fragmentos, foram mensuradas no ano de 2003 e remeidas no ano de 2010.

O diâmetro a 1,30 m acima do solo (DAP) e altura total (Ht) de todas as árvores que se enquadraram no critério de inclusão (DAP \geq 5 cm) foram mensurados na medição (2003) e remedição (2010). Todas as árvores receberam identificação própria, com plaquetas metálicas na altura do DAP, para controle do processo de inventário florestal contínuo e para controle

do crescimento individual de cada árvore e espécie arbórea. Para fins de identificação da espécie arbórea, exsicatas foram coletadas nas medições e remedições, e essas exsicatas foram identificadas por especialistas em botânica.

Amostragem destrutiva foi realizada entre os anos de 2005 a 2008, sendo um total de 222 árvores, das espécies *Astronium fraxinifolium* Schott ex Spreng., *Machaerium opacum* Vogel, *Qualea grandiflora* Mart. e *Qualea parviflora* Mart., distribuídas nos Cerrados em diferentes classes de DAP selecionadas para cubagem. O processo de cubagem se deu com a medição e marcação do DAP antes do abate da árvore, seu georeferenciamento, e posteriormente ao abate, medição da altura total com fita métrica e cubagem através do método de Huber, seguindo procedimentos descritos por Scolforo et al. (2015).

Adicionalmente, discos nas seguintes posições em relação à altura total: 0%, 25%, 50%, 75% e 100% foram coletados para cada árvore cubada. Esses discos coletados permitiram a quantificação do percentual de carbono em cada árvore cubada. O percentual de carbono foi calculado através do teor de matéria seca das diferentes seções amostradas. Os métodos para análises de teor de carbono foram combustão completa, redução, separação cromatográfica e utilização de um detector de condutividade térmica para detectar produtos (SCOLFORO et al., 2008b).

2.3 Caracterização da base de dados de ambiental

Para este estudo, utilizaram-se informações de precipitação média anual, evapotranspiração potencial média anual, temperatura média anual, temperatura dos três meses mais frios (Bio10), temperatura dos três meses mais quentes (Bio11), precipitação dos três meses mais secos (Bio16) e precipitação dos três meses mais chuvosos (Bio17). Os dados climáticos anuais médios de precipitação, evapotranspiração e temperatura são provenientes de 65 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pertencem as normais climatológicas de 1981-2010 (INMET, 2018).

Da base de dados WorldClim 2.3 (HIJMANS et al., 2005), com resolução espacial de um quilômetro, foram extraídos dados médios da temperatura dos três meses mais quentes, temperatura dos três meses mais frios, precipitação dos três meses mais chuvosos e precipitação dos três meses mais secos.

2.4 Modelagem do potencial de sequestro de carbono

A quantificação do sequestro de carbono maximizado nos cerrados de Minas Gerais se deu conforme os passos descritos na Figura 3.

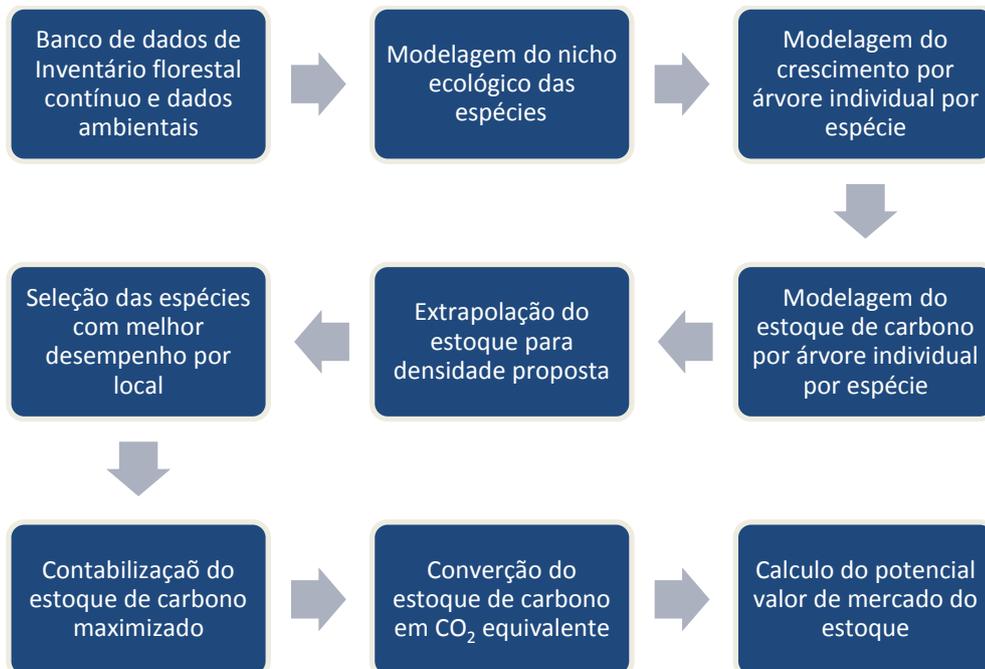


Figura 3 – Fluxograma para maximização do sequestro de carbono.

2.4.1 Nicho ecológico das espécies arbóreas

2.4.1.1 Seleção das espécies candidatas

Espécies foram selecionadas de forma a coibir qualquer viés de estimativa, assumindo que as espécies selecionadas são abundantes, são bem representadas espacialmente e cubram uma ampla faixa de tamanho (baseado em distribuição diamétrica), portanto foram selecionadas espécies de elevada plasticidade fenotípica. Sendo assim, os critérios de seleção de espécies foram: abundância maior ou igual 500 indivíduos por fragmento; ocorrência em mais de 6 fragmentos; ocorrência em ampla faixa de classes diamétricas. Ao final, quatro espécies foram selecionadas para avaliação do potencial de fixação de carbono nos cerrados brasileiros, sendo elas: (1) *Astronium fraxinifolium* Schott ex Spreng; (2) *Machaerium opacum* Vogel; (3) *Qualea grandiflora* Mart.; e (4) *Qualea parviflora* Mart.

A espécie *A. fraxinifolium*, popularmente conhecida por gonçalo, categorizada ecofisiologicamente como secundária inicial, apresenta hábito arbóreo, com porte de até

15 metros de altura, ocorre em Minas Gerais nos domínios Atlântico, dos Cerrados e das Caatinga com estado de conservação dito abundante. *M. opacul*, popularmente conhecida como jacarandá-cascudo, categorizada ecofisiologicamente como pioneira, apresenta hábito arbóreo, com porte de até 15 metros de altura, ocorre em Minas Gerais nos domínios Atlântico, dos Cerrados e das Caatingas com estado de conservação dito frequente (OLIVEIRA FILHO et al., 2008a). *Q. grandiflora*, conhecida popularmente como pau-terrão, apresenta hábito arvoreta, com porte de até 3 metros de altura, ocorre em Minas Gerais nos domínios Atlântico e dos Cerrados, com estado de conservação dito muito raro (OLIVEIRA FILHO et al., 2008b). *Q. parviflora*, popularmente conhecida por pau-terra, categorizada ecofisiologicamente como pioneira, apresenta hábito arbóreo, com porte de até 8 metros de altura, ocorre em Minas Gerais no domínio dos Cerrados com estado de conservação dito ocasional (OLIVEIRA FILHO et al., 2008c).

