



**FACULDADE DE TECNOLOGIA DO AMAPÁ - META
BACHAREL EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO**

VICTOR CRISTOVAN PIRES DA GAMA

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA AUXÍLIO NA IDENTIFICAÇÃO DE
ESPÉCIES FLORESTAIS ATRAVÉS DE PADRÕES ESPACIAIS EM IMAGENS**

**MACAPÁ - AP
2024**

VICTOR CRISTOVAN PIRES DA GAMA

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA AUXÍLIO NA IDENTIFICAÇÃO DE
ESPÉCIES FLORESTAIS ATRAVÉS DE PADRÕES ESPACIAIS EM IMAGENS**

Trabalho de Conclusão de Curso na Modalidade de Monografia apresentada a Faculdade de Tecnologia do Amapá - META, como requisito final à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação, sob a orientação do Prof. Me. Márcio Wendel de Lima Neri.

**MACAPÁ - AP
2024**

VICTOR CRISTOVAN PIRES DA GAMA

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA AUXÍLIO NA IDENTIFICAÇÃO DE
ESPÉCIES FLORESTAIS ATRAVÉS DE PADRÕES ESPACIAIS EM IMAGENS**

Trabalho de Conclusão de Curso na Modalidade de Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia do Amapá - META, como requisito final à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de computação.

DATA DE APROVAÇÃO: ____/____/____.

Prof. Me. Márcio Wendel de Lima Neri (Orientador)

Prof. XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX (Avaliador 1)

Profª. XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX (Avaliador 2)

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA AUXÍLIO IDENTIFICAÇÃO DE ESPÉCIES FLORESTAIS ATRAVÉS DE PADRÕES ESPACIAIS EM IMAGENS

Victor Cristovan Pires da Gama¹
Márcio Wendel de Lima Neri²
Rafael Lucas Figueiredo de Souza³

Resumo

A classificação e identificação das diferentes espécies florestais é fundamental para o manejo de madeiras na construção civil, industrialização, exportação e fiscalização. No entanto, o cenário é complicado pela limitação de recursos financeiros de órgãos governamentais e universidades, que não possuem orçamentos robustos para investir em infraestrutura computacional de alto custo. Assim, o desenvolvimento de um sistema que auxilie na identificação de espécies de madeira de forma eficiente, mas com requisitos computacionais reduzidos, seria de grande ajuda. Este estudo levanta a hipótese de que é possível auxiliar na classificação das espécies florestais a partir do software desenvolvido. O desenvolvimento da aplicação foi realizado utilizando o editor de código *Visual Studio Code* e a linguagem PHP, na versão 8.3. O *front-end* e o *back-end* foram implementados com o *framework* Laravel e o Livewire para componentes dinâmicos. O *script* responsável pelo cálculo do semivariograma foi escrito em Python, com bibliotecas específicas para processamento de imagens, geração de gráficos e cálculos. Os dados foram armazenados em um banco de dados MySQL, enquanto o controle de versão foi gerenciado com Git e o repositório hospedado no GitHub. O semivariograma geoestatístico foi eficiente em descrever a correlação espacial entre pixels em imagens escaneadas de alta resolução. O software mostrou potencial como ferramenta para analisar perfis radiais de madeira escaneada, extraindo informações relevantes sobre os parâmetros do semivariograma, sendo uma solução promissora para identificar espécies florestais.

Palavras-chave: Software, processamento de imagem, geoestatística, identificação.

¹ Acadêmico do Curso de Bacharelado em Engenharia de Computação da Faculdade de Tecnologia do Amapá - META; E-mail: victor.p.gama@gmail.com

² Orientador, Mestre em Educação Profissional e Tecnológica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá - IFAP, docente da Faculdade de Tecnologia do Amapá - META; E-mail: marcioneri@meta.edu.br

³ Coorientador, Doutor em Recursos florestais pela Universidade de São Paulo - USP; E-mail: rafaelflorestal55@gmail.com

SOFTWARE DEVELOPMENT TO ASSIST IN THE IDENTIFICATION OF FOREST SPECIES THROUGH SPATIAL PATTERNS IN IMAGES

Victor Cristovan Pires da Gama¹
Márcio Wendel de Lima Neri²
Rafael Lucas Figueiredo de Souza³

Abstract

The classification and identification of different forest species are crucial for wood management in construction, industrialization, export, and inspection. However, the scenario is complicated by the limited financial resources of government agencies and universities, which do not have robust budgets to invest in high-cost computational infrastructure. Therefore, the development of a system that efficiently aids in identifying wood species with reduced computational requirements would be highly beneficial. This study raises the hypothesis that it is possible to assist in the classification of forest species through the developed software. The application development was carried out using the Visual Studio Code editor and the PHP programming language, version 8.3. The front-end and back-end were implemented with the Laravel framework and Livewire for dynamic components. The script responsible for calculating the semivariogram was written in Python, utilizing specific libraries for image processing, graph generation, and calculations. Data were stored in a MySQL database, while version control was managed with Git, and the repository was hosted on GitHub. The geostatistical semivariogram efficiently described the spatial correlation between pixels in high-resolution scanned images. The software demonstrated potential as a tool for analyzing radial profiles of scanned wood, extracting relevant information about the semivariogram parameters, and serving as a promising solution for identifying forest species.

Keywords: Software, image processing, geostatistics, identification.

¹ Academic in the Bachelor's Degree in Computer Engineering at the Faculty of Technology of Amapá - META; Email: victor.p.gama@gmail.com

² Advisor, Master in Professional and Technological Education from the Federal Institute of Education, Science, and Technology of Amapá (IFAP), faculty member at the Amapá College of Technology - META; Email: marcioneri@meta.edu.br

³ Co-advisor, PhD in Forest Resources from the University of São Paulo - USP; Email: rafaelflorestal55@gmail.com

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
2.1 Desenvolvimento de software.....	10
2.2 Metodologia ágil	10
2.3 Git.....	10
2.4 Github.....	11
2.5 MySQL	11
2.6 Php.....	11
2.7 Laravel.....	11
2.8 Livewire.....	11
2.9 Bootstrap.....	12
2.10 Python.....	12
2.11 NumPy.....	12
2.12 Matplotlib	12
2.13 Scikit-Image.....	12
2.14 Scikit-Gstat	13
2.15 SciPy.....	13
2.16 Geoestatística	13
2.17 Cálculo do semivariograma	14
2.18 Detecção de alterações em imagens usando o contexto espacial.....	15
2.19 Processamento de imagem.....	16
3 MATERIAL E MÉTODO.....	16
3.1 Banco de dados das imagens utilizadas.....	16
3.2 Hardware	18
3.3 Ferramentas e Configurações de Desenvolvimento.....	18
3.4 Processo de desenvolvimento	18
3.5 Processamento de imagem.....	19
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	21
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
REFERÊNCIAS	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fórmula do semivariograma.....	14
Figura 2 - Imagens escaneadas de quatro espécies florestais.	17
Figura 3 - Reunião para acompanhar e refinar a evolução do sistema	19
Figura 4 - Diagrama de caso de uso.....	20
Figura 5 - Imagem escaneada da Macacaúba após a conversão para cinza	21
Figura 6 - Tela de registro de usuário	22
Figura 7 - Tela de login do usuário	23
Figura 8 - Tela do módulo de Imagens	24
Figura 9 - Tela de upload de imagem	24
Figura 10 - Tela de upload de imagem com pré-visualização.....	25
Figura 11 - Tela do módulo de Gráficos	25
Figura 12 - Exemplo de gráfico baixado através do software	26
Figura 13 - Tela do módulo de Perfil do usuário.....	26
Figura 14 - Tela da funcionalidade de recuperar senha	27
Figura 15 - Semivariogramas geoestatísticos extraídos de imagens escaneadas	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros extraídos do semivariograma geoestatístico.	29
--	----

1 INTRODUÇÃO

A classificação e identificação das diferentes espécies florestais é fundamental para o correto manejo de madeiras na construção civil, madeireiras, industrialização, exportação, órgãos fiscalizadores, entre outros. Tal classificação possibilita a identificação da comercialização de espécies ameaçadas de extinção e fraudes nas transações envolvendo madeiras (Mohan; Venkatachalapathy; Rai, 2014).

Geralmente, a identificação das espécies de madeira é feita por meio da análise dos padrões da textura da superfície. No entanto, esse processo manual é demorado, ineficiente e pouco viável em termos de custo, especialmente ao precisar analisar um grande número de amostras. Por isso, torna-se essencial o desenvolvimento de um sistema confiável para classificar as espécies de madeira (Rajagopal *et al.*, 2019).

A identificação automática de espécies pode elevar significativamente a eficácia e a automação dos sistemas de processamento de madeira. Os avanços recentes no campo do processamento de imagem tornam essa automação viável e eficiente. No entanto, essa solução exige um alto custo computacional e recursos técnicos avançados, tornando o investimento significativo e a implementação desafiadora em termos financeiros e técnicos (Wu *et al.*, 2021).

A pesquisa em processamento de imagens busca algoritmos que reduzem ruído sem perder detalhes essenciais. Algoritmos eficientes visam otimizar o consumo de recursos computacionais, garantindo desempenho ágil e rápido. Isso é fundamental em dispositivos com recursos limitados e em cenários em tempo real, facilitando sua implementação em sistemas com restrições de hardware (Kasauka *et al.*, 2014).

Sistemas de Visão Computacional têm o potencial de resolver problemas complexos, como o reconhecimento de imagens, de maneira semelhante ao funcionamento da visão humana. Desde a década de 1980, essas técnicas têm sido aplicadas na indústria madeireira, ajudando a identificar defeitos em troncos e otimizar cortes (Pedrini; Schwartz, 2008). No entanto, surge a necessidade de sistemas que reconheçam automaticamente espécies florestais apenas a partir de imagens das madeiras.

