

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

ANA CAROLINA DE OLIVEIRA CRUZ

**EFICIÊNCIA DO MODELO CRIADO NO *SOFTWARE* CELLPOSE PARA
AUTOMATIZAÇÃO DA ANÁLISE DE VASOS EM CLONES DE *Eucalyptus grandis* ×
*Eucalyptus urophylla***

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO

2026

ANA CAROLINA DE OLIVEIRA CRUZ

**EFICIÊNCIA DO MODELO CRIADO NO SOFTWARE CELLPOSE PARA
AUTOMATIZAÇÃO DA ANÁLISE DE VASOS EM CLONES DE *Eucalyptus grandis* ×
*Eucalyptus urophylla***

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Jordão Cabral Moulin

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO

2026

ANA CAROLINA DE OLIVEIRA CRUZ

**EFICIÊNCIA DO MODELO CRIADO NO SOFTWARE CELLPOSE PARA
AUTOMATIZAÇÃO DA ANÁLISE DE VASOS EM CLONES DE *Eucalyptus grandis* ×
*Eucalyptus urophylla***

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Aprovado em 13 de fevereiro de 2026

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **JORDAO CABRAL MOULIN**
Data: 16/02/2026 10:20:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jordão Cabral Moulin
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **THAYANNE CAROLINE CASTOR NETO**
Data: 16/02/2026 10:31:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Thyanne Neto
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora

Documento assinado digitalmente
 **STEFFANY DE LIMA ARAUJO**
Data: 16/02/2026 10:25:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ma. Steffany de Lima
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora

*A minha família.
Afetuosamente, dedico.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a mim mesma, pela força e pela coragem de enfrentar todos os desafios e empecilhos que a vida colocou em meu caminho. Tive muita dedicação e esforço para conciliar estágio, ICs, TCC e minha vida pessoal. Reconheço o quanto cresci, aprendi e me tornei mais forte durante esse processo.

Aos meus pais, Ana Cristina e Cleuso, expresso minha eterna gratidão por todo o amor, apoio e incentivo incondicional. Obrigada pelos sacrifícios, pela paciência e por sempre acreditarem em mim, mesmo quando eu duvidei. Essa conquista também é de vocês.

Aos meus irmãos, Átila, Vitor e Fernando, que sempre me apoiaram e me ajudaram durante toda a minha trajetória.

À minha namorada, Nicole, agradeço por estar ao meu lado em todos os momentos, pelo carinho, compreensão e por ser meu apoio nos dias difíceis. Sua presença tornou essa caminhada mais especial.

E, por fim, a todos os amigos que fiz ao longo da minha trajetória, que tornaram essa caminhada mais leve, divertida e significativa.

Muito obrigada!

RESUMO

Devido à alta demanda do mercado por florestas plantadas de eucalipto, é necessário aumentar a intensidade de pesquisas no âmbito das suas estruturas anatômicas, especialmente aos vasos do xilema, para entender o comportamento do incremento das florestas e também para elevar a produtividade das indústrias. Porém, pesquisas sobre essas estruturas são numerosas e os métodos de análise são normalmente trabalhosos e demorados. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é treinar um modelo no software Cellpose para segmentação automatizada e compará-lo ao método de segmentação manual. Para isso, foram utilizadas 275 imagens, contendo 19.250 Regiões de Interesse para o treinamento do modelo criado. Além disso, também foi utilizado um aplicativo com base no modelo que possibilitou a obtenção dos dados de porcentagem da madeira ocupada por vasos, área dos vasos, diâmetro dos vasos e sua frequência. Para os métodos manuais, foram utilizados os softwares CorelDraw e Gimp para a segmentação manual, porcentagem da madeira ocupada por vasos e área dos vasos. Os resultados foram obtidos por meio de coloração das estruturas de vasos e contabilização dos pixels coloridos. Para a frequência e diâmetro foi utilizado o software ImageJ. Nos resultados, com exceção do diâmetro dos vasos, o modelo do Cellpose, após o treinamento, demonstrou elevada eficiência quando comparado aos métodos de medição manual.

Palavras-chave: Anatomia da madeira; Poros; Segmentação automatizada.

ABSTRACT

Due to the high market demand for planted eucalyptus forests, it is necessary to increase the intensity of research in the field of their anatomical structures, especially xylem vessels, to understand the behavior of forest increment and also to increase industrial productivity. However, research on these structures is numerous, and the analysis methods are usually laborious and time-consuming. Thus, the present study proposed to train a model in the Cellpose software for automated segmentation and to compare it with the manual segmentation method. For this, 275 images containing 19.250 ROIs were used to train the created model. In addition, an application based on the model was also used, which enabled obtaining data on the percentage of wood occupied by vessels, vessel area, vessel diameter, and their frequency. For the manual methods, the CorelDraw and GIMP software were used for manual segmentation, percentage of wood occupied by vessels, and vessel area. The results were obtained through staining of the vessel structures and counting of colored pixels. For frequency and diameter, the ImageJ software was used. In the results, except for vessel diameter, the Cellpose model, after training, demonstrated high efficiency when compared to manual measurement methods.

Keywords: Wood anatomy; Pores; Automated segmentation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. OBJETIVOS	10
2.1 Objetivo geral	10
2.2 Objetivos específicos.....	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1 Impacto dos estudos sobre a anatomia da madeira na produtividade e qualidade de florestas plantadas	11
3.2 Importância dos elementos de vaso	11
3.3 Segmentação automatizada na eficiência da análise de Imagens	13
4. METODOLOGIA.....	15
4.1 Amostragem da madeira.....	15
4.2 Preparo das lâminas histológicas	16
4.3 Delimitação da fotomicrografia da lâmina histológica.....	17
4.4 Área dos vasos e área da madeira ocupada por vaso em segmentação manual.....	18
4.5 Frequência e diâmetro dos vasos manual	19
4.6 Criação do modelo no Cellpose para análise dos vasos	20
4.7 Automatização da frequência, área e diâmetro dos vasos	23
4.8 Análise Estatística	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
6. CONCLUSÃO	32
7. REFERÊNCIAS	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa do Brasil representando as 3 regiões onde foram coletadas os clones	15
Figura 2 - Obtenção de amostras de madeira para análise anatômica	16
Figura 3 - Lâmina histológica temporária.	17
Figura 4 - Recorte do quadrante da Fotomicrografia realizado no ImageJ.	18
Figura 5 - Imagem da lâmina histológica após tratamento no CorelDraw. Onde os elementos de azul são vasos, os de amarelo são parênquimas axiais e os de laranja são raios.	19
Figura 6 - Demonstração da medição de diâmetro no ImageJ.....	20
Figura 7 - Fotomicrografia segmentada dentro do Software Cellpose.....	21
Figura 8 - A: máscaras do Software no início do treinamento. B: Máscaras após o treinamento com 52 imagens.	22
Figura 9 - Interface do CellposeApp utilizado para os cálculos de frequência, área e diâmetro dos vasos.	23
Figura 10 - Demonstração do Bounding box ao redor do elemento de vaso. A: Diâmetro no eixo X e Y. B: Diâmetro no eixo X.	24
Figura 11 - Distribuição das frequências por método manual e por segmentação automatizada utilizando o Cellpose. A: Frequência 100%. B: Frequencia 50%	26
Figura 12 - Distribuição das variáveis anatômicas obtidas pelo método manual e por segmentação automatizada Cellpose. C: áreas dos vasos. D: diâmetro dos vasos. E: porcentagem de madeira ocupada por vasos.	28
Figura 13 - Representação da <i>bounding box</i> envolvendo um vaso orientado a 90° em comparação a outro vaso com orientação diferente do eixo de 90°	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores médios da frequência de vasos medidos manualmente e no cellpose.	25
Tabela 2 - Resultados dos testes de normalidade e comparação estatística para porcentagem total de vasos obtidas pelo Cellpose e pelo método manual	27

1. INTRODUÇÃO

O gênero *Eucalyptus* possui grande relevância no mercado brasileiro, virtude de suas qualidades comerciais uma vez que, para a maioria das espécies, a celulose, a madeira e os óleos essenciais podem ser explorados (Guerino *et al.*, 2022). A cada ano, ocorre um aumento nas áreas destinadas ao cultivo dessas espécies (Talgatti *et al.*, 2019). Dentro do gênero tem-se o híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, que apresenta grande potencial produtivo, devido à resistência à falta de água e a pragas e doenças (Assis *et al.*, 2012; Hodge; Dvorak, 2015; Hsing *et al.*, 2016).