2.4.1.2 Seleção das espécies candidatas

A determinação probabilística de ocorrência de espécies foi feita através do classificador Regressão Logística ajustada pelo método de Regressão Ridge, modelando a probabilidade de presença ou ausência através da penalização dos parâmetros. A modelagem foi baseada no gradiente ambiental presente (CARVALHO et al., 2017), resultando em uma classificação lógica quanto aos fatores climáticos e com correspondência biológica as restrições de hábitat de cada espécie.

Embora o ajuste dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) forneça estimativas sem viés, seus coeficientes apresentam uma variância elevada quando seus preditores possuem colinearidade, necessitando de medidas para redução da variabilidade dos parâmetros para obtenção de ganhos na precisão das estimativas (SCOLFORO et al., 2017a). O uso da modelagem Ridge objetivou a obtenção de modelos com maior qualidade de ajuste, com correspondência biológica entre os coeficientes de cada variável climática e as respostas das espécies as mesmas, o que seria impossível de se obter através dos MQO devido à alta colinearidade entre as variáveis climáticas. Probabilidades acima de 50% foram consideradas presença, e probabilidades abaixo ausência.

O modelo de nicho ecológico foi ajustado na seguinte formulação ao nível de fragmento.

$$presença = f((PPT - ETP), Temp, X, Y, Altitude, Bio10, Bio11, Bio16, Bio17) \quad (1)$$

A variável presença representa a probabilidade de ocorrência da espécie, PPT representa precipitação média anual em mm, ETP a evapotranspiração anual em mm, Temp a temperatura média anual em graus Celsius, X a longitude, Y a latitude, a temperatura média dos três meses mais frios (Bio10), a temperatura média dos três meses mais quentes (Bio11), a precipitação média dos três meses mais secos (Bio16) e a precipitação média dos três meses mais chuvosos (Bio17). Para o modelo de nicho ecológico, foi utilizada toda a base histórica das variáveis ambientais, buscando caracterizar de maneira ampla o comportamento climático regional para embasar o ajuste da distribuição potencial das espécies. O pacote glmnet (FRIEDMAN; HASTIE; TIBSHIRANI, 2010) contido em R Development Core Team (R CORE TEAM, 2018) foi utilizado para ajuste do modelo de nicho ecológico.

2.4.2 Projeção do crescimento individual das espécies

2.4.2.1 Pareamento do banco de inventário com variável ambiental

Uma combinação de variáveis que descreve de maneira eficiente o filtro ambiental imposto pelo gradiente climático hídrico ao crescimento das espécies, visto haver uma carência de variáveis mais complexas nesse sentido e que sejam pareadas temporalmente e espacialmente aos dados do inventário florestal, é dada pela precipitação média anual (PPT) subtraída dos valores de evapotranspiração média anual (ETP). Assim é possível fazer inferências sobre a demanda da atmosfera por água, fator impactante no crescimento (SCOLFORO et al., 2019). Com essa combinação é possível inferir se cada local apresenta excedente hídrico, quando o sinal da combinação das variáveis é positivo, e o solo atinge sua capacidade máxima de retenção de água, ou déficit hídrico, quando o sinal da combinação é negativo e o solo não atinge sua capacidade máxima de retenção de água.

Os dados da combinação das variáveis são temporalmente alinhados aos dados obtidos na medição e remedição dos inventários florestais, obtidos especificamente entre os períodos das mesmas. Um alinhamento tanto espacial quanto temporal é fundamental para avaliar o impacto climático sobre o crescimento florestal. Portanto, para o ajuste dos modelos de crescimento florestal, as variáveis climáticas utilizadas compreendem apenas o período da medição e remedição, extraídas do bando de dados climático histórico citado anteriormente, compreendendo apenas os períodos das amostragens do inventário florestal contínuo para modelar crescimento floresta.

2.4.2.2 Estratégia de modelagem

Foi ajustado um modelo linear de efeitos mistos, seguindo o trabalho de Scolforo et al. (2017b), para predição do acréscimo em diâmetro das quatro espécies em função do intervalo de tempo, condições climáticas e densidade inicial, tendo como efeito aleatório a espécie e o componente aleatório inserido em todos os coeficientes para representar os distintos padrões de crescimento de cada espécie, definido por:

$$\ln(dap_2 - dap_1) = (\beta_0 + \alpha_0) + (\beta_1 + \alpha_1)\Delta t + \beta_2 N_1 + (\beta_3 + \alpha_3)(PPT - ETP) \quad (2)$$

O termo dap_1 se refere ao dap em t_1 , dap_2 ao dap em t_2 , ambos em centímetros, $\Delta t = t_2 - t_1$, N_1 a densidade de indivíduos por hectare, β_i ao conjunto de parâmetros ajustados referentes aos efeitos fixos, α_i ao conjunto de parâmetros ajustados referentes aos efeitos aleatórios (espécies) e as demais foram definidas anteriormente.

O modelo foi construído com base na lógica biológica das espécies florestais, assumindo que o desenvolvimento da variável dependente se dá de maneira distinta em locais com diferentes densidades de indivíduos e características de sítio. Devido a inexistência de informações de classificação de sítio para florestas nativas tropicais, a utilização de variáveis climáticas para representação de macro sítios é uma alternativa viável.

Para os Cerrados a variável PPT sozinha não é satisfatória para caracterizar macro sítios, pois considera apenas a quantidade de chuva em um dado período de tempo. A composição PPT – ETP representa a pressão vertical da atmosfera, traduzindo de maneira mais eficiente o filtro ambiental pelo déficit hídrico, refletindo a demanda da atmosfera por água, a qual é mais impactante no crescimento das árvores do que a quantidade de chuvas por si só (SCOLFORO et al., 2019). Assim, com o rearranjo do modelo de crescimento, podemos expressar um diâmetro em um tempo futuro a partir de uma equação agora de projeção, como descrito a seguir, sendo este o modelo ajustado para o trabalho.

$$\ln(dap_2) = dap_1 + \exp((\beta_0 + \alpha_0) + (\beta_1 + \alpha_1)\Delta t + \beta_2 N_1 + (\beta_3 + \alpha_3)(PPT - ETP)) \quad (3)$$

Seguindo o mesmo conceito quanto definição do componente aleatório, porém o inserindo apenas no intercepto, foi proposto um modelo para estimar a altura dos indivíduos através de seu diâmetro e de variáveis ambientais, descrito por

$$\ln(Ht) = (\beta_0 + \alpha_0) + \beta_1 \frac{1}{dap} + \beta_2(PPT - ETP) \quad (4)$$

em que Ht representa a altura total em metros e as demais variáveis seguem definições anteriores. Finalmente, para calcular o estoque de carbono por indivíduo, foi ajustado o modelo a seguir, o qual segue o modelo de Schumacher e Hall (1933) transformado em logaritmo natural, com o efeito aleatório referente a espécie e inserido em todos os coeficientes do modelo:

$$\ln(C) = (\beta_0 + \alpha_0) + (\beta_1 + \alpha_1) \ln(dap) + (\beta_2 + \alpha_2) \ln(Ht) \quad (5)$$

onde C é referente ao estoque de carbono (MgC), as demais variáveis seguem definições anteriores. Para o ajuste dos modelos de dap, Ht e C foi utilizado o pacote nlme (PINHEIRO; DEBROY; TEAM, 2018), contido em R Development Core Team (R CORE TEAM, 2018). As especificidades sobre modelos lineares de efeitos mistos em Galecki e Burzykowski (2013).