O cenário é complicado pela limitação de recursos financeiros dos órgãos governamentais, como o IBAMA, Polícia Federal e das universidades, pois não possuem orçamentos robustos para investir em infraestrutura computacional de alto custo. Logo, seria de grande ajuda o desenvolvimento de um sistema que auxilie na identificação das espécies de madeira de forma eficiente, mas com requisitos computacionais limitados. O sistema permitiria

análises rápidas e precisas, facilitando a fiscalização e pesquisa, sem comprometer os recursos financeiros e técnicos disponíveis.

Mediante o contexto apresentado, o estudo levanta a hipótese de que é possível auxiliar na classificação das espécies florestais a partir do software desenvolvido, e capaz de extrair padrões relevantes através da classificação de uma imagem escaneada da madeira pela análise do semivariograma.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Desenvolvimento de software

Desenvolvimento de software é o processo de tomada de um conjunto de requisitos de um usuário, analisá-los, projetar uma solução, e então implementá-la em um computador. O desenvolvimento de software é um estreitamento do foco da engenharia de software no que diz respeito à criação do software real. E é uma ampliação do foco da programação que inclui questões de análise, projeto e implantação funcional (Dooley, 2011).

O processo de desenvolvimento de software geralmente é encarado como um projeto com início, meio e fim, e é caracterizado por uma sequência clara e lógica de eventos e atividades que precisam ser planejados e, durante sua execução, precisam ser controlados. Projetos de desenvolvimento de software surgem em resposta a uma necessidade ou uma oportunidade de negócio, e acontecem dentro de parâmetros predefinidos de tempo, custo, e escopo (Cortés, 2013).

2.2 Metodologia ágil

As metodologias ágeis são abordagens de desenvolvimento que visam entregar software de forma incremental e satisfazer o cliente, utilizando equipes pequenas. O Manifesto Ágil, criado em 2001, enfatiza valores como a importância das pessoas, a entrega de software funcional, a colaboração com o cliente e a flexibilidade para mudanças. MVP (*Minimum Viable Product*) ou Produto Mínimo Viável, é uma estratégia ágil que cria a versão mais básica e funcional de um produto, em que o objetivo é testar a viabilidade e a aceitação junto aos clientes. Logo é o produto com apenas os recursos indispensáveis para resolver o problema central do cliente e oferecer valor (Camargo; Gallengel, 2024).

2.3 Git

Git é um sistema de controle de versões distribuído gratuito e de código aberto, usado principalmente no desenvolvimento de software, mas pode ser usado para registrar o histórico

de edições de qualquer tipo de arquivo, projetado para lidar com tudo, desde projetos pequenos a muito grandes, com velocidade e eficiência, fácil de aprender e ocupa pouco espaço com desempenho extremamente rápido (Git, 2024).

2.4 Github

GitHub é uma plataforma de hospedagem de código-fonte e arquivos com controle de versão usando o Git. Ele permite que programadores, utilitários ou qualquer usuário cadastrado na plataforma contribuam em projetos privados ou Open Source de qualquer lugar do mundo (Github, 2024).

2.5 MySQL

MySQL é um banco de dados relacional de código popular com desempenho comprovado, confiabilidade e facilidade de uso, se tornou a principal escolha de banco de dados para aplicativos baseados na web pois garante aplicações de todos os tamanhos com sua escalabilidade e flexibilidade. Oferece suporte robusto a transações, consultas SQL complexas e integridade referencial, garantindo a confiabilidade e a consistência dos dados (MySQL, 2024).

2.6 Php

O PHP (Hypertext Preprocessor) é uma linguagem de *script* popular de propósito geral que é especialmente adequada e muito utilizada para desenvolvimento web. Criada em 1994 por Rasmus Lerdorf, o PHP se tornou um dos pilares da web moderna, sendo responsável por sites dinâmicos e sistemas robustos em todo o mundo. Com o *framework* Laravel, o PHP ganha ainda mais robustez e elegância no desenvolvimento de aplicações web (Php, 2024).

2.7 Laravel

Laravel se tornou um dos *frameworks* mais populares e amplamente utilizados para o desenvolvimento de aplicações PHP, possui sintaxe expressiva e elegante, baseado no padrão MVC (Model-View-Controller) e incorpora recursos essenciais como ORM, roteamento, validação, testes automatizados e práticas de segurança (Laravel, 2024).

2.8 Livewire

Livewire é um *framework full-stack* para o Laravel que facilita o desenvolvimento de aplicações dinâmicas e interativas, sem a necessidade de usar *frameworks* JavaScript pesados

para desenvolver, permitindo criar componentes dinâmicos e reativos diretamente no backend (PHP), com uma integração automática e eficiente com o *front-end*, facilitando a interação em tempo real entre o servidor e o cliente (Livewire, 2024).

2.9 Bootstrap

Bootstrap é um *framework front-end* de código aberto amplamente utilizado para o desenvolvimento de interfaces web responsivas e modernas com um kit de ferramentas poderoso, extensível e repleto de recursos que simplificam a criação de layouts resultando na redução de tempo de desenvolvimento (Bootstrap, 2024).

2.10 Python

Python é uma linguagem de programação usada com sucesso em milhares de aplicativos de negócios do mundo real em todo o mundo, incluindo muitos sistemas grandes e de missão crítica, desenvolvido sob uma licença de código aberto, livremente utilizável é distribuível mesmo para uso comercial, possui diversos pacotes e é fácil para aprender, quer seja um programador iniciante ou tenha experiência com outras linguagens (Python, 2024).

2.11 NumPy

NumPy é um projeto de código aberto desenvolvido abertamente no GitHub com ajuda da comunidade científica que permite computação numérica com Python. Foi criado em 2005 com base no trabalho inicial das bibliotecas Numeric e Numarray. Fornece suporte robusto para arrays multidimensionais, operações matemáticas e funções estatísticas de alto desempenho (Numpy, 2024).

2.12 Matplotlib

Matplotlib é uma biblioteca abrangente para criar visualizações estáticas, animadas e interativas em Python. Possui suporte para gráficos 2D e várias opções de personalização, é ideal para a representação de dados científicos e análises visuais (Matplotlib, 2024).

2.13 Scikit-Image

Scikit-Image é uma coleção de algoritmos para processamento de imagens voltada para o processamento e análise de imagens científicas em Python. Ele oferece algoritmos eficientes e fáceis de usar para filtragem, segmentação, morfologia e transformações geométricas (Scikit-Image, 2024).

2.14 Scikit-Gstat

O SciKit-Gstat é um módulo de análise no estilo scipy focada em análises espaciais e estatísticas geoespaciais para análise com Python. Ela implementa diversas técnicas de análise, como variogramas e métodos estatísticos para modelagem de dados geográficos (Scikit-Gstat, 2024).

2.15 SciPy

O SciPy é uma biblioteca robusta para cálculos científicos em Python, fornece algoritmos para otimização, integração, interpolação, problemas de autovalor, equações algébricas, equações diferenciais, estatísticas e muitas outras classes de problemas (SciPy, 2024).

2.16 Geoestatística

No início dos anos 60, na França, G. Matheron abonou o tratamento formal de estimadores clássicos, pelo nome de Geoestatística, para seu estudo das chamadas variáveis regionalizadas, ou seja, variáveis com condicionamento espacial (Clark, 1979).

Conforme a Teoria das variáveis regionalizadas, cada dado é modelado como uma variável aleatória, que pode ser expressa pela soma de três componentes: componente estrutural associado a um valor médio constante ou a uma tendência; um componente aleatório espacialmente estruturado e um erro aleatório (Clark, 1979).

Utilizando métodos geoestatísticos, é possível extrair da distribuição dos dados da variável regionalizada, uma imagem da sua variabilidade e uma medida da correlação existente entre os valores tomados em pontos distintos no espaço. Esse método é conhecido como análise da estrutura espacial dos dados. A geoestatística possibilita também o estudo da estrutura de dependência espacial utilizando, dentre outros, os métodos analíticos como o da máxima verossimilhança e o bayesiano (Diggle; Ribeiro Jr., 2001).

Conforme Isaaks e Srivastava (1989), o semivariograma é o método geoestatístico utilizado para diagnosticar a presença da correlação espacial entre as unidades amostradas. Para caracterizar a estrutura de continuidade espacial, pelo semivariograma, deve-se considerar que a variância das diferenças entre dois pontos amostrais, depende apenas da distância que separa os pontos (hipótese intrínseca), sendo a mesma para toda a área avaliada (estacionaridade) (Vieira, 2000; Journel; Huijbregts, 2003; Mello *et al.*, 2005).

2.17 Cálculo do semivariograma

O semivariograma, definido como o gráfico da função semivariância *versus* a distância h , é uma técnica usada para medir a dependência entre pontos amostrais, distribuídos segundo um sistema espacial de referência e para a interpolação de valores necessários à construção de mapas de isolinhas (Ávila, 2010). A semivariância é uma função de distância h , que é estimada somente em um conjunto discreto de distâncias (lags). A partir dessa estimativa, ajusta-se um modelo que depende de parâmetros desconhecidos a serem determinados e com características espaciais (Mota, 2008), conforme equação abaixo. Em termos práticos, é a técnica estatística que permite estudar a dispersão natural das variáveis regionalizadas. Cada semivariograma construído para uma direção fixa é chamado de semivariograma direcional.

