Junielson Soares da Silva
Organizador

Temas e pesquisas em Biologia: desafios e perspectivas

Volume 1



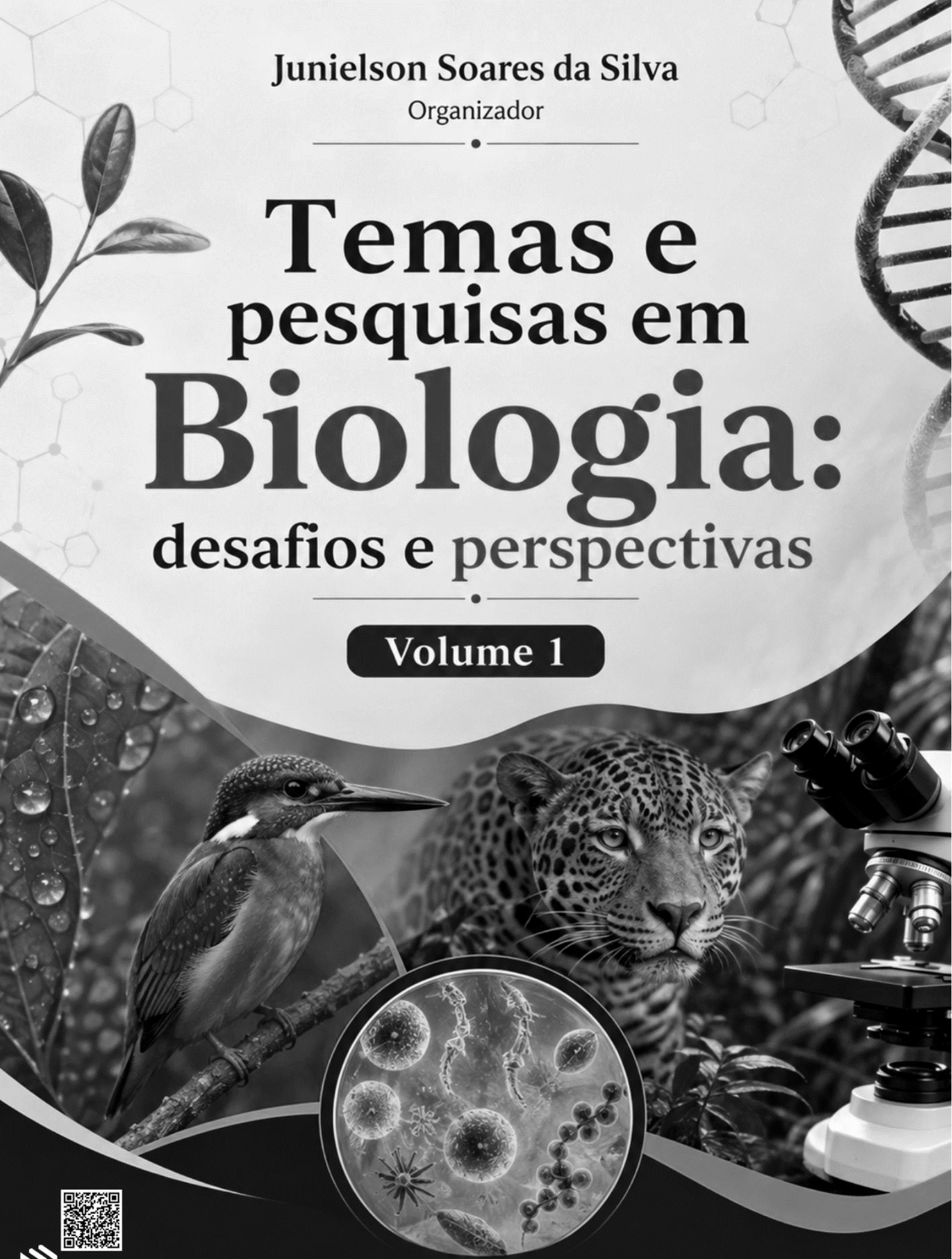
Wissen editora
2026

Teresina-PI, 2026

Junielson Soares da Silva
Organizador

Temas e pesquisas em Biologia: desafios e perspectivas

Volume 1



Wissen editora
2026

Teresina-PI, 2026

Junielson Soares da Silva
Organizador

Temas e pesquisas em Biologia: desafios e perspectivas

Volume 1

Teresina-PI, 2026

©2026 *by* Wissen Editora
Copyright © Wissen Editora
Copyright do texto © 2026 Os autores
Copyright da edição © Wissen Editora
Todos os direitos reservados

Direitos para esta edição cedidos pelos autores à Wissen Editora.

Todo o conteúdo desta obra, inclusive correção ortográfica e gramatical, é de responsabilidade do(s) autor(es). A obra de acesso aberto (Open Access) está protegida por Lei, sob Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial-Sem Derivações 4.0 Internacional, sendo permitido seu *download* e compartilhamento, desde que atribuído o crédito aos autores, sem alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Editores Chefe: Dr. Junielson Soares da Silva
Ma. Neyla Cristiane Rodrigues de Oliveira
Dra. Denise dos Santos Vila Verde
Dra. Adriana de Sousa Lima

Projeto Gráfico e Diagramação: Neyla Cristiane Rodrigues de Oliveira

Imagem da Capa: Canva

Edição de Arte: Neyla Cristiane Rodrigues de Oliveira

Revisão: Os autores
A Organizadora

Informações sobre a Editora
Wissen Editora
Homepage: www.editorawissen.com.br
Teresina – Piauí, Brasil
E-mails: wisseneditora@gmail.com

Siga nossas redes sociais:
@wisseneditora

Temas e pesquisas em Biologia: desafios e perspectivas
Volume 1

http://www.doi.org/10.52832/wed.220

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Temas e pesquisas em biologia [livro eletrônico]: desafios e perspectivas / Junielson Soares da Silva, organizador. -- Teresina, PI: Wissen Editora, 2026.

PDF
Vários autores.

ISBN: 978-65-6219-016-8
DOI: 10.52832/wed.220

1. Biologia - Pesquisa 2. Pesquisa científica3. Sustentabilidade ambiental
I. Silva, Junielson Soares da.

26-398681.0 CDD-570.7

Índices para catálogo sistemático:

1. Biologia: Estudo e ensino 570.7

Suelen Silva Araújo Oliveira - Bibliotecária - CRB-8/11482

Informações sobre a Wissen Editora
Homepage: www.editorawissen.com.br
Teresina - Piauí, Brasil
E-mail: wisseneditora@gmail.com

Como citar ABNT: SILVA, Junielson Soares da. **Temas e pesquisas em biologia [livro eletrônico]: desafios e perspectivas**. v. 1, Teresina-PI: Wissen Editora, 2026. 144 p. DOI: http://www.doi.org/10.52832/wed.220

Teresina-PI, 2026
EQUIPE EDITORIAL

Editores-chefes
Dr. Junielson Soares da Silva
Ma. Neyla Cristiane Rodrigues de Oliveira
Dra. Denise dos Santos Vila Verde
Dra. Adriana de Sousa Lima

Equipe de arte e editoração
Neyla Cristiane Rodrigues de Oliveira

CONSELHO EDITORIAL
Ciências Agrárias e Multidisciplinar
Dr. Felipe Górski - Secretaria de Educação do Paraná (SEED/PR)
Dra. Patrícia Pato dos Santos - Universidade Anhanguera (Uniderp)
Dr. Jose Carlos Guimaraes Junior - Governo do Distrito Federal (DF)

Ciências Biológicas e da Saúde
Dra. Francijara Araújo da Silva - Centro Universitário do Norte (Uninorte)
Dra. Rita di Cássia de Oliveira Angelo - Universidade de Pernambuco (UPE)
Dra. Ana Isabelle de Gois Queiroz - Centro Universitário Ateneu (UniAteneu)

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias
Dr. Allan Douglas Bento da Costa - Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)
Dra. Vania Ribeiro Ferreira - Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)
Dr. Agmar José de Jesus Silva – Secretaria de Educação do Amazonas (Seduc/AM)

Linguística, Letras e Artes
Dra. Conceição Maria Alves de A. Guisardi - Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
Dr. Danni Conegatti Batista – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas
Dr. Isael de Jesus Sena - Culture, Education, Formation, Travail (CIRCEFT)
Dra. Mareli Eliane Graupe - Universidade do Planalto Catarinense (Uniplac)
Dr. Rodrigo Avila Colla - Rede Municipal de Ensino de Esteio, RS
Dr. Erika Giacometti Rocha Berribili - Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)
Dr. Douglas Manoel Antonio De Abreu P. Dos Santos - Universidade de São Paulo (USP)
Dra. Aline Luiza de Carvalho - Fundação Hospitalar do Estado de Minas Gerais (FHEMIG)
Dr. José Luiz Esteves - Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC/PR)
Dr. Claudemir Ramos - Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC/SP)
Dr. Daniela Conegatti Batista – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Dr. Wilson de Lima Brito Filho - Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Dr. Cleonice Pereira do Nascimento Bittencourt- Universidade de Brasília (UnB)
Dr. Jonata Ferreira de Moura - Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
Dra. Renata dos Santos - Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

Conselho Técnico Científico

Me. Anderson de Souza Gallo - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ
Ma. Antônia Alikaene de Sá - Universidade Federal do Piauí (UFPI)
Ma. Talita Benedcta Santos Künast - Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Ma. Irene Suelen de Araújo Gomes – Secretaria de Educação do Ceará (Seduc /CE)
Ma. Tamires Oliveira Gomes - Universidade Federal de São Paulo (Unifesp)
Ma. Aline Rocha Rodrigues - União Das Instituições De Serviços, Ensino E Pesquisa LTDA (UNISEPE)
Me. Mauricio Pavone Rodrigues - Universidade Cidade de São Paulo (Unicid)
Esp. Rubens Barbosa Rezende – Faculdade UniFB
Me. Luciano Cabral Rios – Secretaria de Educação do Piauí (Seduc/PI)
Me. Jhenys Maiker Santos - Universidade Federal do Piauí (UFPI0
Dr. Francisco de Paula S. de Araujo Junior – Instituto Federal da Bahia (IFBA)
Ma. Anna Karla Barros da Trindade - Instituto Federal do Piauí (IFPI)
Ma. Elaine Fernanda dos Santos - Universidade Federal de Sergipe (UFS)
Ma. Lilian Regina Araújo dos Santos - Universidade do Grande Rio (Unigranrio)
Ma. Luziane Said Cometti Lélis - Universidade Federal do Pará (UFPA)
Ma. Márcia Antônia Dias Catunda - Devry Brasil
Ma. Marcia Rebeca de Oliveira - Instituto Federal da Bahia (IFBA)
Ma. Mariana Morais Azevedo - Universidade Federal de Sergipe (UFS)
Ma. Marlova Giuliani Garcia - Instituto Federal Farroupilha (IFFar)
Ma. Rosana Maria dos Santos - Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)
Ma. Rosana Wichineski de Lara de Souza - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Ma. Simone Ferreira Angelo - Escola Família Agrícola de Belo Monte - MG
Ma. Suzel Lima da Silva - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
Ma. Tatiana Seixas Machado Carpenter - Escola Parque
Me. Cássio Joaquim Gomes - Instituto Federal de Nova Andradina / Escola E. Manuel Romão
Me. Daniel Ordane da Costa Vale - Secretaria Municipal de Educação de Contagem
Me. Diego dos Santos Verri - Secretária da Educação do Rio Grande do Sul
Me. Fernando Gagno Júnior - SEMED - Guarapari/ES
Dr. Grégory Alves Dionor - Universidade do Estado da Bahia (UNEB)
Me. Lucas Pereira Gandra - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); UNOPAR, Polo Coxim/MS
Me. Lucas Peres Guimarães – Secretaria Municipal de Educação de Barra Mansa - RJ
Me. Luiz Otavio Rodrigues Mendes - Universidade Estadual de Maringá (UEM)
Me. Mateus de Souza Duarte - Universidade Federal de Sergipe (UFS)
Me. Milton Carvalho de Sousa Junior - Instituto Federal do Amazonas (IFAM)
Me. Sebastião Rodrigues Moura - Instituto Federal de Educação do Pará (IFPA)
Me. Wanderson Diogo A. da Silva - Universidade Regional do Cariri (URCA)
Ma. Heloisa Fernanda Francisco Batista - Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)
Ma. Telma Regina Stroparo - Universidade Estadual do Centro Oeste (Unicentro)

Me. Sérgio Saraiva Nazareno dos Anjos - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)

SOBRE O ORGANIZADOR

Junielson Soares da Silva



Mestre e doutor em Genética, Conservação e Biologia Evolutiva (PPG-GCBEv), pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Licenciado em Ciências Biológicas pela Universidade Federal do Piauí, onde participou do Pibid. Especialista em Saúde Pública, e em Educação Ambiental pelo Instituto Superior de Educação São Judas Tadeu-ISESJT. Vem estudando o efeito de substâncias derivadas de plantas em Aedes aegypti. Tem experiência em bioensaios larvicidas, metodologia de Ensino de Ciências da Natureza (Ciências e Biologia) e Formação de Professores. É editor-chefe de revistas científicas (Journal of Education, Science and Health JESH, Journal of Research in Medicine and Health JORMED, Revista Ensinar - RENSIN e Revista Base Científica) e da Wissen Editora.

APRESENTAÇÃO

O e-book ***Temas e pesquisas em Biologia: desafios e perspectivas*** **– Volume 1** nasce do compromisso com a divulgação científica e com o fortalecimento da pesquisa como instrumento de produção e disseminação do conhecimento. A obra reúne estudos que refletem a diversidade de temas, abordagens e metodologias presentes na Biologia contemporânea, contemplando diferentes áreas e suas interfaces com a sociedade e o meio ambiente.

Os capítulos apresentados nesta coletânea abrangem temas relacionados à **ecologia, conservação da biodiversidade, biotecnologia, agricultura, segurança alimentar, saúde, geociências e educação ambiental**, evidenciando o caráter interdisciplinar da Biologia e sua contribuição para a compreensão e o enfrentamento de questões científicas, ambientais e sociais.

A obra contempla, inicialmente, estudos voltados à **produtividade florestal e aos ecossistemas amazônicos**, contribuindo para a compreensão da dinâmica e da importância das áreas protegidas. Em seguida, são apresentados trabalhos relacionados à **biotecnologia e à utilização de óleos essenciais**, destacando possibilidades de aplicação no controle de agentes fitopatogênicos e na conservação de produtos agrícolas.

Também integram este volume pesquisas direcionadas à **agricultura de precisão e ao manejo da fertilidade do solo**, bem como discussões sobre inovações biotecnológicas relacionadas à segurança alimentar. Esses estudos demonstram como o desenvolvimento científico e tecnológico pode contribuir para a busca de alternativas mais eficientes e sustentáveis para a produção de alimentos.

No campo da saúde e da reprodução, o e-book apresenta uma revisão sobre o **resfriamento de tecido ovariano**, abordando uma estratégia de conservação com potencial aplicação em estudos reprodutivos. Soma-se a isso uma investigação envolvendo **observações geodésicas e mapeamento de áreas de fertilidade**, ampliando a diversidade temática da coletânea e evidenciando a integração entre diferentes campos do conhecimento.

Por fim, a obra dedica espaço à **educação ambiental**, destacando a importância da sensibilização e da formação de uma consciência crítica diante dos problemas ambientais,

especialmente no contexto escolar. Dessa forma, os capítulos reunidos estabelecem um diálogo entre ciência, educação, tecnologia, conservação e sociedade.

Mais do que uma compilação de pesquisas, este e-book constitui um espaço de **compartilhamento de conhecimentos, experiências e perspectivas**, estimulando a reflexão científica e a produção de novos saberes. Espera-se que os estudos aqui reunidos possam contribuir para pesquisadores, estudantes, professores, profissionais e demais interessados nas diferentes áreas da Biologia.

Aos leitores, desejamos que esta obra seja fonte de **conhecimento, inspiração e estímulo para novas pesquisas**, fortalecendo o compromisso com a ciência e com a construção de soluções para os desafios ambientais, sociais e tecnológicos do presente e do futuro.

Boa leitura!

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 ..... **13**

VARIAÇÃO TEMPORAL DA PRODUTIVIDADE FLORESTAL NA RESERVA BIOLÓGICA DO TAPIRAPÉ, PARÁ, BRASIL **13**

Renan Marques Siqueira* 13

Jaqueline Silva de Oliveira 13

Carlos Daniel de Lima Correa 13

Fabio Renan Miranda da Silva 13

Maria Eduarda Cabral Liberal 13

Camila Pinto Leão 13

Bruno Spacek Godoy 13

CAPÍTULO 2 ..... **24**

ÓLEOS ESSENCIAIS MICROENCAPSULADOS COMO AGENTES ANTIFÚNGICOS CONTRA *Colletotrichum* spp. NA PÓS-COLHEITA **24**

Vanessa Caroline de Oliveira 24

Mirielle Teixeira Lourenço 24

Anders Gomes Teixeira 24

Jessiane dos Santos Corrêa 24

João Paulo Costa 24

Fabrícia Queiroz Mendes 24

Eduardo Basílio de Oliveira 24

Lucas Magalhães de Abreu 24

Érica Nascif Rufino Vieira 24

CAPÍTULO 3 ..... **44**

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ECONÔMICA DE ADUBAÇÃO POR TAXA VARIÁVEL DE CÁLCIO, FÓSFORO E POTÁSSIO **44**

Igor Cotica Gnoatto[1] 44

Sandro Barreto Fensterseifer 44

Luís Felipe Piccin Schmitt 44
Danilo Alves Canuto 44
CAPÍTULO 4 56
INOVAÇÕES BIOTECNOLÓGICAS PARA O FORTALECIMENTO DA SEGURANÇA ALIMENTAR 56
Nayara Cristina Milane 56
Adriana Rute Cordeiro 56
CAPÍTULO 5 68
RESFRIAMENTO A 4-5 °C COMO ESTRATÉGIA DE CONSERVAÇÃO DE TECIDO OVARIANO: UMA REVISÃO 68
Samara Hélida Mouta Gonçalves[1] 68
Sara Jayane Abreu de Souza[2] 68
Juliana Sousa Ribeiro de Lima e Silva[3] 68
Iana Lira Nogueira[4] 68
Solano Dantas Martins[5] 68
Valdevane Rocha Araújo[6] 68
Luciana Rocha Faustino[7] 68
CAPÍTULO 6 69
PROJETO DE OBSERVAÇÕES GEODÉSICAS: MAPA DA ÁREA DE FERTILIDADE 69
Germano Oliveira Silvestre[1] 69
Ramiro Tres Lamego e Silva 69

CAPÍTULO 1

VARIAÇÃO TEMPORAL DA PRODUTIVIDADE FLORESTAL NA RESERVA BIOLÓGICA DO TAPIRAPÉ, PARÁ, BRASIL

TEMPORAL VARIATION IN FOREST PRODUCTIVITY IN THE TAPIRAPÉ BIOLOGICAL RESERVE, PARÁ, BRAZIL

Renan Marques Siqueira*
Discente do Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém-PA, Brasil

Jaqueline Silva de Oliveira
Discente do Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aquática e Pesca da Amazônia, Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém-PA, Brasil

Carlos Daniel de Lima Correa
Discente de Graduação em Ciências Biológicas, Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém-PA, Brasil.

Fabio Renan Miranda da Silva
Discente do Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aquática e Pesca da Amazônia, Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém-PA, Brasil

Maria Eduarda Cabral Liberal
Discente do Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aquática e Pesca da Amazônia, Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém-PA, Brasil

Camila Pinto Leão
Discente do Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém-PA, Brasil

Bruno Spacek Godoy
Instituto Amazônico de Agriculturas Familiares, Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém-PA.

DOI: 10.52832/wed.220.1281



RESUMO: Durante a estação seca na Amazônia, o aumento da disponibilidade de radiação solar pode favorecer a atividade fotossintética, enquanto a elevação da demanda atmosférica por água pode restringir a produtividade da vegetação. Este estudo avaliou a variação temporal da produtividade primária bruta (PPB) e suas associações com o déficit de pressão de vapor (VPD) e a radiação solar na Reserva Biológica do Tapirapé, no sudeste do Pará, entre 2000 e 2024. A análise foi restrita às áreas de cobertura florestal estável e considerou os meses de julho, agosto e setembro. A PPB foi obtida do produto PML-V2.2a, enquanto o VPD e a radiação solar foram derivados do ERA5-Land, com processamento realizado no Google Earth Engine. As associações foram analisadas por regressão linear múltipla, utilizando 75 observações mensais agrupadas por ano. O modelo explicou 93,9% da variação da PPB. Mantendo constantes as demais variáveis, a PPB diminuiu 3,30 g C m^{-2} dia^{-1} para cada aumento de 1 kPa no VPD e aumentou 0,37 g C m^{-2} dia^{-1} para cada incremento de 1 MJ m^{-2} dia^{-1} na radiação solar. A PPB apresentou oscilações entre os anos e não foi identificada tendência significativa de aumento ou redução ao longo do período analisado. Os resultados indicam que a produtividade durante a estação seca esteve associada a controles atmosféricos de efeitos opostos, com restrição relacionada ao aumento do VPD e efeito positivo da maior disponibilidade de radiação solar.

Palavras-chave: Amazônia. Produtividade florestal. Déficit de pressão de vapor. Radiação solar. Sensoriamento remoto.

Abstract: During the dry season in the Amazon, increased availability of solar radiation may favor photosynthetic activity, whereas increased atmospheric demand for water may restrict vegetation productivity. This study evaluated the temporal variation in gross primary productivity (PPB) and its associations with vapor pressure deficit (VPD) and solar radiation in the Tapirapé Biological Reserve, in southeastern Pará, between 2000 and 2024. The analysis was restricted to areas of stable forest cover and considered the months of July, August, and September. PPB was obtained from the PML-V2.2a product, whereas VPD and solar radiation were derived from ERA5-Land, with processing performed in Google Earth Engine. The associations were analyzed using multiple linear regression, based on 75 monthly observations grouped by year. The model explained 93.9% of the variation in PPB. Holding the other variables constant, PPB decreased by 3.30 g C m^{-2} day^{-1} for each 1 kPa increase in VPD and increased by 0.37 g C m^{-2} day^{-1} for each 1 MJ m^{-2} day^{-1} increase in solar radiation. PPB showed fluctuations among years, and no significant increasing or decreasing trend was identified over the analyzed period. The results indicate that productivity during the dry season was associated with atmospheric controls with opposing effects, with restriction related to increased VPD and a positive effect of greater solar radiation availability.

Keywords: Amazon. Forest productivity. Vapor pressure deficit. Solar radiation. Remote sensing.

1 INTRODUÇÃO

O aumento da concentração de carbono (CO_2) na atmosfera é cada vez mais evidente, sendo que a elevação de CO_2 no ambiente favorece as mudanças climáticas que se manifestam tanto em escala regional quanto em escala global (Kuo; Lindberg; Thomson, 1990; Wöhrle, 2021).

Nesse cenário, a floresta amazônica tem um papel central no balanço desse elemento na atmosfera, atuando como sumidouro de CO_2, contribuindo para a regulação climática. Apesar desse papel chave, a floresta vem sofrendo crescente pressão com períodos de seca mais acentuados e o aumento da temperatura (Yao *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2024;).

Durante a estação seca, a diminuição da precipitação e também da presença de nuvens modifica a disponibilidade de água e de energia solar nos ecossistemas da Amazônia (Li; Xiao; He, 2018). A produtividade primária bruta (PPB) nesse período é afetada pela combinação de fatores que ampliam a disponibilidade de energia para a fotossíntese e fatores atmosféricos que podem restringir o funcionamento das árvores (Li; Xiao; He, 2018; Green *et al.*, 2020;). Nas últimas décadas, o aumento das temperaturas tem ampliado as condições restritivas à atividade fotossintética na Amazônia, especialmente durante a estação seca, criando a expectativa de redução da produtividade em florestas (Papastefanou *et al.*, 2024). Os resultados dessas interações podem mudar entre regiões e ao longo dos anos, dependendo da intensidade da estação seca, da disponibilidade de água na região e da capacidade da vegetação de manter a assimilação de CO_2 mesmo sob maior demanda atmosférica (Harper *et al.*, 2014; Zhang, Zhaoying *et al.*, 2023).

O déficit de pressão de vapor (VPD) mostra a diferença entre a quantidade de vapor de água necessária para saturar o ar e a quantidade presente no ar, sendo um indicador da demanda atmosférica por água (Mu *et al.*, 2025). Com o aumento da temperatura, o VPD sobe, e o potencial de perda de água pela transpiração aumenta, o que pode levar à redução da condutância estomática como forma de proteção contra a perda excessiva de água e essa resposta diminui a entrada de CO_2 nas folhas. Assim, os valores elevados de VPD podem limitar a PPB mesmo sob condições favoráveis de radiação (Yuan *et al.*, 2019; Slot *et al.*, 2024).

A radiação solar fornece a energia necessária para a fotossíntese, e afeta diretamente a absorção de carbono pela vegetação. Durante a estação seca a redução de nuvens aumenta a incidência solar sobre dossel e amplia a disponibilidade de luz para a atividade fotossintética (Arias *et al.*, 2011). Entretanto, essa relação não é linear, uma vez que a resposta da vegetação também depende do estado hídrico das plantas e da capacidade de manter as trocas gasosas (Stahl *et al.*, 2013; Lian; Morfopoulos; Gentine, 2024). Dessa forma, embora o aumento da radiação possa contribuir para uma maior assimilação de CO_2, o efeito sobre a PPB pode ser reduzido ou até mesmo limitado quando condições atmosféricas e hídricas restringem a abertura estomática e o funcionamento fotossintético (Lamour *et al.*, 2022).

Considerando que a radiação solar e o déficit de pressão de vapor variam simultaneamente durante a estação seca na região amazônica e podem influenciar a produtividade em direções distintas, é necessário avaliar conjuntamente seus efeitos sobre a vegetação. Assim, investigamos a

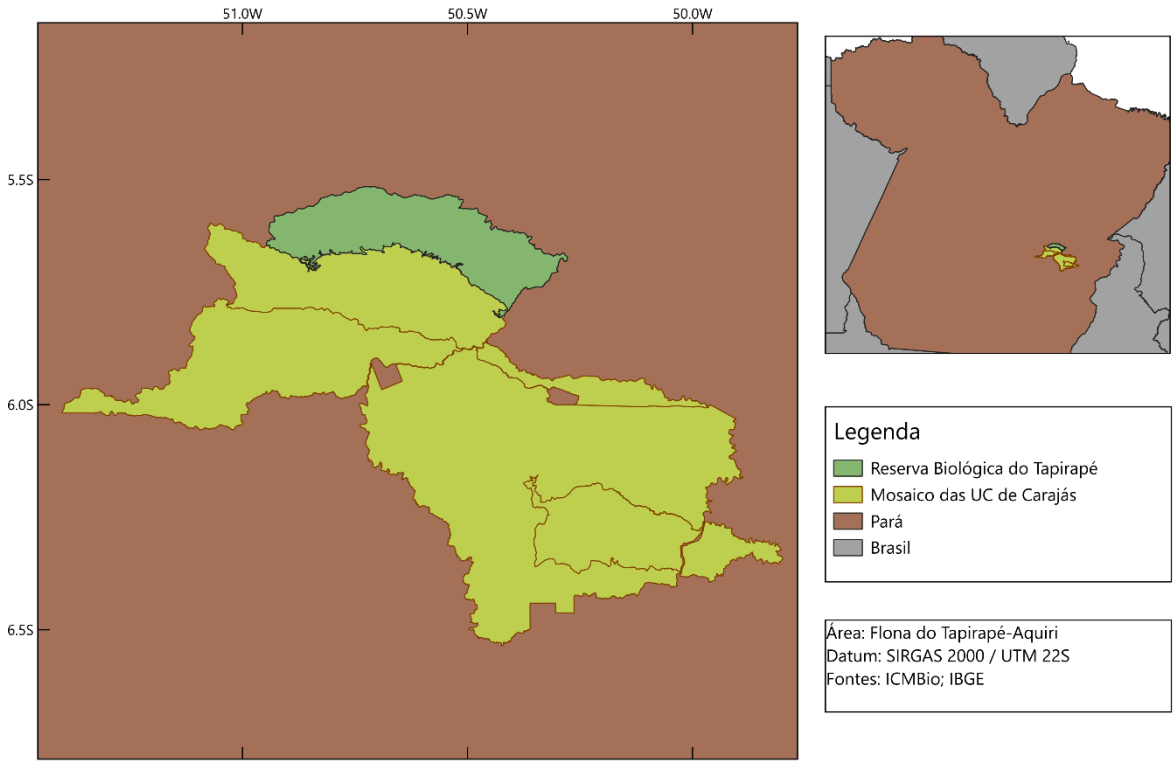
variação da produtividade primária bruta durante a estação seca, correspondente aos meses de julho a setembro, entre os anos de 2000 a 2024, e sua relação com o VPD e a radiação solar na Reserva Biológica do Tapirapé.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na Reserva Biológica do Tapirapé, unidade de conservação federal com aproximadamente 196.504 ha, localizada no sudeste do estado do Pará e inserida no mosaico de UC de Carajás (Figura 1). A unidade conserva uma extensa área de cobertura florestal, e nos permite avaliar a variação da produtividade da vegetação com menor influência direta de mudanças recentes no uso e cobertura da terra.