2.4.2.3 Qualidade dos ajustes

Técnicas de simulação de *bootstrapping* não paramétrico foram utilizadas para validação dos modelos. Um total de 1000 simulações foram executadas e utilizadas em cada um dos modelos ajustados para inferir quanto as suas qualidades. Tal processo se faz necessário, pois a qualidade dos ajustes nem sempre reflete a qualidade das predições (KOZAK; KOZAK, 2003).

A regressão Ridge logística foi validada a partir do uso da estatística “Area Under the Curve” (SAVELAND; NEUENSCHWANDER, 1990), enquanto para os demais modelos foram calculadas as estatísticas de erro médio absoluto (EMA), erro médio (EM) e raiz quadrada o erro médio quadrático (REMQU):

$$EMA (\%) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \right)}{n} \right) 100 \quad (6)$$

$$EM (\%) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)}{n} \right) 100 \quad (7)$$

$$REMQ (\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}} \quad (8)$$

O termo n é dado pelo número de observações, y_i pelo valor observado, \hat{y}_i pelo valor estimado e p pelo o número de parâmetros do modelo. As estatísticas EMA e REMQ mais próximas de zero indicam melhor ajuste. A estatística EM próxima de zero indica estimativas menos tendenciosas.

2.4.3 Mapeamento do sequestro de carbono

No estado de Minas Gerais, para o domínio dos Cerrados, há aproximadamente 1779,7 km² de passivo ambiental causados por supressões ambientais ilegais entre os anos de 2008 e 2011, e como alternativa para tal tem-se a regeneração artificial, via plantio de mudas. Essa informação estratégica proveniente da base de dados do Cadastro Ambiental Rural é fundamental para criação de diretrizes para o enquadramento ambiental em macro escala perante a legislação vigente, contribuindo para uma melhoria da qualidade ambiental do domínio dos Cerrados no estado.

A Figura 4 traz a distribuição do passivo ambiental descrito, referente a desmatamentos entre os anos de 2008 e 2011. Foi calculado o percentual de desmatamento por município frente ao desmatamento global do estado para o domínio dos Cerrados. Como é difícil explicitar pontualmente fragmentos, foi dado um enfoque nos municípios componentes do domínio dos Cerrados no estado, criando um mapa normalizado da área de passivo por município.

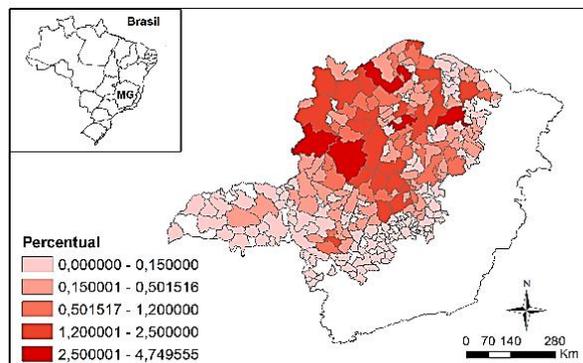


Figura 4 – Percentual de área desmatada por município frente ao total de desmatamento observado para o domínio dos Cerrados em Minas Gerais, Brasil, entre 2008 e 2011.

Os dados de passivo ambiental foram utilizados para formulação de um cenário de recuperação para os próximos nove anos, onde foram aplicados os modelos descritos anteriormente para determinar as diretrizes do programa de recuperação.

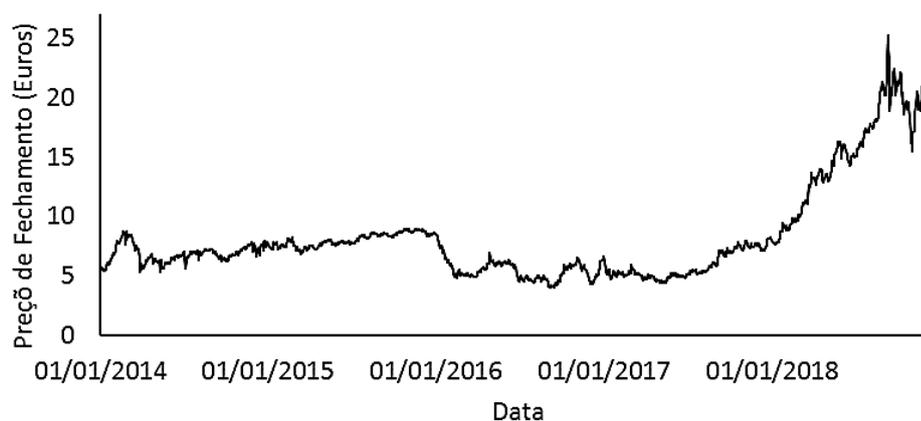
Após a predição do estoque potencial de carbono de cada espécie para cada local de passivo ambiental, foram selecionadas as espécies com maiores valores preditos, criando um cenário de maximização de sequestro pixel a pixel, onde cada pixel, de área equivalente à área das unidades amostrais, foi ocupado pela espécie que apresentou melhor desempenho. Esse processo resulta em um mapa de planejamento de plantio, fragmentado em sítios específicos com a dimensão do pixel utilizado, classificados de acordo com as condições climáticas locais.

2.4.4 Mapeamento do sequestro de conversão do estoque de carbono em CO₂ equivalente e obtenção da cotação dos contratos futuros de crédito de carbono

Para conversão de valores absolutos de carbono em CO₂ equivalente, devemos considerar a massa atômica do carbono e do oxigênio. A massa molar de CO₂ equivale a 44 g.mol⁻¹, a qual dividida pela massa molar do carbono, que equivale a 12 g.mol⁻¹, remete a proporção de 3,66 g.mol⁻¹ de CO₂ equivalente para cada 1 g.mol⁻¹ de C.

Na Bolsa de Valores de Londres, a cotação é referente a 1 Megagrama de CO₂ equivalente, e cada contrato futuro é referente a 1000 Megagrama de CO₂. Os dados de cotações são provenientes do site Investing.com. A Figura 5 traz as informações sobre dados diários do ativo.

(a)



(b)

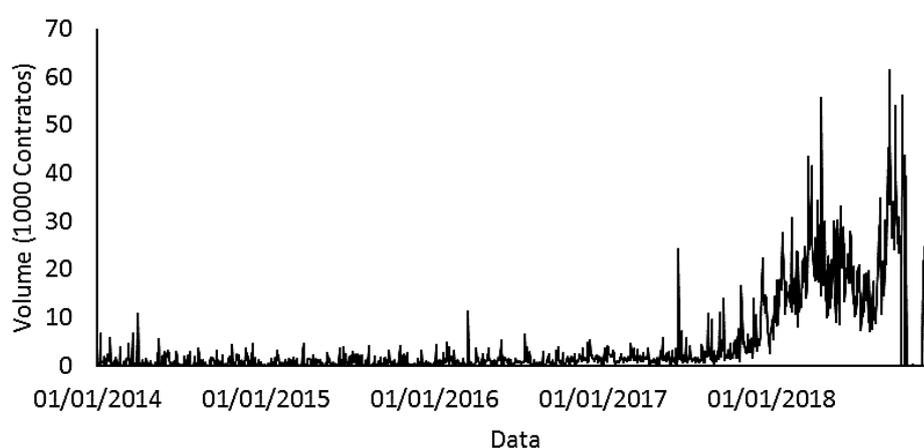


Figura 5 – Série histórica do Crédito de Carbono na Bolsa de Valores de Londres. (a) Preço de Fechamento e (b) Volume de Negociações.