A madeira do híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* estão entre as principais utilizadas no setor florestal brasileiro, possuindo rápido crescimento, adaptabilidade a diferentes ambientes e qualidades tecnológicas para setores de papel e celulose e energia (Medeiros *et al.*, 2016). Nesse contexto, a anatomia da madeira faz-se relevante pois é utilizada para caracterizar a madeira e destiná-la ao seu melhor uso, demonstrando quais aspectos de determinada espécie são superiores a outras (Demarco; Diego, 2011).

O xilema pode ser caracterizado como um sistema de condução composto por múltiplos vasos interligados, que se estendem das raízes às folhas, disponibilizando água e nutrientes para toda a árvore (Geng *et al.*, 2018; Malavasi; Davis; Malavasi, 2016). Estudos sobre variações estruturais do xilema permitem compreender as diferentes adaptações de indivíduos arbóreos, aprimorar a qualidade da madeira e melhorar o manejo florestal em florestas plantadas (Balzano; Merela; De Micco, 2024).

Dessa forma, a segmentação manual, embora amplamente utilizada para a realização da análise dessas imagens, trata-se de um método demorado e que depende da experiência do avaliador, o que pode acarretar em resultados com alta variabilidade. Além disso, o processo limita-se a um pequeno conjunto de imagens devido ao tempo necessário para analisá-las (Kotowska; Wright; Westoby, 2020; Pires 2023)

Assim, ferramentas que possibilitam automatizar o processo de análise apresentam diversas vantagens, como reduzir o esforço humano e possibilitar a ampliação de análise de conjunto de dados de forma rápida. Um dos *softwares* amplamente conhecidos é o Cellpose, que se baseia em aprendizado profundo (*deep learning*) e realiza segmentação de células de forma rápida e precisa, sem a necessidade de ajustes de parâmetros ou novos treinamentos do modelo (Stringer *et al.*, 2021).

Portanto, surge a hipótese de que o treinamento de um modelo específico no software Cellpose, utilizando imagens anatômicas de *E. grandis* x *E. urophylla*, aumenta significativamente a eficiência e a precisão da segmentação dos vasos, tornando o método uma alternativa as metodologias manuais.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver e implementar modelo automatizado no software Cellpose para segmentação de vasos em clones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*

2.2 Objetivos específicos

- Treinar o modelo para o software Cellpose para a medição de vasos nos clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.
- Realizar análise manual dos vasos da madeira;
- Realizar análise automatizada dos vasos da madeira;
- Verificar a concordância entre a segmentação automatizada e a manual das análises dos vasos da madeira.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Impacto dos estudos sobre a anatomia da madeira na produtividade e qualidade de florestas plantadas

O foco da indústria florestal, ao longo dos anos, esteve voltado a maximização da produção de madeira, no entanto, desde a década de 80, os primeiros estudos no Brasil sobre a caracterização anatômica começaram a ser conduzidos por Tomazello Filho (1985). Atualmente, os estudos das propriedades da madeira são essenciais para garantir a qualidade de seus produtos e a determinação de suas utilizações (Barbosa et al., 2019).

Autores como Trevisan *et al.* (2024), ao analisarem dimensões das fibras em diferentes estrados e posição radial de espécies de *E. grandis* de 18 anos de idade, confirmaram que, características como comprimento, espessura da parede e do lúmen das fibras tiveram comportamentos crescentes em direção a casca do tronco. Demonstrando a diferença anatômica entre lenhos jovens e adultos.

Outro estudo publicado por Rodríguez-Ramírez *et al.*, (2022), se propôs a investigar a plasticidade das células do xilema em três espécies de Cedro (*Cedrela fissilis*, *C. nebulosa* e *C. angustifolia*) em florestas tropicais com climas diferentes, com idades variando entre 59 a 120 anos. Os resultados sugeriram que espécies de Cedrela tinham a capacidade de aclimatar em diferentes condições climáticas, por meio de desenvolvimento de vasos menores e anéis de crescimento mais estreitos em épocas secas. Por outro lado, em épocas de maior umidade e precipitação os indivíduos apresentaram como resposta o aumento do diâmetro dos vasos. Esse fato pode ser associado à segurança hidráulica e a eficiência hidráulica respectivamente, assim o xilema das espécies de Cedrela conseguiram se proteger da cavitação em períodos mais secos e aumentar a condução de água em períodos de abundância hídrica.

3.2 Importância dos elementos de vaso

Podemos caracterizar os elementos de vasos como células de condução de água e nutrientes em angiospermas, sendo crucial para a sobrevivência das plantas terrestres, além disso, esse elemento anatômico possui uma expressiva adaptabilidade ao clima e

disponibilidade de água (Malavasi; Davis; Malavasi, 2016). No gênero *Eucalyptus*, os vasos correspondem a uma porcentagem de 10 a 30%, o que representa aproximadamente de 3 a 5% do peso total da madeira (Vaz *et al.*, 2023). Por serem os principais condutores dentro dos indivíduos arbóreos, os vasos têm papel fundamental nos estudos relacionados à deficiência e eficiência hídrica, embolias e fluxo hídrico.

Gauthey *et al.* (2022), investigaram o reabastecimento de espécies de *Eucalyptus saligna* durante um período de estresse hídrico, seguido por um período de reidratação. Para a visualização, foi utilizado microtomografia computadorizada (micro-CT), que forneceu contraste entre os vasos cheio e vazios, os quais apareciam cinzas e pretos, respectivamente. Em contrapartida, os vasos embolizados apresentaram tonalidade mais escura que aqueles cheios de água. Define-se como reabastecimento, a capacidade de recuperação das árvores ao reabastecer os condutos de xilemas que estão embolizados em curtos intervalos de tempo, podendo ser de 6 a 12 horas. Possibilitando ao indivíduo rápida recuperação em período de seca, onde o estresse hídrico é maior. Esse fenômeno consiste na reabsorção de gás pela água, removendo-o no xilema (Gauthey *et al.*, 2022).

Assim, como resultado do experimento de Gauthey *et al.*, (2022), durante o período de estresse hídrico foi possível observar que a recuperação hidráulica das plantas analisadas se deu devido ao surgimento de novos tecidos xilemáticos e não pelo reabastecimento. Os vasos que apresentaram embolia, permaneceram embolizados e não funcionais durante todo o experimento. Nos seis meses seguintes, indivíduos com altos níveis de embolia e estresse hídrico, recuperaram-se integralmente, demonstrando a plasticidade do *E. saligna* em meio ao estresse hídrico, através do desenvolvimento de novos vasos.

Outro estudo publicado por Keret; Drew; Hills, (2024), também demonstrou a adaptabilidade dos tecidos xilemáticos de mudas do *Eucalyptus grandis* em períodos de estresse hídrico. No experimento, as mudas foram cultivadas em viveiro por 6 meses com períodos de irrigação diferentes, os parâmetros utilizados para a coleta de resultados foram dados quantitativos das fibras e vasos do xilema, analisados no software QuPath v0.4.4. Como resultado, a seca influenciou na diminuição da área celular e da área do lúmen de células de vasos. Essas mudanças nas propriedades da madeira tiveram impacto na melhora da resistência a implosão dos vasos causados por embolias, porém

reduziram sua capacidade hidráulica, para compensar, os indivíduos aumentaram a frequência de seus vasos.

Dessa forma, podemos afirmar que o tecido xilemático é uma estrutura extremamente plástica, mudando suas células conforme os estímulos externos, permitindo assim, o desenvolvimento da planta. Porém, apesar disso, a segmentação manual desses elementos anatômicos é um processo lento, muitas vezes inconcebível, uma vez que certas análises necessitam de um grande número de imagens. Além disso, a análise é subjetiva, pois sua execução correta requer que o analista identifique, interprete e delimite corretamente as estruturas (Brunel *et al.*, 2014; Ergun, 2020).

3.3 Segmentação automatizada na eficiência da análise de Imagens

Nos últimos anos, houve um crescimento da segmentação automatizada, podemos caracterizar como segmentação a delimitação dos elementos de vaso (Stringer; Pachitariu, 2024). Assim, esse crescimento e surgimento de modelos de segmentação foi importante para o aumento da eficiência e agilidade na análise de imagens, mesmo se fazendo necessário supervisão humana. Os métodos utilizados são limitados, pois os modelos são utilizados para análise de imagens específicas e ocasionam falhas quando são aplicados em novas imagens. No entanto, métodos de alto rendimento que se baseiam em redes neurais, são utilizados para variadas aplicações, dependendo de extensos agrupamentos de imagens segmentadas por humanos (Pachitariu; Stringer, 2022).