Figura 1 - Mapa de localização da Reserva Biológica do Tapirapé, sudeste do estado do Pará



Fonte: Autores.

Foi utilizada uma máscara derivada dos mapas anuais de uso e cobertura da terra do MapBiomas Brasil, mantendo-se apenas os pixels classificados como cobertura florestal ao longo do período analisado. Foram utilizados os meses de julho, agosto e setembro, considerados os meses mais expressivos da estação seca na região. A série temporal compreendeu o período de 2000 a 2024, totalizando 25 anos.

2.2 Obtenção e processamento dos dados

A obtenção, o processamento espacial e a organização inicial dos dados foram realizados na plataforma Google Earth Engine (Gorelick *et al.*, 2017). Para cada métrica, foi calculada a média observacional mensal da área florestal estável. Os dados foram processados considerando suas respectivas resoluções.

2.2.1 Produtividade primária bruta

A produtividade primária bruta foi obtida do produto PML-V2.2a, disponível na coleção "projects/pml_evapotranspiration/PML/OUTPUT/PML_V22a". Esse produto disponibiliza estimativas de PPB com resolução espacial de 500 m e periodicidade de oito dias entre 2000 e 2024 (Zhang et al., 2019), foi aplicado o fator de escala de 00.1 g C m^{-2}. Esses compostos de oito dias foram agregados para a obtenção da produtividade acumulada em cada mês, considerando a duração dos intervalos temporais. Em seguida, foi calculada a média espacial dos pixels localizados na área de floresta estável. Os valores mensais foram divididos pelo número de dias de cada mês, obtendo-se a PPB média diária, expressa em g C m^{-2} dia^{-1} seguindo a metodologia de Chen *et al.* 2023.

2.2.2 Déficit de pressão de vapor

O déficit de pressão de vapor foi calculado a partir dos dados de temperatura média do ar a 2 metros e temperatura do ponto de orvalho a 2 metros, obtidos do produto "ERA5-Land Monthly Aggregated", disponível pela coleção "ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY_AGGR". O ERA5-Land é um produto de reanálise climática com resolução espacial de aproximadamente 11 km e resolução temporal mensal (Muñoz-Sabater *et al.*, 2021). Os valores de temperatura foram convertidos de Kelvin para graus Celsius e a pressão de vapor de saturação foi calculada a partir da temperatura média do ar, enquanto a pressão de vapor atual foi estimada a partir da temperatura do ponto de orvalho.

2.2.3 Radiação solar

A radiação solar também foi obtida através do "ERA5-Land", utilizando a banda "surface_solar_radiation_downwards_sum", que representa a radiação solar de ondas curtas acumulada na superfície. A radiação acumulada em cada mês foi dividida pelo número de dias respectivos, obtendo a radiação solar média diária (em MJ m^{-2} dia^{-1}). Posteriormente, calculamos a média espacial sobre a área de floresta estável.

2.3 Análise de dados

As associações da PPB com o VPD e a radiação solar foram avaliadas por regressão linear múltipla, considerando as 75 observações mensais referentes a julho, agosto e setembro entre 2000 e 2024. O modelo foi definido como:

$PPB_dia = \beta0 + \beta1 \cdot VPD + \beta2 \cdot Radiação + \beta3 \cdot Ano_c + efeito\ do\ mês + \varepsilon$

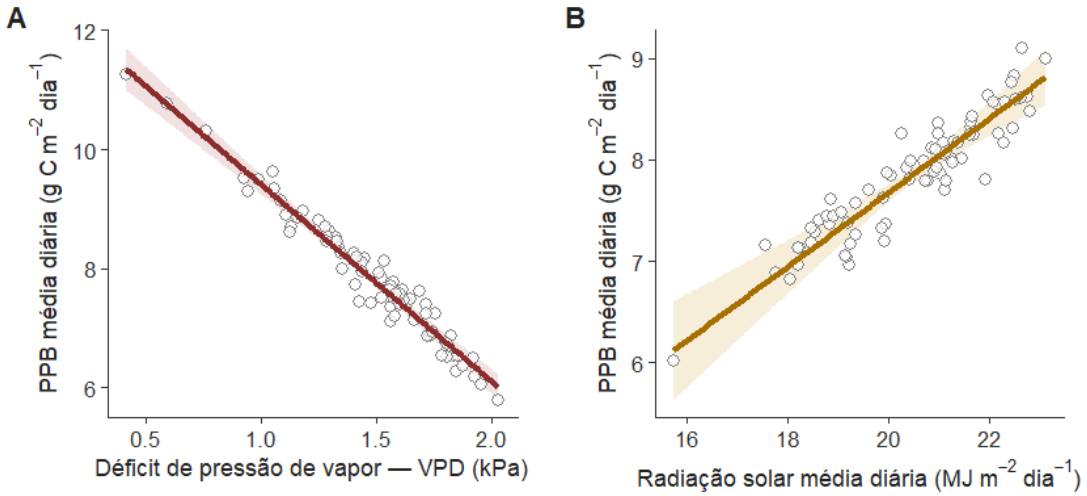
sendo PPB_dia a a produtividade primária bruta média diária; β0 corresponde ao valor esperado de PPB nas condições de referência do modelo; β1 e β2 representam, respectivamente, as variações esperadas na PPB associadas ao aumento de uma unidade no VPD e na radiação solar, mantendo constantes as demais variáveis, e β3 expressa a mudança média anual da PPB após o controle do VPD, da radiação e do mês. A variável Ano_c foi obtida subtraindo 2000 do ano, com zero no início da série. O mês foi incluído como categórico, com julho como referência. O termo ε representa a variação não explicada. Como cada ano forneceu três observações mensais, os erros-padrão foram corrigidos por agrupamento anual, considerando a possível dependência entre observações do mesmo ano. As associações parciais foram representadas por predições do modelo e intervalos de confiança de 95%, mantendo as demais variáveis constantes. A tendência temporal da PPB foi avaliada por um modelo linear contendo o ano e o mês como variáveis explicativas, enquanto as médias de julho a setembro foram utilizadas para representar graficamente a variação interanual. Todas as análises foram realizadas no ambiente R.

3 RESULTADOS

A PPB apresentou variação entre os meses da estação seca e ao longo dos anos analisados. Em média, a PPB diária foi de 7,64 g C m^{-2} dia^{-1} em julho, 7,45 g C m^{-2} dia^{-1} em agosto e 8,45 g C m^{-2} dia^{-1} em setembro. O VPD médio aumentou de 1,36 kPa em julho para 1,63 kPa em agosto e diminuiu para 1,44 kPa em setembro, enquanto a radiação solar média diária aumentou progressivamente de 18,82 MJ m^{-2} dia^{-1} em julho para 20,79 MJ m^{-2} dia^{-1} em agosto e 21,83 MJ m^{-2} dia^{-1} em setembro.

O modelo de regressão múltipla explicou 93,9% da variação da PPB. Mantendo constantes a radiação solar, o ano e o mês, a PPB diminuiu em 3,30 g C m^{-2} dia^{-1} para cada aumento de 1 kPa no VPD ($\beta = -3{,}296$; erro-padrão = 0,173; $p < 0{,}001$) (Figura 2a). Em contraste, mantendo constantes o VPD, o ano e o mês, a PPB aumentou em 0,37 g C m^{-2} dia^{-1} para cada incremento de 1 MJ m^{-2} dia^{-1} na radiação solar média diária ($\beta = 0{,}366$; erro-padrão = 0,052; $p < 0{,}001$) (Figura 2b).

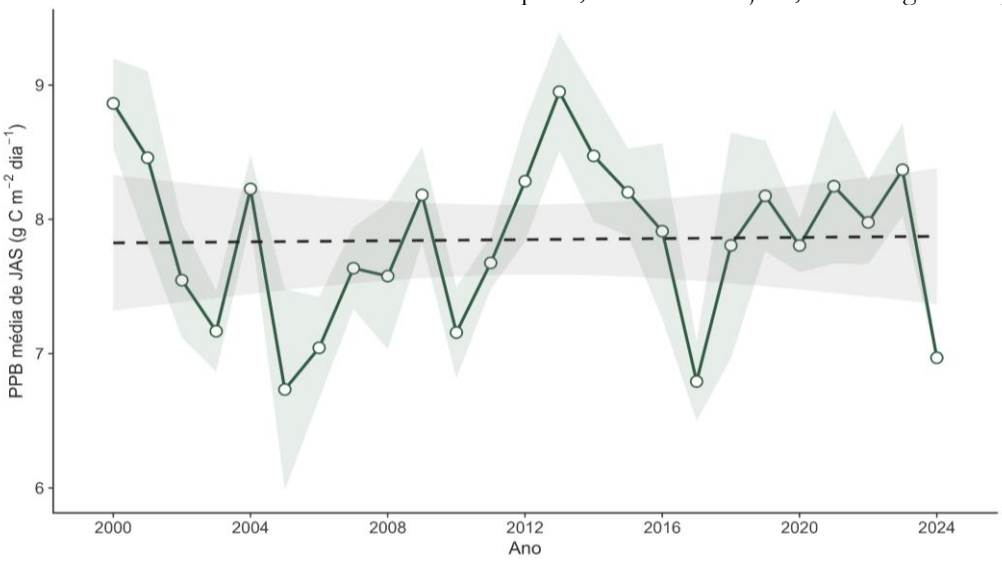
Figura 2: Relação entre a produtividade primária bruta (PPB) média diária e as condições atmosféricas durante a estação seca. **(A)** Relação negativa entre a PPB e o déficit de pressão de vapor (VPD). **(B)** Relação positiva entre a PPB e a radiação solar média diária. Os círculos representam as observações, as linhas contínuas correspondem aos valores ajustados pelos modelos de regressão e as faixas sombreadas indicam os intervalos de confiança de 95%.



Fonte: Autores.

A PPB média de julho a setembro apresentou oscilações interanuais entre 2000 e 2024, sem uma direção de aumento ou redução ao longo da série temporal (Figura 3). O coeficiente associado ao ano no modelo temporal foi próximo de zero e não significativo (β = 0,002 g C m^{-2} dia^{-1} ano^{-1}; p = 0,913), indicando ausência de evidência de tendência temporal da produtividade durante o período analisado.

Figura 3. Variação interanual da produtividade primária bruta (PPB) média em julho, agosto e setembro, entre 2000 e 2024. A linha cinza indica a tendência temporal, e a linha tracejada, a média geral do período.



Fonte: Autores

4 DISCUSSÃO

A produtividade primária bruta apresentou associação negativa com o déficit de pressão de vapor e positiva com a radiação solar durante os meses de julho a setembro. Essas relações permaneceram após o controle do ano e das diferenças entre os meses, indicando que ambas as variáveis contribuíram de forma independente para a variação da produtividade durante a estação seca. Em contraste, não foi detectada uma tendência temporal significativa entre 2000 e 2024. Portanto, foram sustentadas as hipóteses de redução da PPB com o aumento do VPD e de aumento da PPB com a maior disponibilidade de radiação, enquanto a hipótese de diminuição progressiva da produtividade ao longo da série temporal não foi corroborada.

A associação negativa com o VPD indica que a demanda atmosférica por água exerceu uma restrição importante sobre a produtividade da floresta, o aumento do VPD amplia o gradiente de vapor entre as folhas e a atmosfera, o que favorece a perda de água por evapotranspiração e induz a redução da condutância estomática para impedir que isso ocorra. Embora essa resposta contribua para limitar a transpiração, ela também restringe a entrada de CO_2 nas folhas e reduz a atividade fotossintética (Zhang, Zhiqiang *et al.*, 2023). Dados globais de torres de fluxo demonstraram que a sensibilidade da GPP ao VPD permanece negativa ao longo de diferentes condições de umidade do solo, acompanhada por reduções na condutância do dossel e na assimilação fotossintética (Fu *et al.*, 2022). Em árvores de florestas tropicais, a fotossíntese e a condutância estomática também diminuíram consistentemente com o aumento do VPD, reforçando a importância da secura atmosférica como controle fisiológico da produtividade (Slot *et al.*, 2024).

A relação positiva com a radiação solar demonstra que a disponibilidade de energia favoreceu a produtividade quando os efeitos do VPD, do ano e do mês foram mantidos constantes. Durante a estação seca, a redução da intensidade de nuvens aumenta a quantidade de radiação solar sobre o dossel, e acaba por ampliar a energia disponível para a fotossíntese. Em florestas amazônicas perenifólias, a disponibilidade de luz tem sido associada à sazonalidade da renovação foliar e da atividade fotossintética, especialmente em áreas nas quais o déficit hídrico não é suficientemente intenso ao ponto de impedir o funcionamento dessas plantas (Chen *et al.*, 2021). Em diferentes regiões da Amazônia também se nota efeito positivo da radiação solar, com aumento da produção de clorofila durante o período seco (Green *et al.*, 2020).

A ausência de tendência temporal significativa indica que as oscilações interanuais da PPB não formaram uma trajetória contínua de aumento ou redução entre 2000 e 2024. Esse resultado não contradiz as associações identificadas com o VPD e a radiação, pois a influência dessas variáveis pode mudar tanto em intensidade quanto em direção entre os anos sem produzir uma alteração linear de longo prazo. Em diferentes regiões da Amazônia, a resposta da fotossíntese

durante a estação seca varia de acordo com o grau de limitação hídrica, onde florestas equatoriais podem manter ou aumentar a atividade fotossintética, enquanto áreas situadas na porção sul da bacia apresentam maior probabilidade de redução da produtividade sob condições mais restritivas (Restrepo-Coupe *et al.*, 2013). Assim, a estabilidade temporal observada na Reserva Biológica do Tapirapé sugere que a variabilidade anual das condições atmosféricas produziu alternância entre períodos mais e menos produtivos, sem gerar uma tendência clara no intervalo analisado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ausência de diferenças significativas entre julho, agosto e setembro após o controle do VPD e da radiação sugere que a posição do mês dentro da estação seca teve menor importância explicativa do que as condições atmosféricas. Desse modo, a PPB respondeu às combinações específicas de disponibilidade de energia e de VPD em cada período. Nossos resultados também não mostram que o efeito positivo da radiação compense diretamente o efeito negativo do VPD, pois o modelo estimou associações aditivas e independentes. Em conjunto, esses padrões encontrados indicam que a produtividade da floresta durante a estação seca depende da avaliação simultânea desses dois controles ambientais, especialmente em florestas do sudeste da Amazônia sujeitas a elevada variabilidade climática interanual.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) pelo apoio institucional e logístico durante o desenvolvimento deste estudo, à CAPES (001) e ao CNPq (381655/2026-1) pelo fomento e concessão das bolsas e ao Laboratório de Ecologia Aquática e Quantitativa (LEAQua) pelo suporte técnico e pela disponibilização da infraestrutura necessária para a realização do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARIAS, P. A. *et al.* Changes in cloudiness over the Amazon rainforests during the last two decades: diagnostic and potential causes. **Climate Dynamics**, [*s. l.*], v. 37, n. 5–6, p. 1151–1164, 2011.

CHEN, B. *et al.* Carbon dioxide fertilization enhanced carbon sink offset by climate change and land use in Amazonia on a centennial scale. **Science of The Total Environment**, [*s. l.*], v. 955, p. 176903, 2024.

CHEN, X. *et al.* Vapor Pressure Deficit and Sunlight Explain Seasonality of Leaf Phenology and Photosynthesis Across Amazonian Evergreen Broadleaved Forest. **Global Biogeochemical Cycles**, [*s. l.*], v. 35, n. 6, p. e2020GB006893, 2021.

CHEN, S.; ZHANG, S.; WU, S. Long-term and large-scale ecological restoration projects shaped the spatial heterogeneity in new forests. **Ecological Indicators**, [*s. l.*], v. 157, p. 111301, 2023.
FU, Z. *et al.* Atmospheric dryness reduces photosynthesis along a large range of soil water deficits. **Nature Communications**, [*s. l.*], v. 13, n. 1, p. 989, 2022.

GORELICK, N. *et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, [*s. l.*], 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031.

GREEN, J. K. *et al.* Amazon rainforest photosynthesis increases in response to atmospheric dryness. **Science Advances**, [*s. l.*], v. 6, n. 47, p. eabb7232, 2020.

HARPER, A. *et al.* Impact of Evapotranspiration on Dry Season Climate in the Amazon Forest*. **Journal of Climate**, [*s. l.*], v. 27, n. 2, p. 574–591, 2014.

KUO, C.; LINDBERG, C.; THOMSON, D. J. Coherence established between atmospheric carbon dioxide and global temperature. **Nature**, [*s. l.*], v. 343, n. 6260, p. 709–714, 1990.

LAMOUR, J. *et al.* An improved representation of the relationship between photosynthesis and stomatal conductance leads to more stable estimation of conductance parameters and improves the goodness-of-fit across diverse data sets. **Global Change Biology**, [*s. l.*], v. 28, n. 11, p. 3537–3556, 2022.

LI, X.; XIAO, J.; HE, B. Higher absorbed solar radiation partly offset the negative effects of water stress on the photosynthesis of Amazon forests during the 2015 drought. **Environmental Research Letters**, [*s. l.*], v. 13, n. 4, p. 044005, 2018.

LIAN, X.; MORFOPOULOS, C.; GENTINE, P. Water deficit and storm disturbances co-regulate Amazon rainforest seasonality. **Science Advances**, [*s. l.*], v. 10, n. 36, p. eadk5861, 2024.

MU, Y. *et al.* Increasing dry-season vapor pressure deficit in the Amazon Basin: historical trends, future projections, and links to deforestation. **Environmental Research Communications**, [*s. l.*], v. 7, n. 10, p. 101001, 2025.

MUÑOZ-SABATER, J. *et al.* ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. **Earth System Science Data**, [*s. l.*], v. 13, n. 9, p. 4349–4383, 2021.

PAPASTEFANOU, P. *et al.* Simulated sensitivity of the Amazon rainforest to extreme drought. **Environmental Research Letters**, [*s. l.*], v. 19, n. 12, p. 124072, 2024.

RESTREPO-COUPE, N. *et al.* What drives the seasonality of photosynthesis across the Amazon basin? A cross-site analysis of eddy flux tower measurements from the Brasil flux network. **Agricultural and Forest Meteorology**, [*s. l.*], v. 182–183, p. 128–144, 2013.

SLOT, M. *et al.* The stomatal response to vapor pressure deficit drives the apparent temperature response of photosynthesis in tropical forests. **New Phytologist**, [*s. l.*], v. 244, n. 4, p. 1238–1249, 2024.

STAHL, C. *et al.* Influence of Seasonal Variations in Soil Water Availability on Gas Exchange of Tropical Canopy Trees. **Biotropica**, [*s. l.*], v. 45, n. 2, p. 155–164, 2013.

WÖHRLE, D. Kohlenstoffkreislauf und Klimawandel: Die Rolle von Kohlenstoffdioxid und die Bedeutung der Klimagase. **Chemie in unserer Zeit**, [*s. l.*], v. 55, n. 2, p. 112–124, 2021.

YAO, Y. *et al.* How drought events during the last century have impacted biomass carbon in Amazonian rainforests. **Global Change Biology**, [*s. l.*], v. 29, n. 3, p. 747–762, 2023.

YUAN, W. *et al.* Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. **Science Advances**, [*s. l.*], v. 5, n. 8, p. eaax1396, 2019.

ZHANG, Zhiqiang *et al.* Forest water-use efficiency: Effects of climate change and management on the coupling of carbon and water processes. **Forest Ecology and Management**, [*s. l.*], v. 534, p. 120853, 2023.

ZHANG, Zhaoying *et al.* Large diurnal compensatory effects mitigate the response of Amazonian forests to atmospheric warming and drying. **Science Advances**, [*s. l.*], v. 9, n. 21, p. eabq4974, 2023.

CAPÍTULO 2

ÓLEOS ESSENCIAIS MICROENCAPSULADOS COMO AGENTES ANTIFÚNGICOS CONTRA *Colletotrichum* spp. NA PÓS-COLHEITA

MICROENCAPSULATED ESSENTIAL OILS AS ANTIFUNGAL AGENTS AGAINST *Colletotrichum* spp. IN POST-HARVEST

Vanessa Caroline de Oliveira
Mestre em Produção Vegetal, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Rio Paranaíba-MG, Brasil

Mirielle Teixeira Lourenço
Mestre em Ciências de Alimentos pela Universidade de Viçosa (UFV), Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa-MG

Anders Gomes Teixeira
Mestre em Ensino de Ciências da Saúde e do Ambiente, Centro Universitário Anhanguera, Docente do Instituto Federal do Rio de Janeiro, Itaperuna- RJ, Brasil

Jessiane dos Santos Corrêa
Mestre em Fitopatologia pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa-MG

João Paulo Costa
Mestre em Produção Vegetal pela Universidade de Viçosa (UFV), Docente do Centro Universitário Juscelino Kubistchek, João Pinheiro-MG, Brasil

Fabrícia Queiroz Mendes
Doutora em Bioquímica Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), Docente do Departamento de Ciências Agrárias (UFV), Rio Paranaíba-MG, Brasil

Eduardo Basílio de Oliveira
Doutor em Procédés Biotechnologiques et Alimentaires pelo Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL, França), Docente do Departamento de Tecnologia de Alimentos (UFV), Viçosa-MG, Brasil.

Lucas Magalhães de Abreu
Doutor em Química pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Docente do Departamento de Fitopatologia (UFV), Viçosa-MG, Brasil.

Érica Nascif Rufino Vieira
Doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos (UFV), Docente do Departamento de Tecnologia de Alimentos (UFV), Viçosa-MG, Brasil

DOI: 10.52832/wed.220.1282

Resumo: Esta revisão teve como objetivo analisar estratégias tecnológicas para a conservação pós-colheita de frutos, com ênfase no controle da antracnose em abacates por meio de óleos essenciais (OEs) microencapsulados incorporados a revestimentos biodegradáveis. Foi realizada uma busca de informações até dezembro de 2025 nas bases ScienceDirect, Web of Science, PubMed e Google Acadêmico, utilizando termos em português e inglês relacionados a óleos essenciais, microencapsulação, revestimentos biodegradáveis e controle de patógenos. Os resultados indicam que a microencapsulação, especialmente por coacervação complexa, aumenta a estabilidade e possibilita a liberação controlada dos compostos bioativos dos OEs, contribuindo para a redução da deterioração fúngica e o prolongamento da vida útil dos frutos. Polímeros como gelatina, goma arábica e alginato de sódio são amplamente utilizados por formarem estruturas protetoras que reduzem a degradação e evaporação dos compostos. A atividade antifúngica depende da concentração do OE, dos materiais de encapsulamento e das condições de armazenamento e aplicação. A incorporação de OEs microencapsulados em revestimentos biodegradáveis, como filmes de PVOH, também proporciona barreiras físicas e propriedades antimicrobianas e antioxidantes. Apesar do potencial para reduzir o uso de agroquímicos e promover a sustentabilidade, as evidências ainda são predominantemente laboratoriais ou em escala piloto. Portanto, são necessários estudos em condições comerciais para validar a eficácia e viabilizar a adoção dessas tecnologias na cadeia produtiva.

Palavras-chave: Coacervação complexa. Fungicidas. Microencapsulação. Revestimentos. Sustentabilidade.

Abstract: This review aimed to analyze technological strategies for postharvest fruit conservation, with emphasis on anthracnose control in avocados using microencapsulated essential oils (EOs) incorporated into biodegradable coatings. A literature search was conducted through December 2025 in the ScienceDirect, Web of Science, PubMed, and Google Scholar databases, using Portuguese and English terms related to essential oils, microencapsulation, biodegradable coatings, and pathogen control. The results indicate that microencapsulation, particularly through complex coacervation, enhances the stability and controlled release of EO bioactive compounds, contributing to the reduction of fungal deterioration and extension of fruit shelf life. Polymers such as gelatin, gum arabic, and sodium alginate are widely used because they form protective structures that reduce compound degradation and evaporation. Antifungal activity depends on EO concentration, encapsulating materials, and storage and application conditions. The incorporation of microencapsulated EOs into biodegradable coatings, such as PVOH films, also provides physical barriers and additional antimicrobial and antioxidant properties. Despite their potential to reduce agrochemical use and promote sustainability, current evidence is still predominantly based on laboratory or pilot-scale studies. Therefore, further research under commercial conditions is needed to validate their effectiveness and support the adoption of these technologies throughout the fruit production and supply chain.

Keywords: Complex coacervation. Fungicides. Microencapsulation. Coatings. Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A fruticultura é um setor que tem crescido continuamente nos últimos anos e é caracterizado pela grande diversidade de espécies cultivadas (Mason-D'Croz *et al.*, 2019). A maioria das frutas é altamente perecível e suscetível ao ataque de patógenos na pós-colheita, gerando doenças responsáveis por perdas superiores a 50% da produção, de uma maneira global, entre a colheita, armazenamento, transporte e o consumidor final (Ncama *et al.*, 2019). Tal variável é influenciada por fatores específicos de manejo, tipos de frutas e condições ambientais, o que reforça a necessidade de estratégias eficientes de conservação.

A antracnose afeta uma diversidade de culturas frutíferas, incluindo frutas tropicais como bananas, abacates, frutas cítricas como laranjas doces, frutos vermelhos como morangos e frutas de clima temperado como maçãs. Cada tipo de fruta enfrenta desafios únicos no manejo da antracnose, com variações nas condições ambientais e nas espécies específicas de *Colletotrichum* spp. envolvidas (Law *et al.*, 2025), em abacates específico, espécies como *Colletotrichum gloeosporioides, Colletotrichum boninense, Colletotrichum nymphaeae e Colletotrichum siamense* (Kimaru *et al.*, Oliveira *et al.*, 2026) são as mais reportadas. Para abacates, a doença está associada a perdas de 60% devido ao aborto de frutos no campo e à podridão pós-colheita (Kimaru *et al.*, 2020). Além disso, é importante distinguir entre infecção latente, que ocorre sem sintomas visíveis, e a fase de doença visível, caracterizada por lesões perceptíveis na superfície do fruto (Agrios, 2005). Essa diferenciação é crucial para o desenvolvimento de estratégias de controle, uma vez que a infecção latente oferece uma janela de oportunidade para intervenções preventivas. Para controle da antracnose, tradicionalmente são utilizados fungicidas sintéticos, mas alternativas mais sustentáveis estão sendo pesquisadas como a utilização de OE como agentes de controle (Oliveira *et al.*, 2025).