É perceptível uma clara tendência de alta do ativo no período em questão, assim como um aumento expressivo no volume de contratos negociados ao longo do tempo. Para o período foi observado um retorno médio diário de 0,16%, um desvio padrão dos retornos de 3,13%, maior variação positiva de 19,43% e maior variação negativa de -17,65%. O ativo em constante valorização e com expressivo aumento de liquidez se torna cada vez mais interessante para negociações.

2.4.5 Resumo do fluxo de cálculo

Resumidamente, o fluxo de cálculo pode ser desenvolvido a partir das seguintes etapas:

- Aplica-se o modelo de nicho ecológico, obtendo locais onde as espécies selecionadas têm potencial para serem implantadas em programas de reflorestamento
- Estima-se os diâmetros assim como alturas esperados em um programa de reflorestamento, com as dadas condições iniciais: dap_1 igual a 0,1 cm, densidade inicial (N/ha) igual a 1000, tempo de projeção de nove anos.
- Utilizam-se as estimativas de DAP e Ht de cada uma das espécies para estimativa do estoque de carbono de árvore individual. Tendo essa estimativa para todas as zonas de ocorrência de cada espécie e sabendo que densidades de plantio propostas são de 1000 árvores/ha, converte-se estoque de carbono individual para estoque de carbono ao nível de hectare (Mg/ha).
- Posteriormente feita a maximização do processo, onde foram intercaladas as espécies, selecionando as que apresentaram melhores desempenhos em cada local, obtendo um panorama maximizado de sequestro de carbono para as espécies descritas nas áreas de passivo ambiental.
- O estoque potencial de carbono é convertido em CO_2 equivalente para cálculo do valor potencial de mercado das áreas de reflorestamento, lastreado em contratos futuros de Crédito de Carbono na bolsa de valores de Londres. Finalmente dada a serie historica, torna-se possível avaliar os valores mínimos, médio e máximos do valor monetário gerado pela maximização do sequestro de carbono nas áreas com passivo ambiental.

3 RESULTADOS

3.1 Modelo de nicho ecológico

Por meio do ajuste do modelo de nicho ecológico, foram obtidos os parâmetros para cada uma das quatro espécies, descritos na Tabela 1, onde o nível de acurácia do ajuste para cada uma das espécies foi superior a 70% (ou seja, $AUC \geq 70\%$).

Os sinais dos parâmetros do modelo apresentaram coerência com o comportamento real da ocorrência dos indivíduos presentes na amostra, explicitando a correspondência biológica obtida entre o modelo e o comportamento de nicho de macro sítio das espécies. Isso nos permite inferir que a colinearidade das variáveis ambientais não foi um fator que trouxe prejuízos preditivos, obtendo um modelo com êxito em suas estimativas.

Tabela 1 – Coeficientes ajustados pela equação Ridge logística para as espécies do estudo.

Coeficientes	<i>A. fraxinifolium</i>	<i>M. opacum</i>	<i>Q. grandiflora</i>	<i>Q. parviflora</i>
Intercepto	1.52E-01	1.41E+00	1.28E+00	3.68E-01
PPT - ETP	3.37E-03	-1.20E-02	-8.44E-03	1.03E-02
Temp	-6.42E-08	3.61E-08	3.52E-08	8.15E-08
X	-5.32E-08	2.04E-09	4.27E-08	1.33E-07
Y	-1.04E-04	7.95E-05	2.30E-05	3.47E-05
Altitude	3.11E-05	-1.11E-05	-2.54E-05	-7.10E-05
Bio10	1.62E-02	-9.63E-03	-5.22E-03	-4.87E-03
Bio11	1.32E-02	-7.33E-03	-4.94E-03	-1.58E-03
Bio16	1.68E-04	-1.91E-05	-1.06E-04	2.94E-05
Bio17	1.91E-08	-6.76E-04	-3.83E-04	2.09E-03

Com as equações obtidas, foram preditos os locais em que as condições climáticas avaliadas propiciem a ocorrência natural de cada espécie, e consequentemente elucidando quais áreas apresentam potencial para implantação de programas de regeneração artificial com as mesmas. A Figura 06 traz os locais de ocorrências preditos pelos modelos respectivamente para *A. fraxinifolium*, *M. opacum*, *Q. grandiflora* e *Q. parviflora* dentro do cerrado de MG.

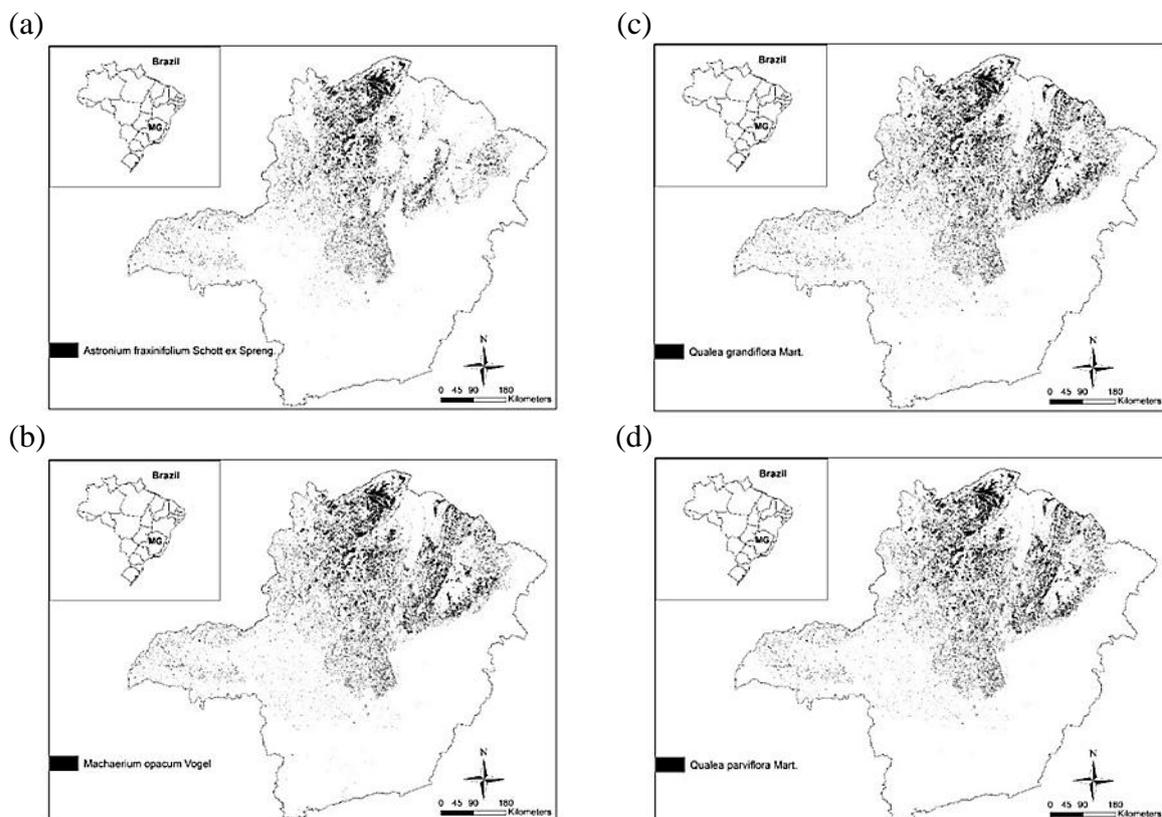


Figura 6 – Locais potenciais de ocorrência das espécies no domínio dos Cerrados em Minas Gerais, Brasil. (a) *A. fraxinifolium*, (b) *M. opacum*, (c) *Q. grandiflora*, e (d) *Q. parviflora*.

