

## Avaliação da Precisão da Medida de Raízes de Plantas com Processamento Digital de Imagens

### *Evaluation of Plant Root Measurement Accuracy Using Digital Image Processing*

Bruna Neves Machado<sup>1</sup>, Jonathan de Matos<sup>2</sup>, Rosane Falate<sup>3</sup>, Teruo Matos Maruyama<sup>4</sup>, Emili Everz Golombiêski<sup>5</sup>, Maria Salete Marcon Gomes Vaz<sup>6</sup>

#### RESUMO

O processamento digital de imagens tem como objetivo identificar e obter informações das imagens, por meio de análises e técnicas matemáticas. Esta abordagem possui diversas aplicações em inúmeras áreas, podendo ser utilizada para auxiliar na identificação de doenças, inspeção industrial, controle de tráfego, reconhecimento facial e na medição de raízes. A medição do comprimento e diâmetro de raízes é utilizada para indicar a disponibilidade de água e de nutrientes no solo, afetando diretamente na produção da cultura. Dado o exposto, o objetivo deste trabalho é desenvolver e avaliar metodologias capazes de aumentar a precisão na medição do comprimento e diâmetro de objetos, por meio do processamento digital de imagens. Além disso, possibilitar a utilização das metodologias desenvolvidas na medição de raízes de plantas. Para tanto, foram comparadas as acurácias de três métodos, durante a obtenção do comprimento e diâmetro de fios de cobre. Dentre os três métodos comparados, o método em fase de desenvolvimento apresentou os menores erros relativos na fase de testes. Esse método obteve erros relativos de 1,45% a 7,42% para a obtenção do comprimento. Foi possível identificar os efeitos da resolução da imagem na acurácia da medição do comprimento e diâmetro de fios de cobre.

**Palavras-chave:** Processamento Digital de Imagens; Análise de imagens; Medição de comprimento e diâmetro; raízes de plantas.

#### ABSTRACT

Digital image processing aims to identify and obtain information from images, through analysis and mathematical techniques. This approach has diverse applications in numerous areas and can be used to assist in disease identification, industrial inspection, traffic control, facial recognition and root measurement. Measuring the length and diameter of roots is used to indicate the availability of water and nutrients in the soil, directly affecting crop production. Given the above, the objective of this work is to develop and evaluate methods capable of increasing precision in measuring the length and diameter of objects, through digital image processing. Furthermore, it enables the use of methodologies developed for measuring plant roots. To this end, the accuracies of three methods were compared when obtaining the length and diameter of copper wires. Among the three methods compared, the method in the development phase presented the smallest errors related to the testing phase. This method obtained related errors from 1.45% to 7.42% for length delivery. It was possible to identify the effects of image resolution on the accuracy of measuring the length and diameter of copper wires.

**Keywords:** Digital Image Processing; Image analysis; Length and diameter measurement; plant roots.

<sup>1</sup> Mestre em Computação Aplicada – PPGCA/UEPG.

E-mail: nevesbm@gmail.com  
Orcid: 0009-0002-7177-0363

<sup>2</sup> Mestre em Ciência da Computação – DEINFO/UEPG.

E-mail: jonathan@uepg.br  
Orcid: 0000-0003-3344-4145

<sup>3</sup> Doutora em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. – PPGCA/UEPG

E-mail: rfalate@uepg.br  
Orcid: 0000-0002-3948-5063

<sup>4</sup> Doutor em Ciência da Computação - PPGCA/UEPG

E-mail: shinigam8@gmail.com  
Orcid: 0000-0002-5173-0375

<sup>5</sup> Mestranda em Computação Aplicada - PPGCA/UEPG.

E-mail: emilieverz043@gmail.com  
Orcid: 0000-0002-8354-9925

<sup>6</sup> Doutora em Ciência da Computação – PPGCA/UEPG.

E-mail: salete@uepg.br  
Orcid: 0000-0001-9172-1863

## 1. INTRODUÇÃO

Processamento Digital de Imagens (PDI) permite a identificação e aquisição de informações de imagens por meio de análises matemáticas e técnicas (Gonzalez e Woods, 2017). Compreender as nuances do processamento digital de imagens é importante dada sua amplitude de aplicações em diversos domínios do conhecimento. ARIVAZHAGAN et al. (2016) destacaram a capacidade do PDI em identificar e extrair informações de imagens, suscitando interesse em áreas diversas, como medicina, engenharia, ciências ambientais, computação, além da agricultura.