Figura 1 - Fórmula do semivariograma

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

Fonte: Mc Bratney & Webster, 1986

Em que $Z(x_i)$ é o valor da variável medida, e (h) , a distância que separa duas amostras. Assim, o semivariograma experimental é um gráfico de dispersão de $\gamma(h)$ em função de h que permite uma análise variográfica do comportamento de $Z(s)$ (Figura 1). Para Mc Bratney & Webster (1986) a técnica mais usada para descrever a dependência espacial na Geoestatística é o semivariograma, o qual descreve a associação espacial dos pontos amostrais em função das distâncias entre eles. É uma técnica exploratória que auxilia os métodos geoestatísticos, contribuindo na modelagem da dependência espacial, determinando os parâmetros básicos do modelo: alcance, efeito pepita e patamar. Conforme Teixeira (2013) os principais estimadores utilizados na construção de semivariogramas são os de Matheron, Cressie e Hawkins, Pairwise e New1 e New2.

Segundo Faraco (2008), o semivariograma teórico é aquele que tem suas propriedades conhecidas, as quais são aproveitadas na análise do semivariograma. Os variogramas têm de ser definidos positivamente, para que se tenham soluções no processo de Krigagem. Esta condição limita a escolha dos modelos teóricos a um conjunto de funções autorizadas. Dentre

os distintos modelos teóricos existentes sobressaem-se: o semivariograma esférico, exponencial e gaussiano, que são comumente usados na literatura.

2.18 Detecção de alterações em imagens usando o contexto espacial

Diversos estudos têm utilizado o contexto espacial para identificar danos florestais e detectar alterações no uso e cobertura do solo (LULC). Sertel *et al.* (2007) investigaram a correlação entre as métricas do semivariograma e o grau de dano causado por terremotos. Em áreas gravemente afetadas, os terremotos provocaram grandes variações espaciais, mensuradas pelos parâmetros do semivariograma: alcance, pepita e peitoril. O alcance capturou a variabilidade espacial em larga escala, a pepita identificou a variabilidade em escala fina e o peitoril representou a variabilidade geral da paisagem.

Costantini *et al.* (2012) exploraram a relação entre a heterogeneidade espacial da vegetação e a ocorrência de eventos de perturbação, integrando a detecção de mudanças e análises espaciais do NDVI em áreas florestais. Em florestas mistas, eles propuseram o alcance do semivariograma como um estimador indireto da suscetibilidade dessas áreas. Essa abordagem combina técnicas de sensoriamento remoto, geoestatística e ecologia da paisagem. Acerbi Junior *et al.* (2015) analisaram a aplicabilidade dos semivariogramas em valores de NDVI derivados de imagens Landsat TM para identificar mudanças em áreas de cerrado. O estudo demonstrou que as formas e os parâmetros do semivariograma são úteis para detectar desmatamento, com destaque para o alcance e o peitoril, que aumentaram em áreas desmatadas e permaneceram constantes em regiões inalteradas.

Gil-Yepes *et al.* (2016) propuseram características baseadas em funções geoestatísticas para avaliar alterações na distribuição espacial de elementos em parcelas agrícolas ao longo do tempo. Utilizando semivariogramas cruzados, conseguiram discriminar mudanças na heterogeneidade dos elementos com alta precisão. A integração dessas métricas com informações espectrais reduziu a confusão entre classes de mudança e não mudança.

Hamunyela *et al.* (2016) introduziram um método que utiliza o contexto espacial para melhorar a detecção precoce de desmatamento em séries temporais de imagens Landsat. Com uma abordagem de janela móvel, normalizaram espacialmente o NDVI ao dividir o valor do pixel focal pelo valor mediano de seus vizinhos, resultando em uma métrica robusta para detectar distúrbios. Apesar das limitações associadas à seleção do tamanho da janela, a metodologia provou ser eficaz em áreas com forte sazonalidade florestal.

Embora esses estudos estejam centrados no uso de imagens orbitais para monitorar fenômenos naturais e antrópicos, a abordagem geoestatística apresenta potencial para ser adaptada a outros contextos. Em vez de analisar alterações em paisagens naturais capturadas por sensores remotos, este trabalho aplica os conceitos de semivariograma a imagens escaneadas de madeira. A proposta é descrever a variabilidade dos pixels em imagens de diferentes espécies florestais, analisando as características espaciais dos padrões internos da madeira, como densidade, textura e composição celular.

Essa aplicação é inovadora, pois transpõe os métodos tradicionais da geoestatística para o campo da análise de imagens de alta resolução de amostras físicas. Diferentemente das alterações macroambientais tratadas nos estudos mencionados, aqui o objetivo é explorar a variabilidade estrutural microscópica presente em amostras de madeira escaneada. Ao adotar essa metodologia pioneira, espera-se avançar no entendimento das propriedades espaciais das espécies florestais, utilizando parâmetros como alcance, pepita e peitoril para identificar padrões característicos de cada tipo de madeira.

2.19 Processamento de imagem

O processamento das imagens desempenha um papel fundamental nas tarefas de reconhecimento de espécies de madeira. O uso de técnicas de aprimoramento ou desfoque muitas vezes adiciona redundância e aumenta a complexidade computacional do processo, mas imagens avaliadas previamente, mesmo aquelas de baixa qualidade pode ser identificadas. A característica da textura da superfície da madeira permanece única para cada espécie, mesmo após os procedimentos químicos pelos quais a madeira passa, serve como uma assinatura visual essencial, a análise dessas texturas permite diferenciar as espécies com precisão (Rajagopal *et al.*, 2019).

A classificação da madeira é amplamente tratada como uma tarefa de análise de textura, técnicas como níveis de cinza e padrões binários são comumente utilizadas, quando aplicadas em conjunto, essas técnicas aumentam a precisão da análise. Essa abordagem é especialmente eficaz para imagens escaneadas de seções de madeira, sua aplicação contribui significativamente para a identificação e categorização da madeira (Wu *et al.*, 2021).

3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 Banco de dados das imagens utilizadas

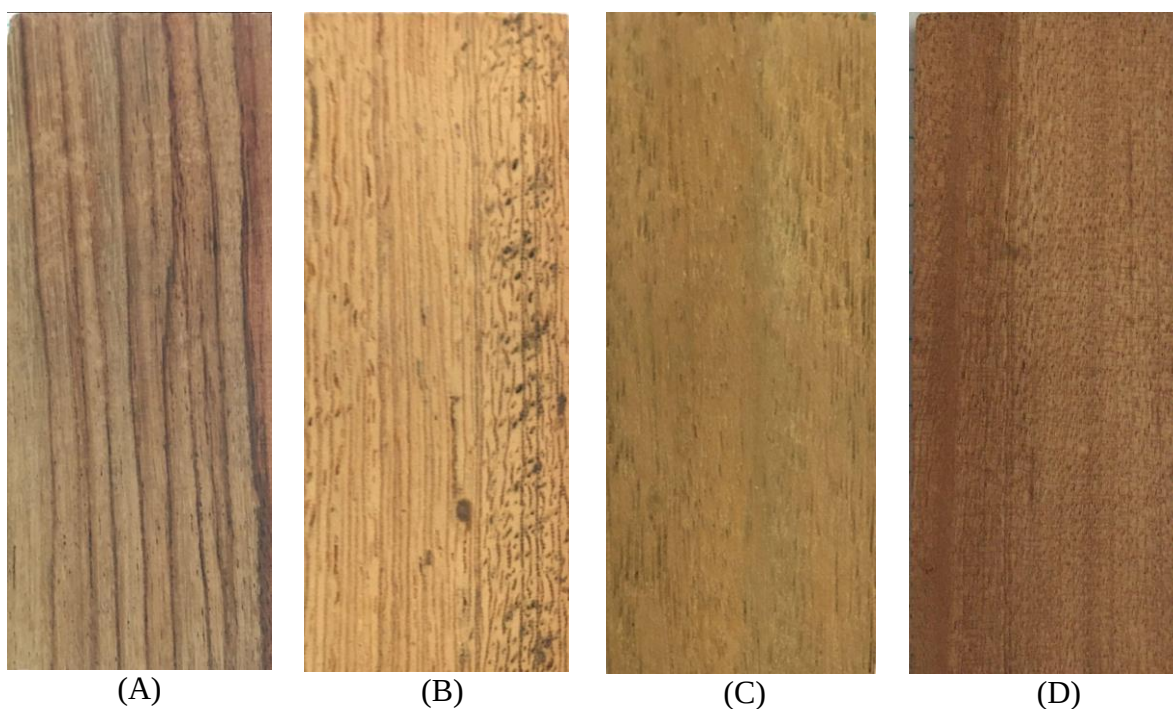
As imagens utilizadas nesse estudo foram disponibilizadas gratuitamente pelo laboratório de Manejo Florestal (LEMAF) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), de

Minas Gerais, com ênfase no grupo de pesquisa em inventário e estatística espacial, que faz parte do departamento de Ciências Florestais. Inicialmente, foram utilizadas quatro imagens referentes a espécies florestais de alto valor comercial para o manejo florestal na Amazônia brasileira: 1) Macacaua (*Platymiscium pinnatum*), 2) Pau mulato (*Calycophyllum spruceanum*), 3) Pau rosa (*Aniba rosaeodora*) e Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*).

Cada espécie teve amostras colhidas para exibição em xiloteca (coleção de madeira), com comprimento de 14 cm, largura de 5 cm e espessura de 1,3 cm. Para o escaneamento das amostras foi realizado utilizando um scanner de mesa de alta precisão, modelo *Epson Perfection V850 Pro*. Este equipamento possui resolução óptica de até 6400 dpi e profundidade de cor de 48 bits, garantindo a captura detalhada das texturas, padrões e variações tonais presentes na superfície das amostras de madeira. Além disso, o uso de uma fonte de luz LED fria minimizou alterações de cor causadas pelo aquecimento, preservando a fidelidade das características originais das amostras.