3.2 Modelagem de crescimento florestal

Para os modelos de projeção diamétrica, modelo de altura e modelo de carbono, todos os parâmetros estimados foram estatisticamente significativos ($p < 0.05$) e com sinais apropriados. Para cada uma dessas equações, os parâmetros ajustados são descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Coeficientes fixos e aleatórios para cada espécie.

Modelo	Parâmetro	<i>A. fraxinifolium</i>	<i>M. opacum</i>	<i>Q. grandiflora</i>	<i>Q. parviflora</i>
dap	Intercepto	-2.22*	-1.21*	-1.83*	-1.36*
	Δt	0.54*	0.32*	0.45*	0.35*
	N1	-0.00035*	-0.00035*	-0.00035*	-0.00035*
	PPT - ETP	0.86*	0.09*	0.56*	0.2*
Ht	Intercepto	2.41*	2.23*	2.06*	2.17*
	1/dap	-5.83*	-5.83*	-5.83*	-5.83*
	PPT - ETP	0.40*	0.40*	0.40*	0.40*
C	Intercepto	-11.35*	-11.35*	-11.35*	-11.35*
	ln(dap)	2.39*	2.39*	2.39*	2.39*
	ln(ht)	0.61*	0.61*	0.61*	0.61*

As estatísticas de qualidade dos ajustes são apresentadas na Tabela 3. Os valores percentuais de erro foram satisfatórios para todos os modelos, apesar de haver para todas as espécies uma ligeira tendência de superestimava para a variável dap e carbono, enquanto mesmo comportamento não foi detectado para variável altura.

Tabela 3 – Estatísticas de qualidade de ajuste.

Modelo	Estatísticas	<i>A. fraxinifolium</i>	<i>M. opacum</i>	<i>Q. grandiflora</i>	<i>Q. parviflora</i>
dap	EM(%)	-7.69	-7.24	-6.71	-6.94
	EMA(%)	7.69	7.24	6.71	6.95
	REMQ(%)	0.81	0.78	0.81	0.79
Ht	EM(%)	0.23	-0.23	1.95	-0.95
	EMA(%)	1.04	7.58	1.21	8.48
	REMQ(%)	0.97	0.43	0.65	0.64
C	EM(%)	-5.03	-5.03	-5.03	-5.03
	EMA(%)	25.26	25.26	25.26	25.26
	REMQ(%)	0.07	0.07	0.07	0.07

Para o modelo de dap, o sinal positivo em relação ao parâmetro tempo indica consistência do ajuste, o sinal negativo em relação ao parâmetro de densidade (N1) indica consistência em relação aos efeitos da competição nos povoamentos, onde uma maior densidade reduz a relação per capita de recursos. Já em relação ao parâmetro PPT – ETP, o sinal positivo elucida a correspondência biológica em relação ao comportamento de indivíduos arbóreos frente a déficits hídricos. O modelo de Ht também apresenta correspondência com a lógica esperada, apresentando um sinal negativo para o coeficiente do inverso do dap, onde indivíduos com maior diâmetro apresentarão maiores alturas. O parâmetro PPT – ETP também respeitou a lógica biológica esperada, onde fisiologicamente é esperado que indivíduos em condições hídricas abundantes apresentam maior crescimento em altura. Por último, o modelo de predição de carbono seguir a mesma linha de correspondência, predizendo maiores valores para indivíduos de maior porte.

3.3 Otimização do sequestro de carbono

Para as espécies *A. fraxinifolium*, foram encontrados estoques variando entre 1,56 a 53,4 Mg/ha, para *M. opacum*, foram estimados estoques variando de 0,57 a 1,38 Mg/ha, para *Q. grandiflora* foram encontrados estoques variando de 0,87 a 18,16 Mg/ha e para *Q. parviflora* foram encontrados estoques variando de 0,69 a 2,54 Mg/ha. Os dados descritos estão representados na Figura 7.

Um gradiente de produtividade crescente do sentido Sul para Norte mostra uma correspondência biológica dos modelos com as condições climáticas do estado, apresentando relação positiva com o gradiente de precipitação presente.

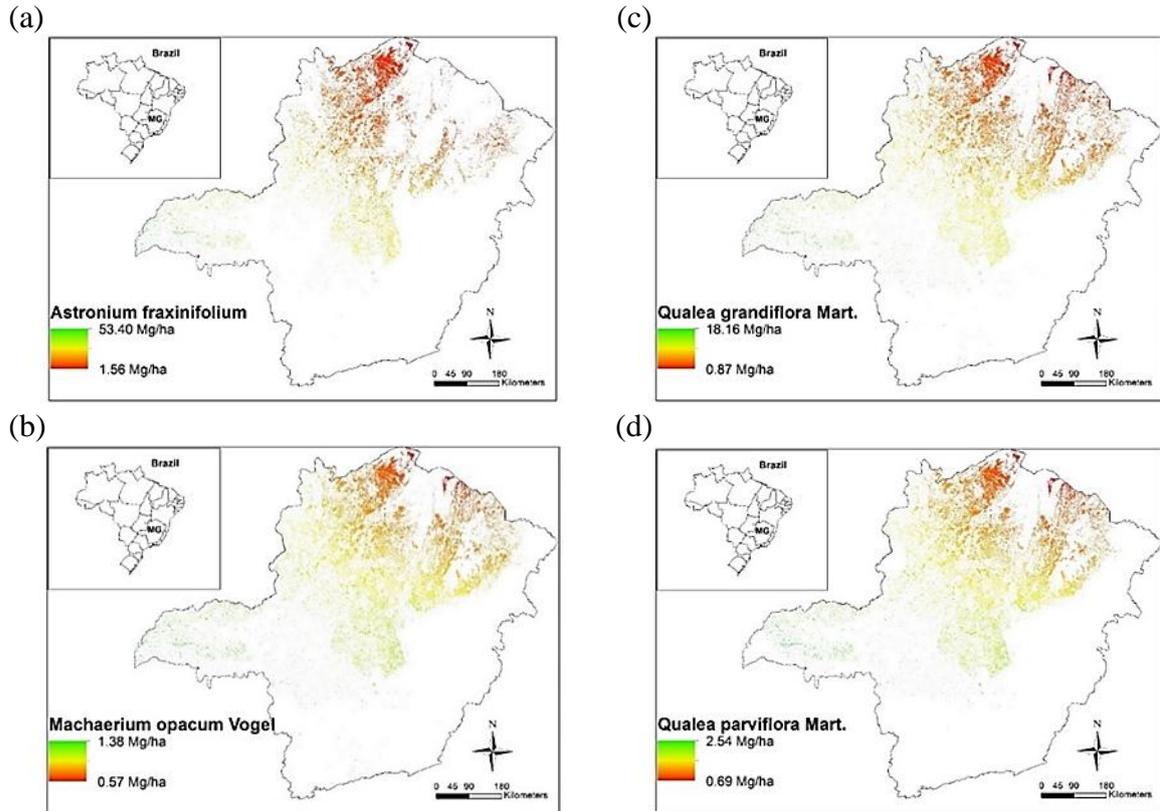


Figura 7 – Estoque de carbono estimado para o domínio dos Cerrados no estado de Minas Gerais, Brasil. (a) *A. fraxinifolium*, (b) *M. opacum*, (c) *Q. grandiflora*, e (d) *Q. parviflora*.