Dentro desse contexto, tem o Cellpose, um algoritmo de segmentação treinado através de imagens segmentadas manualmente, que aprende os padrões demonstrados por humanos, para posteriormente, utilizar em novas imagens. Esse processo de automação gradual ocasiona a diminuição do esforço humano, aumenta o rendimento e consequentemente, a confiabilidade na análise das imagens (Riendeau *et al.*, 2025).

Um estudo realizado por Stringer *et al.* (2021), comparou o Cellpose com outros programas com a mesma finalidade. Para o treinamento da ferramenta, foram utilizadas 70.000 imagens de diferentes bancos de dados, como artigos, materiais educacionais e notícias. As células utilizadas foram citoplasmas, microscopia celular no geral e células fluorescentes. O modelo Cellpose foi comparado com outros *softwares* muito utilizados

para esse tipo de análise, como Stardist, Mask R-CNN e modelos U-Net. Como resultado, o experimento demonstrou que, mesmo para imagens mais complexas, o Cellpose obteve resultados superiores, indicando ser um algoritmo robusto, versátil e confiável para análise automatizada de elementos anatômicos.

Outro artigo publicado por Han *et al.*, (2024), também demonstrou a eficiência do Cellpose ao compará-lo com 18 outros modelos de aprendizado profundo, os quais alguns eram pré-treinados anteriormente por outras imagens, e outros treinados somente pelos próprios durante o experimento. Em um primeiro momento, todos os modelos foram treinados com imagens de imunofluorescência de pele humana infectadas com o vírus HSV (Herpes simplex humano). Após essa primeira etapa, os 8 melhores modelos foram treinados com mais imagens. Como resultado, o Cellpose se destacou tanto na primeira etapa quanto na segunda, demonstrando eficiência sobre-humana e alta plasticidade.

4. METODOLOGIA

4.1 Amostragem da madeira

A espécie utilizada foi um clone de *E. grandis* x *E. urophylla*, aos 6 anos de idade, pertencentes a empresa Suzano S.A., provenientes de florestas em São Paulo, Maranhão e Bahia (Figura 1).

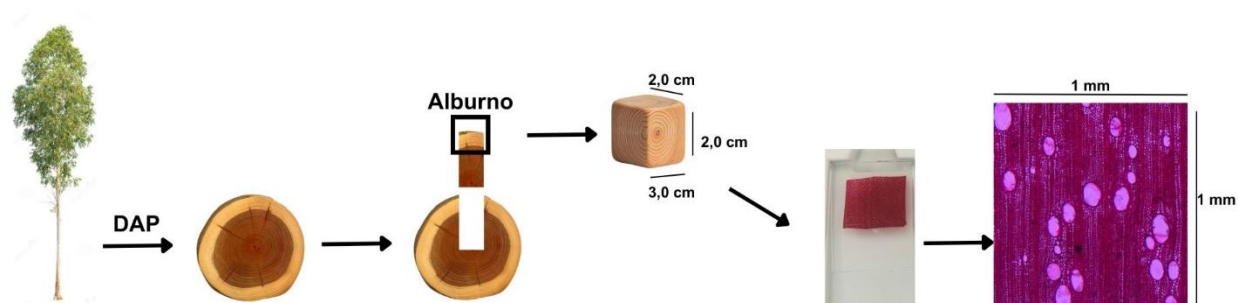
Figura 1 - Mapa do Brasil representando as 3 regiões onde foram coletadas os clones



Fonte: A Autora (2026).

Foram coletadas cinco árvores de cada região, todas pertencentes ao diâmetro à altura do peito (DAP, a 1,30 m do solo) médio do talhão, com o objetivo de representar o valor médio de cada tratamento. Em seguida, retirou-se um disco de 2,5 cm de espessura na região do DAP de cada árvore. Da região do alburno de cada disco foi retirado um corpo-de-prova com dimensões de 2 x 2 x 3 cm (tangencial x radial x longitudinal) para confecções de lâminas histológicas (Figura 2).

Figura 2 - Obtenção de amostras de madeira para análise anatômica



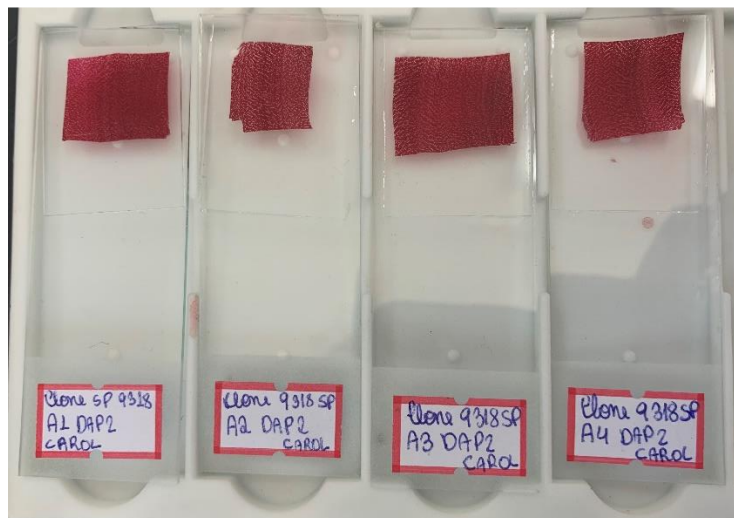
Fonte: A Autora (2026).

4.2 Preparo das lâminas histológicas

Visando facilitar o corte da madeira, os corpos-de-prova foram fervidos em água durante um período de aproximadamente 6 horas. Em seguida, foram levados para o micrótomo de deslize (Leica SM 2000R), para retirada de cortes no plano transversal de 20 µm de espessura, utilizados para preparação das lâminas histológicas.

Os cortes obtidos foram inicialmente alocados em uma placa de Petri, contendo hipoclorito de sódio a 60%, aquecido a 70 °C. Em seguida, aguardou-se o tempo de reação da substância, e o excesso foi removido com água corrente. Para a coloração, foram utilizadas 4 gotas de safranina, após o tempo de reação, as amostras foram lavadas com álcool a 80% e, em seguida, com álcool a 20%, repetindo-se o processo de 2 a 3 vezes. Por fim, algumas gotas de glicerina foram utilizadas para a montagem das lâminas (Figura 3).

Figura 3 - Lâmina histológica temporária.



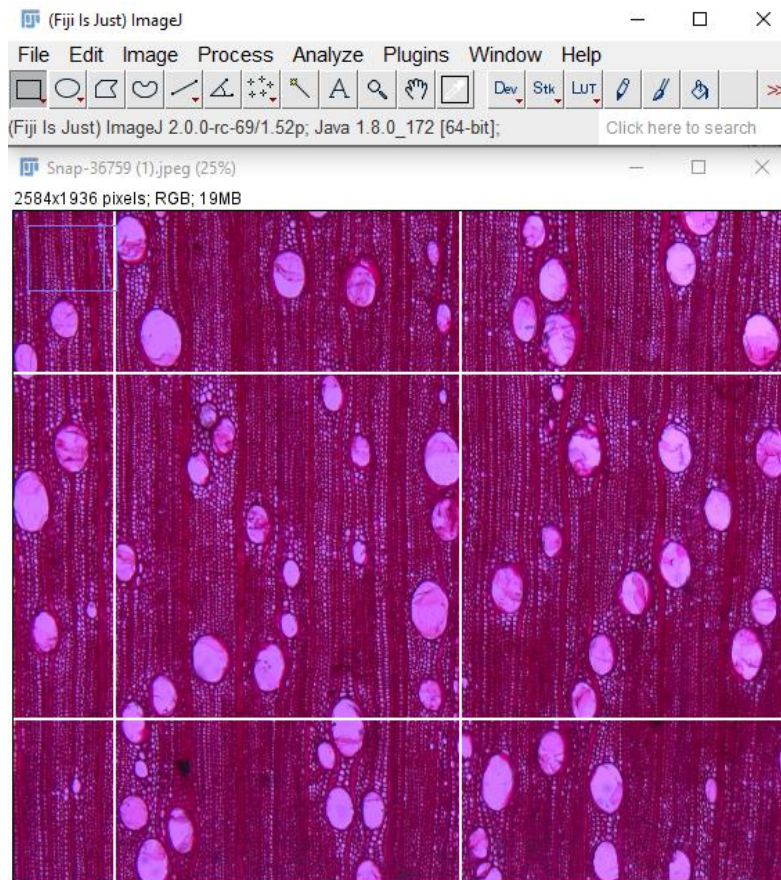
Fonte: A Autora (2026).