Com o crescente uso de OEs, as regulamentações relacionadas com esse tema trabalham para regular a segurança desses óleos e seus componentes e concentrações. A Food and Drug Administration (FDA) classifica os OEs e seus componentes bioativos como Geralmente Reconhecido como Seguro (GRAS), soluções ecológicas e naturais, com características antioxidantes, não deixando resíduos em produtos, como os alimentos frescos (Gunny *et al.*, 2021; Basavegowda, Baek, 2021). Embora os OE apresentem-se como alternativas mais sustentáveis e com potencial de reduzir o uso de fungicidas sintéticos, sua aplicação em escala industrial ainda enfrenta obstáculos regulatórios mais definidos, especialmente relacionados a limites de resíduos e padrões de qualidade que podem variar de país para país.

Apesar de sua comprovada atividade antifúngica (Oliveira *et al.*, 2025, Oliveira *et al.*, 2026), os OE apresentam alta volatilidade, aroma predominante e instabilidade, que podem comprometer a aceitação sensorial do produto final, um desafio real e muitas vezes subestimado na transição de

uma abordagem tecnológica para uma prática comercial. Considerando essas características, sistemas de encapsulamento melhoram essas adversidades, permitindo a sua liberação controlada e preservação de seus componentes. A integração desses OE microencapsulados em revestimentos biopoliméricos para recobrimento de frutos, é uma estratégia inovadora para preservação de frutos, pois potencialmente aumenta a estabilidade do composto ativo, prolonga sua meia-vida, reduz a volatilização e permite a redução da dosagem aplicada, contribuindo para uma abordagem mais sustentável e eficiente no controle de patógenos pós-colheita.

O objetivo dessa revisão narrativa foi analisar e discutir as estratégias de integração de óleos essenciais microencapsulados aos revestimentos biodegradáveis utilizados na conservação de frutos contra *Colletotrichum* spp.

2 MATERIAL E MÉTODOS

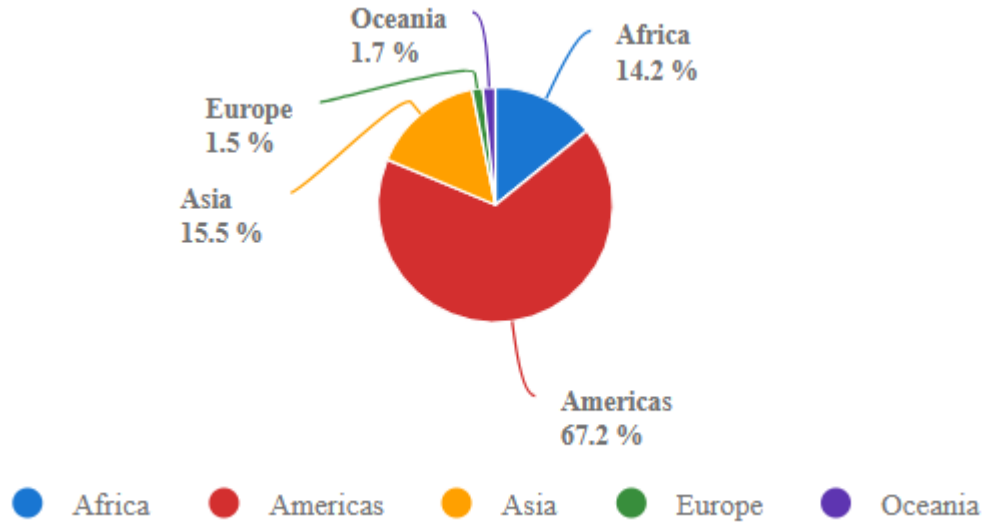
O escopo desta revisão narrativa com foco na análise de tendências cujas tecnologias foram publicadas nos últimos 10 anos sobre a integração de OE microencapsulados aos revestimentos biodegradáveis utilizados na conservação de frutos contra *Colletotrichum* spp. Para estabelecer uma base sólida e facilitar a leitura, apresentamos inicialmente uma abordagem sobre cenário da produção mundial e nacional de abacates e as perdas pós-colheita, os OE como agentes antifúngicos, a microencapsulação de OE com foco na coacervação complexa e a incorporação de OEs microencapsulados em revestimentos biodegradáveis como alternativa a fungicidas sintéticos. A revisão narrativa sintetizou dados coletados até janeiro de 2026 utilizando o banco de dados Science Direct, Web of Science (WOS), PubMed e Google Acadêmico. Os principais termos de busca incluíram "óleos essenciais", "microencapsulação", "revestimentos biodegradáveis", "controle de patógenos", "antracnose", "*Colletotrichum* spp.", "tecnologia de encapsulamento", "post-harvest", e "controle sustentável de doenças em frutas". Os termos foram buscados em inglês e português e foram considerados estudos publicados incluindo artigos originais, revisões e relatórios técnicos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Abacate

O abacate (*Persea americana* Mill.) é uma fruta tropical-subtropical muito apreciada em todo o mundo. A região com maior produção de abacate (todas as cultivares) no mundo é a das Américas seguido da Ásia e da África, de acordo com dados de 2024 (FAO Stat, 2026) (Figura 1).

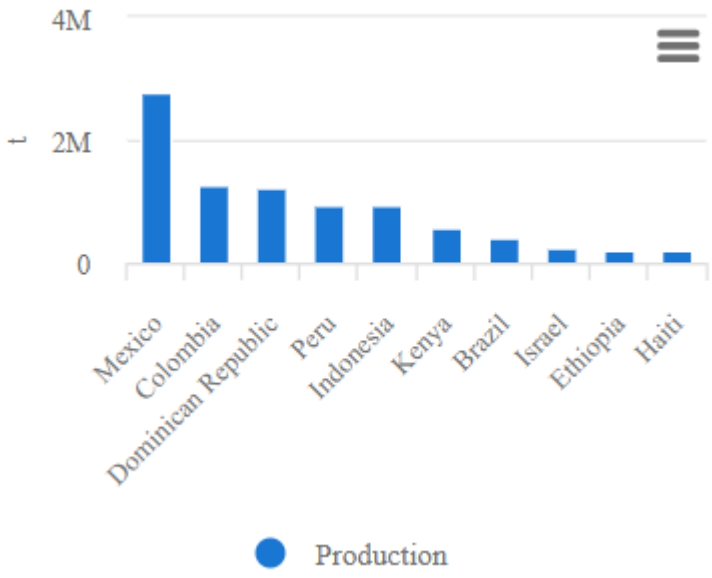
Figura 1- Quota de produção de abacates por região



Fonte: FAOStat (2026).

Em um ranking de países produtores do fruto em 2024, o Brasil se destaca em sétimo lugar em produtividade. Ficando atrás de países como México, Colômbia e outros, de acordo com os dados da Figura 2. Esses países apresentam condições climáticas e sistemas de cultivo bastante distintos, o que resulta em grande variação na composição química da fruta comercializada e em seu tempo de maturação pós-colheita (Ferreyra *et al.*, 2016). O Brasil apresenta uma forte tendência para aumentar seu plantio para atender o mercado interno e externo (Oliveira *et al.*, 2025).

Figura 2 – Os 10 países maiores produtores de abacate



Fonte: FAOSTAT (2026).

O abacate possui alto valor nutricional e econômico, contudo, é uma fruta altamente suscetível a danos mecânicos, deterioração fisiológica devido a sua característica de fruto climatérico e decomposição microbiológica causada principalmente por fungos fitopatogênicos do gênero Colletotrichum spp., durante a sua fase pós-colheita (Bill *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2024; Oliveira *et al.*, 2025; Oliveira *et al.*, 2026), tendo um curto período de vida útil. A antracnose ocorre em culturas de frutas e hortaliças em todo o mundo (Bill *et al.*, 2014); e principalmente no abacate demandando urgentemente estratégias de controle alternativas e sustentáveis aos fungicidas sintéticos.

Convencionalmente, para o controle da antracnose é utilizado fungicidas químicos, como benomil, carbendazim, mancozeb e procloraz (Zhou *et al.*, 2016). O uso de fungicidas não é sustentável devido ao desenvolvimento de cepas de fungos resistentes a fungicidas (Ippolito; Nigro, 2000). Além disso, os fungicidas são uma fonte de contaminação ambiental do solo e dos recursos hídricos devido a sua persistência, alta solubilidade e estabilidade química (Kimaru *et al.*, 2020). Portanto, o aumento na concentração de fungicidas utilizados eleva os riscos para o meio ambiente, a saúde fitossanitária e a saúde humana, tornando necessário o desenvolvimento de novos métodos para o controle da podridão pós-colheita (Mari *et al.*, 2016).

3.2 Óleos essenciais como agentes antifúngicos

Como alternativas novas e seguras, extratos vegetais e OE estão sendo utilizados como agentes antifúngicos (Tesfay; Magwaza, 2017; Sapper *et al.*, 2019; Viacava *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022) para diminuir a incidência de fungos na pós-colheita. Os OE são lipídios complexos e contêm uma diversidade de compostos bioativos voláteis e orgânicos, naturais e biodegradáveis, que atuam sinergicamente (Issouffou *et al.*, 2018; Lima Oliveira *et al.*, 2018; OuYang *et al.*, 2020).

Os OE são considerados lipídios complexos derivados do metabolismo secundário das plantas, são lipossolúveis e solúveis em solventes orgânicos e geralmente têm densidade menor que a da água. Os compostos voláteis produzidos são considerados não essenciais para a sobrevivência das plantas, mas desempenham atividades alelopáticas, herbivoria, função protetora contra microrganismos fitopatogênicos e atração para dispersores e polinizadores (Gutiérrez-Del-Río, Fernández; Lombó, 2018). Podem ser caracterizados também como misturas complexas de substâncias de baixo peso molecular (Acácio *et al.*, 2023).

O timol (2-isopropil-5-metilfenol) é o principal fenol monoterpênico presente em OE isolados de plantas da família *Lamiaceae* (como menta, hortelã etc.), exercendo atividade antimicrobiana de amplo espectro por meio de mecanismos multialvo. A natureza lipofílica permite sua integração e ruptura da membrana citoplasmática dos microrganismos, aumentando a

permeabilidade e causando o extravasamento de componentes celulares vitais. Essa ação colapsa a força próton-motriz, diminuindo a produção de energia (Marchese *et al.*, 2016). Além dos danos à membrana, os OE induzem danos intracelulares ao desencadear disfunção metabólica e morte celular programada. Isso é caracterizado pelo acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), colapso do potencial da membrana mitocondrial, liberação de citocromo e ativação de metacaspases, culminando na degradação do DNA (Gao *et al.*, 2024; Gao *et al.*, 2025). Os compostos de origem natural carvacrol, *trans* -cinamaldeído, citral, p-cimeno e linalol inibiram a germinação de *C. gloeosporioides* em frutos de pimenta (Hong *et al.*, 2015). Os componentes dos óleos essenciais atuam por meio de mecanismos antifúngicos que são fundamentalmente semelhantes. Esses processos ocorrem de forma semelhante entre os diferentes constituintes, refletindo que suas ações antifúngicas compartilham mecanismos comuns. Tanto o cuminaldeído (proveniente do cominho) quanto o cinamaldeído (proveniente da canela) são compostos aldeídos aromáticos. Seu mecanismo de ação também envolve o direcionamento à membrana celular microbiana, levando ao vazamento de íons vitais e conteúdo celular, colapso da força próton-motriz e, por fim, à morte celular (Marchese *et al.*, 2016).

Ainda existem muitos desafios a serem superados para aproveitar ao máximo os benefícios dos OE como agentes antifúngicos. Uma das principais limitações decorre das características físico-químicas dos compostos, como volatilidade, fotodegradabilidade, termolabilidade, atividade oxidativa e baixa solubilidade em água, que dificultam sua aplicação (Turek; Stintzing, 2013; Odak *et al.*, 2018). Outro ponto a ser considerado são as limitações à venda desses produtos, devido à dificuldade de obtenção de registros junto aos órgãos de fiscalização. O processo de autorização é frequentemente complexo, demorado e burocrático (Pavela; Benelli, 2016), carecendo de dados mais abrangentes sobre a estabilidade e padronização dos componentes (Pavela; Benelli, 2016; Raveau *et al.*, 2020).

Apesar dos seus benefícios, um dos principais desafios na aplicação de óleos essenciais é a sua volatilidade e curta persistência nas superfícies tratadas. Além de que o corpo de evidências *in vitro* sobre a atividade antifúngica dos OE sejam inúmeras, sua transição para uma aplicação prática efetiva na cadeia pós-colheita enfrenta desafios. Um dos riscos, subdimensionado em estudos preliminares, se refere a qualidade sensorial e a fisiologia do produto hortícola. A aplicação de OE pode alterar de modo indesejável o aroma, o sabor e a aceitabilidade global pelo consumidor. Também os compostos voláteis podem atuar como moléculas sinalizadoras, interferindo em processos fisiológicos ou podem acelerar ou podem desacelerar o amadurecimento (Oliveira *et al.*, 2025).

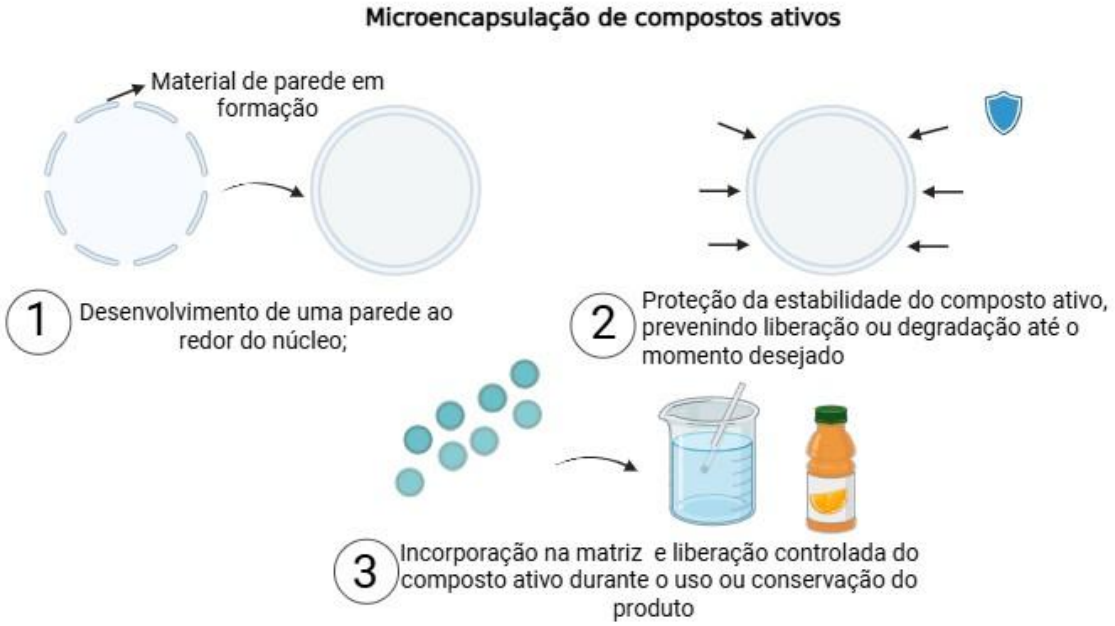
3.3 Microencapsulação de OE

A microencapsulação tem sido amplamente empregada para melhorar a estabilidade, diminuindo a volatilidade e favorecer liberação controlada dos compostos dos OE.

O encapsulamento requer que os componentes bioativos sejam revestidos dentro de uma matriz (ou seja, um ou uma combinação de polímeros sintéticos ou naturais), que isola os ingredientes ativos do ambiente externo (Gonçalves *et al.*, 2017) (Figura 3).

As técnicas utilizadas de encapsulamento incluem liofilização, secagem por aspersão, fluido supercrítico, fluidização, como métodos de secagem física; os métodos químicos incluem emulsificação, homogeneização de alta pressão, lipossomas e coacervação; e os métodos físico-químicos incluem sistemas de eletroaspiração e fiação eletrostática (Oliveira *et al.*, 2023; Bo *et al.*, 2025).

Figura 3 – Microencapsulação de composto ativos.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para a escolha do método de microencapsulação em pós-colheita, diversos critérios devem ser considerados de forma integrada. Entre os principais fatores estão o custo e a escala de produção, que influenciam a viabilidade econômica da tecnologia. Por exemplo, spray drying destaca-se como o método mais escalável e de menor custo operacional, amplamente disponível na indústria de alimentos junto com a liofilização (Acácio *et al.*, 2023; Martiñon *et al.*, 2014). A coacervação complexa oferece excelente desempenho, mas são processos mais descontínuos,

demandando controle preciso de parâmetros (pH, temperatura), o que aumenta o custo e dificulta a escalabilidade (Chen; Xia; Xiao, 2022). A segurança alimentar é fundamental, exigindo materiais compatíveis com alimentos e aprovados por órgãos reguladores, além de imprescindível a utilização de materiais de parede com selo Geralmente Reconhecidos como Seguros (GRAS). O rendimento do encapsulamento, ou seja, a eficiência na retenção do OE. O tamanho da partícula influencia a dispersibilidade no revestimento e a liberação controlada, além de afetar a aceitação sensorial do produto final. Um tamanho de partícula da microcápsula deve ser observado, pois também pode influenciar na sua capacidade antifúngica (poder de penetração nas células fúngicas) (Liu *et al.*, 2025). A taxa de liberação deve ser ajustada para assegurar que os compostos ativos sejam disponibilizados de forma sustentada, compatível com o tempo de armazenamento e transporte.

Ademais, a compatibilidade do sistema de microencapsulação com o filme ou revestimento utilizado é importante para preservar as propriedades físicas e mecânicas (Bill *et al.*, 2014). Nesse ponto, é importante também observar o tamanho de partícula, pois partículas muito grandes podem criar pontos de fragilidade no filme, prejudicar a adesão ao fruto ou sedimentar em soluções de imersão, diminuindo sua eficiência. A estabilidade oxidativa e físico-química do óleo essencial encapsulado é outro critério essencial, pois garante maior durabilidade e eficácia durante o armazenamento e aplicação (Bo *et al.*, 2025). Assim, esses critérios funcionam como parâmetros, de uma forma geral, que devem ser considerados na seleção do método de microencapsulação mais adequado às necessidades específicas do uso pós-colheita.

3.3.1 Coacervação complexa

A coacervação consiste na separação de um sistema coloidal em duas fases líquidas (Iupac, 1997). Esse sistema é baseado na interação entre polímeros de cargas opostas, geralmente uma proteína e um polissacarídeo (Schmitt; Turgeon, 2011), sendo as proteínas carregadas positivamente e os polissacarídeos aniônicos (Guo *et al.*, 2022), levando a separação de fases. Embora a força eletrostática entre macromoléculas com cargas opostas seja a principal força motriz, as forças intermoleculares de Van der Waals e as interações hidrofóbicas em proteínas também agem no processo de coacervação complexa (Turgeon; Schmitt; Sanchez, 2007).

No geral, esse processo é baseado em quatro etapas (Ortega-Rivas; Juliano; Yan, 2006). Primeiramente é realizada a dispersão de um ou mais polímeros separados em uma solução aquosa. É importante observar a temperatura de gelificação de cada material e seu ponto isoelétrico. Quando se utiliza proteína como biopolímero, é imprescindível descobrir seu ponto isoelétrico e trabalhar em faixas de pHs acima. Com as dispersões prontas, faz-se a mistura da fase hidrofóbica à solução aquosa de um polímero, geralmente solução de proteína, e homogeneização da mistura

resultante de modo a produzir uma emulsão estável. Nesse momento, pode-se testar diferentes pHs e temperaturas para se trabalhar em estado ótimo para indução da coacervação e separação das fases. Há o endurecimento das matrizes poliméricas usando temperatura elevada, agente reticulador, que tem a função de promover a formação de ligações covalentes entre as cadeias poliméricas que compõem a parede da cápsula, conferindo-lhe rigidez, estabilidade mecânica e resistência química. Podem ser usados agente reticulantes como glutaraldeído, genipina, transglutaminase e taninos (ácido tânico) (Mu *et al.*, 2022), fazendo-se necessário que esses agentes reticulantes sejam seguros para alimentos (GRAS).

Propriedades dos materiais, como a massa molecular dos polímeros, densidade de carga, concentração e proporção de mistura, quanto os parâmetros do processo, como o método utilizado para produzir a emulsão/grau de homogeneização, pH, temperatura e força iônica, afetam consideravelmente o complexo processo de coacervação (Weinbreck *et al.*, 2003). Portanto, a condição ótima para a coacervação complexa de um conjunto de polímeros não pode ser simplesmente aplicada a outro conjunto de polímeros. Por essa razão, a otimização dos parâmetros de coacervação é uma etapa essencial para que a microencapsulação apresente características desejáveis (Timilsena *et al.*, 2017) como bom rendimento, retenção dos compostos microencapsulados e boa estabilidade.

O rendimento de coacervados complexos em função do pH do dispersante e da proporção de polímeros é o parâmetro mais importante para determinar as condições ótimas para a coacervação complexa entre dois polímeros. O rendimento do processo de coacervação complexa pode ser facilmente determinado pela separação dos coacervados complexos precipitados da fase aquosa por centrifugação. A densidade de carga superficial (potencial zeta) e a turbidez em função do pH e da proporção de polímeros têm sido usadas como propriedades estratégicas para otimizar as condições de coacervação complexa entre dois biopolímeros (Eratte *et al.*, 2014; Kaushik *et al.*, 2015; Timilsena *et al.*, 2016). A coacervação complexa, embora eficiente para a produção de microcápsulas, é um processo considerado reversível. Os coacervados formados pela interação eletrostática entre proteínas e polissacarídeos mantêm-se estáveis apenas dentro de uma faixa estreita de pH, força iônica e temperatura (Timilsena *et al.*, 2017), parâmetros esses escolhidos durante o processo. Essa característica representa uma vulnerabilidade crítica quando as cápsulas são destinadas a aplicações de pós-colheita, onde as condições de armazenamento e transporte são dinâmicas e frequentemente adversas. Durante o armazenamento prolongado, variações no pH devido à atividade fisiológica dos frutos, o aumento da força iônica pela migração de sais ou a oscilação de temperaturas entre refrigeração e ambiente podem desestabilizar as interações poliméricas, levando à dissociação dos coacervados. Essas adversidades podem provocar uma

liberação descontrolada do composto microencapsulado. Para assegurar a funcionalidade das microcápsulas ao longo de toda a cadeia pós-colheita, é essencial estar atento as características de cada microcápsula produzida para manter sua estabilidade.

Na Tabela 1 estão apresentados trabalhos que utilizaram a coacervação para microencapsulação de OEs.

Tabela 1 – Pesquisa com microencapsulação de OEs por coacervação

OE ou composto principal	Materiais de parede	Principais resultados do processo	Referência
Carvacrol	Isolado de proteína de soro de leite/pectina de alta metoxila	•pH ótimo de 4,1 •Relação proteína-pectina de 5:1. •Eficiência de encapsulamento: 77,48% •Materiais de parede mantidos a uma concentração de 2% •Uma relação parede/núcleo de 1:2 •Velocidade de homogeneização de 15.000 rpm	Guo et al. (2022)
Orégano	Gelatina e mucilagem de chia	•Razão de massa: 2:1 (gelatina e chia) •Eficiência de encapsulamento: 91,79 ± 0,05%	Hernández-Nava et al. (2020)
Pimenta de Sichuan, gengibre e anis estrelado	Isolado de proteína de quinoa-goma arábica	•pH ótimo: 3,6 •Razão QPI-GA: 4:1. •Eficiência de encapsulamento para pimenta (82,53 ± 1,59 %), gengibre (88,19 ± 2,37 %) e anis estrelado (84,68 ± 1,51 %).	Chen et al. (2023)
Pimenta do reino	Gelatina Alginato de sódio	•A proporção de 6:1 (gelatina/alginato de sódio) •pH ótimo: 4,0 •Eficiência de encapsulamento variou de 49,13 a 82,36%	Bastos et al. (2020)
Cinamaldeído	Gelatina Goma arábica Ácido tânico (para reticulação)	•Eficiência de encapsulamento: 92,53 ± 5,20%	Chen, Xia e Xiao (2022)

Fonte: elaborada pelo autor

Observando os estudos da Tabela 1, os polímeros mais utilizados no processo de coacervação são goma arábica (Chen; Xia; Xiao, 2022; Chen *et al.*, 2023) e alginato de sódio (Bastos *et al.*, 2020). Para a fração proteica utiliza-se quanto proteína animal como a gelatina (Hernández-Nava *et al.*, 2020; Bastos *et al.*, 2020; Guo *et al.*, 2022; Chen; Xia; Xiao 2022). É fundamental

compreender que parâmetros de processo, como pH e composição e proporção dos materiais de parede podem afetar a permeabilidade e a taxa de liberação do OE, influenciando diretamente sua eficácia no controle de patógenos na pós-colheita. Assim, além de otimizar o encapsulamento, é necessário estabelecer a relação entre esses parâmetros e a liberação controlada do ativo, garantindo que a ação antifúngica ocorra na quantidade e no momento adequados para prolongar a vida útil dos frutos. Por exemplo, um sistema de nanoencapsulamento obteve uma eficiência de 95% e o tamanho das partículas inferior a 500 nm, protegeram o que pode proteger eficazmente o OE, prevenindo a degradação acelerada por ultravioleta e reduziu a toxicidade de altas concentrações de OE para a matriz aplicada (Peres *et al.*, 2020). O processo de coacervação precisa ser feito de maneira otimizada, por exemplo um pH próximo ao ponto isoelétrico (pI) da proteína (O pI é o pH no qual a proteína possui carga líquida global zero e o material estará livre para fazer ligações), com tempo adequando para formação de coacervados, o resultado serão cápsulas com paredes densas e reticuladas. Esta propriedade físico-química se traduzirá, no armazenamento, em uma liberação lenta e controlada dos compostos antifúngicos das cápsulas, dependente também da espessura de poros na camada externa da microcápsula. Em contraponto um microcápsula não estável, sofreria dissociação e liberando o composto microencapsulado de maneira não organizada.

3.4 Incorporação de OEs microencapsulados em revestimentos biodegradáveis

Os revestimentos biopoliméricos também têm sido utilizados para prolongar a vida útil de frutas e vegetais, proporcionando uma película semipermeável ao redor da superfície dos frutos, atuando como uma membrana de isolamento que retarda as atividades oxidativas celulares, dificultando a entrada de água, gases, óleos e fitopatógenos (Al-Tayyar *et al.*, 2020; Choi; Sing; Lee, 2016). A película formada também atua como uma espécie de barreira protetora contra contaminantes e infestações externas, aumentando a resistência da fruta a danos físicos, diminuindo as chances de desenvolvimento de lesões que seriam a porta de entrada para infecções fúngicas (Atarés; Chiralt, 2016; Talón *et al.*, 2019). Os revestimentos podem ser produzidos por uma variedade de componentes, incluindo proteínas, polissacarídeos, biocompósitos, óleos essenciais e misturas comestíveis, não tóxicas, biodegradáveis e biocompatíveis (Ebrahimzadeh *et al.*, 2021).

O álcool polivinílico (PVOH), por exemplo, apresenta características desejáveis para um bom material de revestimento, entre elas: não tóxico, fácil fabricação, estabilidade química, natureza comestível e hidrofílico (Ebrahimzadeh *et al.*, 2021). O PVOH é um polímero com estrutura linear, com alta solubilidade em água e não cancerígeno. Possui boa compatibilidade com outros materiais, com excelente capacidade de formação de filme e altas propriedades emulsificantes e adesivas, sendo utilizado em grande escala industrial (Chai *et al.*, 2009). Os filmes de PVOH apresentam uma

estrutura semicristalina condicionando esse material a uma menor capacidade de adsorção de água, flexibilidade e resistência a tração, resultando também em boas propriedades de barreira de oxigênio e aromática (Mucha; Ludwiczak; Kawinska, 2005; Chai *et al.*, 2009; Tang; Alavi, 2011). Além disso, o PVOH foi classificado como GRAS podendo ser usado em embalagens de alimentos (Gómez-Aldapa *et al.*, 2020). Sua utilização em embalagens de alimentos, envolve requisitos de segurança além de certificações que garantam sua adequação para contato com alimentos.