A partir dos dados pontuais de potencial de estoque de carbono por espécie, foi possível selecionar em quais locais cada espécie apresentava desempenho superior. Com base nesses resultados foi possível otimizar o sequestro de carbono para implantação de projetos de regeneração artificial com as espécies do estudo. A Figura 8 traz as áreas previstas de afinidade ecológica para cada espécie selecionada via otimização da capacidade de estoque de carbono.

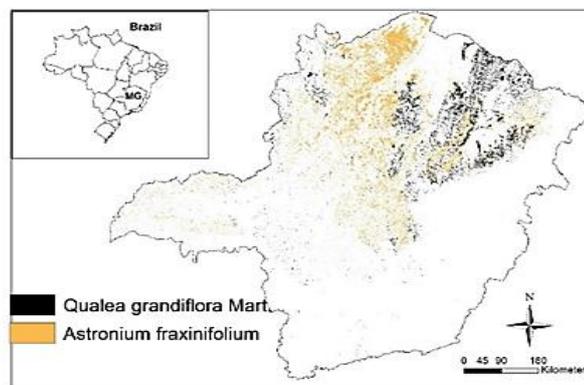


Figura 8 – Distribuição das espécies embasada na otimização de carbono no domínio dos Cerrados no estado de Minas Gerais, Brasil.

A Figura 9 traz o valor do estoque de carbono otimizado para cada local. A espécie *A. fraxinifolium* e *Q. grandiflora* apresentaram o maior potencial de crescimento. O total de passivo ambiental enquadrado na legislação para o domínio dos Cerrados no estado de Minas Gerais é da ordem de 1.779,7 km² (179.700 ha). Foi predito um potencial de estoque de 1.425.819 Mg de carbono em nove anos para tais áreas, apresentando uma média de 8,01 Mg/ha.

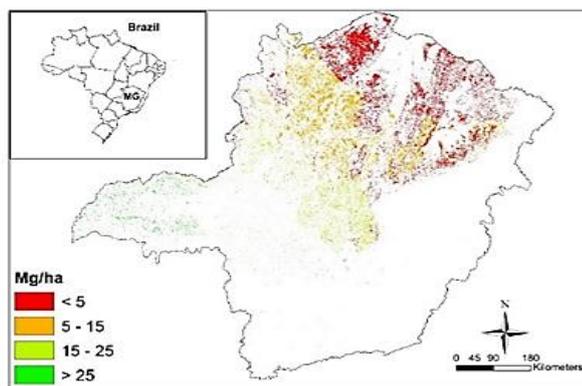


Figura 9 – Estoque de otimizado carbono no domínio dos Cerrados no estado de Minas Gerais, Brasil.

4 DISCUSSÃO

Este estudo objetivou identificar espécies nativas do domínio dos Cerrados, em Minas Gerais, que apresentem rápido crescimento, locais ótimos para sua implantação, e finalmente quantificar o potencial de sequestro de carbono para plantios em área de passivo ambiental do Cerrado em MG. Para as condições de povoamento descritas, a média estimada de 8,01 Mg/ha de carbono é satisfatória, demonstrando grande potencial para implantação de projetos de sequestro de carbono. Scolforo et al. (2016) estimou uma média de 12,40 Mg/ha para ambientes naturais existentes no domínio no estado de Minas Gerais, indicando que os plantios atingem proximidade aos estoques naturais em um curto espaço de tempo (9 anos).

Com o estoque de carbono total estimado de 1.425.819 Mg, é possível inferir um incremento médio anual de 158.424 Mg/ano, equivalente a 10% das emissões globais anuais por uso da terra e mudança no uso da terra, baseado na média entre 2008 e 2017 (LE QUÉRÉ et al., 2018). Ao fim do prazo analisado, é estimado um acréscimo de 1,5% do total do estoque de carbono no domínio dos Cerrados para o estado de Minas Gerais, baseado nas estimativas de Scolforo et al. (2015). O custo atual da emissão de uma tonelada de CO₂ ou seu equivalente, denominado custo social do carbono, é estimado em US\$ 31, corroborando a ideia de que o controle das emissões possui importância econômica (NORDHAUS, 2017).

Através do método proposto, baseado no custo social do carbono, é estimada uma economia de US\$ 44.200.389,00 com a mitigação de impactos negativos relativos aos problemas gerados pelos altos teores de GEE na atmosfera no prazo de nove anos.

No mercado de capitais, o crédito de carbono é negociado na forma de contratos futuros, e sua unidade padrão é denominada dióxido de carbono equivalente. O valor de 1.425.819 Mg de carbono convertidos a unidade negociada resultaria em 5.232.755 Mg de carbono equivalente, e dada a cotação atual (21/12/2018), de 25,25 EUR (euros), teria valor de mercado de aproximadamente 132.127.082 EUR. Assim, políticas públicas que fortaleçam o cenário de negociações de créditos de carbono podem ser mecanismos eficientes de incentivo e monetização dos processos. Há uma demanda na melhoria dos mecanismos de negociação no país, nos processos certificadores e na regulamentação do mercado. Deve haver uma interlocução menos burocrática e mais eficiente com os mecanismos certificadores internacionais.

A presença e o grau de passivo ambiental, assim como a capacidade de implementar ações de recuperação de áreas degradadas estão relacionadas de maneira inversa a condição socioeconômica local. Neste contexto, o pagamento por serviços ambientais também pode ser uma alternativa viável no tocante a essa questão, fomentando a economia local juntamente ao cumprimento das métricas de preservação (REZENDE et al., 2018).

A baixa compreensão da capacidade de estocagem de carbono de nossos ambientes naturais e das espécies nativas são fatores que atrasam tais processos. Modelos estatísticos consistentes, aplicados a dados de pesquisas de larga escala, podem trazer avanços significativos na compreensão da dinâmica de nossos ecossistemas e na identificação e mensuração de fatores que influenciam a ocorrência de espécies (EKSTRÖM et al., 2018).

A Regressão Logística apresenta bom desempenho neste sentido, com resultados satisfatórios na modelagem da influência causada pelas mudanças climáticas e regimes de manejo na ocorrência de espécies (EKSTRÖM et al., 2018). Resultados positivos também foram obtidos na previsão de incêndios florestais (BUI et al., 2016; CHANG et al., 2013) e em estudos da análise da dinâmica e cobertura florestal (KUMAR et al., 2014).

Os modelos de nicho ecológico e de projeção de DAP são dependentes do clima, ou seja, é possível ainda criar diferentes cenários, avaliando o comportamento frente a períodos de clima fora do comportamento médio (SCOLFORO et al., 2017b). Ainda é possível avaliar como diferentes densidades de povoamento influenciam no desenvolvimento das espécies, para cada condição climática.

Scolforo et al. (2017b) ressaltam o método de projeção diamétrica apresenta grande potencial para o estudo do desenvolvimento de espécies em ecossistemas tropicais, ambientes onde ainda não há dados de longo prazo e as espécies em geral não formam anéis de crescimento. Estudando o crescimento de espécies do domínio Atlântico também no estado de Minas Gerais, os autores conseguiram resultados satisfatórios, indicando espécies de rápido crescimento com potencial para programas de restauração e geração de bens e renda através do manejo florestal de uso múltiplo.