Na Figura 2, são apresentadas as imagens escaneadas em vista radial da madeira utilizadas nesse estudo. Para fins didáticos e para o experimento, foram utilizadas apenas imagens de 4 espécies, entretanto, após o desenvolvimento do software, é possível analisar um banco de dados mais robusto de imagens de outras espécies.

Figura 2 - Imagens escaneadas de quatro espécies florestais.
A) Macacaua, B) Angelim pedra, C) Pau mulato e D) Pau rosa.



Fonte: LEMAF, 2024

3.2 Hardware

Para o desenvolvimento do programa e elaboração do *script* Python foi utilizado um notebook pessoal com processador ryzen 7 e 16GB de memória RAM e SSD de 480GB.

3.3 Ferramentas e Configurações de Desenvolvimento

O desenvolvimento do software foi elaborado utilizando o editor de código *Visual Studio Code* e a linguagem de programação PHP, na versão estável 8.3. O *front-end* e o *back-end* foram implementados utilizando o *framework* Laravel e o Livewire para a criação de componentes dinâmicos.

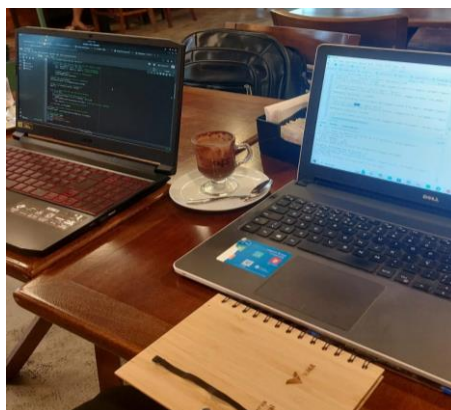
A implementação do *script* responsável pelo tratamento da imagem e cálculo do semivariograma foi realizada em Python, utilizando as bibliotecas NumPy, Matplotlib, Scikit-Image, Scikit-Gstat, SciPy, específicas para o processamento de imagens, geração de gráficos e cálculos. Os dados gerados pela aplicação foram armazenados em um banco de dados MySQL. O controle de versão do código foi gerenciado através do Git, e o repositório do projeto foi hospedado na plataforma GitHub.

3.4 Processo de desenvolvimento

A produção do software foi feita com base na abordagem ágil MVP, o projeto foi dividido em etapas menores, com entregas realizadas em prazos curtos, permitindo um ciclo contínuo de validação e aprimoramento. A elaboração da aplicação contou com a participação de um doutorando em recursos florestais, que atuou como cliente, dono do produto e coorientador, além de um acadêmico de graduação em engenharia de computação, responsável pelo desenvolvimento, sob a supervisão de um orientador acadêmico.

Durante o processo, o dono do produto forneceu explicações detalhadas sobre as análises específicas necessárias, o que permitiu modelar e desenvolver o software e *script* de forma alinhada aos requisitos propostos. Além disso, foram realizadas discussões frequentes em reuniões para acompanhar e refinar a evolução do sistema, assegurando a concordância às necessidades identificadas (Figura 3).

Figura 3 - Reunião para acompanhar e refinar a evolução do sistema



Fonte: Figura do autor, 2024

Diante disso a lista de necessidades incluiu criar login de usuário, para acessar o programa, e redefinição de senha venha a ser esquecida, edição de perfil do usuário para modificar os dados pertinentes do usuário para acesso e identificação no programa, *upload* de imagens de perfis de madeira de espécies florestais escaneadas que serão analisadas, edição de nome da imagem, exclusão de imagem, geração de gráfico a partir da imagem, edição de nomenclatura do gráfico e exclusão de gráfico.

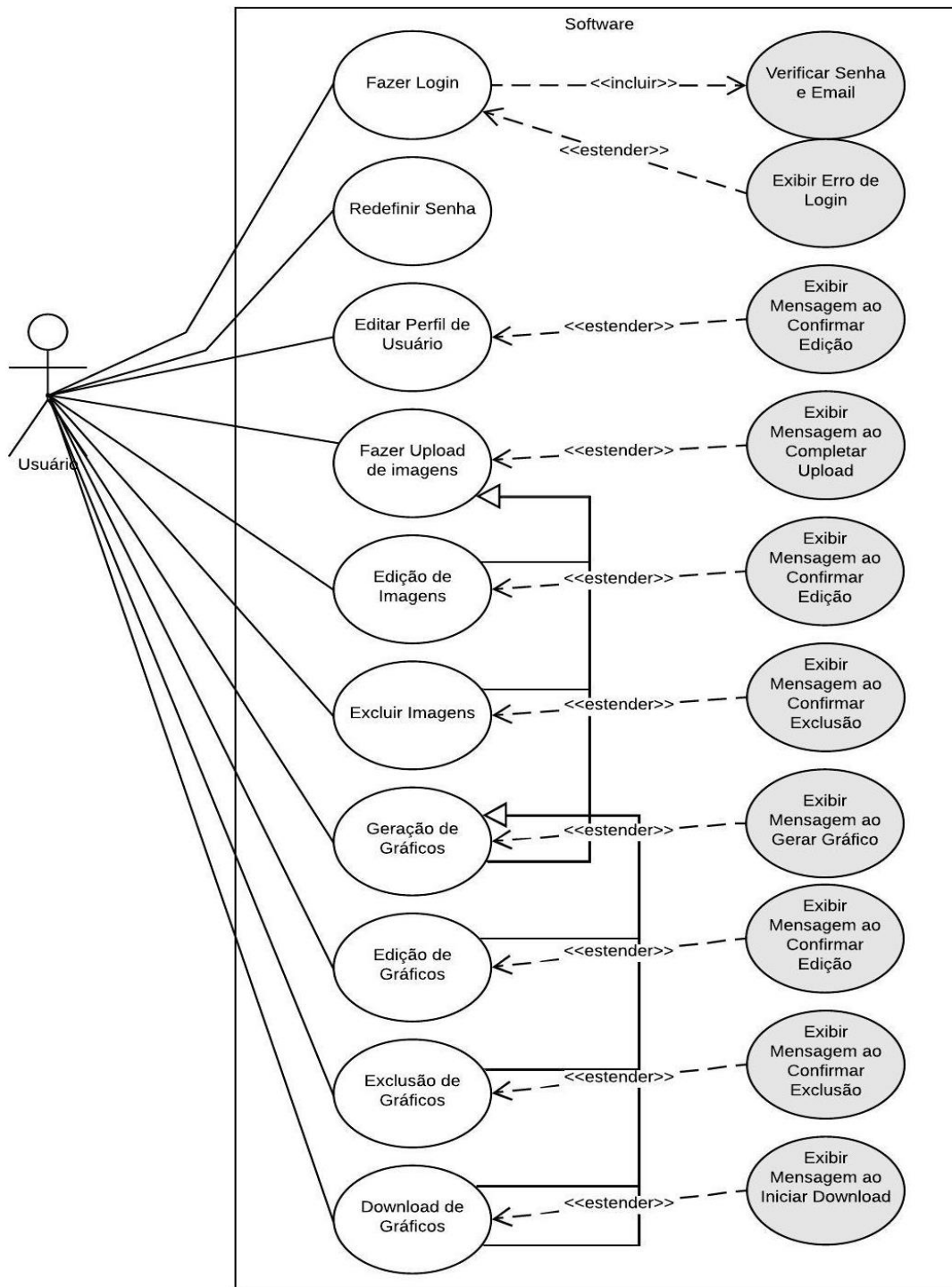
Através considerações indicadas, a lista de necessidades incluiu criação de login de usuário para acesso ao programa, implementação de funcionalidade para redefinição de senha em caso de esquecimento, edição do perfil do usuário para modificação dos dados relacionados ao acesso e identificação do mesmo no sistema, upload de imagens destinadas à análise, edição do nome das imagens, exclusão de imagens, geração de gráficos com base nas imagens salvas, edição da nomenclatura dos gráficos, exclusão de gráficos e *download* de gráficos gerados (Figura 4).

3.5 Processamento de imagem

O código elaborado em Python para processamento de imagem foi realizado com base na orientação do coorientador doutorando, estudos acadêmicos e em artigos que utilizam imagens tratadas de cortes de madeira, como os de Wu *et al.* (2021) e Rajagopal *et al.* (2019), além de métodos bastante utilizados em tratamento de imagens. O processo inicia com a conversão das imagens para escala de cinza, seguida pelo redimensionamento para 256x256

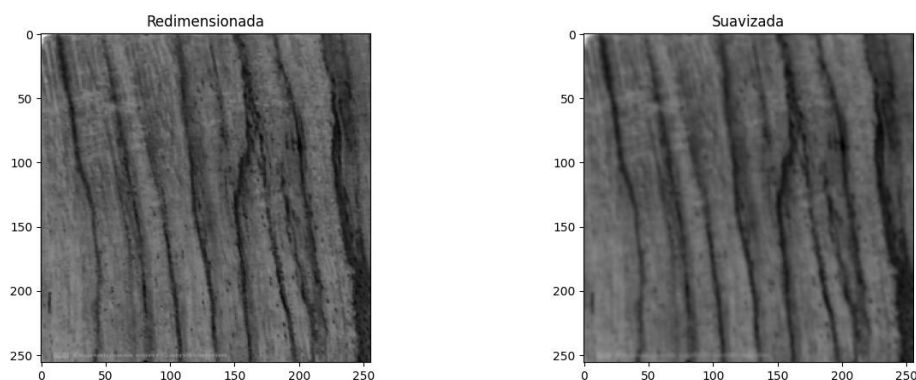
pixels, o que garante a consistência e a viabilidade dos cálculos. Em sequência, aplica-se um filtro Gaussiano para reduzir ruídos e eliminar detalhes desnecessários (Figura 5).