No contexto agrícola, o PDI corresponde uma ferramenta para auxiliar no monitoramento do crescimento de culturas, detecção de doenças em plantas, análise de padrões de irrigação e mapeamento de áreas cultivadas. Essa aplicação direcionada do PDI na agricultura permite uma gestão eficiente dos recursos agrícolas e contribui para o aumento da produtividade e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

O Processamento Digital de Imagens representa uma inovação, oferecendo ferramentas que melhoram a precisão e a eficiência das análises de campo. A investigação contínua e o desenvolvimento de novas técnicas de PDI prometem transformar a forma como a agricultura é praticada, promovendo uma gestão sustentável dos recursos naturais. Portanto, o investimento em pesquisa e desenvolvimento de PDI é essencial para o futuro da agricultura e para a segurança alimentar.

A aplicação do PDI na agricultura pode ser vista na utilização de imagens de satélite para monitorar a saúde das plantações em larga escala. Essas imagens permitem a detecção precoce de estresses nas plantas causados por pragas, doenças ou condições adversas do solo, possibilitando a intervenção imediata e direcionada. Isso melhora a saúde das plantas e otimiza o uso de insumos agrícolas, como água, fertilizantes e pesticidas.

O uso de drones equipados com câmeras de alta resolução, para inspeção de campo, podem sobrevoar grandes áreas agrícolas e capturar imagens detalhadas das plantas. As imagens obtidas são então processadas utilizando técnicas de PDI para identificar áreas que necessitam de atenção, como regiões com baixa densidade de plantas ou áreas afetadas por doenças. Essa abordagem permite uma resposta rápida e precisa, ajudando os agricultores a manterem a saúde das suas plantações e maximizar a produção.

O PDI é também utilizado para analisar a qualidade do solo, identificando variáveis como umidade, composição de nutrientes e compactação. As imagens de satélite e drones podem ser processadas para gerar mapas detalhados do solo, que auxiliam na tomada de

decisões sobre práticas de manejo, como a aplicação de fertilizantes e a irrigação. Essas informações garantem às plantas o recebimento dos nutrientes necessários em quantidades adequadas, evitando desperdícios e minimizando o impacto ambiental.

No contexto de pesquisa e desenvolvimento, o PDI tem sido aplicado na criação de modelos preditivos que ajudam a antecipar os rendimentos das colheitas. Utilizando dados históricos e imagens atuais, algoritmos de aprendizado de máquina podem prever o desempenho das plantações, permitindo aos agricultores planejarem melhor suas operações e tomar decisões.

O Processamento Digital de Imagens melhora a eficiência operacional na agricultura e promove a sustentabilidade, reduzindo o uso excessivo de recursos e minimizando o impacto ambiental. O avanço contínuo dessa tecnologia, aliado ao desenvolvimento de novas aplicações e integração com outras inovações tecnológicas, promete transformar a agricultura. A adoção de PDI pode resultar em uma agricultura mais inteligente e sustentável, garantindo a segurança alimentar e contribuindo para a preservação do meio ambiente.

A avaliação do comprimento e diâmetro das raízes desempenha um papel fundamental na determinação da disponibilidade de água e nutrientes no solo, elementos que influenciam diretamente a produtividade agrícola (RUIZ-SÁNCHEZ et al., 2020). Dada a relevância econômica e científica dessa análise, têm sido desenvolvidos e aprimorados diversos métodos e técnicas destinados à mensuração precisa das características das raízes das plantas, visto que, os métodos tradicionais são demorados e não fornecem a precisão necessária.

Ao explorar essas técnicas, espera-se melhorar a precisão das medições das raízes e incentivar a adoção de PDI em outras áreas da agricultura. O PDI pode ser utilizado para monitorar a saúde das folhas, identificar pragas e doenças em estágios iniciais, e otimizar o uso de fertilizantes e pesticidas. Essas aplicações contribuem para a criação de práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes, reduzindo o impacto ambiental e promovendo a produção de alimentos de maneira mais responsável.