Componentes podem ser incorporados nos revestimentos, como os OEs livres ou microencapsulados, oferecendo propriedades adicionais vantajosas, como atividades antioxidantes e antimicrobianas, além da proteção física. Os abacates revestidos com PVOH (1,5%) e amido (0,75%) adicionados de OEs livres (0,1%) apresentaram redução na prevalência de fungos e na taxa respiratória, alteração de cor, durante 29 dias de armazenamento em todos os tratamentos em relação ao controle. Os tratamentos com PVOH + citronela, PVOH + capim-limão e PVOH + canela apresentaram retenção de firmeza superior (Oliveira *et al*, 2025). Os revestimentos têm a capacidade de aumentar as propriedades antimicrobianas dos frutos devido ao seu potencial hidrofóbico, o que proporciona também uma diminuição na deterioração causada por alterações bioquímicas sofridas durante o amadurecimento (Murmu; Mishra, 2018; Riva; Opara; Fawole, 2020). Em conjunto, OE de *Lippia sidoides* Cham (alecrim-pimenta) (concentrações de 0; 31; 62,5; 125; 250 e 500 µl L^{-1}), associado à carboximetilcelulose (0,25%) em frutos de mamão, aumentou a vida útil dos frutos por 9 dias de armazenamento. Em relação à severidade da doença antracnose, observou-se que, após oito dias de armazenamento, apenas o tratamento preventivo com OE proporcionou redução na progressão da doença com diferença em relação ao controle (Zillo *et al.* 2018). Diversas espécies de *Colletotrichum* spp. foi inoculado em frutos de goiaba, manga e mamão e revestidos com quitosana (2,5, 5 e 7,5 mg/mL) e OE *Cymbopogon citratos* (0,15, 0,3 ou 0,6 µL/mL). Observou-se inibição total do desenvolvimento de lesões de antracnose durante o período de armazenamento monitorado em goiaba e manga revestidas com 5 mg/mL de quitosana + 0,6 µL/mL de OE e inoculadas com *C. karstii* até o 6º e 8º dia de armazenamento em mamão revestido com 5 mg/mL de Chi + 0,6 ou 0,3 µL/mL de OE e inoculado com *C. karstii*, respectivamente (Lima Oliveira *et al.*, 2018). Quitosana (2%) também foi associada ao OE de *Ruta graveolens* L. (0,5%, 1,0% e 1,5%) para o controle do crescimento de *C. gloesporioides* tanto *in vivo* quanto *in vitro* em mamão. Os estudos *in vitro* mostraram uma diminuição no crescimento fúngico (diâmetro do micélio) com o aumento da concentração de EO (1,0% e 1,5% induziram uma redução de 97%). Estudos *in situ*, durante 12 dias a 20 °C mostraram redução de 100% na expansão da lesão com os tratamentos de quitosana + OE a 1,0% e 1,5%. A análise físico-química

dos frutos de mamão demonstrou que o tratamento com emulsões de quitosana + OE retardou o amadurecimento do mamão sem afetar suas características organolépticas (Peralta-Ruiz *et al.*, 2020).

O tratamento pós-colheita que combina revestimentos e OE pode ser considerado uma tecnologia promissora e eficaz para manter a qualidade dos frutos e diminuir as perdas por deterioração fúngica.

4 CONCLUSÃO

Embora as estratégias de microencapsulação de OE em revestimentos biodegradáveis demonstram um potencial promissor na preservação de frutos, especialmente no controle da antracnose, é importante reconhecer que essa abordagem ainda enfrenta diversos desafios. A aplicação prática dessa tecnologia apresenta limitações relacionadas à padronização dos materiais, e desempenho sob condições reais de armazenamento. Portanto, embora os resultados laboratoriais e de escala piloto mostrem muitos avanços e bons resultados, é fundamental conduzir estudos adicionais que avaliem sua viabilidade em ambientes comerciais e em cadeia produtiva. Dessa maneira, a utilização de OE microencapsulado em filmes biodegradáveis deve ser considerada uma tecnologia inovadora com potencial de agregar valor às práticas de conservação, mas requer validação constante para superar as barreiras apresentadas.

Agradecimentos e Financiamento

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) Código de Financiamento 001, pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG, Brasil) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

ACÁCIO, R. da S. *et al.* Dataset of *Schinus terebinthifolius* essential oil microencapsulated by spray-drying. **Data in Brief**, vol. 47, 108927, 2023. DOI: 10.1016/j.dib.2023.108927

AL-TAYYAR, N. A., YOUSSEF, A. M.; AL-HINDI, R. R. Edible coatings and antimicrobial nanoemulsions for enhancing shelf life and reducing foodborne pathogens of fruits and vegetables: A review. **Sustainable Materials and Technologies**, 26, Article e00215, 2020. DOI: 10.1016/j.susmat.2020.e00215.

AGRIOS, G. N. **Plant Pathology**. 5ª ed. New York: Elsevier Academic Press, 2005.

BASAVEGOWDA, N.; BAEK, K. H. Synergistic Antioxidant and Antibacterial Advantages of Essential Oils for Food Packaging Applications. **Biomolecules**, vol. 11, p. 1267, 2021. DOI:10.3390/biom11091267

BASTOS, L. P. H. *et al.* Encapsulation of black pepper (*Piper nigrum* L.) essential oil with gelatin and sodium alginate by complex coacervation. **Food Hydrocolloids**, vol. 102, 105605, 2020. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2019.105605

BILL, M. *et al.* The efficacy of combined application of edible coatings and thyme oil in inducing resistance components in avocado (*Persea americana* Mill.) against anthracnose during post-harvest storage. **Crop Protection**, vol. 64, p. 159-167, 2014. DOI: 10.1016/j.cropro.2014.06.015

BO, Y. *et al.* Breakthroughs in extraction and encapsulation of volatile oil and essential oil for superior functionalities. **Materials Today**, v. 89, p. 477-501, 2025. DOI: 10.1016/j.mattod.2025.08.005

ATARÉS, L.; CHIRALT, A. Essential oils as additives in biodegradable films and coatings for active food packaging. **Trends in Food Science and Technology**, vol. 48, p. 51-62, 2016. DOI: 10.1016/j.tifs.2015.12.001

CHAI, W. L. *et al.* Evaluation of the biodegradability of polyvinyl alcohol/starch blends: a methodological comparison of environmentally friendly materials. **Journal of Environmental Polymer Degradation**, vol.17, 71-82, 2009. DOI: 10.1007/s10924-009-0123-1

CHEN, K. *et al.* Encapsulation of different spice essential oils in quinoa protein isolate-gum Arabic coacervates for improved stability. **Carbohydrate Polymers**, vol. 300, 120250, 2023. DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.120250

CHEN, W.; XIA, S.; XIAO, C. Complex coacervation microcapsules by tannic acid crosslinking prolong the antifungal activity of cinnamaldehyde against *Aspergillus brasiliensis*. ***Food Bioscience**, vol. 47, 101686, 2022. DOI:* 10.1016/j.fbio.2022.101686

CHOI, W. S.; SINGH, S.; LEE, Y. S. Characterization of edible film containing essential oils in hydroxypropyl methylcellulose and its effect on quality attributes of "Formosa" plum (*Prunus salicina* L.). LWT - Food Science and Technology, vol. 70, p. 213-222, 2016. DOI: 10.1016/j.lwt.2016.02.036

EBRAHIMZADEH, S. *et al.* Essential oils-loaded electrospun chitosan-poly (vinyl alcohol) nonwovens laminated on chitosan film as bilayer bioactive edible films. **LWT**, vol. 144, p.111217, 2021. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111217

ERATTE, D. *et al.* Complex coacervation with whey protein isolate and gum Arabic for the microencapsulation of omega-3 rich tuna oil. **Food & Function**, vol. 5, p. 2743-2750, 2014. DOI:10.1039/C4FO00296B

FAO. Crops and livestock products. Avocados. 2026. Disponível em: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize. Acesso em: 5 jan. 2026.

FERREYRA, R. *et al.* Identification of pre-harvest factors that affect fatty acid profiles of avocado fruit (*Persea americana* Mill) cv. 'Hass' at harvest. **South African Journal of Botany***,* vol. 104, 15–20, 2016. DOI: 10.1016/j.sajb.2015.10.006

GAO, Q. *et al.* Antifungal mechanism of Angelica sinensis essential oil against *Penicillium roqueforti* and its application in extending the shelf life of bread. **International Journal Food Microbiology**, vol. 408, article 110427, 2024. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110427

GAO, Q. *et al.* Carvacrol induces apoptosis in aspergillus Niger through ROS burst. **World Journal Microbiology Biotechnology**, vol. 41, p. 225, 2025. DOI: 10.1007/s11274-025-04437-

GÓMEZ-ALDAPA, C.A. *et al.* Effect of polyvinyl alcohol on the physicochemical properties of biodegradable starch films. **Materials Chemistry and Physics**, vol. 239, p.122027, 2020. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.122027

GONÇALVES, N. D. *et al.* Encapsulated thyme (Thymus vulgaris) essential oil used as a natural preservative in bakery product. **Food Research International**, vol. 96, p. 154-160, 2017. DOI: 10.1016/j.foodres.2017.03.006

GUNNY, A. A. N. *et al.* Microwave-assisted solvent-free extraction of essential oil from *Coleus aromaticus*: anti-phytopathogenic potential for fruit post-harvesting. **3 Biotech**, vol. 11, 1-11, 2021. DOI: 10.1007/s13205-021-02701-2

GUO, Q. *et al.* Formulation and characterization of microcapsules encapsulating carvacrol using complex coacervation crosslinked with tannic acid. **LWT**, vol. 165, p. 113683, 2022. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113683

GUTIÉRREZ-DEL-RÍO, I.; FERNÁNDEZ, J.; LOMBÓ, F. Plant nutraceuticals as antimicrobial agents in food preservation: Terpenoids, polyphenols and thiols**. International Journal of Antimicrobial Agents**, vol. 52, p. 309-315, 2018. DOI: 10.1016/j.ijantimicag.2018.04.024

HERNÁNDEZ-NAVA, R. *et al.* Encapsulation of oregano essential oil (*Origanum vulgare*) by complex coacervation between gelatin and chia mucilage and its properties after spray drying. **Food Hydrocolloids**, vol. 109, 106077, 2020. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2020.106077

HONG, J. K. *et al.* Application of volatile antifungal plant essential oils for controlling pepper fruit anthracnose by *Colletotrichum gloeosporioides*. **Plant Pathology Journal**, vol. 31, p. 269-277, 2015.DOI: 10.5423/PPJ.OA.03.2015.0027

ISSOUFFOU, C. *et al.* Synergistic effect of essential oils and enterocin KT2W2G on the growth of spoilage microorganisms isolated from spoiled banana peel. **Food Control**, vol. 89, p. 260-269, 2018. DOI: 10.1016/j.foodcont.2018.02.019

IPPOLITO, A.; NIGRO, F. Impacto da aplicação pré-colheita de agentes biológicos em doenças pós-colheita de frutas e vegetais frescos. **Crop Protection**, vol. 19, p.715–723, 2000. DOI: 10.1016/S0261-2194(00)00095-8

IUPAC (Compendium of chemical technology). 2ª ed. North Carolina: 1997.

KAUSHIK, P. *et al.* Complex coacervation between flaxseed protein isolate and flaxseed gum. **Food Research International**, vol. 72, p. 91-97, 2015. DOI: 10.1016/j.foodres.2015.03.046

KIMARU, K. S. *et al.* Effects of anthracnose disease on avocado production in Kenya. **Cogent Food & Agriculture**, vol.6, 1799531, 2020. DOI: 10.1080/23311932.2020.1799531

LAW, C. X. *et al.* A review on anthracnose disease caused by *Colletotrichum* spp. in fruits and advances in control strategies. **International Journal of Food Microbiology**, v. 442, 2025, p. 111397. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2025.111397.

LIMA OLIVEIRA, P. D. *et al.* Control of anthracnose caused by *Colletotrichum* species in guava, mango and papaya using synergistic combinations of chitosan and *Cymbopogon citratus* (D.C. ex Nees) Stapf. essential oil. **International Journal of Food Microbiology**, vol. 266, p. 87-94, 2018. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2017.11.018

LIU, Z. *et al.* Preparation of *Cinnamomum camphora* essential oil microcapsules using gelatin/gum arabic and evaluation of their antifungal effects on *Fusarium* spp. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 303, 140706, 2025. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.140706

MARCHESE, A. *et al.* Antibacterial and antifungal activities of thymol: A brief review of the literature. **Food Chemistry**, vol. 210, p. 402-414, 2016. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.04.111

MARTIÑON, M. E. *et al.* Development of a multilayered antimicrobial edible coating for shelf-life extension of fresh-cut cantaloupe (*Cucumis melo* L.) stored at 4 °C. **LWT**, vol. 56, p. 341-350, 2014. DOI: 10.1016/j.lwt.2013.11.043

MASON-D'CROZ, D. *et al.* Gaps between fruit and vegetable production, demand, and recommended consumption at global and national levels: An integrated modelling study. **The Lancet Planetary Health**, vol. 3, p. e318-e329, 2019. DOI: 10.1016/S2542-5196(19)30095-6

MU, H. *et al.* Microencapsulation of algae oil by complex coacervation of chitosan and modified starch: Characterization and oxidative stability. International Journal Biological Macromolecules, vol. 194, p. 66-73, 2022. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2021.11.168

MUCHA, M.; LUDWICZAK, S.; KAWINSKA, M.; Kinetics of water sorption by chitosan and its blends with poly (vinyl alcohol). **Carbohydrate Polymers**, vol. 62, p. 42–49, 2005. DOI: /10.1016/j.carbpol.2005.07.008

MURMU, S. B.; MISHRA, H. N. The effect of edible coating based on Arabic gum, sodium caseinate and essential oil of cinnamon and lemon grass on guava. **Food Chemistry**, vol. 245, p. 820-828, 2018. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.11.104

NCAMA, K. *et al*. Topical procedures adopted in testing and application of plant-based extracts as bio-fungicides in controlling postharvest decay of fresh produce. Crop Protection, vol. 115, p. 142-151, 2019. DOI: 10.1016/j.cropro.2018.09.016

OLIVEIRA, V. C. *et al*. First report of *Colletotrichum nymphaeae* causing anthracnose on Hass avocados in Brazil. **Plant Disease**, vol. 108, p. 3653, 2024. DOI: 10.1094/PDIS-08-24-1674-PDN

OLIVEIRA, V. C. *et al*. Coating based on PVOH and starch with essential oils of citronella, lemongrass, cinnamon, and thyme for preserving avocado (*Persea americana* Mill. cv. Hass). **ACS Food Science Technology**, vol. 5, 2025, p.3835–3843, 2025. DOI: 10.1021/acsfoodscitech.5c00449

OLIVEIRA, V. C.; COSTA, N. A.; PAIVA, M. J. A. E.; MAGALHAES, I. S.; GONCALVES, D. J. R.; VIEIRA, ÉRICA NASCIF RUFINO; MENDES, F.Q. Métodos químicos de microencapsulação de óleos essenciais para adição em revestimentos em frutas e vegetais: revisão de literatura. In: Adriano Gomes da Cruz Denise R. Perdomo Azeredo Karen Signori. (Org.). I Congresso Latino-Americano de Segurança de Alimentos 2023. 1ed.: 2023, v. 1, p. 63-82. Disponível em: https://agronfoodacademy.com/pesquisas-e-avancos-em-seguranca-de-alimentos/. Acesso em: 27 dez. 2025.

OLIVEIRA, V. C. *et al*. Isolation and identification of pathogenic fungi (*Colletotrichum nymphaeae* and *C. siamense*) from avocado and sensitivity to essential oils from *Pelargonium graveolens* or *Cordia verbenacea*. **Plant Pathology**, vol. 75, e70081, 2026. DOI: https://doi.org/10.1111/ppa.70081

ORTEGA-RIVAS, E.; JULIANO, P.; YAN, H. **Food Powders**: Physical Properties, Processing, and Functionality. New York: Springer Science & Business Media, 2006.

OUYANG, Q.L. *et al*. Cinnamaldehyde exerts its antifungal activity by disrupting the cell wall integrity of *Geotrichum citri-aurantii*. **Frontier in Microbiology**, 10, 55, 2019. DOI: 10.3389/fmicb.2019.00055

PAVELA, R.; BENELLI, G. Essential Oils as Ecofriendly Biopesticides? Challenges and Constraints. Trends in Plant Science, vol. 21, p. 1000-1007, 2016. DOI: 10.1016/j.tplants.2016.10.005

PERALTA-RUIZ, Y. et al. *Colletotrichum gloesporioides* inhibition using chitosan-*Ruta graveolens* L essential oil coatings: Studies *in vitro* and *in situ* on Carica papaya fruit. **International Journal of Food Microbiology**, vol. 326, p. 108649, 2020. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108649

PERES, M. C. *et al.* In natura and nanoencapsulated essential oils from *Xylopia aromatica* reduce oviposition of *Bemisia tabaci* in *Phaseolus vulgaris*. **Journal of Pest Science**, vol.93, p.807–821, 2020. DOI: 10.1007/s10340-020-01201-1

RAVEAU, R.; FONTAINE, J.; SAHRAOUI, L. A. Essential oils as potential alternative biocontrol products against plant pathogens and weeds: A review. **Foods**, vol. 9, p. 31, 2020. DOI: 10.3390/foods9030365

RIVA, S. C.; OPARA, U. O.; FAWOLE, O. A. Recent developments on postharvest application of edible coatings on stone fruit: A review. **Scientia Horticulturae**, vol. 262, p. 109074, 2020. 10.1016/j.scienta.2019.109074

SAPPER, M. *et al.* Antifungal starch–gellan edible coatings with thyme essential oil for the postharvest preservation of apple and persimmon. **Coatings**, vol. 9, p. 333, 2019. DOI: 10.3390/coatings9050333

SCHMITT, C.; TURGEON, S. L. Protein/polysaccharide complexes and coacervates in food systems. **Advances in Colloid and Interface Science**, vol. 167, p. 63-70, 2011. DOI: 10.1016/j.cis.2010.10.001

TALÓN, E. *et al.* Antioxidant starch-based films with encapsulated eugenol. Application to sunflower oil preservation. **Lwt**, vol. 113, p. 108290, 2019. DOI: 10.1016/j.lwt.2019.108290

TANG, X.; ALAVI, S.; Recent advances in starch, polyvinyl alcohol-based polymer blends, nanocomposites and their biodegradability. **Carbohydrate Polymers**, vol. 85, p. 7-16, 2011. DOI: 10.1016/j.carbpol.2011.01.030

TESFAY, S. Z.; MAGWAZA, L. S. Evaluating the efficacy of moringa leaf extract, chitosan and carboxymethyl cellulose as edible coatings for enhancing quality and extending postharvest life of avocado (Persea americana Mill.) fruit. **Food Packaging and Shelf Life**, v.11, p. 40-48, 2017. DOI: 10.1016/j.fpsl.2016.12.001.

TIMILSENA, Y. P. *et al.* Preparation and characterization of chia seed protein isolate–chia seed gum complex coacervates. **Food Hydrocolloids**, vol. 52, p. 554-563, 2016. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2015.07.033

TIMILSENA, Y. P. *et al.* Advances in microencapsulation of polyunsaturated fatty acids (PUFAs)-rich plant oils using complex coacervation: A review. **Food Hydrocolloids**, vol. 69, p.369–381, 2017. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2017.03.007

TURGEON, S. L.; SCHMITT, C.; SANCHEZ, C. Protein–polysaccharide complexes and coacervates. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, vol. 12, p. 166-178, 2007. DOI: 10.1016/j.cocis.2007.07.007

TUREK, C.; STINTZING, F. C. Stability of essential oils: A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, vol. 12, p. 40-53, 2013. DOI: 10.1111/crf3.2013.12.issue-110.1111/1541-4337.12006

VIACAVA, G. E.; CENCI, M. P.; ANSORENA, M. R. Effect of chitosan edible coatings incorporated with free or microencapsulated thyme essential oil on quality characteristics of fresh-cut carrot slices. **Food and Bioprocess Technology**, vol. 15, p. 768-784, 2022. DOI: 10.1007/s11947-022-02783-7

WANG, H. *et al*. Incorporation of clove essential oil nanoemulsion in chitosan coating to control *Burkholderia gladioli* and improve postharvest quality of fresh *Tremella fuciformis*. **LWT**, vol. 170, 114059, 2022. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.114059

WEINBRECK, F. *et al*. Complex coacervation of whey proteins and gum Arabic. **Biomacromolecules**, vol.4, p. 293-303, 2003. DOI: 10.1021/bm025667n

ZHOU, Y.; ZHANG, L.; ZENG, K. Efficacy of *Pichia membranaefaciens* combined with chitosan against *Colletotrichum gloeosporioides* in citrus fruits and possible modes of action. Biology Control, vol. 96, p. 39-47, 2016. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2016.02.001

ZILLO, R. R. *et al*. Carboxymethylcellulose coating associated with essential oil can increase papaya shelf life. **Scientia Horticulturae**, vol. 239, p. 70-77, 2018. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.05.025

CAPÍTULO 3

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ECONÔMICA DE ADUBAÇÃO POR TAXA VARIÁVEL DE CÁLCIO, FÓSFORO E POTÁSSIO

EVALUATION OF THE ECONOMIC EFFICIENCY OF VARIABLE RATE FERTILIZATION WITH CALCIUM, PHOSPHORUS, AND POTASSIUM

Igor Cotica Gnoatto[1]
Estudante de graduação, agronomia (UFSM), orientado por Doutor Sandro Barreto Fensterseifer. Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul, Brasil.

Sandro Barreto Fensterseifer
Doutor, orientador (UFSM). Professor, Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul, Brasil.

Luís Felipe Piccin Schmitt
Estudante de graduação, agronomia (UFSM), orientado por Doutor Sandro Barreto Fensterseifer. Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul, Brasil.

Danilo Alves Canuto
Estudante de graduação, agronomia (UFSM), orientado por Doutor Sandro Barreto Fensterseifer. Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul, Brasil.

DOI: 10.52832/wed.220.1283

Resumo: Agricultura de precisão tem se destacado como uma estratégia essencial para o manejo eficiente e sustentável dos sistemas produtivos, ao permitir a compreensão da variabilidade espacial do solo e subsidiar decisões agronômicas mais precisas. Entre suas ferramentas, a aplicação de insumos em taxa variável (VRT) se evidencia por ajustar as doses de fertilizantes conforme a necessidade real de cada ambiente produtivo, utilizando dados georreferenciados para otimizar o uso de nutrientes. Este estudo teve como objetivo elaborar planos de informação para os nutrientes Cálcio (Ca), Fósforo (P) e Potássio (K), considerando a fertilidade do solo e a recomendação de adubação, além de comparar financeiramente o método convencional com a aplicação localizada em taxa variável. A área experimental, com 555,7 hectares, foi processada no software ArcGIS, onde foram desenvolvidas máscaras de recorte, pontos de amostragem, tabelas de atributos e modelos de interpolação IDW. Os dados de fertilidade, inicialmente em mg/dm³, foram convertidos para kg/ha e utilizados na elaboração de mapas temáticos de fertilidade e de recomendação. Os resultados demonstraram que a adubação convencional implicou na aplicação de 200.052 kg de nutrientes, totalizando R$ 585.902,30. Em contrapartida, a aplicação em taxa variável utilizou 187.935,16 kg, resultando em uma economia de R$ 33.929,85 — equivalente a mais de R$ 61 por hectare. Além da significativa redução de custos, a VRT apresentou maior eficiência agronômica e menor desperdício de insumos, reduzindo riscos ambientais relacionados à lixiviação e ao escorrimento superficial. Dessa forma, a aplicação em taxa variável se confirma como uma alternativa superior ao método convencional, aliando eficiência técnica, sustentabilidade e viabilidade econômica para a agricultura moderna.

Palavras-chave: agricultura de precisão. taxa variável. Fertilidade. SIG. Interpolação. Adubação.

Abstract: Precision agriculture has emerged as an essential strategy for the efficient and sustainable management of production systems, as it enables the understanding of spatial variability in soils and supports more accurate agronomic decision-making. Among its tools, variable rate technology (VRT) stands out for adjusting fertilizer doses according to the actual needs of each production environment, using georeferenced data to optimize nutrient use. This study aimed to develop information layers for Calcium (Ca), Phosphorus (P), and Potassium (K), considering both soil fertility and fertilization recommendations, as well as to perform a financial comparison between the conventional method and localized variable-rate application. The experimental area, totaling 555.7 hectares, was processed in ArcGIS, where clip masks, sampling points, attribute tables, and IDW interpolation models were created. Fertility data, initially expressed in mg/dm³, were converted into kg/ha and used to produce thematic maps of fertility and recommended fertilization. The comparison between methods revealed substantial differences. Conventional fertilization resulted in the application of 200,052 kg of nutrients, costing R$ 585,902.30. In contrast, variable-rate application used only 187.935,16 kg, yielding savings of R$ 33.929,85 — equivalent to more than R$ 61 per hectare. In addition to the significant cost reduction, VRT demonstrated greater agronomic efficiency and minimized input waste, reducing environmental risks associated with leaching and surface runoff. Therefore, variable-rate fertilization is confirmed as a superior alternative to the conventional method, combining technical efficiency, sustainability, and economic viability for modern agriculture.

Keywords: Precision agriculture. VRT. Soil fertility. GIS. Interpolation. Fertilization.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão tem se firmado, nas últimas décadas, como um dos mais relevantes avanços tecnológicos aplicados ao setor agrícola, ao proporcionar estratégias robustas para otimizar o uso de insumos e elevar a eficiência produtiva sem ampliar a pressão sobre os recursos naturais. Fundamentada na coleta, processamento e interpretação de dados georreferenciados, essa abordagem permite compreender a variabilidade espacial e temporal presente nos sistemas agrícolas, possibilitando tomadas de decisão mais assertivas e sustentáveis.

Entre os instrumentos centrais da agricultura de precisão, destaca-se a aplicação de insumos em taxa variável (*VRT – Variable Rate Technology*), que se apoia em softwares e plataformas de geoprocessamento capazes de integrar diferentes camadas de informação (Pawase *Et al.,* 2023). Essa tecnologia ajusta, de forma precisa, a quantidade de fertilizante a ser aplicada em cada área da lavoura, considerando as características edáficas e produtivas detectadas por meio de análises laboratoriais, sensores embarcados, mapas de colheita, levantamentos geofísicos, imagens de satélite e veículos aéreos não tripulados (*VANTs*). A espacialização e interpolação desses dados permitem modelar a dinâmica dos nutrientes no solo, identificando zonas de manejo específicas e reduzindo a aplicação desnecessária de insumos.

Os estudos de Bertollo *et al.*, (2023) comprovam que a adoção da adubação em taxa variável tem demostrado benefícios expressivos, como redução de desperdícios, mitigação de impactos ambientais associados ao uso excessivo de fertilizantes e incremento da eficiência econômica do sistema produtivo. Além disso, possibilita uma visão mais detalhada da fertilidade do solo, contribuindo para o manejo racional dos macronutrientes e para o planejamento agronômico de médio e longo prazo.

Neste contexto, a finalidade deste estudo é de gerar planos de informação referentes aos parâmetros de Cálcio, Fósforo e Potássio, tanto no que se refere à fertilidade do solo quanto à recomendação de adubação. Ademais, buscou-se realizar uma análise financeira comparativa entre a adubação convencional e a aplicação em taxa variável, quantificando a economia proporcionada pela tecnologia. Para isso, foram elaborados mapas temáticos de fertilidade e de recomendação de adubação por meio do Sistema de Informações Geográficas (SIG) *ArcGIS*, os quais subsidiaram a definição das doses variáveis dos macronutrientes, expressas em quilogramas por hectare. Tais recomendações foram confrontadas com os valores obtidos pelo método tradicional, baseado nas diretrizes da Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solo (ROLAS).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1- Localização da área de estudo.