Figura 4 - Diagrama de caso de uso



Fonte: Figura do autor, 2024

Figura 5 - Imagem escaneada da Macacaúba após a conversão para cinza e redimensionamento



Fonte: Figura do autor, 2024

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após a entrega da primeira versão do software, o dono do produto forneceu comentários construtivos sobre o layout e o design das páginas atribuídas à listagem de gráficos e imagens. Em relação à listagem de imagens, o feedback do dono do produto apontou que o tamanho das imagens dificultava a visualização. Para resolver esse problema, as imagens foram ampliadas, garantindo uma visualização melhor.

Já na página dedicada à listagem dos gráficos, o feedback do dono do produto foi que a estrutura baseada em tabelas não proporcionava uma identificação nítida dos elementos, exceto após o *download*. Para melhorar a experiência do usuário, a estrutura foi alterada, substituindo o formato da tabela do *bootstrap* por cartões o que tornou a visualização dos gráficos mais intuitiva e nítida.

Na primeira versão do software também foi ressaltado o potencial do programa para auxiliar na identificação de espécies florestais por meio dos resultados obtidos nos gráficos gerados (Figura 12). Isso se deve ao fato de que, mesmo naquela versão o software já permitia o cálculo do semivariograma, o qual analisou a correlação espacial entre os pixels, gerando o gráfico do semivariograma e extraiu os parâmetros essenciais (Figura 12).

A versão mais recente do software possui recursos voltados à importação de imagens e ao suporte na análise e geração do gráfico de semivariograma com melhor layout. Após o

registro com nome de usuário, e-mail, senha (Figura 6) e login do usuário (Figura 7), as funcionalidades são acessíveis por meio do módulo "Imagens", "Gráficos" e "Perfil do Usuário", localizado na barra de navegação (Figura 8).

Figura 6 - Tela de registro de usuário



Inscrever-se
 Digite seu nome, e-mail e senha para se cadastrar

Nome
 victor

Email
 victor.p.gama@gmail.com

Senha

CADASTRAR

Já possui uma conta? [Entrar](#)

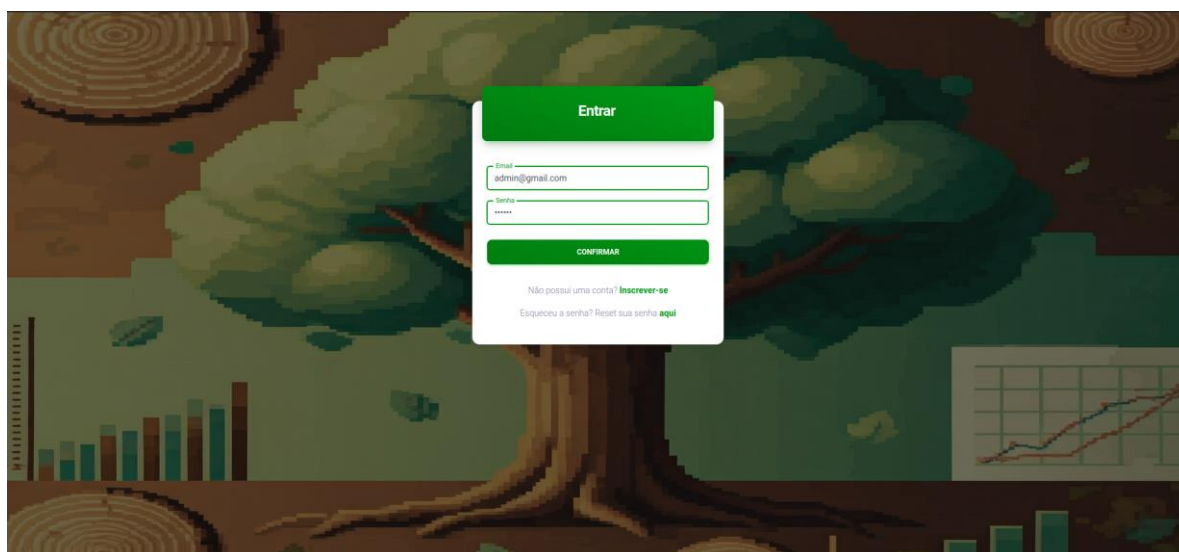
Fonte: Figura do autor, 2024.

Ainda no módulo “Imagens”, ao selecionar a opção "Adicionar Nova Imagem", o sistema abre uma modal que permite a inserção de um arquivo de imagem de lenho radial da madeira previamente existente no computador, com um limite máximo de 1 MB (Figura 9). Antes da confirmação, o software exibe uma pré-visualização da imagem em uma modal, oferecendo ao usuário a opção de confirmar ou cancelar a ação, garantindo maior controle no processo (Figura 10), por padrão o nome da imagem será o nome do arquivo, mas pode ser alterado caso preenchido o input de nome.

Após ser salva, a imagem fica disponível na tabela de listagem, acompanhada de informações como nome, data de criação e data de atualização (Figura 8). Ainda na Figura 8, é possível observar, no canto central direito da listagem, botões que permitem ações de edição do nome da imagem, exclusão da imagem e geração do gráfico a partir da imagem. Esses botões estão com cores verde, vermelho e amarelo, respectivamente, para facilitar a identificação e o uso.

Todos os botões relacionados aos módulos “Imagens” e “Gráficos” incluem modais para confirmação de ações, conforme ilustrado nas figuras 9 e 10.

Figura 7 - Tela de login do usuário



Fonte: Figura do autor, 2024.

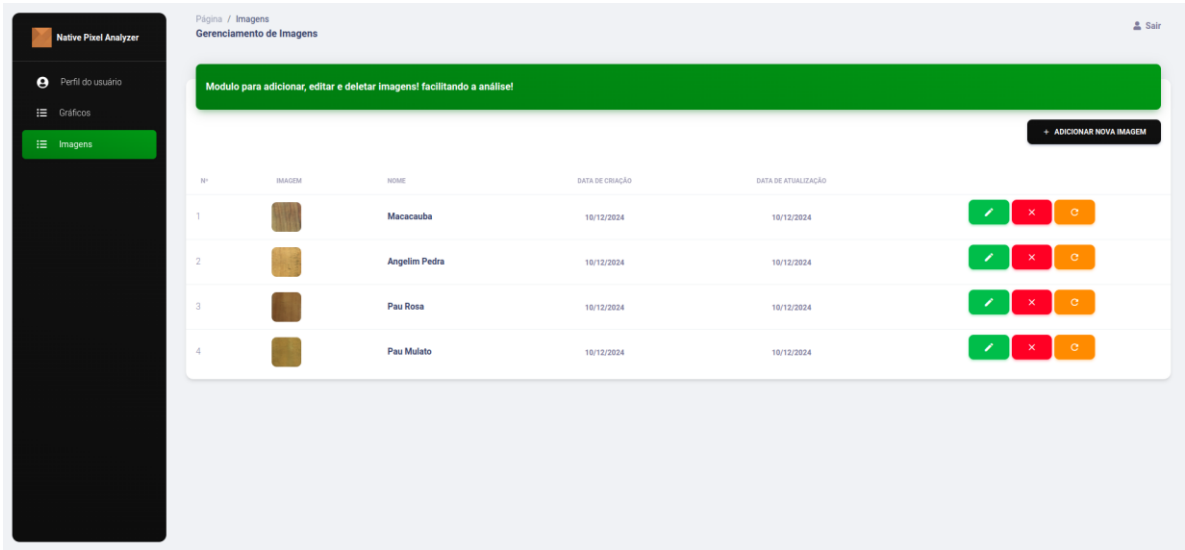
Após a confirmação, a ação é executada e o resultado é imediatamente renderizado na tela, acompanhado por uma mensagem de confirmação, garantindo transparência do processo.

Ao acessar o módulo “Gráficos”, é possível visualizar os gráficos gerados a partir das imagens onde foi realizada a ação de geração de gráfico. Esses gráficos estão organizados em cartões com seus respectivos parâmetros essenciais, como efeito pepita, alcance e sigma (ou peitoril), otimizados para facilitar a análise do semivariograma (Figura 11 e Figura 12). Além disso, os cartões incluem botões de ação para edição, exclusão e download com um efeito fluido ao passar o mouse, garantindo uma interação prática e intuitiva.

No módulo “Perfil do Usuário”, é possível editar informações pessoais, como nome e e-mail, e atualizá-las conforme necessário (Figura 13). Além disso, foi desenvolvida uma funcionalidade específica para a redefinição de senha, permitindo que o usuário recupere o acesso caso esqueça a senha cadastrada (Figura 14).