Tendo em vista o exposto, o objetivo deste artigo é apresentar a investigação, concepção e aferição de estratégias para aprimorar a acurácia na determinação do comprimento e diâmetro de objetos através do emprego do processamento digital de imagens. Além disso, almeja-se viabilizar a aplicabilidade das técnicas desenvolvidas na mensuração das raízes de plantas, abrindo oportunidades para contribuições no campo agrícola e ambiental.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para conduzir esta pesquisa, foi utilizada a linguagem de programação orientada a objetos Java como principal recurso tecnológico, juntamente à biblioteca de processamento de imagens OpenCV 2.4.0, biblioteca de código aberto utilizada para processamento de imagens e visão computacional. Essa biblioteca fornece um conjunto de funções e algoritmos, permitindo aos desenvolvedores a realização de uma variedade de tarefas inerentes ao processamento de imagens e análise visual.

O Plugin JavaCV 0.1 foi utilizado para habilitar a manipulação das rotinas da Biblioteca OpenCV na Linguagem Java, biblioteca de código aberto, oferecendo uma interface Java para várias bibliotecas de visão computacional, incluindo OpenCV, FFmpeg, entre outras. Esse plugin permite aos desenvolvedores utilizarem as funcionalidades nos aplicativos Java, facilitando o desenvolvimento de soluções de visão computacional e processamento de vídeo em Java.

Para a implementação dos algoritmos de medição do comprimento e diâmetro dos objetos por meio do processamento de imagens, foram utilizados recursos computacionais específicos. O computador empregado apresentava configurações adequadas, incluindo um processador i5 e 6GB de RAM, juntamente com um sistema operacional Windows 10 64 bits. Essas características garantiram uma capacidade de processamento e desempenho suficientes para realizar as tarefas de análise de imagem de maneira eficiente.

Para a manipulação e edição das imagens, recorreu-se ao Software GIMP (GNU Image Manipulation Program), ferramenta de edição de imagens de código aberto, com recursos e funcionalidades para manipulação, edição e criação de imagens. É possível realizar tarefas como ajuste de cores, recorte, redimensionamento, aplicação de filtros, entre outras operações de edição, de forma eficaz e precisa.

A escolha do GIMP, como software de edição de imagens, é justificada por sua versatilidade, facilidade de uso e disponibilidade gratuita. Além disso, oferece suporte para uma variedade de formatos de imagem e possui uma comunidade ativa de desenvolvedores e usuários, o que garante atualizações regulares e suporte contínuo. É uma ferramenta de edição de imagens confiável e eficiente para manipular e preparar imagens para análise, por meio dos algoritmos de medição de comprimento e diâmetro dos objetos.

Para a condução da pesquisa, foram adotadas imagens de fios de cobre com uma resolução de 300 DPI – dots per inch, medida que proporciona uma densidade de pontos suficiente para uma análise detalhada, pois indica quantos pixels na imagem correspondem

a uma polegada. As imagens apresentavam uma dimensão de 733 pixels de altura por 700 pixels de largura, no Formato JPEG, garantindo uma representação visual de alta qualidade dos objetos em estudo. A escolha do cobre como material de interesse se deve à sua ampla utilização em diversos setores, tornando-se relevante para a aplicação dos métodos de medição propostos.

Para compor o conjunto de dados, foram selecionados seis conjuntos de imagens, cada um contendo 91 imagens, totalizando 546 imagens analisadas. Esses conjuntos abrangiam uma diversidade de comprimentos e diâmetros dos fios de cobre, refletindo as variações comuns encontradas. Três desses conjuntos foram constituídos por fios com um diâmetro de 0,12 mm, com comprimentos de 10 mm, 20 mm e 50 mm, respectivamente. Os outros três conjuntos apresentavam fios com um diâmetro ligeiramente superior, de 0,16 mm, e os mesmos comprimentos de 10 mm, 20 mm e 50 mm. Cada conjunto de imagens representava o mesmo fio de cobre, variando apenas o ângulo de inclinação, com variação de 0 a 90° em cada conjunto. Essa variedade de amostras permitiu uma análise abrangente das capacidades dos métodos de medição propostos em diferentes condições.