Para mensuração dos vasos, foi utilizado um microscópio ótico (Zeiss: Axio Scope.A1), acoplado com uma câmera (Axiocam MRc5), através do *software* AxionVision. Foram retiradas 25 fotomicrografias, totalizando 350 no total na objetiva de 5x. As medições manuais do diâmetro, área e frequência dos vasos, foram realizadas no *software* ImageJ e Coreldraw.

4.3 Delimitação da fotomicrografia da lâmina histológica

Para a delimitação do quadrante de área de 1 mm², foram selecionadas 5 fotomicrografias por lâmina de madeira, com dimensões de 2580 x 1936 µm, para todas as 5 árvores de cada região, totalizando 75 micrografias. As imagens selecionadas foram recortadas em quadrantes de 1mm² pelo programa ImageJ sempre na mesma área (Figura 4). Os quadrantes foram utilizados para a medição do diâmetro, área e frequência dos vasos de forma manual e automatizada. Para o treinamento do modelo do Cellpose, não foram utilizadas as 75 micrografias, isso porque, poderiam influenciar positivamente os resultados dos treinamentos. As 75 micrografias foram utilizadas apenas para comparação dos dados. O restante das 275 fotomicrografias foram utilizadas apenas para o treinamento do modelo

Figura 4 - Recorte do quadrante da Fotomicrografia realizado no ImageJ.

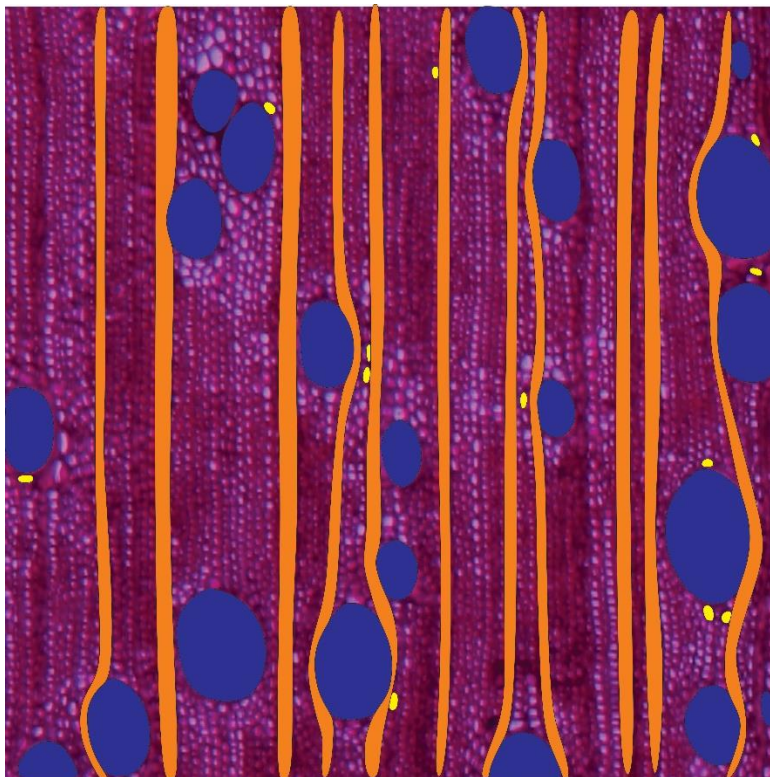


Fonte: A Autora (2026).

4.4 Área dos vasos e área da madeira ocupada por vaso em segmentação manual

Os quadrantes foram utilizados para o cálculo da área média dos vasos e a área da madeira ocupada por vasos, através da segmentação manual. Os quadrantes foram submetidos ao CorelDraw para coloração dos elementos de vasos (Figura 5), e depois a quantificação foi realizada pelo Gimp, que contabiliza os pixels de cores iguais.

Figura 5 - Imagem da lâmina histológica após tratamento no CorelDraw. Onde os elementos de azul são vasos, os de amarelo são parênquimas axiais e os de laranja são raios.



Fonte: A Autora (2026)

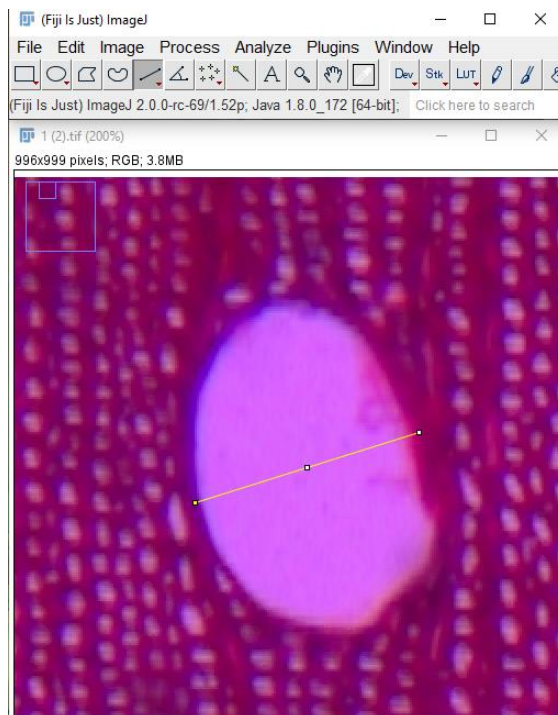
4.5 Frequência e diâmetro dos vasos manual

Os quadrantes das micrografias recortados com área de 1 mm² foi usado para medição da frequência e diâmetro dos vasos. Na frequência foi realizado a contagem dos vasos inteiros, ou seja, os que estavam 100% da sua área no interior do quadrante, foi denominado no texto como “frequência 100%”. Além disso, também foi realizado a contagem da frequência dos vasos que apresentaram 50% ou mais da sua área para o interior do quadrante, de acordo com a norma IAWA (1989), este recebeu a denominação de “frequência 50%”.

Para a medição manual do diâmetro tangencial e área dos vasos foi utilizado o programa ImageJ (Figura 6), de acordo com a norma IAWA (1989), é medido ao longo de seu eixo tangencial mais largo. A medição do diâmetro foi realizada apenas com os

vasos que estavam 100% dentro do quadrante.

Figura 6 - Demonstração da medição de diâmetro no ImageJ.



Fonte: A Autora (2026).

4.6 Criação do modelo no Cellpose para análise dos vasos

Foi criado o modelo no Cellpose para a medição automatizada dos vasos da madeira de eucalipto. Para a avaliação da qualidade do modelo criado, foram medidos os vasos em imagens de forma manual e pelo modelo criado no Cellpose. Ao longo do resultado essa comparação foi denominada de medição manual e medição no Cellpose.

A segmentação automatizada foi realizada pelo *Software* Cellpose na versão 3.1.0, para a instalação foi utilizado o programa *Anaconda Power Shell Prompt*. Para a execução do Cellpose foi utilizado a sequência de comandos (Código 1).