A estratégia ágil do MVP mostrou-se uma abordagem eficaz e valiosa no desenvolvimento do software, facilitando a coleta de informações e necessidades diretamente do dono do produto. Os resultados obtidos com a versão mais recente do programa, juntamente com o feedback positivo do usuário e dono do produto, que destacou a eficiência do

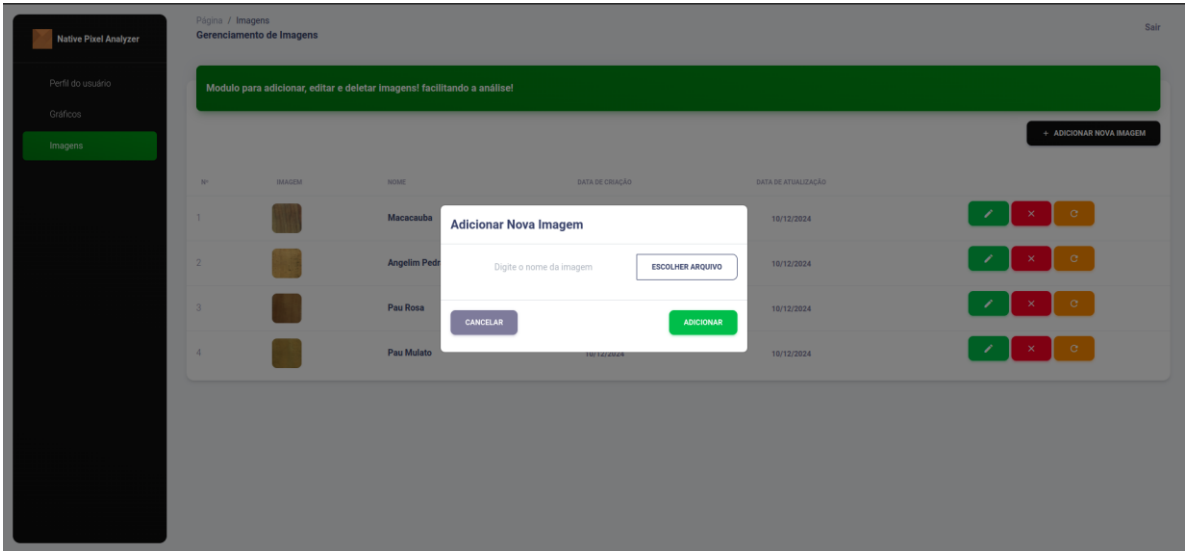
Figura 8 - Tela do módulo de Imagens



Fonte: Figura do autor, 2024.

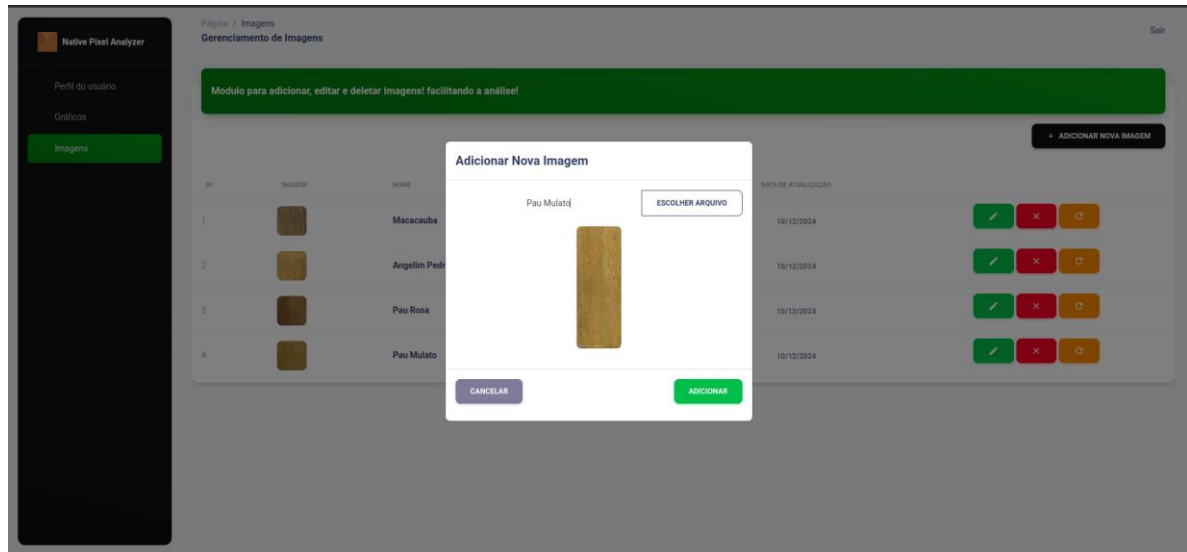
semivariograma geoestatístico na descrição da correlação espacial entre os pixels, evidenciam o potencial da ferramenta para a análise de perfis radiais de madeira escaneada de espécies florestais, utilizando o semivariograma gerado pela aplicação.

Figura 9 - Tela de upload de imagem



Fonte: Figura do autor, 2024.

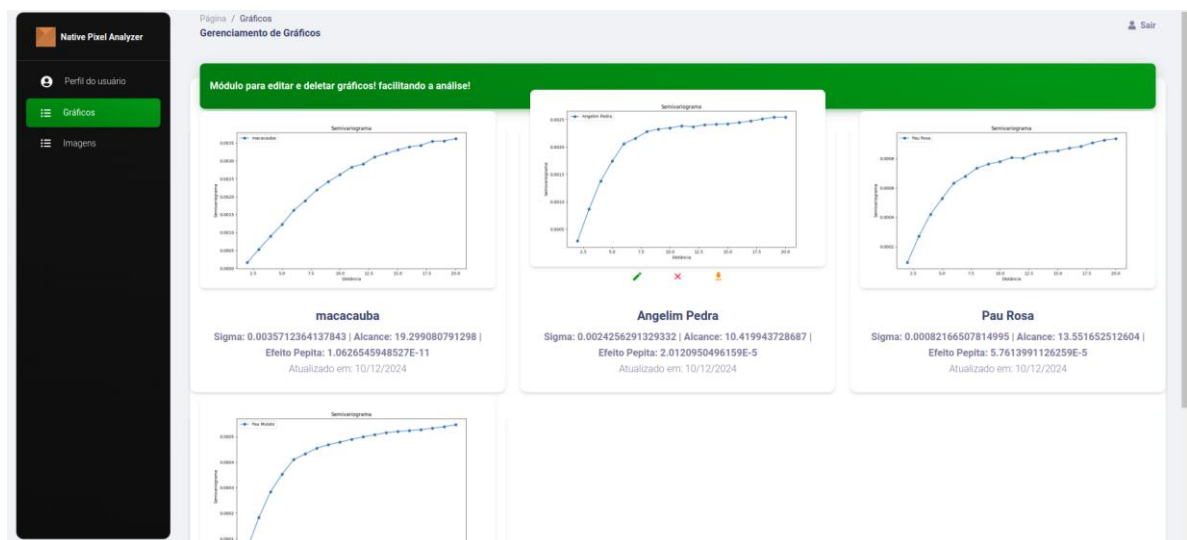
Figura 10 - Tela de upload de imagem com pré-visualização



Fonte: Figura do autor, 2024.

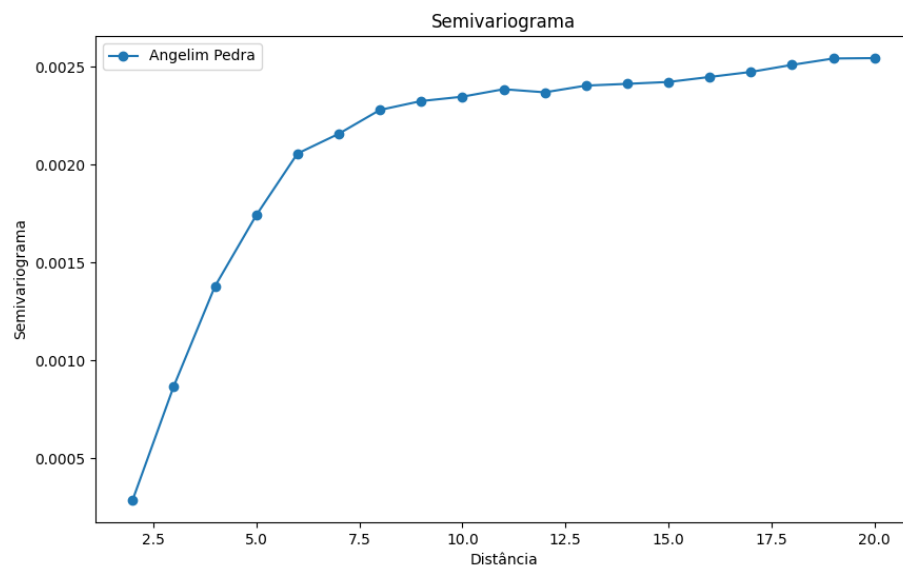
Na tabela 1, são apresentados os parâmetros dos semivariogramas extraídos das imagens analisadas. O efeito pepita, que representa a variabilidade não explicada (erro) em escalas menores do que a resolução da imagem, apresentou valores muito baixos para todas as imagens. Este fato é justificado pelo uso do mesmo equipamento para a produção das imagens.

Figura 11 - Tela do módulo de Gráficos



Fonte: Figura do autor, 2024.

Figura 12 - Exemplo de gráfico baixado através do software



Fonte: Figura do autor, 2024.