Nesta pesquisa, foi desenvolvido e aplicado um algoritmo dedicado à adaptação das curvas encontradas nas imagens capturadas, seguido pela medição precisa do comprimento dos objetos, consistindo em identificar e ajustar as curvas que representam a forma e contorno dos objetos na imagem. O algoritmo é projetado para analisar os pontos de referência ao longo dessas curvas, geralmente definidos pelas bordas ou características distintivas dos objetos, e calcular o comprimento total com base nas distâncias entre esses pontos. Por meio dessa abordagem, buscou-se obter medidas precisas e confiáveis do comprimento dos objetos, contribuindo na aplicação eficaz de técnicas de PDI.

Diversas metodologias podem ser empregadas para este procedimento, contudo, optou-se pela convolução proposta por Suhadolnik, Petrišič e Kosel (2009), considerando que o objeto é representado pelos seus eixos médios, e que cada eixo médio é uma curva, possibilitando ajustar um novo conjunto de curvas. Cada uma das curvas é composta por pixels com coordenadas x e y, e por meio destas é possível calcular o comprimento do objeto. Para calcular o comprimento do objeto, são calculadas as distâncias entre pixels adjacentes e, em seguida, as distâncias são somadas (Equação 1).

$$\sum_{i=1}^n diL \quad (1)$$

Onde:

- L representa o comprimento do objeto;
- n é o número total de pixels ao longo da curva do objeto; e
- $d_i$  é a distância entre o pixel i e o pixel i+1 ao longo da curva.

O objetivo do algoritmo é encontrar as curvas, permitindo uma medição do comprimento real do objeto. Para a aplicação da abordagem, os eixos médios dos fios de cobre foram extraídos em cada imagem, usando um algoritmo de esqueletização, objetivando reduzir a largura do objeto para um único pixel, mantendo sua topologia e estrutura geral. Isso é útil para várias aplicações, como reconhecimento de padrões, análise de formas, segmentação de imagens e extração de características. A abordagem proposta por Suhadolnik, Petrišič e Kosel (2009) foi aplicada nos eixos médios extraídos.

Uma outra estratégia adotada para a medição do comprimento e diâmetro dos objetos consistiu no aumento virtual da resolução das imagens. Essa técnica envolve a manipulação digital das imagens para aumentar a resolução aparente, permitindo uma análise mais detalhada e precisa dos objetos. O procedimento foi realizado utilizando imagens de fios de cobre de diâmetro e comprimento conhecidos.

Para aumentar a resolução virtual das imagens, foram levados em consideração o DPI, bem como a largura e altura das imagens. Esses parâmetros foram ajustados digitalmente para proporcionar uma representação detalhada e nítida dos objetos em análise. Ao aumentar o DPI de uma imagem, há aumento do número de pixels, sendo esse processo chamado de interpolação. Como DPI está relacionado às dimensões e à qualidade da imagem, é indispensável para a medição do comprimento e diâmetro de objetos por meio de imagens.

HSIA et al. (2018) explicaram que quanto maior o DPI, maior a precisão da medição. Deste modo, houve um aumento da resolução virtual, através Software GIMP, com imagens de fios de cobre originalmente com 300 DPI, 733 pixels de altura e 700 pixels de largura foram ampliadas para 600 DPI, 1466 pixels de altura e 1400 pixels de largura. Em seguida, para o cálculo do comprimento, adotou-se abordagem semelhante ao ajuste de curvas.

O algoritmo proposto por Kimura, Kikuchi e Yamasaki (1999), para medir o comprimento do fio de cobre foi implementado devido à sua relevância e potencial eficácia na medição precisa do comprimento dos fios. Esta abordagem oferece uma metodologia estabelecida e testada para cálculo do comprimento dos fios de forma confiável, essencial para análise precisa dos objetos. Além disso, a implementação deste algoritmo permitiu

uma comparação direta com outras técnicas utilizadas, contribuindo para uma avaliação abrangente e rigorosa da precisão das medições realizadas.

As imagens coloridas foram convertidas em tons de cinza para simplificar a representação dos dados, tornando mais fácil identificar padrões e características relevantes nos objetos. Essa conversão visa reduzir a complexidade das informações presentes nas imagens, permitindo uma análise mais precisa e eficiente das características desejadas.