A área de estudo de aproximadamente 555 Hectares está localizada no município de Cruz Alta, inserido no Planalto Médio do Rio Grande do Sul, apresentando um relevo predominantemente ondulado, marcado por coxilhas e altitudes variando entre 400 e 500 metros. Seu clima é classificado como Subtropical Temperado (Cfa), caracterizado por estações bem definidas, com verões mornos e abafados e invernos curtos e amenos, onde a ocorrência de geadas é comum devido à influência das massas de ar polar. A precipitação pluviométrica é bem distribuída ao longo do ano, sendo abundante, com a média anual na região de Cruz Alta situando-se em torno de 1.700 mm.

2.2 Delimitação da área dos mapas

Inicialmente foi delimitado a área para estudo através do aplicativo Google Earth, utilizando a ferramenta Polígonos, depois de gerado o arquivo, fez-se o download no formato kml para introduzi-lo posteriormente ao software ArcGIS.

2.3 Importação da máscara do projeto

Processo de importação para o sistema de informação geográfico os limites da área de interesse. Configurou-se o aplicativo ArcGIS, habilitou-se a ferramenta de execução de rotinas para execução da ferramenta de conversão, onde converteu-se de KML para Layer, inserindo o arquivo Layer.

2.4 Extração da área do projeto

Rotina onde o aplicativo recorta a área de interesse, na caixa de ferramentas executando a função de análise espaciais e extração através de uma máscara, adicionando-se as camadas que se deseja recortar.

2.5 Definição de pontos amostrais dentro da área em estudo

Definiu-se os pontos dentro da área em estudo onde serão coletadas amostras de solo para se obter dados de fertilidade. Neste trabalho foi escolhido os nutrientes Cálcio (Ca), Fósforo (P) e Potássio (K).

Para tal, na ferramenta de geoprocessamento, foi definido os limites do polígono que corresponde a área estudada. Este procedimento será interpretado pelo aplicativo do ArcGis como a área onde deve ser gerada os cálculos para definir os pontos na sequência do projeto.

Após a definição dos limites do polígono, na ferramenta de gerenciamento de dados, foi feita a amostragem para criar pontos aleatórios, nomeados de Pontos de Controle. O programa pode gerar pontos fora do limite definido da área, entretanto não é de interesse do projeto a coleta destes pontos, excluindo-se os pontos que extrapolaram os limites.

2.6 Adicionar dados de fertilidade nos pontos amostrais gerados

Neste item, se faz necessário adicionar dados a respeito dos nutrientes (Ca, P, K) nos pontos amostrais gerados. Esses dados foram obtidos a partir de Análise de Amostras de Solos, ou de informações de solo sobre a região em que a área do projeto está localizada. Então gera-se as colunas para adicionar os pontos de controle, criando colunas na tabela de atributos com os dados individuais para cada nutriente na unidade mg/dm³ e outras camadas individuais para nutrientes desta vez na unidade kg/ha, posteriormente convertidos no item 2.7.

2.7 Transformações de mg/dm³ para kg/ha

Após os dados de fertilidade serem preenchidos, é transformado os dados para kg/ha, que é a unidade de medida utilizada para mensurar os insumos da adubação. Para transformação, multiplica-se os valores da tabela em mg/dm³ por 2, resultando no valor em kg/ha no outro campo de dados. O processo é repetido para todos os nutrientes utilizando seus respectivos dados.

2.8 Modelagem de Interpolação IDW (Inverse Distance Weighted)

Rotina no qual utiliza-se de um algoritmo interpolador para fazer o preenchimento dos espaços onde não foram coletados pontos amostrais. Este acessa as informações no sistema de gerenciamento de banco de dados, onde apresenta-se armazenado como informações alfa numéricas de localização representada pelo parâmetro de coordenadas de posicionamento, latitude e longitude, e fator de brilho que corresponde ao valor do nutriente no solo.

Gerou-se o modelo de interpolação para criar os mapas de fertilidade e adubação. A interpolação dos pontos de coleta é feita através de uma análise espacial e interpolação de pontos, aplicando-se a operação para cada nutriente. Após a interpolação, a área do projeto é delimitada com o uso da máscara de limites, utilizando-se do módulo de extração vetorial por máscara, que estabelece a área de processamento dos dados a serem gerados.

2.9 Quantificação da adubação

Após os cálculos, nas estatísticas da camada de adubação pode-se coletar a soma das quantidades de adubo que deve ser aplicada, e a partir deste valor, comparamos com a adubação

convencional que consiste em simplesmente multiplicar o valor da recomendação geral de cada nutriente pelo valor da média do nutriente quantificado no solo.

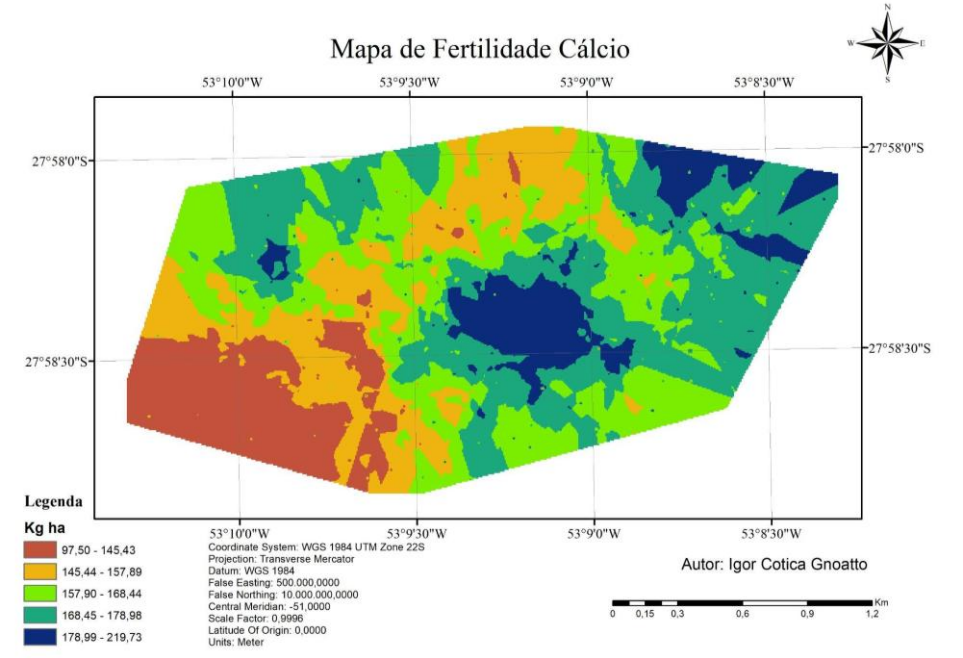
2.10 Inserção dos elementos cartográficos

Insere-se as informações pertinentes a um documento cartográfico, título, legenda, escala, orientação, grade de coordenadas e projeção cartográfica. Os planos de informação previamente elaborados são então transformados em mapas completos. Essa etapa de conversão marca o momento em que os dados brutos, provenientes de levantamentos e estudos de campo ou bases de dados digitais, passam a ser apresentados de maneira integrada, clara e acessível, obtendo-se um documento cartográfico que sintetiza informações complexas, e também facilita sua interpretação, contribuindo para análises espaciais, tomadas de decisão estratégica e a divulgação de conhecimento em diversas áreas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

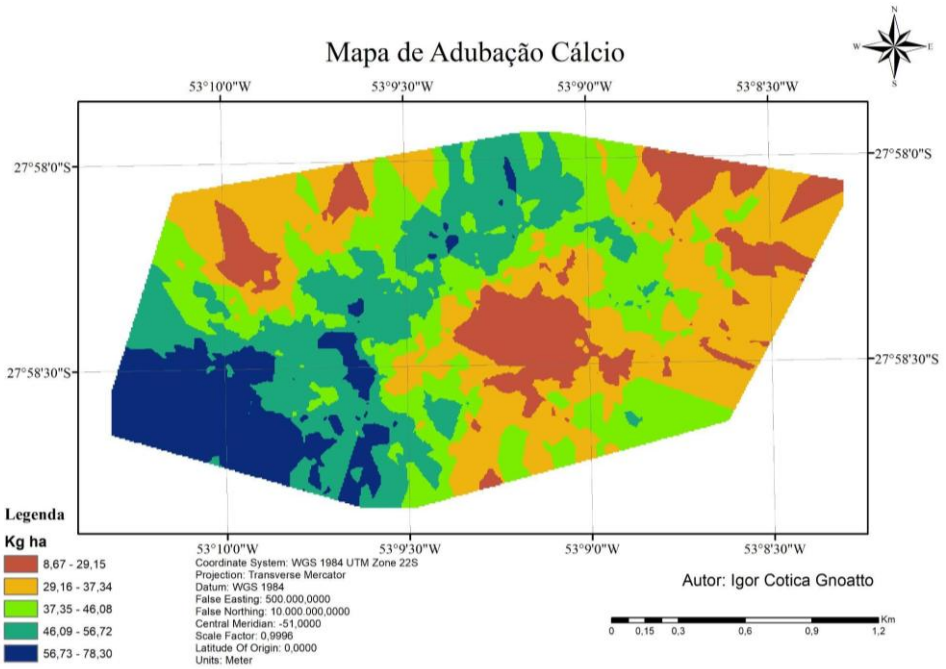
A avaliação dos dados obtidos demonstra diferenças substanciais entre a adubação convencional, ainda amplamente adotada por produtores, e o sistema de aplicação localizada em taxa variável, fundamentado na interpretação espacial da fertilidade do solo. Em áreas extensas, como a área de 555,7 hectares analisada, a aplicação uniforme de nutrientes tende a gerar um consumo elevado de fertilizantes, independentemente da necessidade real de cada ambiente produtivo. Essa prática resulta não apenas em custos significativamente superiores, mas também em expressivas perdas por lixiviação, fixação e escorrimento superficial, reduzindo a eficiência de uso dos insumos e contribuindo para impactos ambientais negativos.

Figura 1 - Fertilidade de Ca.



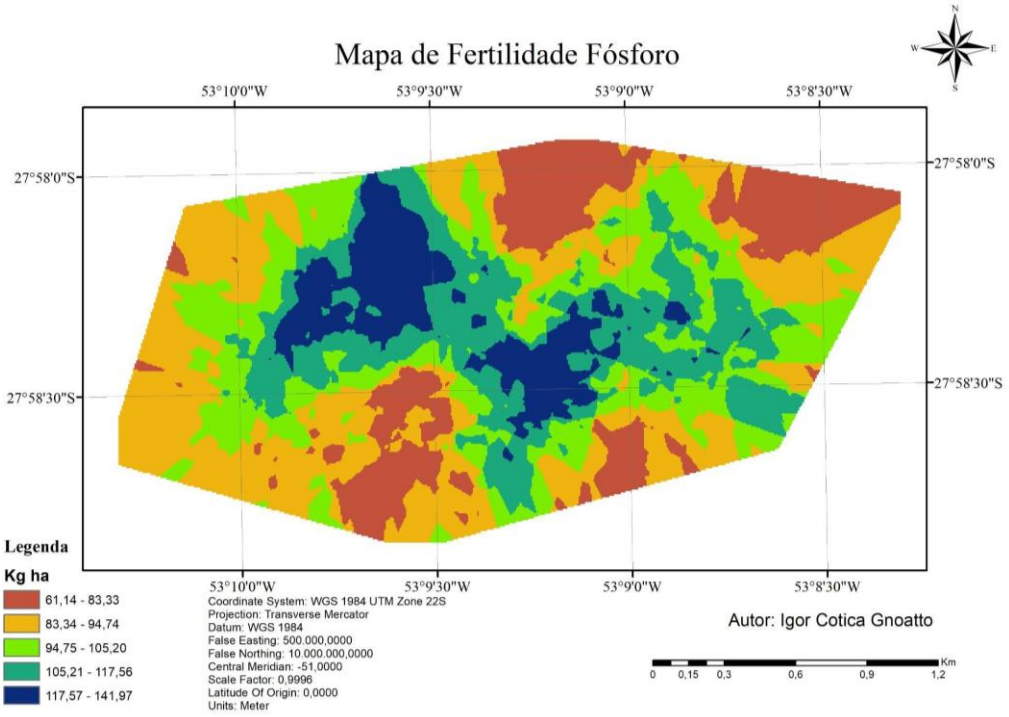
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 2 – Adu3,bação de Ca



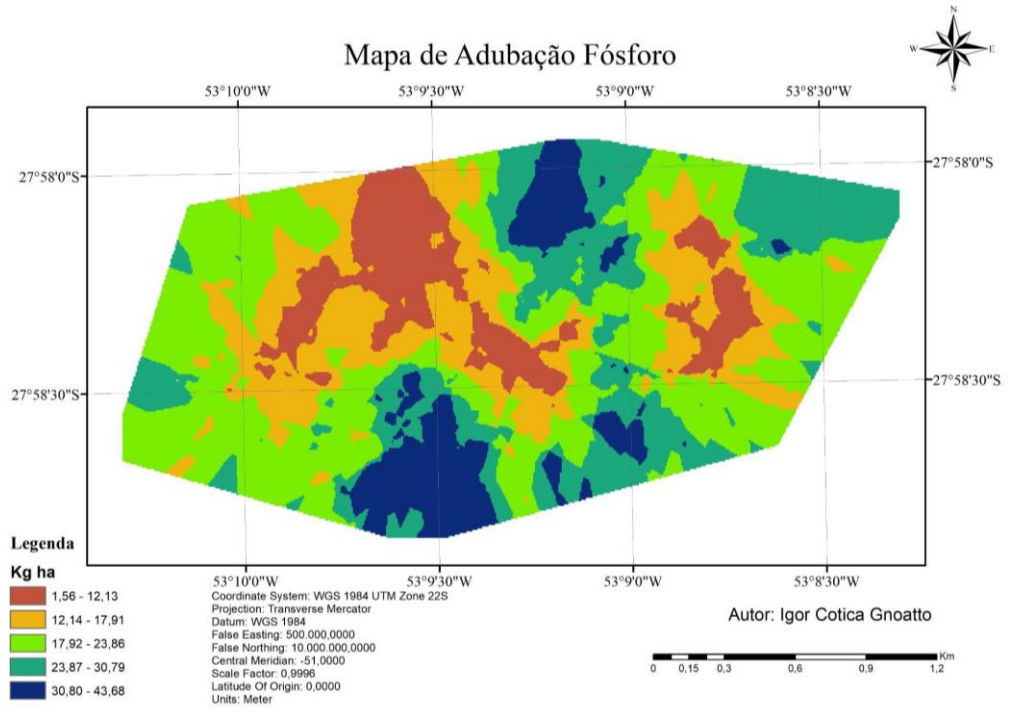
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 3 - Fertilidade de P



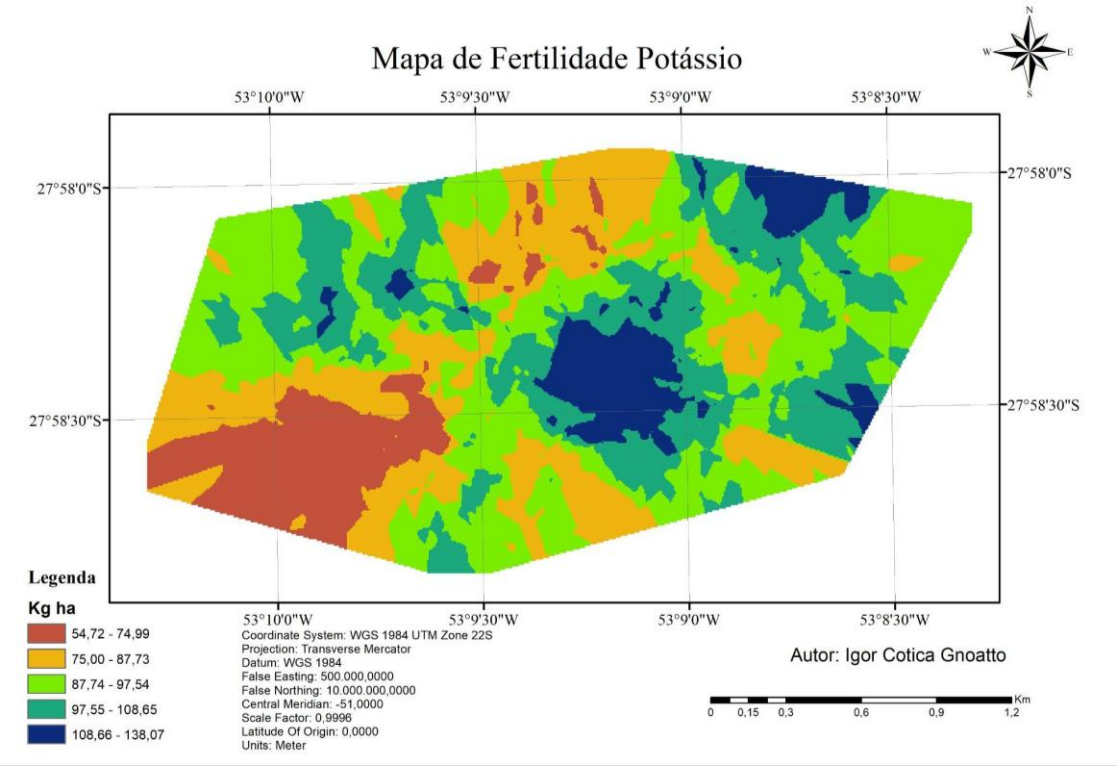
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 4 - Adubação de P



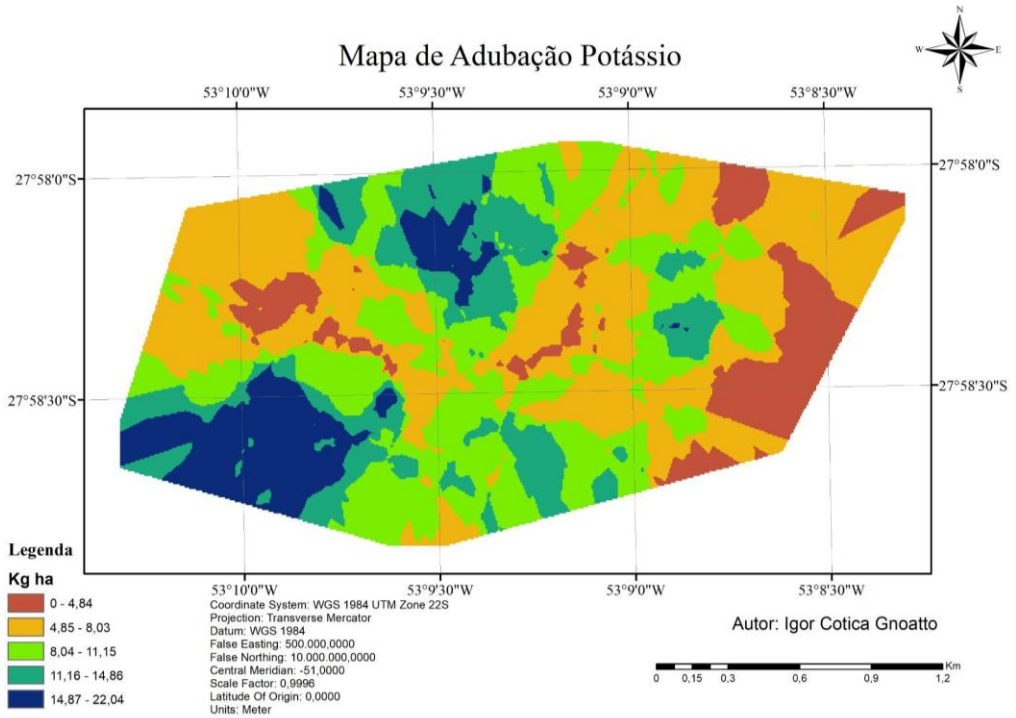
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 5 - Fertilidade de K



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 6 - Adubação de K



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A tabela a seguir apresenta os resultados referentes ao cenário convencional, no qual se adotaram doses fixas de fósforo, potássio e cálcio por hectare. Observa-se que a aplicação homogênea ocasiona um volume total extremamente elevado de nutrientes distribuídos na área, refletindo diretamente no custo final.

Tabela 1 – Custos da adubação convencional em 555,7 hectares

Nutriente	Recomendação	R$/kg insumo	Qtd aplicada	Custo
Potássio (K)	65 kg/ha	R$ 5,85	36.120,50 kg	R$ 211.304,93
Fósforo (P)	95 kg/ha	R$ 4,78	52.791,50 kg	R$ 252.343,37
Cálcio (Ca)	200 kg/ha	R$ 1,10	111.140,00 kg	R$ 122.254,00
Soma ∑				**R$ 585.902,30**

A magnitude dos valores evidencia o elevado gasto associado ao método convencional. A aplicação de mais de 200 toneladas de nutrientes ocorre sem distinção das demandas reais do solo, levando, inevitavelmente, a desperdícios. O fósforo, por exemplo, quando aplicado em excesso, é rapidamente imobilizado por oxi-hidróxidos de ferro e alumínio, tornando-se indisponível para as plantas. O potássio, por sua vez, apresenta alta mobilidade em solos com baixa CTC, favorecendo a lixiviação. Já o cálcio, quando aplicado acima da necessidade, tende a saturar cargas negativas do solo sem trazer benefícios adicionais à cultura. Esses fatores explicam a baixa eficiência agronômica observada quando se utiliza a adubação tradicional sem critérios espaciais, implicando não apenas em prejuízos econômicos, mas em potenciais danos ambientais, como contaminação de águas subterrâneas e eutrofização de corpos hídricos devido ao transporte de nutrientes (Scherwietes., et al. 2025).

Em contraste, o sistema de aplicação localizada por taxa variável demonstrou desempenho significativamente superior, tanto em eficiência quanto em racionalização do uso dos fertilizantes. A metodologia permitiu distribuir nutrientes apenas nas áreas efetivamente necessitadas, reduzindo drasticamente o volume total aplicado e os custos operacionais. A tabela a seguir apresenta os resultados obtidos com essa abordagem.

Tabela 2 – Custos da adubação localizada em taxa variável

Nutriente	Recomendação	R$/kg insumo	Qtd aplicada	Custo
Potássio (K)	65 kg/ha	R$ 5,85	34.598,74 kg	R$ 202.402,62
Fósforo (P)	95 kg/ha	R$ 4,78	49.157,55 kg	R$ 234.973,08
Cálcio (Ca)	200 kg/ha	R$ 1,10	104.178,87 kg	R$ 114.596,75
Soma ∑				**R$ 551.972,45**

A redução observada é expressiva: enquanto a adubação convencional demandou 200.052 kg de nutrientes, a taxa variável utilizou apenas 187.935,16 kg, representando uma diminuição de 6,2% no volume total de fertilizantes aplicados. Consequentemente, o custo caiu de R$ 585.902,30 para R$ 551.972,45, resultando em uma economia total de R$ 33.929,85. Em termos de eficiência econômica, a economia por hectare ultrapassa R$ 61 sc/ha, reforçando o impacto positivo da tecnologia.

Além do benefício financeiro, a aplicação localizada contribui para um manejo mais sustentável da fertilidade do solo. Ao evitar excessos, diminui-se o risco de contaminação ambiental e melhora-se a eficiência do uso dos nutrientes pelas plantas. Essa abordagem também favorece o equilíbrio químico do solo, reduz a fixação e a lixiviação de nutrientes, e direciona o investimento apenas para os locais onde há limitação produtiva. Em sistemas agrícolas modernos, nos quais a sustentabilidade e o retorno econômico são fatores determinantes, a taxa variável mostra-se, portanto, uma alternativa superior, tanto agronomicamente quanto ambientalmente.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram de forma clara a superioridade técnica e econômica da aplicação de fertilizantes em taxa variável em comparação ao método convencional amplamente utilizado pelos produtores rurais. A integração de dados geoespaciais, mapas de fertilidade e modelos de interpolação permitiu identificar a real necessidade nutricional da área, reduzindo significativamente o uso de insumos e os custos operacionais. Além da expressiva economia financeira observada, o método contribui para minimizar perdas por lixiviação e escorrimento, favorecendo a sustentabilidade ambiental do sistema produtivo. Assim, a adoção da agricultura de precisão e da adubação em taxa variável configura-se como uma estratégia eficiente, sustentável e alinhada às exigências da agricultura moderna.

REFERÊNCIAS

ROLAS, EMBRAPA; Disponível em https://rolas.cnpt.embrapa.br/arquivos/manual_rolas.pdf acesso em: 5.nov.2025.

ARCGIS; Disponível em https://enterprise.arcgis.com/pt-br/portal/10.5/use/deploy-app.html
BERTOLLO, G. M., Fiorin, J. E., & Wyzykowski, T. (2023). **Recomendação da correção com fósforo e potássio usando ferramenta de agricultura de precisão**. Anais de seminário universitário.

PAWASE, P. P., Nalawade, S. M., Bhanage, G. B., Walunj, A. A., Kadam, P. B., Durgude, A. G., & Patil, M. R. (2023). **Variable rate fertilizer application technology for nutrient management**: A review. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 16(4), 11–19.

SCHERWIETES, E., Stein, M., Six, J., et al. (2025). **Phosphorus and aluminium mobilisation in ferralsols:** effects of local sediment amendments, liming and straw application in a lab study. Frontiers in Environmental Science. DOI: 10.3389/fenvs.2025.1628554.

CAPÍTULO 4

INOVAÇÕES BIOTECNOLÓGICAS PARA O FORTALECIMENTO DA SEGURANÇA ALIMENTAR

BIOTECHNOLOGICAL INNOVATIONS FOR STRENGTHENING FOOD SECURITY

Nayara Cristina Milane
Nutricionista, bacharel pelo Centro de Ensino Superior dos Campos Gerais. Pós-graduada em Metodologia do Ensino Superior e em Gestão de Alimentos e Nutrição, com Residência Multiprofissional em Saúde Coletiva. Mestre e Doutora pelo Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciência e Tecnologia da UTFPR.

Adriana Rute Cordeiro
Professora colaboradora da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). Licenciada em Ciências Biológicas e Química, Mestre em Química pela UEPG e Doutora em Ciências, com ênfase em Bioquímica, pela UFPR.

DOI: 10.52832/wed.220.1284

Resumo: A segurança microbiológica dos alimentos constitui um desafio global diante do crescimento populacional, das mudanças climáticas e das limitações da produção agrícola. Nesse contexto, a biotecnologia destaca-se por oferecer ferramentas capazes de aumentar a produtividade, reduzir perdas e fortalecer o controle sanitário. Este estudo analisou as principais inovações biotecnológicas aplicadas à segurança alimentar por meio de uma revisão integrativa da literatura nas bases PubMed, Scopus, Web of Science e SciELO. Após aplicação dos critérios de elegibilidade, foram incluídos 17 estudos publicados entre 2020 e 2025. Os resultados indicaram avanços em três frentes: biossensores para detecção rápida de microrganismos e toxinas; sistemas diagnósticos baseados em CRISPR, com alta precisão analítica; e biotecnologia agrícola, com melhorias em produtividade, resistência a doenças e qualidade dos alimentos. Conclui-se que essas inovações são promissoras, embora ainda demandem validação, padronização e avanços regulatórios.

Palavras-chave: Biossensores. Biotecnologia agrícola. Diagnóstico molecular. Segurança dos alimentos.

Abstract: Food microbiological safety is a global challenge in the context of population growth, climate change, and limitations affecting agricultural production. In this scenario, biotechnology has gained prominence by offering tools capable of increasing productivity, reducing losses, and strengthening sanitary control. This study analyzed the main biotechnological innovations applied to food security through an integrative literature review conducted in the PubMed, Scopus, Web of Science, and SciELO databases. After applying the eligibility criteria, 17 studies published between 2020 and 2025 were included. The results revealed advances in three main areas: biosensors for rapid and sensitive detection of microorganisms and toxins; CRISPR-based diagnostic systems with high analytical precision; and agricultural biotechnology innovations, which showed improvements in productivity, disease resistance, and food quality. It is concluded that these biotechnological innovations offer promising pathways to strengthen food security, although further validation under real-world conditions, protocol standardization, and regulatory advances are still required.