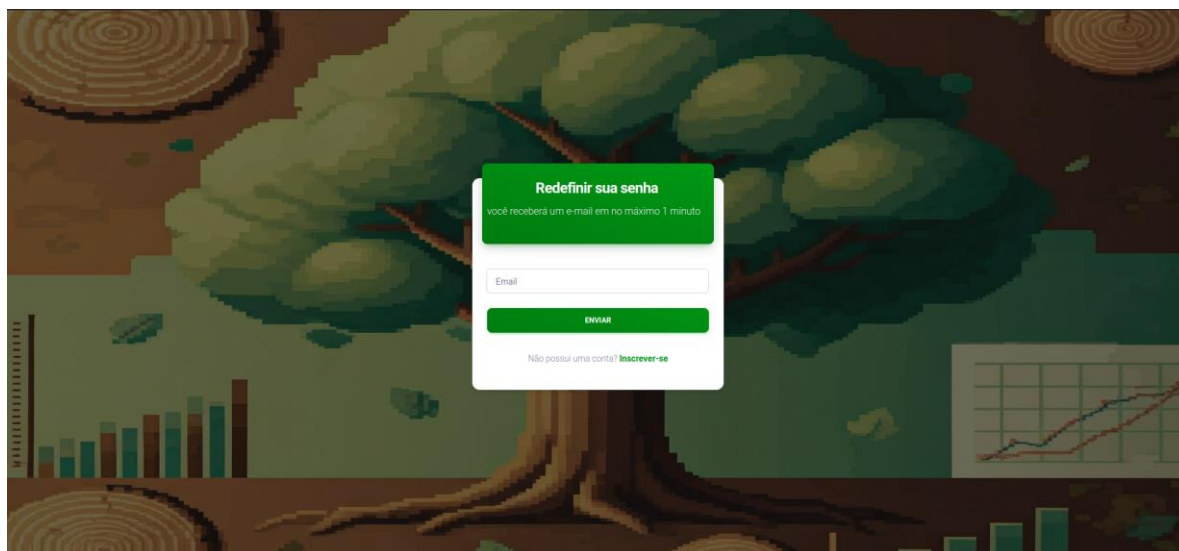
O scanner de mesa de alta precisão produz imagens com tamanho de pixel na escala de micrômetros, ou seja, os detalhes da imagem são capturados com maior nitidez e eficiência. Logo, basicamente toda a variabilidade existente pôde ser mensurada pelo semivariograma geostatístico, produzindo erros ínfimos.

Figura 13 - Tela do módulo de Perfil do usuário

The screenshot shows the 'Native Pixel Analyzer' software interface. On the left is a dark sidebar with a menu containing 'Perfil do usuário' (highlighted), 'Gráficos', and 'Imagens'. The main area has a header with 'Página / Perfil Do Usuário' and 'Gerenciamento do Usuário', and a 'Sair' button. Below the header is a decorative green banner with a tree and concentric circles. A white 'Admin' profile card is displayed, containing the title 'Informações do perfil', an email field with 'admin@gmail.com', a name field with 'Admin', and an 'ATUALIZAR' button.

Fonte: Figura do autor, 2024.

Figura 14 - Tela da funcionalidade de recuperar senha



Fonte: Figura do autor, 2024.

Para Silveira *et al.* (2017), o efeito pepita possui relação inversa com a resolução da imagem. Imagens de baixa ou média resolução possuem efeito pepita maior do que imagens de alta resolução. Devido ao maior tamanho do pixel alguns elementos da imagem podem não ser detectados e, com isso, vão agregando uma variabilidade não explicada devido a essa limitação. Neste mesmo estudo, os autores indicaram que a resolução da imagem utilizada depende da finalidade e do objetivo do estudo. Neste trabalho, o objetivo é comparar as amostras de lenho radial de diferentes espécies florestais e, com isso, a imagem deve ser capaz de detectar elementos da anatomia da madeira, como: textura, cor, elementos de vaso e outras variações inerentes ao processo de formação da madeira (IAWA Committee, 1989).

De forma similar, o parâmetro contribuição apresentou diferenças entre as imagens, mas também com valores baixos. Entretanto, este fato já era esperado, pois a variância em imagens apresenta valores baixos (Acérbi Júnior *et al.*, 2015). A contribuição é o parâmetro mais importante para a análise do semivariograma geoestatístico, pois ele está relacionado com a magnitude apresentada pela correlação espacial entre as amostras (pixels) (Mello *et al.*, 2005).

Em relação ao alcance, foi o parâmetro que mais sofreu alterações entre as imagens. Este parâmetro indica a distância máxima em que as amostras (pixels) possuem correlação espacial, ou seja, o domínio geoestatístico possui um limite (Pelissari *et al.*, 2014). Além disso, como as imagens utilizadas neste estudo não representam uma dimensão do mundo real, a unidade de distância são os próprios pixels.

Tabela 1 - Parâmetros extraídos do semivariograma geoestatístico. 1) Efeito pepita, é o grau de incerteza da modelagem, este valor representa a variabilidade não explicada em escalas menores do que a resolução da imagem. 2) Contribuição, é a magnitude dos dados explicados pela geoestatística, ou seja, é a quantidade de correlação entre os pixels na imagem. 3) Alcance, é a distância máxima em que os pixels possuem correlação espacial. Como não estamos na escala do mundo real, a distância será medida em pixels. 4) Grau de dependência espacial ou GDE, é a porcentagem dos dados que são explicados pela geoestatística. Nesse caso, uma dependência espacial > 25% é fraca, entre 25% e 75% é moderada e > 75% é forte.

Espécie	Efeito pepita	Contribuição	Alcance	Grau de dependência espacial (%)
Macacaba	1,06265E-10	0,00357123	19,29908	100
Pau Mulato	0,000074766	0,000448579	12,7748	85
Pau Rosa	0,000057613	0,000821665	13,5516	93
Angelim Pedra	2,0121E-05	0,002425629	10,41994	99

Fonte: Tabela do autor

De forma geral, o semivariograma é caracterizado pelo aumento da variância entre os pixels conforme o aumento da distância e, após uma certa distância, os pixels não possuem mais correlação, e essa distância máxima é o alcance. Logo, toda a variância entre os pixels fora do alcance estimado pelo semivariograma não possuem correlação espacial e a geoestatística não se aplica a eles.

Neste estudo, o alcance estimado possui uma outra interpretação. Em semivariogramas extraídos de imagens de satélite para áreas de floresta, o alcance representa os maiores elementos na imagem e que, nesse caso, são a copa das árvores (Silveira *et al.* (2017). Este fato ocorre porque ao observar uma floresta através de imagens orbitais, a copa das árvores são os elementos de maior abundância na imagem e, com isso, a quantidade de pixels necessários para explicar essa estrutura da floresta será maior. Logo, se mais pixels são necessários para representar a copa das árvores, maior será a quantidade de pixels que terão uma correlação espacial e, conseqüentemente, maior alcance (Constantini *et al.*, 2012).

Utilizando a interpretação do alcance em imagens orbitais, podemos compreender qual a função do alcance em imagens escaneadas do lenho de espécies florestais, basta conhecer os elementos que compõem a madeira em sua vista radial (visão que é representada nas imagens). Os elementos mais relevantes observados nessas imagens incluem os anéis de crescimento,

elementos de vaso, poros ou cavidades vasculares, textura da madeira e aspectos anatômicos específicos relacionados a cada espécie (Wheeler, Baas & Gasson, 1989). Entretanto, o elemento mais importante na vista radial da madeira são os elementos de vaso, que são estruturas responsáveis pelo transporte de água e nutrientes através da planta (Carlquist, 2001). Os elementos de vaso se manifestam nas imagens escaneadas como regiões claras ou com variações específicas de densidade, dependendo da quantidade e a distribuição desses elementos ao longo da amostra.

O parâmetro alcance, no semivariograma, reflete as maiores estruturas e os padrões espaciais em escala macroscópica da madeira, relacionados à distribuição desses elementos. Assim, o alcance representa a extensão espacial máxima na qual os elementos de vaso, por sua organização e localização, exibem correlações significativas nos padrões dos pixels da imagem escaneada. Esses elementos têm grande importância para caracterizar as propriedades hidráulicas e estruturais da madeira e variam conforme suas densidades e arranjos espaciais.

Em imagens escaneadas da madeira tropical amazônica, o alcance também captura a variabilidade espacial associada a padrões específicos de organização estrutural da madeira, como a formação de zonas de porosidade e as mudanças na densidade ao longo das amostras (Plomion, Leprovost e Stokes, 2001). Essas características estão diretamente ligadas ao ambiente de crescimento e às adaptações evolutivas das árvores da região.

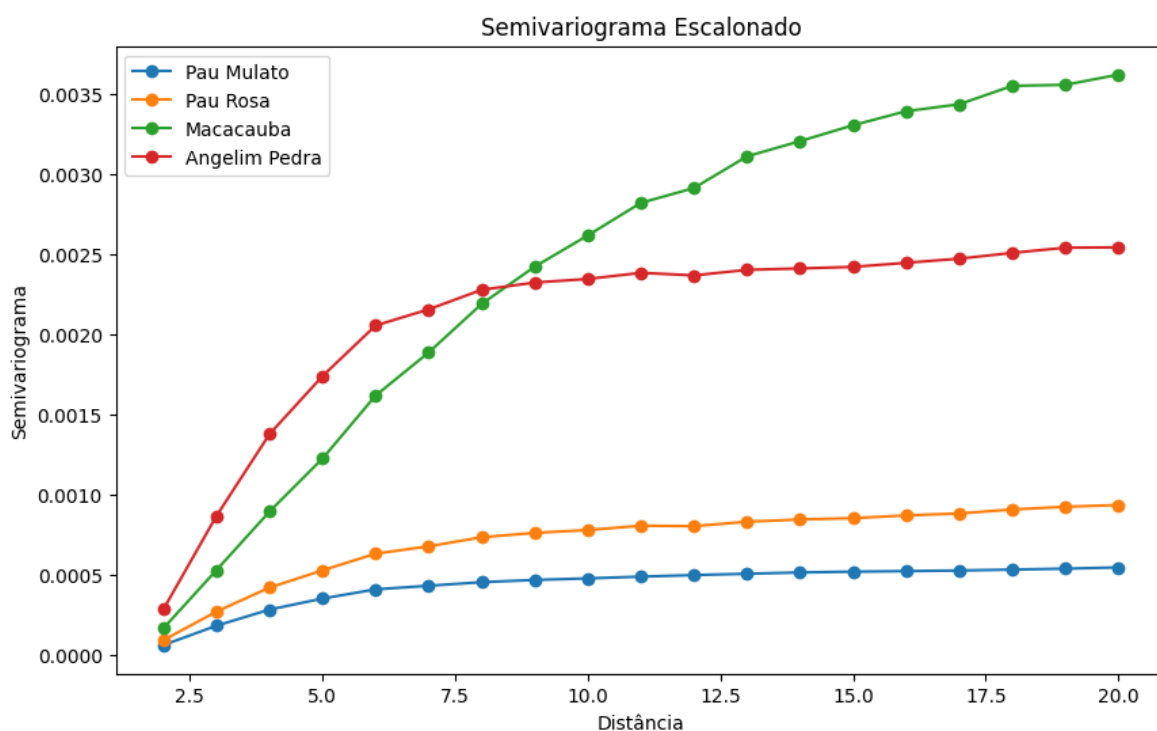
Portanto, ao extrair o semivariograma de imagens escaneadas da madeira, o parâmetro alcance fornece informações preciosas sobre as escalas espaciais de variação nos padrões relacionados aos elementos de vaso e suas distribuições, permitindo identificar as principais estruturas anatômicas e padrões espaciais críticos para compreender a variabilidade das madeiras tropicais e, com isso, agregar valor de identificação.