Após, as imagens foram binarizadas, convertidas para preto e branco, utilizando um valor de limiar. Essa etapa teve como objetivo destacar características específicas dos objetos e simplificar a análise. Durante o processo de binarização, os pixels com valores de tons de cinza acima do limiar foram convertidos para branco, enquanto aqueles com valores abaixo do limiar foram convertidos para preto. Isso resultou em objetos de interesse destacados em branco sobre um fundo preto, o que facilitou a identificação e análise das características.

Em seguida, os contornos de cada objeto foram identificados. Esse procedimento permitiu delinear as formas dos objetos presentes na imagem binarizada. Ao utilizar o processo de esqueletização, descrito por Schneider, et al. (2012), foram encontrados os eixos médios, ou esqueletos, de cada objeto.

Por fim, o comprimento dos fios foi calculado com base no número de pixels diagonais e ortogonais presentes no esqueleto de cada objeto. Isso permitiu uma medição precisa do comprimento dos fios, contribuindo para a análise e caracterização dos objetos.

Após a implementação das três abordagens mencionadas, os valores de comprimento e diâmetro obtidos por cada método foram comparados com os comprimentos e diâmetros reais dos objetos. Utilizando o conceito de erro relativo, foi possível quantificar a discrepância entre os valores medidos e os valores reais, fornecendo uma medida da precisão de cada abordagem. Essa análise comparativa foi fundamental para avaliar a eficácia e confiabilidade dos métodos empregados no processo de medição, permitindo identificar eventuais desvios e determinar a adequação de cada abordagem para as demandas específicas da pesquisa.

### 3. RESULTADOS

Os resultados são sintetizados na Tabela 1, onde são exibidos os erros relativos obtidos para o comprimento ao empregar cada um dos métodos de convolução. Os métodos comparados incluem o método proposto por esta pesquisa, o método de

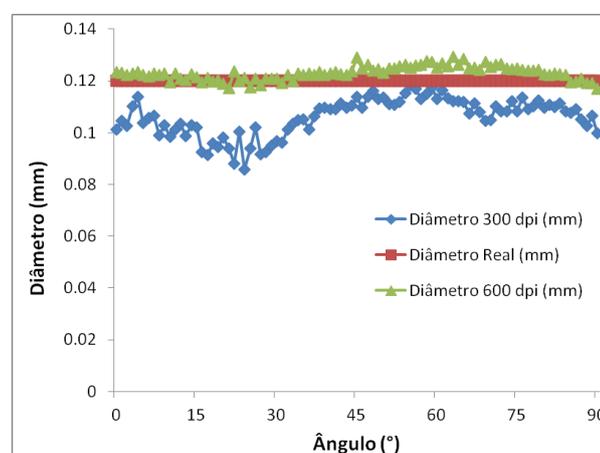
Suhadolnik, Petrišič e Kosel (2009) e o método de Kimura, Kikuchi e Yamasaki (1999). O erro relativo foi calculado relacionando o valor de comprimento obtido pelos métodos com o comprimento real. Essa métrica fornece uma medida quantitativa da precisão das abordagens utilizadas na medição do comprimento, permitindo uma avaliação detalhada da eficácia de cada método.

**Tabela 1.** Intervalos de erros relativos do comprimento.

Conjunto	Intervalo de erro Método Proposto (%)	Intervalo de erro Método de Suhadolnik, Petrišič e Kosel (2009) (%)	Intervalo de erro Método de Kimura, Kikuchi e Yamasaki (1999) (%)
m01_d12_L01_a001	1,45 a 7,42	-95,91 a -24,26	93,59 a 110,53
m01_d12_L02_a002	0,90 a 5,78	-97,96 a -31,38	95,27 a 102,20
m01_d12_L05_a003	-0,48 a 5,07	-94,05 a -60,57	89,66 a 103,53
m01_d16_L01_a004	-2,37 a 5,61	-97,96 a -46,66	92,60 a 104,73
m01_d16_L02_a003	-0,86 a 3,72	-98,13 a -62,99	92,08 a 102,51
m01_d16_L05_a003	-0,78 a 3,74	-99,94 a -52,93	93,01 a 100,44