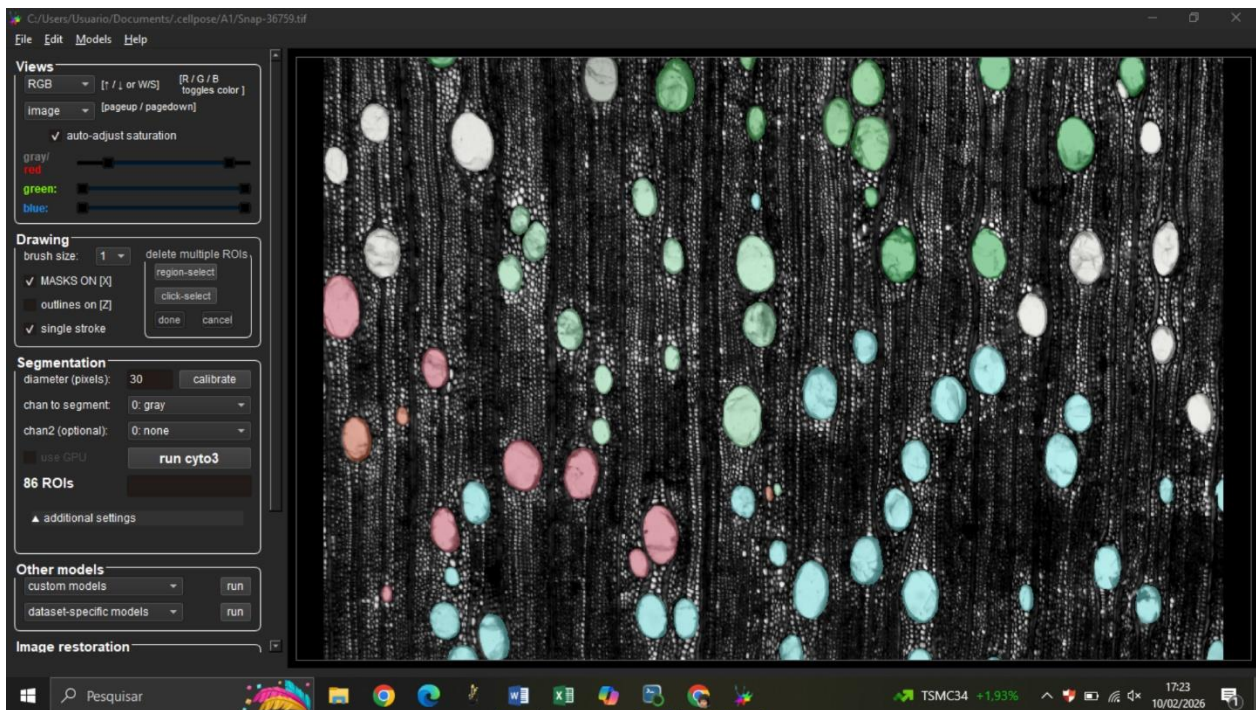
Código 1 - Comandos utilizados para instalação e execução do *software* Cellpose.

conda activate cellpose

```
python -m pip install cellpose[gui]  
python -m cellpose
```

Para o treinamento, utilizou-se o método *human-in-the-loop* (Pachitariu; Stringer, 2022), onde o modelo realiza a segmentação de poucas imagens, que são corrigidas por um avaliador. Assim, foram usadas 275 fotomicrografias com dimensões de 2584 x 1936 pixels para o treinamento, onde foram analisadas 19.250 regiões de interesse (ROI) (Figura 7). Define-se como ROI cada célula de vaso que foi segmentada pelo programa. Ao final do treinamento e criação do modelo, o mesmo foi usado para análise dos vasos do eucalipto das 75 fotomicrografias que não entraram no treinamento, para observarmos a eficiência do modelo treinado. De acordo com Pachitariu e Stringer, (2022), com a utilização do método *human-in-the-loop*, o *software* necessita apenas de 100-200 ROI para apresentar eficiência.

Figura 7 - Fotomicrografia segmentada dentro do Software Cellpose



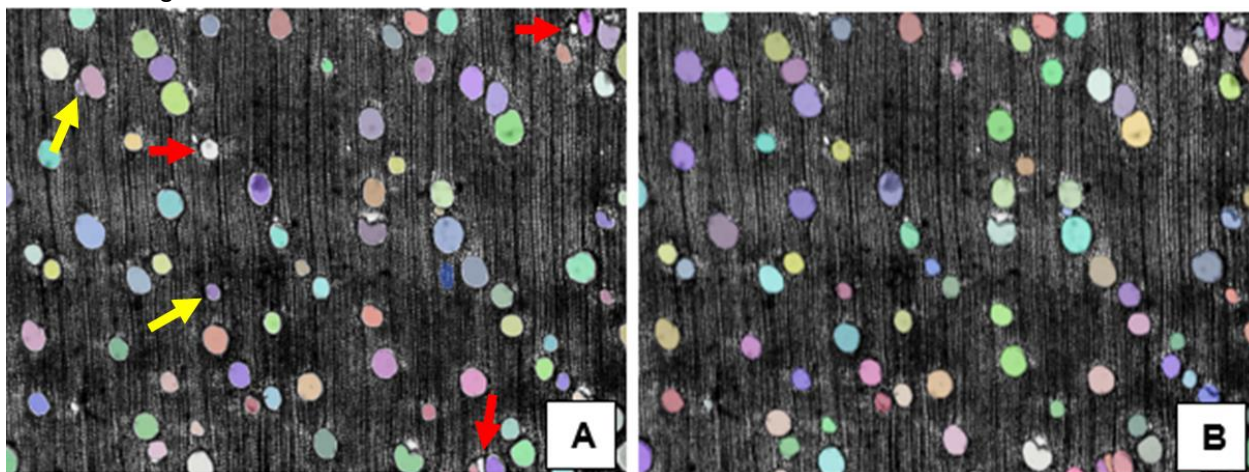
Fonte: A Autora (2026).

Para o processamento das imagens, optou-se por trabalhar com as imagens em escala de cinza, o que facilita a identificação das estruturas anatômicas e não tem interferência de cor para o treinamento.

Após a abertura do Cellpose, foram aplicadas as configurações necessárias para a segmentação das imagens. Na aba *Drawing*, foi marcada a opção *Outlines*. Em *Segmentation*, na opção *Diameter*, definiu-se o valor 100, ajustando o diâmetro para que seu tamanho correspondesse aproximadamente ao diâmetro dos vasos. Em seguida, em *Image restoration*, na aba *restore-dataset*, foi escolhido a opção *nuclei*. Por fim, em *Other models*, na aba *dataset-specific mode*, foi selecionada a opção *nuclei*. Para a execução do modelo, selecionávamos a opção *Run*.

Após a segmentação automática realizada pelo programa, foram selecionadas e corrigidas as máscaras incorretas sobre os vasos. Esse processo foi repetido cinco vezes antes da criação de um modelo próprio. Posteriormente, o treinamento teve continuidade com as 275 fotomicrografias que foram tiradas (Figura 8).

Figura 8 - A: máscaras do Software no início do treinamento. B: Máscaras após o treinamento com 52 imagens.



Setas em vermelho indicam os vasos não reconhecidos e as setas em amarelo os vasos com preenchimento incorreto.

Fonte: A Autora (2026).

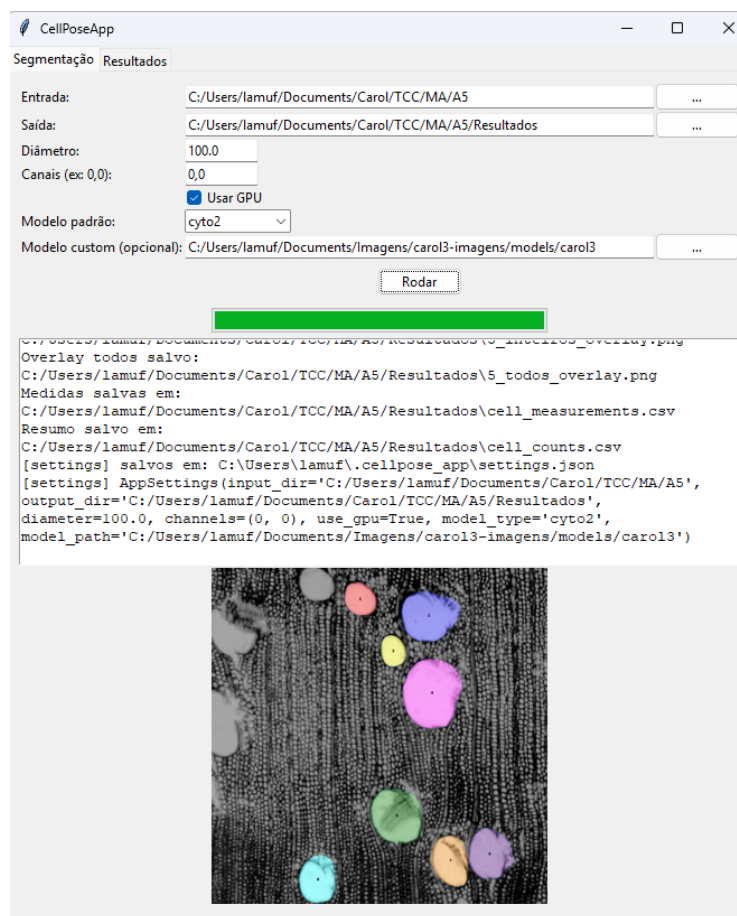
A validação deste modelo foi realizada com base nas medições da frequência do

vaso, diâmetro do vaso, área do vaso e a porcentagem da madeira ocupada por vaso no quadrante delimitado de 1 mm², que foi usado para fazer as medições manualmente no Imagen J, como descrito nos tópicos anteriores.