Para todas as imagens analisadas, o grau de dependência espacial foi superior a 90%, logo, os pixels provenientes das imagens escaneadas de espécies nativas da amazônia possuem uma forte dependência espacial. Este fato está relacionado com a homogeneidade da madeira, apesar de possuir diferentes elementos em sua estrutura, a madeira mantém um padrão homogêneo desses elementos ao longo do seu crescimento em altura (Yemele *et al.*, 2019). Esta característica faz com que os pixels possuam uma maior similaridade e padrões bem definidos ao longo da imagem, aumentando a sua correlação espacial.

Na figura 15 abaixo estão representados os semivariogramas extraídos para cada espécie estudada. Os semivariogramas encontrados são do tipo clássico e apresentam efeito pepita, contribuição e alcance bem delimitados (Curran *et al.*, 1988). Utilizando o gráfico escalonado, foi possível verificar as diferenças na variabilidade espacial dos pixels e a mudança visual entre

os parâmetros para cada espécie. No geral, o efeito pepita não apresenta grandes alterações, mas a contribuição e o alcance sofrem mudanças notáveis. Logo, esses dois últimos parâmetros são fundamentais para identificar a variabilidade espacial dos pixels em imagens escaneadas.

Figura 15 - Semivariogramas geoestatísticos extraídos de imagens escaneadas para quatro espécies florestais



Fonte: Figura do autor, 2024.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O semivariograma geoestatístico foi eficiente ao descrever a correlação espacial entre os pixels em imagens escaneadas. A contribuição e alcance foram os parâmetros do semivariograma que mais sofreram alterações entre as imagens de diferentes espécies, enquanto o efeito pepita não sofreu alterações visualmente significativas. Todos os semivariogramas gerados apresentam um alto grau de dependência espacial, revelando a importância e o potencial do uso da geoestatística em imagens.

A versão mais recente do software demonstrou grande potencial como ferramenta para analisar perfis radiais de madeira escaneada, extraindo informações relevantes sobre a correlação dos parâmetros do semivariograma, mostrando-se uma solução promissora para

auxiliar na identificação de espécies florestais, o próximo passo para o software será disponibilizar o mesmo na web.

REFERÊNCIAS

- ACERBI JÚNIOR, F. W.; SILVEIRA, E. M. O.; MELLO, J. M.; MELLO, C. R.; SCOLFORO, J. R. S. Change detection in brazilian savanas using semivariograms derived from ndvi images. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras, v. 39, n.2, p. 103-109, mar./abr., 2015.
- ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M. Continuidade e distribuição espacial da umidade do solo em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.**, v. 14, p. 1257-1266, 2010.
- BOOTSTRAP - Framework front-end. Disponível em: <https://getbootstrap.com/>. Acesso em: 27 nov. 2024.
- CARLQUIST, S. Comparative Wood Anatomy: Systematic, Ecological, and Evolutionary Aspects of Dicotyledon Wood. Berlin: Springer-Verlag, 2001.
- CONSTANTINI, ML; ZACCARELLI, N.; MANDRONE, S.; ROSSI, D.; CALIZZA, EE; ROSSI, L. NDVI padrão espacial e a fragilidade potencial de áreas florestais mistas em bacias de lagos vulcânicos. **Ecologia e manejo florestal**, v. 285, p. 133– 141, 2012.
- CORTÉS, M. I. Fundamentos de Engenharia de Software. P.20. Fortaleza: **Informática**. 2013.
- CLARK, I. Practical geostatistics. London: **Applied Science Publishers**, 130 p, 1979.
- CURRAN, P. J. The semivariogram in remote sensing: An introduction. **Remote Sens. Environ.** 24, 493–507.1988.
- DOOLEY, J. **Software Development and Professional Practice**. 1 st ed. New York: Apress, p. 1-7.2011.
- FARACO, M. A.; URIBE-OPAZO, M.; A. ALVES DA SILVA, E. A.; JOHANN, J. A.; BORSSOI, J. A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, 2008.
- GIT - Sistema de controle de versão. Disponível em: <https://git-scm.com/>. Acesso em: 10 nov. 2024.
- GITHUB - Plataforma de hospedagem. Disponível em: <https://github.com/>. Acesso em: 15 nov. 2024.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. An introduction to applied geostatistics. New York: **Oxford University**, p. 560, 1989.
- IAWA COMMITTEE. IAWA List of Microscopic Features for Hardwood Identification. **IAWA Bulletin n.s.**, v. 10, p. 219-332, 1989.

JOURNAL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. Mining geostatistics. Caldwell, Blackburn Press; p. 600, 2003.

KASAUKA, D; TSUTSUI, H.; OKUHATA, H.; MIYANAGA, Y. **Computational cost analysis and implementation of accelerated iterative shrinkage smoothing**. IEEE. Osaka - Japão, p. 1-4, 2014.

MATPLOTLIB - Biblioteca python. Disponível em: <https://matplotlib.org/>. Acesso em: 1 dez. 2024.

MELLO, J.M.; BATISTA, J.L.F.; RIBEIRO JR, P.J.; OLIVEIRA, M. S. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. **Sci. For.**, v. 69: p. 25-37, 2005.

Mc BRATNEY, A.G.; WEBSTER, A.G. Choosing functions for semi-variograms and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, v.37, p.617-639, 1986.

MOHAN, S; VENKATACHALAPATHY, K; RAI, A. K. **Wood Species Classification and Identification System**. International Journal of Engineering Sciences & Research Technology. Indore – Índia, p.847-853. Junho de 2014.

MOTA, V. C. Metodologia geoestatística para caracterizar a variabilidade temporal de elementos climáticos de Juiz de Fora – MG Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

NUMPY - Biblioteca python. Disponível em: <https://numpy.org/about/>. Acesso em: 1 nov. 2024.

MYSQL - Banco de dados relacional. Disponível em: <https://www.mysql.com/about/>. Acesso em: 9 nov. 2024.

PEDRINI, H; SCHWARTZ, W. R. **Análise de Imagens Digitais: Princípios, Algoritmos e Aplicações**. São Paulo: Thomson, 2008.

PELISSARI, A. L.; FIGUEIREDO FILHO, A.; CALDEIRA, S. F.; MACHADO, S. D. A. Geoestatística aplicada ao manejo de povoamentos florestais de teca, em períodos pré-desbaste seletivo, no estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Biometria**, 32(3), 430-444. 2014.

PLOMION, C.; LEPROVOST, G.; STOKES, A. Wood formation in trees. **Plant Physiology**, v. 127, n. 4, p. 1513-1523, 2001.

PYTHON. Disponível em: . Acesso em: 7 nov. 2024.

RAJAGOPAL, H; KHAIRUDDIN, A; MOKHTAR, N.; AHMAD, A; YUSOF, R. Application of image quality assessment module to motion-blurred wood images for wood species identification system. **Wood Science and Technology**, v. 53, p. 967-981, 2019.

RIBEIRO JUNIOR, P. P.; DIGGLE, P. P. GeoR: a package for geostatistical analysis. **R News**, Rochester, v. 1, n. 2, p. 15-18, 2001.

SCIKIT-GSTAT - Biblioteca python. Disponível em: <https://scikit-image.org/>. Acesso em: 1 dez. 2024.

SCIKIT-IMAGE - Biblioteca python. Disponível em: <https://scikit-image.org/>. Acesso em: 1 dez. 2024.

SILVEIRA, E. M. O.; MELLO, J. M.; ACERBI JÚNIOR, F. W.; REIS, A. A.; WITHEY, K. D.; RUIZ, L. A. Characterizing landscape spatial heterogeneity using semivariograma parameters derived from ndvi images. **Cerne**, v. 23, n.4, p. 413-422, 2017.

TEIXEIRA, M. B. dos R. Comparação entre estimadores de semivariância. 2013. 122 p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

WHEELER, E. A.; BAAS, P.; GASSON, P. E. Wood anatomy and identification: a review. **IAWA Journal**, v. 5, p. 219-231, 1984.

WU, B.; A. LIANG, H.; ZHANG, T.; ZHU, Z.; ZOU, D.; YANG, W.; TANG, J.; LI, J. S. Wood identification based on longitudinal section images by using deep learning. **Wood Science and Technology**, v. 55, p. 553-563, 2021.

YEMELE, M. C., Hernández, R. E., & Ung, C.-H. Phenotypic correlations among growth and selected wood properties in white spruce (*Picea glauca*). **Forests**, 10(7), 589. <https://doi.org/10.3390/f10070589> .2019.