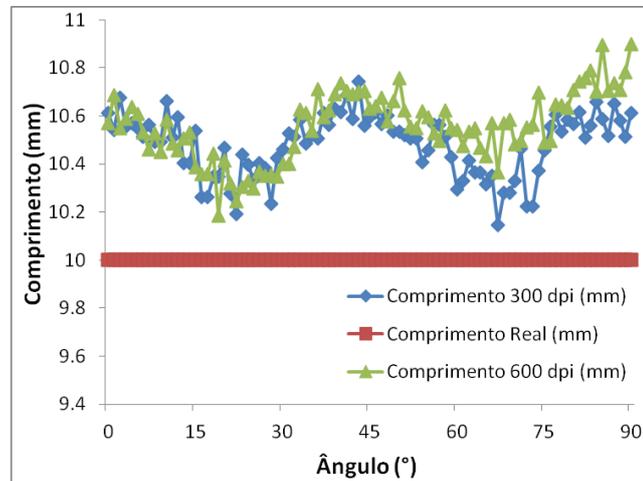
Fonte: Os Autores.

Na Figura 1, é possível perceber o aumento da resolução virtual da imagem dos fios de cobre, passando de 300 DPI para 600 DPI, o que resultou em uma melhoria na precisão durante a medição do diâmetro. Esse fenômeno pode ser atribuído ao fato de que uma resolução mais alta proporciona uma representação mais nítida e detalhada dos objetos na imagem. Com mais pixels disponíveis para descrever as características do fio de cobre, como contornos e bordas, o algoritmo de processamento de imagem pode calcular o diâmetro com maior precisão. Portanto, a partir dessa observação, é possível inferir que o aumento da resolução virtual pode ser uma estratégia eficaz para aprimorar a precisão das medições em aplicações de processamento de imagem.



**Figura 1.** Dependência dos valores de diâmetros do fio de cobre (Fonte: Os Autores).

Vale destacar que o ajuste teve um efeito adverso na medição do comprimento, conforme mostrado na Figura 2. Ao aumentar a resolução virtual, observou-se uma redução na precisão da medição do comprimento dos fios de cobre.



**Figura 2** - Dependência dos valores de comprimentos do fio de cobre, com o ângulo de inclinação. (Fonte: Os Autores).

As figuras ilustram como a alteração da resolução de imagem impacta a precisão das medições de diâmetro e comprimento dos fios de cobre, destacando a importância de ajustar a resolução para otimizar a precisão em diferentes parâmetros de medição.

## 4. DISCUSSÃO

Ao comparar o método proposto com os valores reais de comprimento, verificou-se a apresentação de erros relativos superiores ao limite aceitável de 5% em alguns casos. No entanto, ao comparar os métodos de Suhadolnik, Petrišič e Kosel (2009) e de Kimura, Kikuchi e Yamasaki (1999), notou-se que ambos apresentaram superestimções dos comprimentos dos fios de cobre em todos os conjuntos de imagens.

O método proposto demonstrou uma precisão superior na medição do comprimento dos fios de cobre em comparação com os métodos de Suhadolnik, Petrišič e Kosel (2009) e de Kimura, Kikuchi e Yamasaki (1999). Observou-se que o método proposto tende a superestimar os valores de comprimento em 33,33% dos conjuntos de imagens analisados. Essa tendência à superestimação pode ser atribuída a fatores específicos no algoritmo de processamento de imagem utilizado, que pode ser sensível a certos parâmetros ou condições nas imagens dos fios de cobre. Em contrapartida, o método de Suhadolnik, Petrišič e Kosel (2009) mostrou-se consistentemente inadequado, subestimando o

comprimento dos fios em 100% dos conjuntos de imagens, o que indica uma falha sistemática na abordagem utilizada por este método.

Por outro lado, o método de Kimura, Kikuchi e Yamasaki (1999) apresentou resultados que se desviam dos valores reais de comprimento dos fios de cobre. Esse desvio sugere que este método pode não ser adequado para medições precisas de comprimento, possivelmente devido às limitações intrínsecas nos algoritmos ou técnicas de imagem empregados. A inadequação para medições precisas do comprimento evidenciada por esse método destaca a importância de continuar pesquisando e desenvolvendo novas técnicas de processamento de imagem que possam oferecer maior precisão e confiabilidade.