4.7 Automatização da frequência, área e diâmetro dos vasos

Após a consolidação do modelo, foi desenvolvido o aplicativo CellposeApp (Figura 9) no Python e que possibilitou a contabilização dos vasos no que se refere ao diâmetro, área e frequência. Os cálculos apresentados pelo aplicativo seguiam a seguinte ordem, frequência dos vasos inteiros (frequência 100%), frequência dos vasos que estavam 50% dentro do quadrante (frequência 50%), área total dos vasos, porcentagem da madeira ocupada pelos vasos e diâmetro tangencial dos vasos.

Figura 9 - Interface do CellposeApp utilizado para os cálculos de frequência, área e diâmetro dos vasos.



Fonte: A Autora (2026).

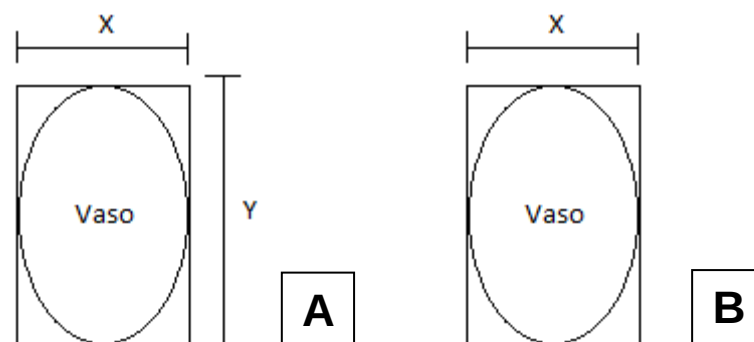
Para análise da área da madeira ocupada por vaso, considerou-se a soma das áreas de todos os vasos localizados no quadrante analisado em relação a área total da imagem. Para a porcentagem foi multiplicado por 100, conforme Equação 1:

$$V\% = \frac{\Sigma ATV}{A_{foto}} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: ΣATV é a soma total das áreas dos vasos e A_{foto} é a área da foto, as quais ambas unidades são em pixels

No cálculo do diâmetro do vaso, para encontrar a média do eixo X e Y, o aplicativo criou uma caixa ao redor do elemento de vaso denominada de *bounding box*, a qual contabilizou suas extremidades (altura e comprimento) e realizou a média das duas medidas. Já para a média diâmetro do eixo X, o aplicativo novamente criou uma caixa ao redor da célula, assim, devido as imagens terem sido capturadas com os raios paralelos e verticais, a delimitação tendia a considerar o eixo mais achatado da célula (Figura 10) para o eixo X e para o eixo Y.

Figura 10 - Demonstração do Bounding box ao redor do elemento de vaso. A: Diâmetro no eixo X e Y. B: Diâmetro no eixo X.



Fonte: A Autora (2026)

Com exceção dos resultados de porcentagem total de vasos e a frequência, as medidas foram apresentadas em pixels, dessa forma, para a conversão área dos vasos totais, média da área dos vasos totais e média da área dos vasos inteiros foi realizado um cálculo de proporção entre o tamanho dos quadrantes em μm e os pixels dessas

imagens.No que se refere ao fator de conversão da média dos diâmetros dos eixos X, foi utilizado apenas os valores de comprimento tanto do tamanho das imagens em micrometros (μm) quanto em pixels.

4.8 Análise Estatística

Para comparar as medições realizadas manualmente e as medições a partir do modelo criado no Cellpose, foi verificada a distribuição dos dados, quando não apresentou distribuição normal, foi feito o teste não paramétrico kruskal-wallis.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para as variáveis de frequência 100% e frequência 50%, observou-se que os dados apresentavam distribuição normal. Além disso, o teste de homogeneidade de variâncias demonstrou que tanto o método manual, quanto o realizado pelo Cellpose, foram estatisticamente iguais (Tabela 1).

Tabela 1 – Valores médios da frequência de vasos medidos manualmente e no cellpose.

Característica	Manual	Cellpose
Frequência 100% (n/m^2)	9,98 a (2,51)*	10,60 a (2,54)
Frequência 50% (n/m^2)	11,93 a (2,68)	11,68 a (2,66)

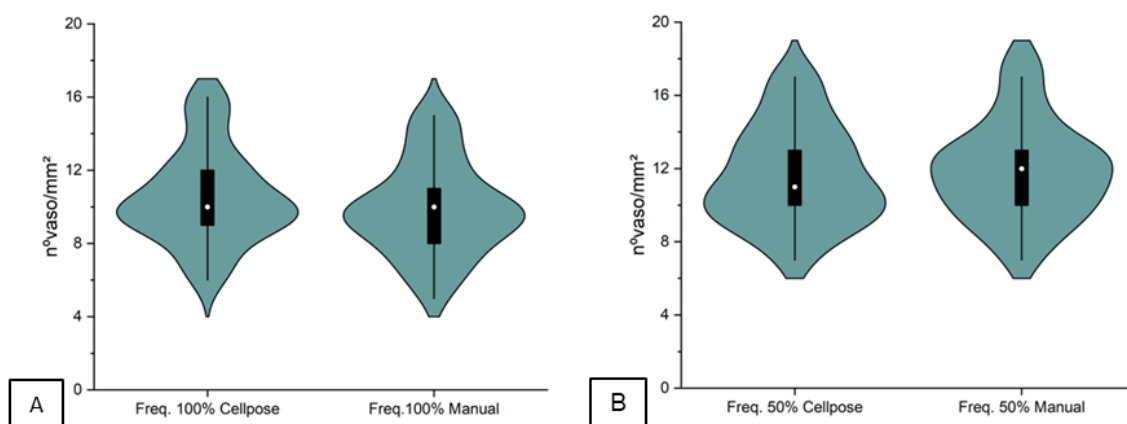
Valores seguidos da mesma letra na linha não diferiram estatisticamente pela Anova ($p \geq 0,05$).

*Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Fonte: A Autora (2026).

No gráfico violino (Figura 11), o método manual e o realizado pelo modelo do Cellpose, apresentaram frequência de vasos com mediana em torno de 10 vasos/ mm^2 , e distribuição semelhantes dos resultados.

Figura 11 - Distribuição das frequências por método manual e por segmentação automatizada utilizando o Cellpose. A: Frequência 100%. B: Frequencia 50%



Fonte: A Autora (2026).

Quanto a dispersão, a variação foi em torno de 1 vaso, com a Frequência 100% no Cellpose entre 6 e 16 vasos/mm², enquanto frequência manual variou de 5 a 15 vasos/mm², sugerindo assim uma variabilidade semelhante. Em ambos os gráficos, o violino apresenta-se no formato mais largo entre 9 e 11 vasos/mm², demonstrando a densidade de dados nessa faixa, quanto ao intervalo interquartil, 50% dos dados estão distribuídos de forma semelhante. Dessa forma, pode-se afirmar a concordância entre a medição de frequência de forma manual e pelo programa Cellpose.

Com relação a frequência das células que se encontravam mais de 50% dentro da fotomicrografia, observou-se que novamente valor central para os dois métodos está similar, com mediana em torno de 12 vasos/mm² e 11 vasos/mm² para frequência manual e no Cellpose, respectivamente. Na dispersão, em ambos os métodos houve uma variação de 7 a 17 vasos/mm², demonstrando variabilidade semelhante. Em relação à densidade dos dados e consequentemente, o formato do gráfico, os dados se encontram em maior quantidade entre 10 e 13 vasos/mm², porém o gráfico manual possui uma distribuição ligeiramente mais expandida na faixa superior, o que sugere valores de frequência mais elevados. A diferença entre valores de frequência está atrelada a subjetividade do avaliador ao contabilizar a frequência. Quanto ao intervalo interquartil, observa-se tamanho e posição semelhantes em ambos os métodos. Dessa forma também podemos dizer que, tanto na contagem da frequência 50% manual, quanto a

realizada pelo Cellpose são similares.