Keywords: Biosensors. Agricultural biotechnology. Molecular diagnostics. Food safety.

1 INTRODUÇÃO

A segurança alimentar representa um desafio estrutural complexo na contemporaneidade, intensificado por pressões demográficas, ambientais e socioeconômicas, como o crescimento populacional, as mudanças climáticas, a degradação dos recursos naturais e as desigualdades no acesso a tecnologias e políticas públicas, fatores que ampliam o risco de escassez e comprometem a qualidade e o acesso a alimentos seguros, nutritivos e adequados (FAO, 2021).

No Brasil, esse cenário assume contornos particularmente críticos. Dados recentes apontam que mais de 33 milhões de brasileiros vivenciaram insegurança alimentar grave, evidenciando fragilidades estruturais nos sistemas de produção, distribuição e acesso aos alimentos, bem como a necessidade de estratégias inovadoras e sustentáveis para garantir o direito humano à alimentação adequada (Rede Penssan, 2022; Barbosa; Brisola, 2024).

Nesse cenário, a biotecnologia destaca-se como um campo estratégico para a segurança

alimentar, ao oferecer soluções capazes de aumentar a produtividade, reduzir perdas e fortalecer o controle sanitário dos alimentos. Embora suas bases estejam presentes em práticas tradicionais, como a fermentação, os avanços científicos do século XX — especialmente a descoberta da estrutura do DNA e o desenvolvimento da engenharia genética — ampliaram significativamente seu alcance, permitindo intervenções mais precisas nos sistemas biológicos e impulsionando aplicações em melhoramento genético, diagnóstico molecular e bioengenharia voltadas à produção de alimentos (Singh; Singh; Singh, 2023; Fiaz; Uzair; Zhang, 2024).

As inovações biotecnológicas contemporâneas aplicadas à segurança alimentar abrangem diferentes frentes interconectadas. No âmbito agrícola, ferramentas de edição gênica, como os sistemas baseados em CRISPR-Cas, têm permitido modificações direcionadas no genoma vegetal, favorecendo o desenvolvimento de cultivos mais produtivos, resistentes a doenças, tolerantes a estresses ambientais e com características pós-colheita aprimoradas. Essas tecnologias apresentam vantagens significativas em relação aos métodos convencionais de melhoramento, especialmente no que se refere à precisão das alterações genéticas e à redução do tempo necessário para obtenção de novas variedades, configurando-se como alternativas promissoras frente às demandas impostas pela segurança alimentar global (Wang *et al.*, 2019; Wolter *et al.*, 2019).

Paralelamente, a biotecnologia tem desempenhado papel central no fortalecimento do controle sanitário dos alimentos, especialmente por meio do desenvolvimento de biossensores e sistemas de diagnóstico rápido com alta sensibilidade e especificidade para a detecção de microrganismos patogênicos, toxinas e contaminantes ao longo da cadeia produtiva. Além disso, estratégias de biopreservação baseadas no uso de microrganismos probióticos e culturas iniciadoras têm sido exploradas para prolongar a vida útil dos alimentos e reduzir riscos de contaminação, por meio da produção de metabólitos com ação antimicrobiana. (Teneva; Denev, 2023; Zavišić *et al.*, 2024).

Apesar de seu potencial, a adoção das inovações biotecnológicas ainda é limitada por desafios regulatórios, éticos e sociais, especialmente pela ausência de marcos normativos consolidados, incertezas jurídicas e pela percepção pública sobre organismos geneticamente modificados (Grassi Neto, 2022; Winter; Vilaça, 2024; Lopes; Corleto; Chiavari, 2025).

Diante desse cenário, este capítulo analisa criticamente as principais inovações biotecnológicas aplicadas à segurança alimentar, discutindo suas contribuições, limitações e perspectivas, bem como o papel de abordagens regulatórias e sociais para garantir seu uso responsável, sustentável e acessível.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo se caracteriza como uma revisão integrativa da literatura, método que permite reunir, analisar e sintetizar evidências científicas sobre um determinado tema, possibilitando compreensão ampla e sistematizada do fenômeno investigado. Esse tipo de revisão é especialmente adequado para integrar estudos com diferentes delineamentos e identificar lacunas de conhecimento, conforme proposto por Mendes; Silveira; Galvão (2008). O percurso metodológico seguiu seis etapas: elaboração da pergunta norteadora; definição dos critérios de inclusão e exclusão; busca nas bases de dados; categorização dos estudos; avaliação crítica dos achados; e síntese dos resultados.

A revisão situa-se no campo da Biotecnologia aplicada à Segurança Alimentar e abrangeu estudos nacionais e internacionais das áreas de Ciências Agrárias, Engenharia de Alimentos, Nutrição, Microbiologia, Biotecnologia Molecular e Políticas Públicas em Ciência e Tecnologia. Por se tratar de pesquisa exclusivamente bibliográfica, não houve delimitação geográfica ou institucional, nem envolvimento de seres humanos, experimentação laboratorial ou coleta de dados in loco, caracterizando-se como estudo documental e analítico.

A pergunta norteadora da revisão foi formulada da seguinte maneira: "Quais inovações biotecnológicas têm sido aplicadas para ampliar a segurança alimentar e quais são suas contribuições, limitações e desafios?". Essa questão orientou todas as etapas do processo metodológico, incluindo a busca, a seleção, a análise e a interpretação dos estudos incluídos.

Foram incluídos estudos disponíveis na íntegra em formato digital, publicados entre 2020 e 2025, que abordassem aplicações biotecnológicas relacionadas à produção, conservação, biopreservação, diagnóstico, controle sanitário ou biossensores aplicados à segurança alimentar. Consideraram-se apenas artigos originais empíricos ou aplicados, publicados em periódicos revisados por pares, redigidos em português, inglês ou espanhol, com descrição metodológica suficiente para análise crítica e síntese qualitativa. Foram excluídos estudos duplicados, revisões narrativas, sistemáticas ou bibliométricas, textos opinativos, editoriais, resumos simples e literatura cinzenta, bem como pesquisas exclusivamente biomédicas, farmacológicas ou ambientais sem interface direta com alimentos. Também foram excluídos estudos com metodologia insuficientemente descrita, resultados incompletos, indisponibilidade do texto completo ou ausência de revisão por pares.

A busca bibliográfica foi realizada em novembro de 2025 nas bases *PubMed/Medline, Scopus, Web of Science* e SciELO. Utilizaram-se descritores em português e inglês, conforme DeCS/MeSH, combinados por operadores booleanos, resultando na seguinte estratégia de busca: *("CRISPR" OR "gene editing" OR "biosensor*" OR "nanobiotechnology") AND ("food safety" OR "food contamination").*

Os estudos selecionados foram organizados em planilha padronizada, contendo informações sobre autores, ano de publicação, país de origem, tipo de estudo, objetivos, métodos, aplicações biotecnológicas, contribuições para a segurança alimentar, limitações e desafios. Essa sistematização permitiu a comparação entre os estudos e a síntese estruturada dos achados.

A avaliação crítica considerou critérios de qualidade metodológica, clareza dos objetivos, coerência interna, adequação dos métodos e relevância para a segurança alimentar, conforme as recomendações de Whittemore; Knafl (2005). A síntese dos resultados foi realizada por categorização temática, integrando achados semelhantes, divergentes e complementares, de modo narrativo e interpretativo, conforme orientações de Mendes; Silveira; Galvão (2008).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram identificados um total de 610 artigos nas bases de dados, foram removidas 15 duplicatas e os 595 artigos restantes foram analisados de acordo com os critérios de inclusão e exclusão. Ao final, foram incluídos 17 artigos nesta pesquisa, como mostra o Quadro 1.

Quadro 1- Artigos inseridos na revisão

Código	Autores	Ano	Revista	Título
A01	Nuñez-Muño *et al.*	2021	Plant Signaling & Behavior	Plant drought tolerance provided through genome editing of the trehalase gene
A02	Hu; Zhang; Yu.	2023	Journal of Experimental Botany	CRISPR/Cas9-based system enables fast breeding of canola with Rcr1 resistance
A03	Dedičová ; Lopez-Lavalle	2024	BioTechniques	Cassava for the future: embryogenic liquid cultures suitable for new biotech techniques
A04	Liu *et al.*	2023	Journal of IntegrativePlant Biology	Establishment of genome-editing system and assembly of a near-complete genome in broomcorn millet
A05	Nonaka; Ito; Ezura.	2023	Front. Genome	Targeted modification of CmACO1 by CRISPR/Cas9 extends the shelf-life of Cucumis melo var. reticulatus melon.

A06	Lorenzo *et al.*	2023	The Plant Cell	BREEDIT: multiplex genome editing to improve quantitative traits in maize
A07	Ferrero *et al.*	2024	Plant Stress	Enhancing tolerance to Phytophthora spp. in eggplant through DMR6–1 CRISPR/Cas9 knockout
A08	Schepler-Luu *et al.*	2025	Microbiology and Infectious Disease	Genome editing of an African elite rice variety confers resistance against endemic and emerging Xanthomonas oryzae pv. oryzae strains.
A09	Barrera *et al.*	2025	Plants	Protoplast-Based Regeneration Enables CRISPR/Cas9 Application in Two Temperate Japonica Rice Cultivars
A10	Shahbaz *et al.*	2025	Plant Cell Reports	Reduced stomatal density improves water-use efficiency in grapevine under climate scenarios of decreased water availability.
A11	Ramasamy *et al.*	2025	Current Plant Biology	CRISPR/Cas9 mutagenesis generated elite alleles of a novel yield gene An-1 leading to increased grain number in rice (Oryza sativa L.).
A12	Liu *et al.*	2024	LWT	Innovative application of CRISPR for eliminating Ustiloxin in Cordyceps militaris: Enhancing food safety and quality.
A13	Zhou *et al.*	2025	BMC Plant Biology	Biological agents and plant growth regulator promote rice growth and regenerative capacity
A14	Nguyen; Nguyen; Tran *et al.*	2024	PlosOne	Disposable impedance sensors based on novel hybrid MoS2 nanosheets and microparticles to detect Escherichia Coli DNA.
A15	Caliskan-Aydogan *et al.*	2023	Trends in Food Science & Technology	Plasmonic biosensors for food control
A16	Zhao *et al.*	2023	Chemosensors	Aptamer Sensor Based on Hybrid Chain Reaction and CRISPR-Cas9 System for STX Detection

Fonte: Autoria Própria

Todos os estudos incluídos nesta revisão foram publicados em inglês (N = 16; 100%) em periódicos internacionais, evidenciando a inserção global das discussões sobre biotecnologia aplicada à segurança alimentar, diagnóstico rápido, produtividade agrícola e edição genética, não tendo sido identificadas publicações em periódicos nacionais. A produção científica analisada organizou-se em três eixos temáticos principais: biossensores e nanotecnologia aplicados ao controle e monitoramento de alimentos; sistemas diagnósticos baseados em CRISPR; e biotecnologia agrícola associada à edição genética voltada à produção, qualidade e segurança dos alimentos.

No primeiro eixo, os avanços em biossensores e nanotecnologia evidenciam respostas à demanda por métodos analíticos mais rápidos, sensíveis e acessíveis para o monitoramento microbiológico e toxicológico ao longo da cadeia produtiva. Dispositivos baseados em nanomateriais e plataformas de reconhecimento molecular têm superado limitações dos métodos tradicionais, especialmente em termos de tempo de análise e aplicabilidade em matrizes alimentares complexas (Curulli, 2022; Wang *et al.*, 2022; Nath, 2024). Destacam-se sensores eletroquímicos baseados em dissulfeto de molibdênio para detecção de DNA de *Escherichia coli* (Nguyen; Nguyen; Tran, 2024), aptassensores fluorescentes integrando CRISPR-Cas9 e amplificação de sinal para detecção de saxitoxina (Zhao *et al.*, 2023) e biossensores colorimétricos com nanopartículas de ouro voltados à identificação de DNA associado à resistência antimicrobiana (Caliskan-Aydogan *et al.*, 2023), ampliando as possibilidades de aplicação dessas tecnologias em diferentes contextos produtivos.

O segundo eixo refere-se aos sistemas diagnósticos baseados em CRISPR, que se destacam pela elevada especificidade e sensibilidade na detecção de sequências genéticas e toxinas relevantes para a segurança alimentar. A adaptação da tecnologia CRISPR-Cas para fins diagnósticos explora o reconhecimento preciso entre o complexo Cas–RNA guia e a sequência-alvo, permitindo análises rápidas e direcionadas, inclusive em matrizes alimentares complexas (Wang *et al.*, 2019; Wolter *et al.*, 2019). A integração entre CRISPR, aptâmeros e métodos de amplificação de sinal tem ampliado significativamente a sensibilidade analítica desses sistemas, viabilizando a detecção de contaminantes em concentrações muito baixas e fortalecendo estratégias de vigilância sanitária (Zhao *et al.*, 2023; Nath, 2024). Estudos baseados em reconhecimento genético, como os sensores eletroquímicos desenvolvidos por Nguyen; Nguyen; Tran (2024), reforçam o potencial de integração dessas abordagens com plataformas CRISPR, ampliando a robustez e a versatilidade dos métodos diagnósticos (Nguyen; Nguyen; Tran, 2024; Curulli, 2022).

O terceiro eixo, que concentra o maior número de estudos, envolve aplicações da biotecnologia agrícola e da edição genética voltadas ao aumento da produtividade, à resistência a

doenças, à tolerância a estresses ambientais e à melhoria da segurança e da qualidade dos alimentos. A edição gênica tem permitido avanços no rendimento de culturas, como a modificação do gene An-1 em arroz (Ramasamy *et al.*, 2025) e a edição multiplex em milho para aprimoramento de características quantitativas (Lorenzo *et al.*, 2023). Estratégias voltadas à resistência a patógenos, como a inativação do gene DMR6-1 em berinjela (Ferrero *et al.*, 2024) e a edição de cultivares de arroz africano resistentes a *Xanthomonas oryzae* (Schepler-Luu *et al.*, 2025), contribuem para reduzir perdas produtivas e o uso de defensivos agrícolas.

A adaptação a estresses ambientais, evidenciada pela redução da densidade estomática em videiras (Shahbaz *et al.*, 2025), e aplicações voltadas diretamente à segurança dos alimentos, como a eliminação de ustiloxina em *Cordyceps militaris* (Liu *et al.*, 2024) e o prolongamento da vida útil de melões (Nonaka; Ito; Ezura, 2023), reforçam o caráter multifuncional dessas tecnologias. Avanços metodológicos em regeneração vegetal e sistemas de edição genética ampliam ainda mais as possibilidades de aplicação em culturas estratégicas (Barrera *et al.*, 2025; Dedičová; Lopez-Lavalle, 2024; Liu *et al.*, 2023), assim como abordagens complementares voltadas à tolerância à seca e ao uso de agentes biológicos (Nuñez-Muñoz *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2025).

Em conjunto, os três eixos analisados demonstram que a biotecnologia aplicada à segurança alimentar constitui um campo integrado e multifacetado, no qual diferentes ferramentas convergem para reduzir perdas, aumentar a produtividade, melhorar a qualidade dos alimentos e fortalecer a resiliência dos sistemas produtivos. Apesar dos desafios regulatórios, éticos e sociais ainda presentes, as evidências indicam que essas inovações representam instrumentos centrais para a construção de sistemas alimentares mais eficientes, seguros e sustentáveis (Grassi Neto, 2022; Winter; Vilaça, 2024).

4 CONCLUSÃO

As evidências reunidas nesta revisão mostram que as inovações biotecnológicas têm desempenhado um papel importante no fortalecimento da segurança alimentar, seja pela detecção mais rápida e sensível de contaminantes, seja pela criação de plantas mais resistentes, produtivas e adaptadas às condições atuais de produção. Tecnologias como biossensores, diagnósticos moleculares e ferramentas de edição genética têm se mostrado promissoras para reduzir perdas, melhorar a qualidade dos alimentos e tornar os sistemas alimentares mais eficientes e seguros.

Ao analisar os estudos em conjunto, percebe-se que essas abordagens não atuam de forma isolada. Elas se complementam ao oferecer soluções que vão desde o controle microbiológico até o melhoramento agrícola, contribuindo para enfrentar desafios antigos e novos relacionados à produção, ao transporte e ao consumo de alimentos. Apesar disso, muitas dessas tecnologias ainda

precisam ser validadas em condições reais e avaliadas em relação à sua aplicabilidade, custo e impacto social.

Este estudo também apresenta limitações, como a dependência do material disponível nas bases consultadas e a ausência de dados experimentais de campo na maior parte dos artigos analisados. Para avançar, pesquisas futuras podem explorar avaliações em ambientes produtivos reais, aprofundar as discussões sobre regulamentação e sustentabilidade e investigar a aceitação social das tecnologias, garantindo que seus benefícios sejam viáveis, seguros e acessíveis. Esses caminhos podem fortalecer ainda mais o potencial da biotecnologia na construção de sistemas alimentares mais estáveis, saudáveis e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

BALBINOT, S. *et al.* Plasmonic biosensors for food control. **Trends in Food Science & Technology**, [*s. l.*], v. 111, p. 128–140, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.057. Acesso em: 29 nov. 2025.

BARBOSA, V. C. R.; BRISOLA, M. V. Beyond the fields: EMBRAPA'S sustainable technological prospects for Brazilian agribusiness. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, [*s. l.*], v. 62, n. 3, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1806-9479.2023.270441en. Acesso em: 27 nov. 2025.

BARRERA, M. *et al.* Protoplast-Based Regeneration Enables CRISPR/Cas9 Application in Two Temperate Japonica Rice Cultivars. **Plants**, [*s. l.*], v. 14, n. 13, p. 2059–2059, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/plants14132059. Acesso em: 29 nov. 2025.

CURULLI, A. Electrochemical Biosensors in Food Safety: Challenges and Perspectives. **Molecules**, [*s. l.*], v. 26, n. 10, p. 2940, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/molecules26102940. Acesso em: 27 nov. 2025.

DEDIČOVÁ, B.; AUGUSTO, L. Cassava for the future: embryogenic liquid cultures suitable for new biotech techniques. **BioTechniques**, [*s. l.*], v. 76, n. 9, p. 453–461, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1080/07366205.2024.2393546. Acesso em: 29 nov. 2025.

FADIJI, A. E. *et al.* Harnessing the Known and Unknown Impact of Nanotechnology on Enhancing Food Security and Reducing Postharvest Losses: Constraints and Future Prospects. **Agronomy**, [*s. l.*], v. 12, n. 7, p. 1657, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/agronomy12071657. Acesso em: 23 nov. 2025.

FAO. **The State of Food Security and Nutrition in the World 2021**. [*S. l.*], 2021. Disponível em: https://www.fao.org/interactive/state-of-food-security-nutrition/2021/en/. Acesso em: 23 nov. 2025.

FIAZ, S.; UZAIR, M.; ZHANG, B. Modern Plant Breeding for Achieving Global Food Security. **Physiologia Plantarum**, [*s. l.*], v. 176, n. 6, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1111/ppl.70014. Acesso em: 27 nov. 2025.

GAO, F. *et al.* Molecular breeding of livestock for disease resistance. **Virology**, [*s. l.*], v. 587, p. 109862, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.virol.2023.109862. Acesso em: 23 nov. 2025.

GRASSI NETO, R. DESAFIO BIOTECNOLÓGICO DA SEGURANÇA ALIMENTAR. **Direito, Processo e Cidadania**, [*s. l.*], v. 1, n. 2, p. 41–55, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.25247/2764-8907.2022.v1n2.p41-55. Acesso em: 23 nov. 2025.

HU, H.; ZHANG, Y.; YU, F. A CRISPR/Cas9-based vector system enables the fast breeding of selection-marker-free canola with *Rcr1*-rendered clubroot resistance. **Journal of Experimental Botany**, [*s. l.*], 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1093/jxb/erad471. Acesso em: 29 nov. 2025.

LIU, Y. *et al.* Establishment of genome-editing system and assembly of a near-complete genome in broomcorn millet. **Journal of Integrative Plant Biology**, [*s. l.*], v. 66, n. 8, p. 1688–1702, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1111/jipb.13664. Acesso em: 29 nov. 2025.

LIU, M. *et al.* Innovative application of CRISPR for eliminating Ustiloxin in Cordyceps militaris: Enhancing food safety and quality. **LWT**, [*s. l.*], v. 204, p. 116420, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116420. Acesso em: 29 nov. 2025.

LOPES, C. L.; CORLETO, A. F.; CHIAVARI, J. **Biotecnologia da Biodiversidade: Desafios Regulatórios e Institucionais - CPI**. [*S. l.*], 2025. Disponível em: https://www.climatepolicyinitiative.org/pt-br/publication/biotecnologia-da-biodiversidade-desafios-regulatorios-e-institucionais/. Acesso em: 23 nov. 2025.

LORENZO, C. J. *et al.* BREEDIT: a multiplex genome editing strategy to improve complex quantitative traits in maize. [*s. l.*], v. 35, n. 1, p. 218–238, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1093/plcell/koac243. Acesso em: 29 nov. 2025.

MARTINA, F. *et al.* Enhancing tolerance to Phytophthora spp. in eggplant through DMR6-1 CRISPR/Cas9 knockout. **Plant Stress**, [*s. l.*], p. 100691–100691, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100691. Acesso em: 29 nov. 2025.

MENDES, K. D. S.; SILVEIRA, R. C. de C. P.; GALVÃO, C. M. Revisão integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem. **Texto & Contexto - Enfermagem**, [*s. l.*], v. 17, n. 4, p. 758–764, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1590/s0104-07072008000400018. Acesso em: 23 nov. 2025.

NATH, S. Advancements in food quality monitoring: integrating biosensors for precision detection. **Sustainable Food Technology**, [*s. l.*], 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1039/d4fb00094c. Acesso em: 23 nov. 2025.

NGOC, T.; NGUYEN, S. H.; TRAN, M. T. Disposable impedance sensors based on novel hybrid MoS2 nanosheets and microparticles to detect Escherichia Coli DNA. **PLoS ONE**, [*s. l.*], v. 19, n. 2, p. e0299272–e0299272, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299272. Acesso em: 29 nov. 2025.

NONAKA, S.; ITO, M.; EZURA, H. Targeted modification of CmACO1 by CRISPR/Cas9 extends the shelf-life of Cucumis melo var. reticulatus melon. **Frontiers in genome editing**, [*s. l.*], v. 5, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fgeed.2023.1176125. Acesso em: 29 nov.

2025.

NUÑEZ-MUÑOZ, L. *et al.* Plant drought tolerance provided through genome editing of the trehalase gene. **Plant Signaling & Behavior**, [*s. l.*], v. 16, n. 4, p. 1877005, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1080/15592324.2021.1877005. Acesso em: 29 nov. 2025.

PENSSAN. **2º Inquérito Nacional sobre Insegurança Alimentar no Contexto da Pandemia da Covid-19 no Brasil – Rede Brasileira de Pesquisa em Soberania e SAN**. [*S. l.*], 2022. Disponível em: https://pesquisassan.net.br/2o-inquerito-nacional-sobre-inseguranca-alimentar-no-contexto-da-pandemia-da-covid-19-no-brasil/. Acesso em: 23 nov. 2025.

RAMASAMY, S. P. *et al.* CRISPR/Cas9 mutagenesis generated elite alleles of a novel yield gene An-1 leading to increased grain number in rice (Oryza sativa L.). **Current Plant Biology**, [*s. l.*], v. 43, p. 100511, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cpb.2025.100511. Acesso em: 29 nov. 2025.

SHAHBAZ, U. *et al.* Reduced stomatal density improves water-use efficiency in grapevine under climate scenarios of decreased water availability. **Plant Cell Reports**, [*s. l.*], v. 44, n. 9, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00299-025-03577-9. Acesso em: 29 nov. 2025.

SINGH, J.; SINGH, A.; SINGH, S. MAJOR MILESTONES IN THE EVOLUTIONARY TIMELINE OF BIOTECHNOLOGY. **International Journal of Current Science**, [*s. l.*], v. 13, p. 2250–1770, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1729/Journal.35933. Acesso em: 27 nov. 2025.

TENEVA, D.; DENEV, P. Biologically Active Compounds from Probiotic Microorganisms and Plant Extracts Used as Biopreservatives. **Microorganisms**, [*s. l.*], v. 11, n. 8, p. 1896–1896, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/microorganisms11081896

WANG, K. *et al.* Review of Electrochemical Biosensors for Food Safety Detection. **Biosensors**, [*s. l.*], v. 12, n. 11, p. 959–959, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/bios12110959

WANG, T.; ZHANG, H.; ZHU, H. CRISPR technology is revolutionizing the improvement of tomato and other fruit crops. **Horticulture Research**, [*s. l.*], v. 6, n. 1, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41438-019-0159-x. Acesso em: 23 nov. 2025.

WHITTEMORE, R.; KNAFL, K. The integrative review: Updated methodology. **Journal of Advanced Nursing**, [*s. l.*], v. 52, n. 5, p. 546–553, 2005. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2005.03621.x

WINTER, B. C. de A.; VILAÇA, M. M. O desafio regulatório da Biotecnologia e suas novas aplicações: o caso da CRISPR-Cas9 e da sua aplicação em células germinativas humanas. **Revista Binacional Brasil-Argentina Diálogo entre as ciências**, [*s. l.*], v. 14, n. 2, p. 138–166, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.22481/rbba.v14i2.15394. Acesso em: 23 nov. 2025.

WOLTER, F.; SCHINDELE, P.; PUCHTA, H. Plant breeding at the speed of light: the power of CRISPR/Cas to generate directed genetic diversity at multiple sites. **BMC Plant Biology**, [*s. l.*], v. 19, n. 1, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s12870-019-1775-1. Acesso em: 23 nov. 2025.

ZAVIŠIĆ, G. *et al.* Microbial Contamination of Food: Probiotics and Postbiotics as Potential

Biopreservatives. **Foods**, [*s. l.*], v. 13, n. 16, p. 2487, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/foods13162487. Acesso em: 23 nov. 2025.

ZHAO, Q.; LI, G.; LI, X. Aptamer Sensor Based on Hybrid Chain Reaction and CRISPR-Cas9 System for STX Detection. **Chemosensors**, [*s. l.*], v. 11, n. 3, p. 183, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/chemosensors11030183. Acesso em: 29 nov. 2025.

ZHOU, H. *et al.* Biological agents and plant growth regulator promote rice growth and regenerative capacity. **BMC Plant Biology**, [*s. l.*], v. 25, n. 1, p. 1540–1540, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s12870-025-06751-z. Acesso em: 29 nov. 2025.