Uma elevada diversidade de espécies florestais e alto grau de endemismo fazem com que a probabilidade de se selecionar espécies que apresentem desenvolvimento insatisfatório em sítios locais seja acentuada, devido às complexidades inter e intraespecíficas. Com 1,5% do total de espécies vegetais global ocorrendo exclusivamente no domínio dos Cerrados e com uma riqueza aproximada de 10000 espécies (MYERS et al., 2000), a implementação de programas de regeneração artificial, principalmente em macro escala, carece de estudos para se obter uma eficiência adequada.

Obter parâmetros para seleção de espécies e planejar a produção de mudas em macro escala é uma das grandes potencialidades para aplicação da metodologia proposta neste trabalho. Pode ser usada para determinar um conjunto de espécies, de crescimento e área de abrangência otimizados, padronizando o processo de produção de mudas para implantação inicial em áreas de passivo ambiental para todo o domínio dos Cerrados no estado de Minas Gerais, contribuindo para alcançar o compromisso do Brasil de restauração frente ao Acordo de Paris e dando eficiência aos projetos de reflorestamento (BRASIL, 2015).

Os custos do reflorestamento poderão ser minimizados, por meio do fechamento de dossel antecipado, permitindo o controle de plantas competidoras (ALVINO-RAYOL; ROSA; RAYOL, 2011), com menor taxa de replantio de projetos malsucedidos, devido ao menor insucesso com estabelecimento de mudas, e na produção das mudas, com produção em escala de espécies direcionadas. Com um plantio inicial bem-sucedido, um enriquecimento posterior fica facilitado. O Brasil apresenta elevado potencial para implementação destes programas devido as suas condições climáticas e ampla extensão territorial. Tais projetos são classificados como soluções climáticas naturais, medidas de conservação, restauração e ações mais eficientes do uso da terra, as quais aumentam o estoque de carbono e/ou evitam emissões de GEE. É estimado que tais médias têm potencial para fornecer 37% da mitigação de CO₂ necessária para se obter uma probabilidade maior que 66% de se manter a temperatura global abaixo dos 2 °C acima dos níveis pré-industriais (GRISCOM et al., 2017).

São eficientes no sequestro de carbono e têm um custo benefício promissor, e aliadas às políticas públicas para redução das emissões de GEE, podem ser um componente estratégico para a mitigação do aquecimento global. Dentre tais medidas, os reflorestamentos se destacam por apresentar maior potencial para o sequestro de carbono (GRISCOM et al., 2017). A população mundial, estimada em 7,6 bilhões de pessoas no ano 2017, pode chegar a 11,2 bilhões de pessoas até 2100 (ONU, 2017). Tal perspectiva indica que o meio ambiente global terá que suportar uma pressão antrópica crescente. As emissões de GEE aumentaram em 50% desde a década de noventa e entre os anos 2000 e 2010 o aumento foi superior ao das três décadas anteriores, e em contraparte os estoques de carbono florestais do mundo veem sofrendo constantes reduções (FAO, 2016).

Estimativas indicam que as ações antrópicas tenham causado uma elevação de 1,0 °C em relação à média global pré-industrial, e entre os anos 2030 e 2052 este valor poderá atingir o patamar de 1,5 °C se mantida a taxa de aumento atual, equivalente a 1,5%/ano (IPCC, 2018; LE QUÉRÉ et al., 2018). Alinhar políticas públicas de recuperação de ecossistemas degradados ao sequestro de GEE, agregando valor econômico aos resultados pode ser o caminho para à mitigação do aquecimento global, abrindo espaço para um desenvolvimento sustentável. A monetização pode tornar tais iniciativas mais vantajosas e eficientes, além de contribuir para o incentivo de parcerias entre as iniciativas público e privadas, utilizando-se de ferramentas como esta metodologia para quantificar e planejar empreendimentos futuros.

5 CONCLUSÃO

- Modelos têm boa capacidade preditiva;
- Foi possível planejar o plantio de mudas para o domínio dos Cerrados, otimizando o sequestro de carbono;
- Foram encontradas espécies adequadas a sítios específicos;
- Fornece embasamento técnico para desenvolver medidas de monetização de bens ambientais;
- A metodologia tem potencial de contribuir para a mitigação do aquecimento global.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ALVINO-RAYOL, F. DE O.; ROSA, L. DOS S.; RAYOL, B. P. Efeito do espaçamento e do uso de leguminosas de cobertura no manejo de plantas invasoras em reflorestamento de *Schizolobium amazonicum* HUBER EX. DUCKE (PARICÁ). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 391–399, 2011.

BRASIL. Lei n.º 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis n.ºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis n.ºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória n.º 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União, Brasília**, DF, 25 de mai. 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm>. Acesso em: 14 fev. 2019.

BRASIL. **Projeto “apoio a estratégias nacionais de redução do desmatamento e dos incêndios florestais no cerrado brasileiro”**. 1. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2014.

BRASIL. **Nationally Determined Contribution towards Achieving the Objective of the United Nations Framework Convention on Climate Change**. 2015. Disponível em: <http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRAZIL-iNDC-english.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2019.

BUI, D. T. et al. Tropical Forest Fire Susceptibility Mapping at the Cat Ba National Park Area, Hai Phong City, Vietnam, Using GIS-Based Kernel Logistic Regression. **Remote Sensing**, Basel, v. 8, n. 4, p. 347, 2016.

CARVALHO, M. C. et al. Modeling Ecological Niche of Tree Species in Brazilian Tropical Area. **Cerne**, Lavras, v. 23, n. 2, p. 229–240, 2017.

CHANG, Y. et al. Predicting fire occurrence patterns with logistic regression in Heilongjiang Province, China. **Landscape Ecology**, Dordrecht, v. 28, n. 10, p. 1989–2004, 2013.

CIA – Central Intelligence Agency. **The World Factbook**. 2019. Disponível em: <<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2147rank.html>>. Acesso em: 19 mar. 2019.

COELHO, G. L. N.; CARVALHO, L. M. T. DE; GOMIDE, E. L. R. Modelagem preditiva de distribuição de espécies pioneiras no estado de minas gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 3, p. 207–214, 2016.

DELALIBERA, H. C. et al. Alocação de reserva legal em propriedades rurais: do cartesiano ao holístico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, João Pessoa, v. 12, n. 3, p. 286–292, 2008.

EKSTRÖM, M. et al. Logistic regression for clustered data from environmental monitoring programs. **Ecological Informatics**, Amsterdam, v. 43, p. 165–173, 2018.

FAO. **Global Forest Resources Assessment 2015**. 2. ed. Rome: FAO-ONU, 2016. 245 p.

FERREIRA, M. E. et al. Modeling landscape dynamics in the central Brazilian savanna biome: Future scenarios and perspectives for conservation. **Journal of Land Use Science**, London, v. 8, n. 4, p. 403–421, 2013.

FRIEDMAN, J.; HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R. Regularization Paths for Generalized Linear Models via Coordinate Descent. **Journal of Statistical Software**, Los Angeles, v. 33, n. 1, p. 1–22, 2010.

GALECKI, A.; BURZYKOWSKI, T. **Linear Mixed-Effects Models Using R: A Step-by-Step Approach**. 1. ed. New York: Springer, 2013. 542 p.