Tabela 2 - Resultados dos testes de normalidade e comparação estatística para porcentagem total de vasos obtidas pelo Cellpose e pelo método manual

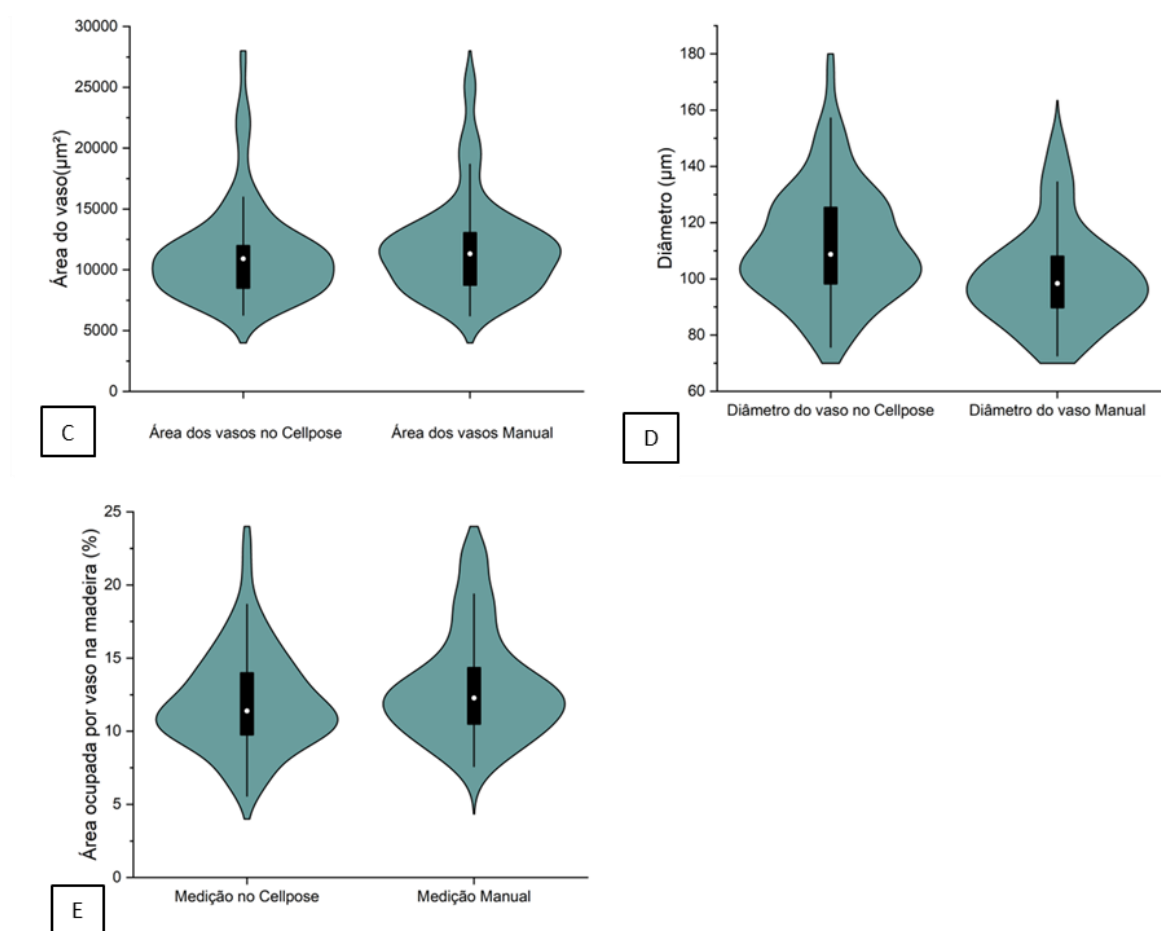
Característica	Manual		Cellpose	
% da madeira ocupada por vasos	12,28	a	11,40	a
Área dos vasos (μm^2)	159853,70	a	133993,60	a
Diâmetro do vaso (μm)	98,39	a	108,76	b

Valores seguidos da mesma letra na linha não diferiram estatisticamente pelo teste de Kruskal-Wallis ($p \geq 0,05$).

Fonte: A Autora (2026).

No que se refere as variáveis a porcentagem da madeira ocupada por vasos, área dos vasos (μm^2) e diâmetro do vaso, elas não apresentaram distribuição normal (Tabela 2). Dessa forma, optou-se por realizar métodos não paramétricos, sendo ele o Kruskal-Wallis. Foi observado que a porcentagem da madeira ocupada por vasos e a área dos vasos (μm^2) não apresentaram diferenças estatisticamente significativas, indicando que os dois métodos apresentam resultados similares. Por outro lado, o diâmetro dos vasos, quando submetido ao teste de Kruskal-Wallis, apresentou diferença estatisticamente significativa entre os métodos.

Figura 12 - Distribuição das variáveis anatômicas obtidas pelo método manual e por segmentação automatizada Cellpose. C: áreas dos vasos. D: diâmetro dos vasos. E: porcentagem de madeira ocupada por vasos.



Fonte: A Autora (2026).

A área dos vasos medida do Cellpose e manualmente houve uma tendência central parecidas, com mediana de aproximadamente 10.000–11.000 μm^2 (Figura 12). Já sobre a dispersão dos dados é semelhante com valores se distribuindo entre 6.000 e 18.000 μm^2 , porém o método de medição manual apresentou maior variabilidade, o que foi evidenciado pela cauda superior mais extensa. Na densidade dos dados, os valores concentram-se entre 8.000 e 12.000 μm^2 para as duas técnicas, o formato do gráfico é bastante similar, demonstrando distribuições semelhantes, porém podemos observar a cauda superior mais longa no gráfico manual, o que evidencia a presença de maiores vasos com menores frequências.

Novamente, embora a mediana seja aproximada, pode-se observar uma maior

extensão dos *bigotes* do *boxplot* no método manual, indicando maior amplitude/variabilidade dos valores da área ocupada por vasos. Dessa forma, pode-se dizer que os resultados indicam que o método automatizado (modelo do Cellpose) apresenta distribuição da área dos vasos semelhante ao método manual, com valores centrais e dispersão comparáveis.

De acordo com o gráfico de violino (Figura 12), o diâmetro apresentou algumas diferenças para os dois métodos. A medição manual apresentou um diâmetro no valor de 100 μm , enquanto o Cellpose apresentou 110 μm .

O *boxplot* do método Cellpose apresenta maior tamanho, indicando um intervalo interquartil (IQR) mais amplo em comparação ao método manual, ou seja, 50% dos dados apresentados estão distribuídos numa faixa de diâmetro maior. Em relação a dispersão, o método de medição automatizado apresenta maior extensão dos *bigotes* do *boxplot*, e por consequência maior amplitude e variabilidade dos dados.

Quanto a densidade dos dados, observa-se que os dois gráficos possuem formatos distintos entre si, sendo o método manual possuindo maior largura, indicando maior concentração de dados na faixa de 90 a 120 μm , enquanto o método automatizado apresenta uma faixa mais ampla, sendo de 90 a 130 μm . Assim, podemos observar que na técnica automatizada possui a presença de diâmetros mais elevados (Hintze; Nelson, 1998).

De acordo com IAWA (1989), para a medição dos diâmetros de vasos, é necessário dividi-lo em secções transversais no ponto mais largo do lúmen. Porém, algumas fotomicrografias possuíam vasos com orientações diferentes de 90°, dessa forma, o programa Cellpose ao gerar uma caixa ao redor do vaso (*bounding box*) e coletar sua largura, superestimou os valores (Figura 13).

Figura 13 - Representação da *bounding box* envolvendo um vaso orientado a 90° em comparação a outro vaso com orientação diferente do eixo de 90°



Fonte: A Autora (2026)

Na medição da porcentagem de área dos vasos na madeira (Figura 12), em ambos os métodos apresentam valores centrais próximos, com medianas em torno de 11-12% de área ocupada por vasos. Em relação ao *boxplot*, em ambos os métodos o Q3 inicia-se na mesma altura, porém o Q1 está em alturas diferentes, com a medição no Cellpose se estendendo um pouco mais, indicando mais variabilidade em 50% dos dados.

Na dispersão de dados, embora a mediana seja aproximada, podemos observar uma maior extensão dos *bigotes* do *boxplot* no método automatizado, indicando maior amplitude/variabilidade dos valores da área ocupada por vasos. De maneira prática isso pode indicar uma maior sensibilidade do algoritmo na segmentação, ao capturar vasos pequenos e grandes demais.

Com relação a densidade e distribuição dos dados, no método Cellpose, apresenta-se um formato mais largo na porção inferior, indicando uma maior concentração de valores mais baixos. Já no método manual, a parte mais larga do gráfico está em torno da mediana, com menor distribuição de densidade ao longo do eixo. Essa discrepância nos dois formatos também sugere uma maior suscetibilidade do Cellpose em capturar vasos menores em relação ao método manual.