CAPÍTULO 5

RESFRIAMENTO A 4-5 °C COMO ESTRATÉGIA DE CONSERVAÇÃO DE TECIDO OVARIANO: UMA REVISÃO

OVARIAN TISSUE COOLING AT 4-5 °C AS A FOLLICULAR PRESERVATION STRATEGY: A REVIEW

Samara Hélida Mouta Gonçalves[1]
Estudante de Graduação em Bacharelado em Medicina, Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPar), Parnaíba-PI, Brasil

Sara Jayane Abreu de Souza[2]
Estudante de Graduação em Bacharelado em Biomedicina, Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPar), Parnaíba-PI, Brasil

Juliana Sousa Ribeiro de Lima e Silva[3]
Estudante de Graduação em Bacharelado em Biomedicina, Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPar), Parnaíba-PI, Brasil

Iana Lira Nogueira[4]
Estudante de Graduação em Bacharelado em Biomedicina, Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPar), Parnaíba-PI, Brasil

Solano Dantas Martins[5]
Doutorando em Biotecnologia, Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPar), Parnaíba-PI, Brasil

Valdevane Rocha Araújo[6]
Doutora em Ciências Veterinárias pela Universidade Estadual do Ceará (UECE), Docente do Curso de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPar), Parnaíba-PI, Brasil

Luciana Rocha Faustino[7]
Doutora em Ciências Veterinárias pela Universidade Estadual do Ceará (UECE), Docente do Curso de Medicina, Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPar), Parnaíba-PI, Brasil

DOI: 10.52832/wed.220.1285

Resumo: Com o avanço das biotecnologias reprodutivas, o transporte de tecido gonadal tornou-se uma etapa crítica dessas tecnologias, uma vez que condições inadequadas de transporte podem comprometer a viabilidade das gônadas, reduzindo a qualidade dos gametas. Nesse contexto, o resfriamento do tecido ovariano, a aproximadamente 4-5 °C tem sido utilizado como estratégia para reduzir o metabolismo celular e permitir o transporte seguro do material biológico. O objetivo deste capítulo foi revisar os efeitos do armazenamento a frio sobre a viabilidade e a morfologia folicular em diferentes espécies. Para isso, realizou-se uma revisão bibliográfica nas bases de dados PubMed, Scopus e Web of Science, incluindo estudos que abordaram a preservação do tecido ovariano sob resfriamento e excluindo revisões de literatura. Os achados indicam que o resfriamento a baixas temperaturas contribui para a manutenção da morfologia e da viabilidade folicular e estromal por até 24 horas, com controle do estresse oxidativo e redução da apoptose. Contudo, apesar da preservação estrutural do tecido, alguns estudos relatam prejuízos na qualidade oocitária, o que pode prejudicar o desenvolvimento embrionário, evidenciando a necessidade de aprimoramento dos protocolos para ampliar a aplicabilidade dessa técnica.

Palavras-chave: Biotecnologias reprodutivas. Criopreservação. Folículos pré-antrais. Viabilidade celular.

Abstract: With the advancement of reproductive biotechnologies, the transportation of gonadal tissue has become a critical step, as inadequate conditions may compromise its viability, reducing gamete quality. In this context, cooling ovarian tissue to approximately 4–5 °C has been used as a strategy to reduce cellular metabolism and enable the safe transport of biological material. The aim of this chapter was to review the effects of cold storage on follicular viability and morphology in different species. To this end, a literature review was conducted using the PubMed, Scopus, and Web of Science databases, including studies that addressed the preservation of ovarian tissue under cooling conditions and excluding review articles. The findings indicate that low-temperature storage contributes to the maintenance of follicular and stromal morphology and viability for up to 24 hours, with control of oxidative stress and reduction of apoptosis. However, despite the preservation of tissue structure, some studies report impairments in oocyte quality and, consequently, in embryonic development, highlighting the need for further improvement of protocols to expand the applicability of this technique.

Keywords: Reproductive biotechnologies. Cryopreservation. Preantral follicles. Cell viability

1 INTRODUÇÃO

Com os avanços da medicina moderna, especialmente nas abordagens terapêuticas para o tratamento do câncer, como a quimioterapia e a radioterapia, observou-se um aumento expressivo na sobrevida de pacientes oncológicas jovens (Martins *et al.*, 2025). Entretanto, essas terapias são altamente gonadotóxicas e, frequentemente, resultam em insuficiência ovariana prematura, menopausa precoce e comprometimento irreversível da fertilidade dessas pacientes (Tomás *et al.*, 2016).Diante desse cenário, a preservação da fertilidade tornou-se uma demanda clínica relevante, sobretudo para mulheres em idade reprodutiva que desejam manter a possibilidade de gestação ou apenas a retomada do eixo hormonal, tendo em vista todos os aspectos negativos ocasionados pela redução dos hormônios (Yoshida *et al.*, 2018; Timko *et al.*, 2024). Nesse contexto, as biotecnologias

reprodutivas emergem como uma alternativa promissora para a manutenção do potencial reprodutivo feminino. Uma das estratégias, é a criopreservação de tecido ovariano com posterior autotransplante (Ross *et al.*, 2014); uma abordagem particularmente vantajosa para pacientes que não podem postergar o início do tratamento oncológico ou que ainda não atingiram a puberdade (Angarita, 2016). Todavia, uma das principais limitações dessa técnica está na necessidade de garantir a viabilidade do tecido ovariano desde o momento de sua coleta até seu processamento e/ou criopreservação (Vilela *et al.*, 2021).

A conservação por resfriamento é comumente realizada em temperaturas entre 4-5 °C, com o objetivo de reduzir o metabolismo celular, o consumo de oxigênio e a progressão dos processos degenerativos (Isachenko *et al.*, 2013). A redução metabólica permite retardar a atresia folicular e preservar a integridade morfológica do tecido durante o armazenamento temporário (Cheng *et al.*, 2021). Nesse sentido, embora existam padronizações para o transporte de diferentes tipos de tecidos, ainda se tem variações para a conservação de tecido ovariano, a depender da equipe que realiza (Vilela *et al.*, 2021). Variáveis como meio de transporte, temperatura, tempo de armazenamento e outras, são descritas e podem influenciar. Nesse contexto, considerando possíveis implicações na qualidade do tecido ovariano durante o transporte, a presente revisão tem como objetivo investigar os impactos do armazenamento a frio (4-5°C), tendo em vista, os melhores resultados, na viabilidade e na morfologia folicular de diferentes espécies, quando comparado a temperaturas de aquecimento (20-35°C; Chaves et al., 2008) reunindo literatura suficiente para debater a melhora nos protocolos de transporte de tecido ovariano.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Esta revisão bibliográfica foi baseada na avaliação dos principais achados relacionados aos efeitos da preservação folicular por meio do resfriamento do tecido ovariano à temperatura média de 4 a 5 °C. Para isso, partiu-se da seguinte pergunta norteadora: "Quais são os impactos do armazenamento a frio (4-5 °C) na viabilidade e na morfologia folicular em diferentes espécies?". Optou-se por não incluir o tempo de armazenamento como variável de análise, considerando a limitação da literatura disponível e a elevada heterogeneidade metodológica entre os estudos, especialmente no que se refere à duração do resfriamento, o que dificulta comparações diretas e análises padronizadas. Dessa forma, a presente revisão concentrou-se exclusivamente nos efeitos do resfriamento a 4-5 °C, com ênfase nas alterações morfológicas do ovário.

Foram considerados elegíveis artigos publicados em língua inglesa até janeiro de 2026. Os critérios de inclusão adotados foram: (01) artigos originais que abordassem a preservação de tecido ovariano e (02) estudos que utilizaram o resfriamento com gelo ou sistemas de temperatura

controlada das amostras. Como critérios de exclusão, foram definidos: (01) artigos que não avaliaram diretamente a influência da preservação das amostras a temperaturas a 4-5ºC, (02) revisões de literatura e (03) estudos que não apresentaram controle adequado ou descrição clara da temperatura durante o processo de resfriamento. As buscas foram realizadas nos bancos de dados PubMed Central, Web of Science e Scopus, utilizando os descritores "cooling AND ovary AND reproduction", "cooling AND ("ovary" OR "ovarian tissue") AND transportation" e "ovarian tissue AND hypothermic preservation AND follicles".

Ressalta-se que os descritores específicos para essa temática não se encontram plenamente definidos na literatura, razão pela qual os termos de busca foram adaptados; estratégia que contribuiu para ampliar a sensibilidade da pesquisa e aumentar a credibilidade metodológica do estudo.

Após a identificação dos estudos, realizou-se inicialmente a leitura dos títulos e resumos. Posteriormente, procedeu-se à leitura integral dos artigos, sendo selecionados aqueles que contribuíram de forma direta para a compreensão dos principais efeitos do resfriamento a baixas temperaturas acima de zero na morfologia do ovário, tema central deste capítulo.

3 RESULTADOS

No total, 12 trabalhos foram selecionados nesta revisão, de forma que seus protocolos experimentais, modelos biológicos e principais achados, estão sintetizados no Quadro 1.

Quadro 1 - Estudos que avaliaram o transporte e o armazenamento de tecido ovariano a 4–5 °C, destacando protocolos experimentais, finalidade do estudo, espécies estudadas e efeitos sobre a viabilidade e a morfologia folicular.

AUTORES	PROTOCOLO	FINALIDADE	ESPÉCIE	RESULTADOS
Lucci *et al.* (2004)	Solução salina ou água de coco; 4°C e 20°C; 6, 12 e 18h; fragmento ovariano.	Comparar meios e temperaturas para conservação de folículos pré-antrais.	Bovino	- Manutenção de mais de 90% de folículos normais por até 18 h a 4 °C; - ↓ folículos normais armazenamento a 20 °C por 12 h; - ↑ resistência de folículos primordiais ao frio em comparação aos folículos primários.
Cocchia *et al.* (2014)	PBS ± SOD; 4°C por 3 a 72h; peça inteira.	Avaliar efeitos da adição de SOD no meio de transporte sobre apoptose e FIV.	Felino	- Suplementação com SOD neutralizou as ROS geradas pelo transporte; prolongado a 4 °C e diminuiu significativamente a apoptose ovariana; - ↑ competência meiótica e das taxas de desenvolvimento embrionário até o estágio de blastocisto.
Isachenko *et al.* (2013)	Meio Leibovitz L-15; 5°C por 24h antes da criopreservação; fragmentos com medula.	Avaliar efetividade do cultivo em tecido resfriado-criopreservado	Humano	- ↑ viabilidade celular pós descongelamento em grupo resfriado previamente à criopreservação; - ↑ citoqueratina e Ki-67 (proliferação celular)
Gastal *et al.* (2017)	α-MEM; 4°C por 0, 6, 12 e 24h; peça inteira, biópsia e transplante	Avaliar efeitos do tamanho do tecido e tempo de transporte na integridade folicular.	Equino	-↑ progressivo de taxa de fragmentação de DNA conforme o prolongamento do armazenamento em todos os tamanhos de fragmentos; -↓ potencial de membrana mitocondrial quando o ovário inteiro utilizado; -↑ quantidade de folículos pré-antrais morfologicamente normais após 24h a 4 °C em fragmentos de tamanho de biópsia.
Piras *et al.* (2018)	PBS; 4°C por 0, 24, 48, 72 e 96h; ovários inteiros.	Avaliar efeitos do armazenamento na estrutura folicular e	Felino	- Armazenamento por 24 h preservou adequadamente a morfologia folicular; - ↑ significativo no dano ao DNA, ROS e despolimerização de microtúbulos em períodos superiores a 24 h; -↓ formação de blastocistos com armazenamento prolongado.

		competência oocitária.		
Martins *et al.* (2018)	MEM; 4 °C por 24h ou 72h + Vitrificação; Fragmentos.	Avaliar a sobrevivência de folículos pré-antrais após armazenamento prolongado.	Felino	- Manutenção da integridade estrutural por 24h; - ↓ taxa metabólica basal folicular sem comprometer a viabilidade pós-vitrificação; - ↑ danos ultraestruturais severos e ↓ viabilidade após 72h de armazenamento.
Isachenko *et al.* (2019)	Meio Leibovitz L-15; 5°C por 24h antes da criopreservação; fragmentos e tiras.	Avaliar a translocação de fosfatidilserina como marcador precoce de apoptose e viabilidade celular.	Humano	- ↓ translocação de fosfatidilserina no grupo resfriado por 24h; - ↑ proporção de células viáveis e melhor preservação da integridade estrutural em comparação à congelação imediata; - ↓ estresse celular e ativação da cascata apoptótica com o resfriamento prolongado pré-criopreservação.
Isachenko *et al.* (2020)	Meio Leibovitz L-15; 5°C por 24h na presença de crioprotetores permeáveis; fragmentos e tiras.	Analisar a viabilidade do tecido após resfriamento longo pré-congelação.	Humano	- Manutenção de alta proporção de folículos pré-antrais morfologicamente normais após 24 h de resfriamento; - Resfriamento prévio permitiu a saturação homogênea do tecido e protegeu a integridade cromossômica e microfilamentos contra a toxicidade do DMSO.
Souza *et al.* (2020)	MEM; 4°C por 24h em meio BotuOvary® (autotransplante); fragmentos grandes com medula.	Analisar efeitos do resfriamento e VEGF em autotransplante heterotópico.	Equino	-↓ hiperemia aguda e inflamação pós-transplante após resfriamento prévio; - Manutenção do percentual de folículos pré-antrais normais em níveis semelhantes ao controle fresco.

Piras *et al.* (2020)	PBS; 4°C por 24 ou 48h + resveratrol; ovários inteiros.	Analisar efeito do resveratrol na maturação e desenvolvimento embrionário.	Felino	-↓ níveis de ROS com a suplementação de 5µM de resveratrol; -↑ GSH, além de restaurar a taxa de formação de blastocistos em oócitos de ovários armazenados por 48 h para níveis semelhantes ao controle fresco.
Wang *et al.* (2021)	Meio Leibovitz L-15; 5°C por 24h antes da criopreservação (análise COPAS); Fragmentos.	Validar tecnologia COPAS para análise de viabilidade após resfriamento.	Humano	-↑ significativo na viabilidade celular no grupo pré-resfriado em comparação à congelação imediata; -↓ estresse celular global associado ao processo de criopreservação.
Souza *et al.* (2021)	MEM; 4°C por 24h em meio BotuOvary® + VEGF (xenotransplante); fragmentos.	Avaliar impactos do resfriamento e VEGF em xenotransplante ovariano.	Equino	-↑ preservação da morfologia folicular comparada a criopreservação imediata; -↑ viabilidade folicular pós-descongelamento quando o tecido foi previamente resfriado.

PBS, solução salina fosfatada; SOD, superóxido dismutase; MEM, meio essencial mínimo; ROS, espécies reativas de oxigênio; DMSO, Dimetilsulfóxido; GSH, Glutationa; COPAS, análises e classificação paramétrica de objetos complexos; VEGF, fator de crescimento endotelial; ↑, maior; ↓, menor; ±, em presença ou ausência de.

Fonte: Elaborado pelos autores.

4 DISCUSSÃO

4.1 Hipotermia por exposição a 4-5ºc: o papel da redução metabólica na preservação da sobrevivência folicular

A avaliação da viabilidade do tecido ovariano após o resfriamento a 4-5 °C é fundamental para determinar a segurança dessa estratégia como ponto de partida da utilização de biotécnicas reprodutivas na preservação da fertilidade. De forma consistente, a literatura demonstra que o armazenamento a frio por até 24 horas mantém níveis adequados de viabilidade celular e folicular em diferentes espécies (Martins *et al.*, 2018) e humanos (Isachenko *et al.,* 2020), embora os resultados sejam modulados pela espécie e pelas etapas subsequentes, como a criopreservação (Isachenko *et al.,* 2019) ou criopreservação seguida de transplante (Gasta *et al.,* 2017). Os autores relatam que a redução do metabolismo basal é central para a limitação da ativação precoce das vias de apoptose. Em equinos, o resfriamento do tecido ovariano está associado à menor ativação de caspases (Gastal *et al.,* 2017), enquanto em felinos esses fenômenos estão diretamente relacionados à desaceleração das reações bioquímicas dependentes de ATP (Martins *et al.,* 2018). Esses efeitos, possivelmente, contribuem para a manutenção da viabilidade celular em curto prazo, sem impedir completamente a progressão do dano isquêmico.

A diminuição da temperatura também favorece a estabilidade das membranas celulares e das junções comunicantes entre o oócito e as células da granulosa (Martins *et al.,* 2018) , no entanto essa integridade morfológica não deve ser interpretada como sinônimo de manutenção plena da qualidade biológica do tecido. Em tecido ovariano humano, a preservação da arquitetura folicular tem sido descrita como um fator importante para evitar a morte celular que ocorreria sob metabolismo mais ativo na ausência de perfusão sanguínea (Isachenko *et al.,* 2020).

À medida que o armazenamento a frio se prolonga, a desaceleração metabólica mostra-se insuficiente para sustentar a homeostase celular (Piras *et al.*, 2018). Como o metabolismo não é completamente interrompido, ocorre acúmulo progressivo de subprodutos metabólicos, associado à disfunção de sistemas dependentes de ATP, como as bombas iônicas de membrana (Yuge *et al.,* 2003). Esse desequilíbrio contribui para o aumento do estresse oxidativo e para o dano genômico, explicando a fragmentação do DNA observada após períodos mais longos de resfriamento (Piras *et al.,* 2018) e a perda da competência funcional (Colombo *et al.,* 2021), mesmo quando a morfologia aparenta estar preservada (Colombo *et al.,* 2021).

Diante desse contexto, a redução metabólica induzida pela hipotermia pode explicar, simultaneamente, o potencial e o limite dessa estratégia. O resfriamento a 4-5 °C amplia temporariamente a janela de viabilidade do tecido ovariano ao retardar o dano isquêmico inicial (Yuge *et al.,* 2003), mas sua eficácia é intrinsecamente dependente do tempo, sendo limitada pela

exaustão progressiva das reservas energéticas celulares (Martins *et al.,* 2018). Assim, a preservação hipotérmica (4-5ºC) deve ser compreendida prioritariamente como uma estratégia intermediária, capaz de ampliar temporariamente a janela de viabilidade do tecido ovariano, mas insuficiente, por si só, para garantir a preservação duradoura em situações em que períodos mais prolongados são necessários.

4.2 Fatores que determinam o sucesso ou a falha da preservação de tecido ovariano

A eficiência do resfriamento do tecido ovariano durante o transporte depende não apenas do controle da temperatura, mas também da composição do meio utilizado, uma vez que o metabolismo celular permanece ativo, ainda que em níveis reduzidos (Vilela *et al.,* 2021). O meio deve garantir estabilidade do pH, equilíbrio osmótico, manutenção da morfologia, da integridade folicular e estromal e da preservação de organelas celulares, especialmente mitocôndrias e cromatina nuclear (Isachenko *et al*., 2015). Dessa forma, o resfriamento isolado não é suficiente para assegurar a preservação funcional do tecido, tornando a escolha do meio um fator crítico para o sucesso da técnica (Lucci *et al*., 2004; Wilken-Jensen *et al*., 2014).

Meios simples, como a solução salina tamponada com fosfato (PBS) (Piras *et al*., 2018; Cocchia *et al.,* 2014) e a solução salina (Lucci *et al*., 2004), são amplamente utilizados devido à praticidade e ao baixo custo, apresentando resultados satisfatórios em transportes de curta duração. Em felinos, o PBS preservou a morfologia folicular por até 24 horas a 4 °C; entretanto, tempos prolongados foram associados ao aumento do estresse oxidativo, danos ao DNA e redução da competência embrionária (Piras *et al*., 2018; Colombo *et al*., 2021). Além disso, a literatura aborda que a conservação em temperaturas próximas ao limite fisiológico (20-35ºC), aumentam a degeneração folicular (Chaves et al., 2008). Em contrapartida, meios mais complexos, como MEM (Martins *et al.,* 2018), α-MEM (Gastal *et al.,* 2017) e Leibovitz L-15 (Isachenko *et al.,* 2013), proporcionam suporte metabólico superior e preservação mais consistente da integridade folicular e estromal, especialmente em tecidos humanos (Isachenko *et al*., 2015) e equinos (Gastal *et al*., 2017), desde que o tempo de transporte seja limitado a aproximadamente 24 horas (Isachenko *et al*., 2020). Os trabalhos evidenciam que a manutenção do pH, do equilíbrio osmótico e de um aporte mínimo de nutrientes, são fatores que contribuem para a redução do dano tecidual.

Além disso, estratégias de suplementação dos meios de transporte têm demonstrado potencial para minimizar os efeitos deletérios do resfriamento. A adição de antioxidantes, como a superóxido dismutase, reduziu a apoptose celular e favoreceu o desenvolvimento embrionário pós-transporte (Cocchia *et al*., 2014). Apesar desses avanços, soluções alternativas, como água de coco ou solução salina simples, apresentam limitações funcionais importantes, como composição não

definida e indução ao estresse oxidativo após longos períodos, reforçando que a escolha do meio de transporte deve considerar o modelo biológico, o tempo de armazenamento e a finalidade reprodutiva do tecido ovariano (Liu *et al*., 2003; Yuge *et al*., 2003; Lucci *et al*., 2004;).

A preservação morfológica do tecido ovariano também parece ser influenciada pelo tamanho do fragmento e pelo tempo de transporte, especialmente quando se consideram as particularidades da morfologia ovariana da espécie estudada. Gastal *et al.* (2017) destacam a relação estreita entre a densidade do estroma ovariano em ovários equinos e a dinâmica de desenvolvimento dos folículos pré-antrais, demonstrando que fragmentos menores (0,5 × 1 × 1 mm) tendem a apresentar melhor preservação tanto do estroma quanto dos folículos se comparados a amostras maiores, como tamanho de biópsia (2 x 2 x 12mm) e transporte do ovário inteiro. Esse efeito possivelmente está relacionado à manutenção mais eficiente da organização tecidual e à maior facilidade de penetração e equilíbrio da solução no interior da amostra. Por outro lado, amostras inteiras mostram maior suscetibilidade à desorganização estrutural (Piras *et al.,* 2018), enquanto fragmentos em formato de biópsia parecem favorecer a preservação da arquitetura folicular ao manter uma quantidade adequada de estroma (Gastal *et al.,* 2017). Embora essa avaliação se refira à dinâmica particular dos ovários equinos, a consideração das diferenças estruturais entre espécies contribui para a definição de condições mais adequadas de transporte do tecido ovariano em estudos de caráter transnacional.

4 CONCLUSÃO

Com base nos trabalhos analisados, observou-se que a eficiência da preservação tecidual durante o resfriamento está diretamente relacionada com a interação entre tamanho do fragmento ovariano, a composição do meio de transporte, a difusão de nutrientes e o tempo de transporte da amostra. O transporte em temperatura de 4-5ºC preserva em até 24h a viabilidade folicular do tecido ovariano coletado, tendo em vista a redução do metabolismo celular, o que não ocorre em temperaturas de aquecimento (20-35ºC). Entretanto, devido ao acúmulo de danos celulares genômicos gerado pelo metabolismo basal residual celular, apesar da manutenção morfológica os tecidos com 24h possuem qualidade inferior quando comparados aos conservados por menor tempo. Assim, a padronização conjunta desses parâmetros pode representar um fator determinante para otimizar os protocolos de preservação em condições de resfriamento.

Conflitos de interesses

Os autores declaram que não há conflitos de interesse. Todos os autores estão cientes da submissão do artigo.

Contribuições dos autores

Samara Hélida Mouta Gonçalves, Sara Jayane Abreu de Souza, Juliana Sousa Ribeiro de Lima e Silva e Iana Lira Nogueira contribuíram de forma equivalente para a concepção do estudo, delineamento metodológico, levantamento e análise da literatura científica, bem como para a redação do manuscrito. Solano Dantas Martins, Valdevane Rocha Araújo e Luciana Rocha Faustino atuaram contribuindo para a orientação científica, análise crítica do conteúdo, revisão intelectual do texto e aprovação da versão final. Todos os autores leram e aprovaram a versão final do manuscrito.

REFERÊNCIAS

Angarita, A. M., Johnson, C. A., Fader, A. N., & Christianson, M. S. (2016). **Fertility Preservation: A Key Survivorship Issue for Young Women with Cancer.** *Frontiers in oncology*, 6, 102. https://doi.org/10.3389/fonc.2016.00102

Chaves, R. N., Martins, F. S., Saraiva, M. V., Celestino, J. J., Lopes, C. A., Correia, J. C., Verde, I. B., Matos, M. H., Báo, S. N., Name, K. P., Campello, C. C., Silva, J. R., & Figueiredo, J. R. (2008). **Chilling ovarian fragments during transportation improves viability and growth of goat preantral follicles cultured in vitro.** *Reproduction, fertility, and development,* 20(5), 640–647. https://doi.org/10.1071/rd07195

Cheng, J., Ruan, X., Zhou, Q., Li, Y., Du, J., Jin, F., Gu, M., & Mueck, A. O. (2021). **Long-time low-temperature transportation of human ovarian tissue before cryopreservation.** *Reproductive BioMedicine Online, 43*(3), 489–498. https://doi.org/10.1016/j.rbmo.2021.05.006

Cocchia, N., *et al.* (2014). **The effects of superoxide dismutase addition to the transport medium on cumulus–oocyte complex apoptosis and IVF outcome in cats** (*Felis catus*). *Reproduction in Domestic Animals, 49*(Suppl. 4), 56–64. https://doi-org.ez17.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.repbio.2014.10.002

Colombo, M., *et al.* (2021). **Ovary cold storage and shipment affect oocyte yield and cleavage rate of cat immature vitrified oocytes.** *Theriogenology, 166*, 88–95.https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2020.11.003

Courbiere, B., Odagescu, V., Baudot, A., Massardier, J., Mazoyer, C., Salle, B., & Lornage, J. (2006). **Cryopreservation of the ovary by vitrification as an alternative to slow-cooling protocols**. *Fertility and sterility*, 86(4 Suppl), 1243–1251. https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2006.05.019

Gastal, E. L., *et al.* (2017). **Ovarian fragment sizes affect viability and morphology of preantral follicles during storage at 4 °C**. *Theriogenology, 97*, 182–189.https://doi.org/10.1530/REP-16-0621

Isachenko, V., Isachenko, E., Mallmann, P., & Rahimi, G. (2013). **Increasing follicular and stromal cell proliferation in cryopreserved human ovarian tissue after long-term**

precooling prior to freezing: In vitro versus chorioallantoic membrane (CAM) xenotransplantation. *Cell Transplantation, 22*(11), 2053–2061.https://doi.org/10.3727/096368912X658827

Isachenko, V., Todorov, P., Isachenko, E., Rahimi, G., Tchorbanov, A., Mihaylova, N., Manoylov, I., Mallmann, P., & Merzenich, M. (2019). **Correction: Long-Time Cooling before Cryopreservation Decreased Translocation of Phosphatidylserine (Ptd-L-Ser) in Human Ovarian Tissue.** PloS one, 14(2), e0212961. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212961

Isachenko, V., Morgenstern, B., Todorov, P., Isachenko, E., Mallmann, P., Hanstein, B., & Rahimi, G. (2020). **Long-term (24h) cooling of ovarian fragments in the presence of permeable cryoprotectants prior to freezing: Two unsuccesful IVF-cycles and spontaneous pregnancy with baby born after re-transplantation**. *Cryobiology*, 93, 115–120. https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2020.01.022

Liu, R. H., Sun, Q. Y., Li, Y. H., Jiao, L. H., & Wang, W. H. (2003). **Maturation of porcine oocytes after cooling at the germinal vesicle stage.** *Zygote* (Cambridge, England), 11(4), 299–305. https://doi.org/10.1017/s0967199403002351

Lucci, C. M., Kacinskis, M. A., Rumpf, R., & Báo, S. N. (2004). **Effects of lowered temperatures and media on short-term preservation of zebu (Bos indicus) preantral ovarian follicles**. *Theriogenology*, 61(2-3), 461–472. https://doi.org/10.1016/s0093-691x(03)00226-7

Martins, J. L. A., Lopes, M. D., de Souza, F. F., Possebon, F. S., Wibbelt, G., & Jewgenow, K. (2018). **Cat preantral follicle survival after prolonged cooled storage followed by vitrification**. *Cryobiology*, 81, 94–100. https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2018.02.004

Martins, S. D., Oliveira, M. A. F., Azevedo, V. A. N., Costa, F. D. C., Silva, I. G. M. D., de Morais, S. M., ... & Araújo, V. R. (2026). **Punica granatum L. Modulates Antioxidant Activity in Vitrified Bovine Ovarian Tissue.** *International Journal of Molecular Sciences*, 27(2), 903.