O resultado pode ser atribuído a uma série de fatores, incluindo a natureza das características de medição do comprimento em relação à resolução da imagem. Ao ampliar a resolução, o algoritmo de processamento de imagem pode capturar uma quantidade maior de detalhes, resultando na representação mais precisa do diâmetro. No entanto, no caso do comprimento, o aumento da resolução pode levar a uma segmentação mais detalhada do objeto, introduzindo maior variabilidade nos cálculos de comprimento. Assim, enquanto o aumento da resolução virtual pode ser benéfico para certas medições, é importante considerar os efeitos potenciais sobre diferentes parâmetros, como o comprimento, e avaliar as estratégias de processamento de imagem em conformidade.

A comparação entre os métodos revela que, embora o método proposto tenha suas próprias limitações, ele ainda supera os demais métodos em termos de precisão, fazendo dele uma escolha confiável para aplicações que exigem medições de comprimento rigorosas e precisas.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa apresentada oferece uma análise sobre o uso do processamento digital de imagens na medição do comprimento e diâmetro de objetos, com foco na avaliação de raízes de plantas. Através da implementação e comparação de diferentes metodologias, foram exploradas abordagens para a medição precisa dessas características, proporcionando informações sobre suas vantagens e limitações.

A aplicação de tais técnicas e metodologias permitiu uma avaliação detalhada da precisão e confiabilidade das técnicas de medição. Os resultados obtidos revelaram

diferenças na precisão da medição do comprimento e diâmetro dos objetos, enfatizando a seleção de abordagens adequadas às características específicas dos objetos.

Ao discutir as implicações práticas dos resultados, verificou-se que PDI possui potencial como ferramenta para a análise de raízes de plantas e outras aplicações agrícolas. Apesar dos desafios encontrados, o estudo demonstrou que, com uma abordagem planejada e aprimorada, é possível obter resultados precisos e confiáveis.

Esta pesquisa contribui para o avanço do conhecimento no campo do processamento digital de imagens aplicado à agricultura. Ao integrar teoria e prática, oferece dados para pesquisadores e profissionais abrindo perspectivas para o desenvolvimento de soluções inovadoras e sustentáveis para os desafios enfrentados pelo setor agrícola.

## REFERÊNCIAS

ARIVAZHAGAN, S.; NAGARAJAN, B. G.; VIMAL, V.; RAJARATHINAM, R. Automatic identification of plant diseases using image processing techniques. **International Journal of Computer Applications**. EUA. v. 133, n. 1, 2016, p. 7-11.

GIMP (GNU Image Manipulation Program). Versão 2.10.22. Desenvolvedor: The GIMP Development Team. Disponível em: <<https://www.gimp.org/downloads/>>. Acesso em: 23 fev. 2024.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital image processing**. Londres: Pearson Education Limited, 2017. 1024 p.

JAVA. Oracle Corporation. Disponível em: <<https://www.oracle.com/java/>>. Acesso em: 23 fev. 2024.

KIMURA, K.; KIKUCHI, S.; YAMASAKI, S. Accurate root length measurement by image analysis. **Plant and Soil**, v. 216, 1999, p. 117-127.

HSIA, Y.-F.; LIN, J.-B.; WU, C.-H. Precision enhancement method for direct optical measurement by adjusting resolution and magnification. **Sensors**, v. 18, n. 5, 2018, p. 1456-1478.

OPENCV. Open-Source Computer Vision Library. Versão 2.4.0. Disponível em: <<https://opencv.org/>>. Acesso em: 23 fev. 2024.

RUIZ-SÁNCHEZ, M.; AROCA, R.; MUNNS, R. Root enhancement in water uptake and its impact on plant growth under water deficit and salinity stress. **Plant, Cell & Environment**, v. 43, n. 12, 2020, p. 2934-2947.

SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. NIH. Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature Methods**, v. 9, n. 7, 2012, p. 671-675.

SUHADOLNIK, A.; PETRIŠIČ, J.; KOSEL, F. An anchored discrete convolution algorithm for measuring length in digital images. **Measurement**, v. 42, 2009, p. 1112-1117.