O estudo de Pachitariu e Stringer (2022) avaliou o desempenho do Cellpose 2.0

para segmentação automatizada, comparando-o aos modelos TissueNet e LiveCell. Utilizando modelos pré-treinados e agrupamento de imagens por estilo, o Cellpose apresentou desempenho superior, mesmo quando treinado com apenas 500 a 1.000 ROI por categoria, enquanto os modelos comparativos empregaram entre 81 mil e 200 mil ROI.

Quando comparado ao presente trabalho, cujo objetivo foi o treinamento do modelo no Cellpose a partir de 275 fotomicrografias, observou-se, durante o processo, uma média de 70 ROIs por fotomicrografia, totalizando 19.250 regiões de interesse. Esse valor é quase vinte vezes superior ao necessário para que o Cellpose superasse os modelos de TissueNet e LiveCell, o que corrobora com os resultados estatísticos encontrados no neste trabalho.

Ainda, os autores Pachitariu; Stringer (2022) também avaliaram o treinamento *human-in-the-loop*, o qual também foi utilizado no presente trabalho. Tal abordagem de treinamento consiste no modelo realizar a segmentação de poucas imagens e a correção do avaliador logo em seguida. Após isso o modelo reaprende com menos erros e ROI mais acertos. Para esse processo, os autores concluíram que o treinamento de 100-200 ROI foi suficiente para um resultado satisfatório, o que havia levado 2 horas no tempo do avaliador.

6. CONCLUSÃO

Com base nos dados apresentado, podemos concluir que, de maneira geral, o modelo treinado do Cellpose obteve um ótimo desempenho quando comparado aos métodos de medição manual, sendo eficiente para a mensuração de vasos em clones de *E. grandis* x *E. urophylla*.

Os resultados indicaram ausência de diferenças estatísticas significativas entre os métodos para as variáveis de frequência, área dos vasos e porcentagem da madeira ocupada por vasos mostrando que o modelo é eficiente para a mensuração desses parâmetros.

No entanto, para a variável diâmetro dos vasos, foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os métodos, mostrando uma possível limitação do modelo na estimativa dessa variável, devido ao método utilizado para coletar os dados dessa variável.

Por fim, de maneira geral, o modelo treinado provou ser uma ferramenta promissora para automatização de análises anatômicas, reduzindo a necessidade de mensuração manual, agilizando a obtenção de informações importantes, diminuindo o esforço humano e possibilitando a análise de um grande conjunto de imagens.

7. REFERÊNCIAS

- ASSIS, Máira Reis de *et al.* **Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla***. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 32, n. 71, p. 291–302, 28 set. 2012.
- BALZANO, Angela; MERELA, Maks; DE MICCO, Veronica. **Advances in Wood Anatomy: Cutting-Edge Techniques for Identifying Wood and Analyzing Its Structural Modifications**. Forests, v. 15, n. 10, p. 1802, 14 out. 2024.
- BARBOSA, Thiago Leite *et al.* **Influence of site in the wood quality of *Eucalyptus* in plantations in Brazil**. Southern Forests: a Journal of Forest Science, v. 81, n. 3, p. 247–253, 3 jul. 2019.
- BRUNEL, Guilhem *et al.* **Automatic identification and characterization of radial files in light microscopy images of wood**. Annals of Botany, v. 114, n. 4, p. 829–840, 1 set. 2014.
- ERGUN, Halime. **Segmentation of rays in wood microscopy images using the U-net model**. BioResources, v. 16, n. 1, p. 721–728, 7 dez. 2020.
- GAUTHEY, Alice *et al.* **Mechanisms of xylem hydraulic recovery after drought in *Eucalyptus saligna***. Plant, Cell & Environment, v. 45, n. 4, p. 1216–1228, 10 abr. 2022.
- GENG, Dali *et al.* **MdMYB88 and MdMYB124 Enhance Drought Tolerance by Modulating Root Vessels and Cell Walls in Apple**. Plant Physiology, v. 178, n. 3, p. 1296–1309, nov. 2018.
- HAN, Sunwoo *et al.* **Optimizing deep learning-based segmentation of densely packed cells using cell surface markers**. BMC Medical Informatics and Decision Making, v. 24, n. 1, p. 124, 15 maio 2024.
- HINTZE, Jerry L.; NELSON, Ray D. **Violin Plots: A Box Plot-Density Trace Synergism**. The American Statistician, v. 52, n. 2, p. 181–184, maio 1998.
- HODGE, G. R.; DVORAK, W. S. **Provenance variation and within-provenance genetic parameters in *Eucalyptus urophylla* across 125 test sites in Brazil, Colombia, Mexico, South Africa and Venezuela**. Tree Genetics & Genomes, v. 11, n. 3, p. 57, 21 jun. 2015.
- HSING, Tseng Yao; PAULA, Nadia Figueiredo de; PAULA, Rinaldo César de. **CARACTERÍSTICAS DENDROMÉTRICAS, QUÍMICAS E DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE HÍBRIDOS DE *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla***; Ciência Florestal, v. 26, n. 1, p. 273–283, 31 mar. 2016.
- IAWA Journal**, v. 10, n. 3, p. 219–232, 1989.

- KERET, Rafael; DREW, David M.; HILLS, Paul N. **Xylem cell size regulation is a key adaptive response to water deficit in *Eucalyptus grandis***. *Tree Physiology*, v. 44, n. 7, 2 jul. 2024.
- MALAVASI, Ubirajara Contro; DAVIS, Antony Swick; MALAVASI, Marlene de Matos. **Lignin in Woody Plants under Water Stress: A Review**. *Floresta e Ambiente*, v. 23, n. 4, p. 589–597, 12 set. 2016.
- MARINI, Lucas José *et al.* **Estimativa da resistência à tração nas madeiras de dez espécies de eucalipto em função de parâmetros anatômicos e da densidade aparente**. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 27, n. 4, 2022.
- MOTTA, Javan Pereira *et al.* **Caracterização da madeira de quatro espécies florestais**. *Ciência Rural*, v. 44, n. 12, p. 2186–2192, dez. 2014.
- PACHITARIU, Marius; STRINGER, Carsen. **Cellpose 2.0: how to train your own model**. *Nature Methods*, v. 19, n. 12, p. 1634–1641, 7 dez. 2022.
- PANDEY, Sudip *et al.* **Xylem anatomical responses to climate variability in Himalayan birch trees at one of the world's highest forest limit**. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, v. 33, p. 34–41, ago. 2018.
- PIRES, Tatiana de Fátima Martins. **Impacto do clima nos elementos anatômicos de clones de eucalipto**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2023.
- RIENDEAU, Jeremiah M. *et al.* **Cellpose as a reliable method for single-cell segmentation of autofluorescence microscopy images**. *Scientific Reports*, v. 15, n. 1, p. 5548, 14 fev. 2025.
- RODRÍGUEZ-RAMÍREZ, Ernesto C. *et al.* **Plastic adjustments in xylem vessel traits to drought events in three *Cedrela* species from Peruvian Tropical Andean forests**. *Scientific Reports*, v. 12, n. 1, p. 21112, 7 dez. 2022.
- STRINGER, Carsen *et al.* **Cellpose: a generalist algorithm for cellular segmentation**. *Nature Methods*, v. 18, n. 1, p. 100–106, 14 jan. 2021.
- STRINGER, Carsen; PACHITARIU, Marius. **Benchmarking cellular segmentation methods against Cellpose**. , 7 abr. 2024.
- TALGATTI, Maiara *et al.* **CARACTERIZAÇÃO ANATÔMICA DE CLONES COMERCIAIS DE EUCALYPTUS PARA A PRODUÇÃO DE PAPEL**. *BIOFIX Scientific Journal*, v. 5, n. 1, p. 65, 21 ago. 2019.
- TREVISAN, Rômulo *et al.* **Dimensões das fibras de *Eucalyptus grandis* em**

diferentes estratos e posição radial. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 44, 31 jul. 2024.

VAZ, Álvaro *et al.* **Effect of enzymatic treatment on Eucalyptus globulus vessels passivation.** Scientific Reports, v. 13, n. 1, p. 2832, 17 fev. 2023.

VON ARX, Georg *et al.* **Quantitative Wood Anatomy—Practical Guidelines.** Frontiers in Plant Science, v. 7, 3 jun. 2016.