GOMES, D.; MARTINELLI, D. M. C. O código florestal e o uso da propriedade rural na perspectiva da (in)constitucionalidade da reserva legal. **Cadernos de Direito**, Piracicaba, v. 12, n. 23, p. 215–233, 2012.

GRISCOM, B. W. et al. Natural climate solutions. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 114, n. 44, p. 11645–11650, 2017.

HIJMANS, R. J. et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, Hoboken, v. 25, n. 15, p. 1965–1978, 2005.

INMET. **Normal Climatológica do Brasil 1981-2010**. Brasília: MAPA, 2018. 766 p.
Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>.
Acesso em: 24 mar. 2019.

IPCC. Summary for Policymakers. In: Masson-Delmotte et al (Orgs.). **Global warming of 1.5°C**. Geneva: World Meteorological Organization, 2018. 32 p.

KOZAK, A.; KOZAK, R. Does cross validation provide additional information in the evaluation of regression models? **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 33, n. 6, p. 976–987, 2003.

KUMAR, R. et al. Forest cover dynamics analysis and prediction modeling using logistic regression model. **Ecological Indicators**, Kiel, v. 45, p. 444–455, 2014.

LAUDARES, S. S. A.; SILVA, K. G.; BORGES, L. A. C. Cadastro Ambiental Rural: uma análise da nova ferramenta para regularização ambiental no Brasil. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 31, p. 111–122, 2014.

LE QUÉRÉ, C. et al. Global Carbon Budget 2015. **Earth System Science Data**, Gottingen, v. 7, n. 2, p. 349–396, 2018.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. Estimativa da produção hídrica superficial do Cerrado brasileiro. In: SCARLOT, A.; SOUSA-SILVA, J. C.; FELFILI, J. M. (Eds.). **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**. 1. ed. Brasília: MMA, 2005. p. 61–72.

MILLER, R. L et al. CMIP5 historical simulations (1850–2012) with GISSModelE2 Ron. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, Washington, v. 6., p. 441–478, 2014.

MORA, C. et al. Broad threat to humanity from cumulative climate hazards intensified by greenhouse gas emissions. **Nature Climate Change**, London, v. 8, p. 1062–1071, 2018.

MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, London, v. 403, p. 853–858, 2000.

NORDHAUS, W. D. Revisiting the social cost of carbon. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 114, n. 7, p. 1518–1523, 2017.

OLIVEIRA FILHO, A. T. DE et al. Definição e delimitação de domínios e subdomínios das paisagens naturais do estado de Minas Gerais. In: SCOLFORO, J. R. S.; CARVALHO, L. M. T. DE (Eds.). **Mapeamento e Inventário da Flora e dos Reflorestamentos de Minas Gerais**. 1. ed. Lavras: UFLA, 2006. p. 21–35.

OLIVEIRA FILHO, A. T. et al. Espécies de ocorrência do domínio atlântico, do cerrado e da caatinga. In: OLIVEIRA FILHO, A. T.; SCOLFORO, J. R. (Eds.). **Inventário Florestal de Minas Gerais: Espécies Arbóreas da Flora Nativa**. Lavras: UFLA, 2008a. p. 421–539.

OLIVEIRA FILHO, A. T. et al. Espécies de ocorrência do domínio atlântico e do cerrado. In: OLIVEIRA FILHO, A. T.; SCOLFORO, J. R. (Eds.). **Inventário Florestal de Minas Gerais: Espécies Arbóreas da Flora Nativa**. Lavras: UFLA, 2008b. p. 217–418.

OLIVEIRA FILHO, A. T. et al. Espécies de ocorrência exclusiva do domínio do cerrado. In: OLIVEIRA FILHO, A. T.; SCOLFORO, J. R. (Eds.). **Inventário Florestal de Minas Gerais: Espécies Arbóreas da Flora Nativa**. Lavras: UFLA, 2008c. p. 157–208.

ONU. **World population prospects: The 2017 Revision – Volume II: Demographic profiles**. New York: United Nations, 2017. 883 p. (Serie ST/ESA/SER.A/400).

PINHEIRO, J. B. D.; DEBROY, S. S. D.; TEAM, R. C. **nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models**. R package version 3.1-137. 2018. Disponível em: <<http://www.CRAN.R-project.org/package=nlme>>. Acesso em: 25 fev. 2018.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2018. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: 8 mar. 2019.

REZENDE, C. L. et al. From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 4, p. 208–214, 2018.

ROBIOU DU PONT, Y.; MEINSHAUSEN, M. Warming assessment of the bottom-up Paris Agreement emissions pledges. **Nature Communications**, London, v. 9, n. 1, p. 4810, 2018.

SAVELAND, J. M.; NEUENSCHWANDER, L. F. A Signal Detection Framework to Evaluate Models of Tree Mortality Following Fire Damage. **Forest Science**, Washington, v. 36, n. 1, p. 66–76, 1990.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 47, n. 9, p. 719–734, 1933.

SCOLFORO, H. F. et al. Spatial distribution of aboveground carbon stock of the arboreal vegetation in Brazilian Biomes of Savanna, Atlantic Forest and Semi-arid woodland. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 10, n. 6, p. 1–20, 2015.

SCOLFORO, H. F. et al. Spatial interpolators for improving the mapping of carbon stock of the arboreal vegetation in Brazilian biomes of Atlantic forest and Savanna. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 376, p. 24–35, 2016.

SCOLFORO, H. F. et al. Incorporating rainfall data to better plan eucalyptus clones deployment in eastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 391, p. 145–153, 2017a.

SCOLFORO, H. F. et al. A new model of tropical tree diameter growth rate and its application to identify fast-growing native tree species. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 400, p. 578–586, 2017b.

SCOLFORO, H. F. et al. Generalized stem taper and tree volume equations applied to eucalyptus of varying genetics in Brazil. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 49, n. 5, p. 447–462, 2019.

SCOLFORO, J. R. et al. Amostragem e caracterização dos fragmentos inventariados. In: SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. DE; OLIVEIRA, A. D. DE (Eds.). **Inventário Florestal de Minas Gerais: Cerrado - Florística, Estrutura, Similaridade, Distribuição Diamétrica e de Altura, Volumetria, Tendências de Crescimento e Áreas Aptas para Manejo Florestal**. 1. ed. Lavras: UFLA, 2008a. p. 1–76.

SCOLFORO, J. R. et al. Amostragem e coleta de dados para equações de volume, peso de matéria seca, tanino, cortiça, óleo, sistema radicular, conversão de volumes e carbono. In: SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D. DE; ACERBI JUNIOR, F. W. (Eds.). **Inventário Florestal de Minas Gerais: Equações de Volume, Peso de Matéria Seca e Carbono para Diferentes Fisiologias da Flora Nativa**. 1. ed. Lavras: UFLA, 2008b. p. 1–65.

SKORUPA, A. L. A. et al. Propriedades de Solos sob Vegetação Nativa em Minas Gerais : Distribuição por Fitofisionomia , Hidrografia e Variabilidade Espacial. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, n. 36, p. 11–22, 2012.

UNFCCC. **Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015**. 2016. Disponível em: <<https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a03.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2019.

WANG, T. et al. 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**, Amsterdam, v. 360, p. 357–366, 2016.

WB. **GPD (current US\$)**. 2019. Disponível em: <<https://data.worldbank.org/indicator/ny.gdp.mktp.cd>>. Acesso em: 19 mar. 2019.