Timko Olson, E. R., Olson, A., Driscoll, M., & Bliss, D. Z. (2024). **Psychosocial Factors Affecting Wellbeing and Sources of Support of Young Adult Cancer Survivors: A Scoping Review.** *Nursing reports* (Pavia, Italy), 14(4), 4006–4021. https://doi.org/10.3390/nursrep14040293

Piras, A. R., Burrai, G. P., Ariu, F., Falchi, L., Zedda, M. T., Pau, S., Gadau, S. D., Antuofermo, E., Bebbere, D., Ledda, S., & Bogliolo, L. (2018). **Structure of preantral follicles, oxidative status and developmental competence of in vitro matured oocytes after ovary storage at 4 °C in the domestic cat model.** *Reproductive biology and endocrinology : RB&E*, 16(1), 76. https://doi.org/10.1186/s12958-018-0395-1

Piras, A. R., Ariu, F., Falchi, L., Zedda, M. T., Pau, S., Schianchi, E., Paramio, M., & Bogliolo, L. (2020). **Resveratrol treatment during maturation enhances developmental competence of oocytes after prolonged ovary storage at 4 °C in the domestic cat model.** *Theriogenology*, 144, 152–157. https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.01.009

Ross, L., Chung, K., & Macdonald, H. (2014). **Fertility preservation in the female cancer patient.** *Journal of Surgical Oncology, 110*(7), 907–911.https://doi.org/10.1002/jso.23754

Somfai, T., *et al.* (2021). **Vitrification of immature bovine oocytes in protein-free media: The impact of the cryoprotectant treatment protocol, base medium, and ovary storage.** *Cryobiology, 102*, 53–61.https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2021.05.029

Souza, S. S., Alves, B. G., Alves, K. A., Brandão, F. A. S., Brito, D. C. C., Gastal, M. O., Rodrigues, A. P. R., Figueireod, J. R., Teixeira, D. I. A., & Gastal, E. L. (2020). **Heterotopic autotransplantation of ovarian tissue in a large animal model: Effects of cooling and VEGF.** *PloS one*, *15*(11), e0241442. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241442

Souza, S. S., Aguiar, F. L. N., Alves, B. G., Alves, K. A., Brandão, F. A. S., Brito, D. C. C., Raposo, R. D. S., Gastal, M. O., Rodrigues, A. P. R., Figueiredo, J. R., Teixeira, D. Í. A., & Gastal, E. L. (2021). **Equine ovarian tissue xenografting: impacts of cooling, vitrification, and VEGF.** *Reproduction & fertility*, 2(4), 251–266. https://doi.org/10.1530/RAF-21-0008

Tomás, C., López, B., Bravo, I., Metello, J. L., & Sá e Melo, P. (2016). **Preservação da fertilidade em doentes oncológicos ou sob terapêutica gonadotóxica: Estado da arte.** *Reprodução & Climatério, 31*(1), 55–61. https://doi.org/10.1016/j.recli.2015.11.004

Vilela, J. M., Amorim, C. A., & Dolmans, M.-M. (2021). **Ovarian tissue transportation: A systematic review**. *Reproductive BioMedicine Online, 42*(2), 351–365. https://doi.org/10.1016/j.rbmo.2020.11.001

Wang, W., Salama, M., Todorov, P., Spitkovsky, D., Isachenko, E., Bongaarts, R., Rahimi, G., Mallmann, P., Sukhikh, G., & Isachenko, V. (2021). **New method of FACS analyzing and sorting of intact whole ovarian fragments (COPAS) after long time (24 h) cooling to 5 °C before cryopreservation**. *Cell and Tissue Banking*, 22(3), 487–498. https://doi.org/10.1007/s10561-020-09898-1

Wilken-Jensen, H. N., *et al.* (2014). **Developmental competence of oocytes isolated from surplus medulla tissue in connection with cryopreservation of ovarian tissue for fertility preservation.** *Fertility and Sterility, 101*(5), 1288–1296.https://doi.org/10.1111/aogs.12264

Yoshida, K., Hashimoto, T., Koizumi, T., & Suzuki, N. (2024). **Psychosocial experiences regarding potential fertility loss and pregnancy failure after treatment in cancer survivors of reproductive age:** A systematic review. *Supportive Care in Cancer, 32*(6), 337–354. https://doi.org/10.1007/s00520-024-08544-W

Yuge, M., *et al.* (2003). **Effects of cooling ovaries before oocyte aspiration on meiotic competence of porcine oocytes and of exposing in vitro matured oocytes to ambient temperature on in vitro fertilization and development of the oocytes**. *Theriogenology, 60*(8), 1611–1621.https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2003.08.001

Zhang, J. M., *et al.* (2011). **Effects of cooling rates and ice-seeding temperatures on the cryopreservation of whole ovaries.** *Cryobiology, 62*(3), 241–247.https://doi.org/10.1007/s10815-011-9557-1

CAPÍTULO 6

PROJETO DE OBSERVAÇÕES GEODÉSICAS: MAPA DA ÁREA DE FERTILIDADE

PROJECT OF OBSERVATIONS GEODETIC: MAP OF THE FERTILITY AREA

Germano Oliveira Silvestre[1]
Estudante de graduação, agronomia (UFSM), orientado por Doutor Sandro Barreto Fensterseifer.
Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul, Brasil.
E-mail: silvestregermano10@gmail.com

Ramiro Tres Lamego e Silva
Estudante de graduação, agronomia (UFSM), orientado por Doutor Sandro Barreto Fensterseifer.
Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul, Brasil.
E-mail: ramirotres12@gmail.com

DOI: 10.52832/wed.220.1286

Resumo: O trabalho aborda a aplicação da agricultura de precisão em uma área de 44,162 ha no município de Pinhal-RS, com foco na análise da fertilidade do solo e na definição da adubação recomendada. Utilizou-se o software ArcMap/ArcGis, que permitiu a interpolação de dados, geração de mapas temáticos (geomorfologia, hidrologia, solos, altimetria, declividade, fertilidade e adubação) e identificação das demandas específicas por nutrientes de cada gleba. A agricultura de precisão, fundamentada em tecnologias de informação (TI) como GPS, SIG, sensores eletrônicos e dispositivos móveis, visa otimizar o uso de insumos, reduzir impactos ambientais e aumentar a eficiência produtiva. O estudo comparou custos entre o manejo convencional e o manejo com taxa variável. Os resultados mostraram que, devido ao excesso de dejetos suínos historicamente aplicados na área, ocorreu homogeneização da fertilidade, reduzindo a variabilidade espacial detectável. Isso tornou a aplicação em taxa variável ineficiente e mais cara, elevando os custos de P e K em comparação ao método convencional. O manejo tradicional mostrou-se mais econômico para este caso específico. Conclui-se que o uso da AP deve ser avaliado caso a caso, considerando o histórico de manejo, a variabilidade real do solo e as condições da área. O ArcMap demonstrou ser uma ferramenta eficaz para análise espacial, embora complexa para usuários iniciantes, e possibilitou alcançar os objetivos do estudo.

Palavras-chave: agricultura de precisão; fertilidade de solo; sustentabilidade; eficiência agrícola.

Abstract: This work addresses the application of precision agriculture in an area of 44,162 ha in the municipality of Pinhal-RS, focusing on soil fertility analysis and the definition of recommended fertilization. The ArcMap/ArcGIS software was used, allowing for data interpolation, generation of thematic maps (geomorphology, hydrology, soils, altimetry, slope, fertility, and fertilization), and identification of the specific nutrient demands of each plot. Precision agriculture, based on information technologies (IT) such as GPS, GIS, electronic sensors, and mobile devices, aims to optimize the use of inputs, reduce environmental impacts, and increase productive efficiency. The study compared costs between conventional management and variable-rate management. The results showed that, due to the excess of swine manure historically applied in the area, fertility homogenization occurred, reducing detectable spatial variability. This made variable-rate application inefficient and more expensive, increasing the costs of P and K compared to the conventional method. Traditional management proved to be more economical in this specific case. It is concluded that the use of precision agriculture should be evaluated on a case-by-case basis, considering the management history, the actual variability of the soil, and the area conditions. ArcMap proved to be an effective tool for spatial analysis, although complex for novice users, and enabled the achievement of the study's objectives.
Keywords: precision agriculture; soil fertility; sustainability; agricultural efficiency.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a agricultura de precisão vem ganhando força, pois cada vez mais busca-se maximizar a eficiência dos insumos agrícolas, por meio de aplicação mais precisas e baseadas nas tecnologias de informações. Com isso nas aulas de ajustamento deste corrente semestre foi feita a análise de uma área de 44,162 ha no município de Pinhal-RS, visando fazer a análise precisa da fertilidade do solo dessa área.

Para o corrente andamento da disciplina foi usado o software ArcGis, que possibilitou a criação de diversos mapas através da interpolação dos dados prévios da área. Com a criação desses mapas foi possível se ter um maior conhecimento sobre as glebas das áreas e suas reais demandas por nutrientes.

Por fim, foi possível analisar os teores de nutrientes NPK da área e fazer uma interpretação mais precisa sobre a quantidade de adubação a ser aplicada em Kg/há.

2 MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Delimitação da área

Foi delimitada uma área no município de Jacutinga no Google Earth, de cerca de 2665,5 hectares.

5.2. Importação da mascára da área do projeto

Inicialmente o Arctoolbox deve ser habilitado na página inicial no ArcMap, após isso a opção "Conversion tools" do "Arctoolbox" deve ser selecionada e dentro dela a opção "From KM" deve ser selecionada e dentro dela a "KML to layer" deve ser escolhida. Após isso deve abrir uma aba do "KML to layer" e na opção "Input" deve ser selecionado o arquivo com a área delimitada escolhida e clicar em "OK". Resumindo "Arctoolbox"->"Conversion tools"-> "From KML"-> "KML to layer"-> Vai abrir uma nova página para inserir o arquivo dos limites dos municípios na opção "input"-> "OK". Após isso ir nas propriedades do arquivo aberto no ArcMap e na opção "Symbology" deixar sem coloração de preenchimento e deixar as linhas dos limites mais destacadas. Feito isso, deve-se ir no ícone "Add Date" e adicionar o arquivo "mosaico", o qual está dentro da pasta SRTM RS TUDO, adicionando os dados de altimetria que geraram o mapa das curvas de níveis.

5.3. Extração Da Área Do Projeto

No "Arctoolbox" ir na opção "Spatial Analyst Tools"-> "Extraction"-> "Extract By Mask"-> vai abrir uma aba na seleção "Input raster" colocar o arquivo "mosaic" e no "Imput" colocar o arquivo "polygons" e clicar em "OK". Após isso vai ser gerado um mapa da altimetria da área delimitada. Deve-se ir nas propriedades do arquivo gerado e altera-se o nome altimetria, e também em simbologia altera-se o nuance das cores para melhor destaque das características da área.

5.4. Elaboração do plano de informação de declividade

No arctoolbox ir na opção Spatial Analyst Tools-> Surface-> Slope na janela aberta em "Input raster" selecionou-se o Layer "Altimetria".No Layer criado, clicou-se com o botão direito e selecionou-se "Properties". Na aba "general" foi renomeado para "Declividade", e em "Symbology", em "Label", alterou-se os valores para apenas duas casas após a vírgula, e alterou-se os valores finais para que duas classes não se repetissem.

5.5. Determinação da resolução espacial da área do projeto

Para altimetria de baixa resolução ir no arctoolbox ir na opção "Data Manager Tools"-> "Projections and Transformation"-> "Raster"-> "Project Raster", na opção "input raster" colocar o arquivo "altimetria", no "output Raster": "Coordinate Systems" > "UTM"-> 11 "WGS 1984"-> "South Hemisphere"-> "Fuso 22 S". Após isso ir nas propriedades da camada criada e renomear para altimetria 2 e ir nas propriedades na aba Source em cell size e ver a resolução da camada.

5.6. Rotina de integração para retificação da resolução espacial

Para criar camada de altimetria de alta resolução deve-se diminuir o tamanho do pixel e aumentar a resolução espacial. Deve-se ir no arctoolbox na opção Conversion tools-> From raster-> Raster to point->input raster=altimetria de baixa resolução-> Field= value-. clicar em OK. Vai gerar uma nova camada, abrir a atribute table. Após isso deve se ir no "Arctoolbox" em "Spatial analyst tools"-> "Interpolation"-> "Spline", vai abrir uma nova aba na "Input point features" deve se adicionar "Pontos amostrais", em" Z value field" se altera para "Grid code" e em " Output cell size" colocar 3 metros, gerando o mapa de altimetria de alta resolução.Em seguida,deve-se recortar a área de interesse do mapa indo no "Arctoolbox" em "Spatial analyst tools"-> "Extraction"-> "Extraction by mask" e na aba que abrir no "Input raster" adicionar o arquivo com os limites do projeto.

5.7. Gerar o mapa de declividade de alta resolução

Ir no "Arctoolbox" em "Spatial analyst tools" em "Surface"-> "Slope", irá abrir uma nova aba colocar em "Input raster" o arquivo "Altimetria de alta resolução" e em "Output measurement" selecionar "Percent-rise", após clicar em "OK". Vai ser gerada uma nova camada, deve se ir nas suas "Properties" em "Label" e alterar os valores deixando apenas duas casas decimais após a vírgula e não deixar que ocorra a repetição de números entre as classes de declividade. E nas "Properties" na aba "General" altera- se o nome para declividade"

5.8. Recálculo da resolução radiométrica

Para facilitar o processamento dos arquivos diminuir o tamanho dos arquivos indo no "Arctoolbox" ir na opção "Data Manager Tools"-> "Raster"-> "Raster dataset"-> "Copy raster"-> em "Input raster" colocar o arquivo "Altimetria de alta resolução" e em "Pixel type" selecionar "16_BIT_SIGNED"-> clicar em "OK".

5.9. Gerar mapa de curvas de nível

Deve ir no "Arctoolbox" em "Spatial analyst tools" em "Surface"-> "Contour", irá abrir aba em "Input raster" colocar "Altimétria de alta resolução" e em " Contour interval" colocar o valor que mais se adequa à área escolhida, no meu caso foi 8 e clicar "OK". Depois ir nas propriedades da camada gerada em "Symbology"-> "Categories"-> "Unique values"-> "Value field"-> selecionar a opção "Contour" e clicar em "Add all values" e em "OK". Para concluir essa etapa deve-se identificar e destacar as curvas mestras indo em "Properties"-> "Symbology"-> e mudar a coloração e a espessura das linhas conforme o necessário.

5.10. Adicionar mapadesolo

Ir no ícone "Add date" e adicionar o arquivo "Brasil brasil_solos_5m_20201104".Vai ser aberto um layer de "Brasil_solos", nessa etapa devemos trazer a camada dos "Limites" para cima do layer do "Brasil_solos". Feito isso, se deve recortar o arquivo vetorial de dados de solo do Brasil, usando a ferramenta "Clip". Deve-se ir em "Geoprocessing"-> em "Clip", na aba que abrir em "Input features" colocar o arquivo "Brasil Solos" e em "Clip features" colocar "Limites". Após isso ir na camada criada e ir em suas "Properties" e na aba "General" e alterar o nome para Solos, após isso ir na aba "Symbology"->"Categories"-> em "Value Field" colocar "LEG-DESC" e-> e clicar em "Add all values" e clicar em "Aplicar" e "OK".

5.11. Adicionar mapa de hidrografia

Ir no ícone "Add date" e adicionar o arquivo "Hidrografia-> "Trecho de drenagem " e "Add ". Feito isso, se deve recortar o arquivo vetorial de dados, usando a ferramenta "Clip". Deve-se ir em "Geoprocessing"-> em "Clip", na aba que abrir em "Input features" colocar o arquivo "Trecho de drenagem" e em "Clip features" colocar "Limites".Após isso renomear a cama gerada para "Rede de drenagem" e apagar a primeira camada de drenagem.Em seguida ir em ir na camada criada e ir em suas "Properties" ir na aba "Symbology"->"Categories"-> em "Value Field" selecionar "nomeabrev" clicar em "Aplicar" e "OK".

5.12. Adicionar mapa de hidrogeologia

Ir no ícone "Add date" e selecionar o arquivo "Geomorfologia" e selecionar " Mapa hidrogeológico" e selecionar "hidrogeologia.shp" após isso clicar em "Add"Feito isso, se deve recortar o arquivo vetorial de dados, usando a ferramenta "Clip". Deve-se ir em "Geoprocessing"-> em "Clip", na aba que abrir em "Input features" colocar o arquivo "Hidrogeologia_BR" e em "Clip features" colocar "Limites". Após isso renomear a camada gerada para "Geomorfologia".Em seguida ir em ir na camada criada e ir em suas "Properties" ir na aba "Symbology"->"Categories"-> em "Value Field" selecionar "NOM_UR_AFL" clicar em "Aplicar" e "OK".

5.13. Criação dos pontos amostrais

Deve-se ir em "Geoprocessing"-> selecionar "Environments"-> "Processing Existent"-> "Same as layer limites"-> "Raster Analysis" colocar em "mask" limites/polygons do projeto e clicar em "OK". Esse processo somente passa para o programa onde ele deve gerar os cálculos.Feito isso deve-se habilitar o "Arctoolbox" e ir na opção "Data Manager Tools"-> "Sampling"-> "Create random points"-> em "Output feature class" colocar o arquivo "Pontos de amostragem" e na em "Long" colocar 150 , que será o número de pontos. Depois disso deve-se apagar os pontos que ficaram para fora dos limites da área indo em "Editor"-> "Start editing"->selecionar o arquivo "Pontos de amostragem" e selecionar os pontos fora do limite e clicar em "delete" após acabar esse processo ir em "Editor"-> "Stop editing".

5.14. Criar novos pontos amostrais

Ir no ícone "Add date" e selecionar "Add basemap"-> "Imagery"-> "Add"-> "OK", adicionando a imagem de satélite da área. Selecionar a ferramenta "Create features". Após isso deve-se adicionar novos pontos nos lugares necessários, por exemplo, em áreas que ainda não possuem nenhum ponto e os adicionar.

5.15. Adicionar colunas de fertilidade por MG/DM na attribute table.

Nesse passo vão ser adicionadas as colunas dos respectivos nutrientes escolhidos, no meu caso foi o NPK. Após a criação das colunas, estas devem ser preenchidas com os valores dos nutrientes provenientes de análises de solo. Para isso, inicialmente deve se ir no "editor" e selecionar "Start editing" e na janela que abrir selecionar o layer" Pontos amostrais", abrir o banco de dados da camada de "Pontos amostrais", indo em "Open attribute table", ali vai aparecer todos os pontos presentes no projeto, para adicionar novas colunas deve se ir em "Add Field" e em "Name" preencher com "N_Fertilidade_mg_dm" em "Type" selecionar "Float".Deve ser feito o mesmo

procedimento para os demais nutrientes só alterando o nome das colunas para "P_Fertilidade_mg_dm" e "K_Fertilidade_mg_dm". Após acabar as edições ir no "Editor" e clicar em "Stop editing".

5.16. Adicionar colunas de fertilidade e adubação por Kg/ha naattributetable

Para isso, o "Editor" deve estar com a opção "Stop editing" selecionada, deve-se abrir o banco de dados da camada de Pontos amostrais, indo em "Open attribute table", ali vai aparecer as colunas já criadas dos nutrientes , para adicionar novas colunas deve se ir em "Add Field" e em "Name" preencher com "N_Fertilidade_Kg_ha" em "Type" selecionar "Float".Deve ser feito o mesmo procedimento para os demais nutrientes só alterando o nome das colunas para "P_ Fertilidade_Kg_ha" e "K Fertilidade Kg ha" Para criar as colunas de adubação deve-se estar com a "Attribute table" aberta e deve se ir em "Add Field" e em "Name" preencher com "N Adubação_Kg ha" em "Type" selecionar "Float".Deve ser feito o mesmo procedimento para os demais nutrientes só alterando o nome das colunas para "P_Adubação_Kg_ha" e "K_Adubação_Kg_ha".

5.17. Cálculos fertilidade

Na seleção do editor deve estar em "Stop Editing" e deve-se ir na coluna de "N_Fertilidade_Kg_ha" e clicar no botão direito do mouse e selecionar "Field Calculator"-> na aba que abrir em "Fields" selecionar a opção "N_Fertilidade_mg_dm" e fazer uma multiplicação por 2, ficando da seguinte forma "N_Fertilidade_mg_dm"*2 e clica-se em "OK". Após isso se faz o mesmo procedimento com o "P_ Fertilidade_Kg_ha" e o "K Fertilidade Kg ha", gerando os valores em Kg por ha destes nutrientes.

5.18. Cálculos de adubação

Na seleção do editor deve estar em "Stop Editing" e deve-se ir na coluna de "N_Adubação_Kg_ha" e clicar no botão direito do mouse e selecionar "Field Calculator"-> na aba que abrir em "Fields" selecionar a opção "N_Fertilidade_kg_ha" e fazer uma subtração por 20,que foi um parâmetro para a adubação fornecido pelo professor, ficando da seguinte forma "N_Adubação_Kg_ha"- 20 e clica-se em "OK". Após isso se faz o mesmo procedimento com o "P_ Fertilidade_Kg_ha" e o "K Fertilidade Kg ha", gerando os valores em Kg por ha para a adubação com esses nutrientes. No entanto para o P vai ser feita a subtração por 190 e para o K

por 100, ficando das seguintes formas respectivamente “P_ Fertilidade_Kg_ha”- 190 e “K Fertilidade Kg ha”- 100.Feito isso, a tabela estará preenchida e caso algum valor nas colunas de adubação ficar negativo, deve-se apagar o valor e colocar um0nolugar.

5.19. Gerar mapa de fertilidade por mg/dm.

Para gerar os mapas de fertilidade deve se ir no “Arctoolbox” em “Spatial analyst tools”-> “Interpolation”-> “Kriging” e na aba que abrir em “Input point features” colocar “Pontos_de_amostragem” e em “Value Field” colocar “N_fertilidade_mg_dm” e clicar em “OK”.Vai ser gerado um novo arquivo que deve ser renomeado indo em “Properties” na aba “general” mudando o nome para “N_fertilidade_mg”. O mesmo procedimento deve ser realizado para o P e o K, apenas alterando o arquivo em “Value Field” para “P_fertilidade_mg_dm” e “K_fertilidade_mg_dm”, respectivamente. E os arquivos gerados devem ser renomeados para “P_fertilidade_mg” e “K_fertilidade_mg”. Nos mapas gerados deve-se ir nas suas “Properties” em “Label”e alterar os valores das classes deixando apenas duas casas decimais após a vírgula e não deixar que ocorra a repetição de números entre as classes de fertilidade.

5.20. Gerar mapa fertilidade kg/ha

Para gerar os mapas de fertilidade deve se ir no “Arctoolbox” em “Spatial analyst tools”-> “Interpolation”-> “Kriging” e na aba que abrir em “Input point features” colocar “Pontos_de_amostragem” e em “Value Field” colocar “N_fertilidade_kg_ha” e clicar em “OK”.Vai ser gerado um novo arquivo que deve ser renomeado indo em “Properties” na aba “general” mudando o nome para “N_fertilidade_ha”. O mesmo procedimento deve ser realizado para o P e o K, apenas alterando o arquivo em “Value Field” para “P_fertilidade_Kg_ha” e “K_fertilidade_kg_ha”, respectivamente. E os arquivos gerados devem ser renomeados para “P_fertilidade_Kg” e “K_fertilidade_kg”.Nos mapas gerados deve-se ir nas suas “Properties” em “Label”e alterar os valores das classes deixando apenas duas casas decimais após a vírgula e não deixar que ocorra a repetição de números entre as classes de fertilidade,

5.21. Gerar mapa adubação

Para gerar os mapas de adubação deve se ir no “Arctoolbox” em “Spatial analyst tools”-> “Interpolation”-> “Kriging” e na aba que abrir em “Input point features” colocar “Pontos_de_amostragem” e em “Value Field” colocar “N_adubacao_kg_dm” e clicar em 15 “OK”.Vai ser gerado um novo arquivo que deve ser renomeado indo em “Properties” na aba “general” mudando o nome para “N_adubacao”. O mesmo procedimento deve ser realizado para

o P e o K, apenas alterando o arquivo em "Value Field" para "P_adubacao_Kg_ha" e "K_adubacao_kg_ha", respectivamente. E os arquivos gerados devem ser renomeados para "P_adubacao" e "K_adubacao". Nos mapas gerados deve-se ir nas suas "Properties" em "Label"e alterar os valores das classes deixando apenas duas casas decimais após a vírgula e não deixar que ocorra a repetição de números entre as classes de adubação.

5.22 Correção do sistema de projeção

Para fazer a correção do sistema de projeção deve se ir no "Arctoolbox" ir na opção "Data Manager Tools"-> "Projections and Transformation"-> "Raster"->"Project Raster", na opção "input raster"colocar o arquivo "N_adubação", no "Output Raster"-> "Coordinate Systems"-> "UTM"->"WGS 1984"-> "South Hemisphere"-> "Fuso 22 S".No mapa gerado ir em suas "Properties" e mudar seu nome para "N_projetado" e na aba "Symbology" alterar as cores e ir em "Classified" e selecionar para mostrar 9 classes e em "Label" alterar os valores das classes deixando apenas duas casas decimais após a vírgula e não deixar que ocorra a repetição de números entre as classes de projeção.O mesmo procedimento deve ser feito para o P e o K, usado os arquivos "P_adubação" e "K_adubação" e renomeando as novas camadas para "P_projetado" e "K_projetado". Após esse procedimento deve-se ir nas "Properties" das camadas geradas na aba "Source"e verificar o "Cell size(X,Y)", que é a resolução dos pixels. Esse valor deverá ser anotado, pois vai ser usado na etapa seguinte. No meu caso foi 21,47159869.

5.23. Criar mapas de pontos de adubação

Deve se ir no "Arctoolbox" na opção "Conversion tools"-> "From raster"-> "Raster to point"->vai abrir uma nova aba em "Input raster" colocar "N_adubacao" e em "Field",selecionar "Value"-> clicar em "OK".Fazer o mesmo procedimento com o P e o K usando os arquivos "P_adubacao" e "K_adubacao".Após a geração destas novas camadas renomear para "N_pontos_de_adubacao","P_pontos_de_adubacao" e "K_pontos_de_adubacao".Após isso ir nas camadas e clicar no botão direito do mouse e clicar em "Open attribute table" o editor deve estar em "Stop editing" ir em "Add field" e adicionar uma nova coluna em "Name" colocar "N_aplicacao_kg","P_aplicacao_kg" e "K_aplicacao_kg" e em "Type" selecionar "Float", na respectiva tabela de cada nutriente, depois ir na coluna criada clicar no botão direito do mouse e selecionar "Field Calculator" na fórmula colocar "Grid code" e clicar em "*" pôr o número da resolução ao quadrado e clicar em "/" por 10000. No meu caso a fórmula ficou da seguinte forma "Grid code"*461,1583889/ 10000. Assim vai ser gerada a adubação que irá ser usada em cada ponto e na área total.Para ver a quantidade de adubação basta clicar com o botão direito na coluna

“N_aplicação_Kg”, e selecionando Statistics podemos ver a quantidade total de fertilizante que será aplicada na área. Para nitrogênio, a aplicação calculada foi 38184,991 kg, para fósforo foi de 64419,247 kg e para potássio a quantidade foi de 154909,798kg.

5.24. Criação dos mapas

Selecionar a camada desejada para fazer o mapa ir em”view”-> “Layer view”-> “File”-> “Page and file”-> selecionar o tipo de folha “A4”-> selecionar o melhor formato de acordo com a área no meu caso foi “Landscape” e clicar “OK” Ir em “Insert”-> e selecionar “Title” para gerar o título do mapa adequar tamanho e fonte conforme o necessário. Ir em “Insert”-> e selecionar “Data Frame” e clicar no botão direito do mouse indo em “Data Frame Properties”-> “Grids” e ajustar os graus, minutos e segundos da maneira que possibilite melhor visualização. Ir em “Insert”-> e selecionar “Legend”-> selecionar o arquivo do mapa a ser gerado contendo as informações,por exemplo, o arquivo de “Mapas_do solo”.Para fazer edições na legenda clicar no botão direito do mouse indo em “ Properties”e fazer as modificações necessárias. Ir em “Insert”-> e selecionar “nort”.Selecionar o mais adequado. Ir em “Insert”-> e selecionar “Scala bar” > selecionar uma “scala line” e ir em “properties” em “Number of divisions” alterar de 2 para 4 e em “Label” alterar para “Km” e em “Gap” alterar para 5-> “OK”-> “OK”. Ir em “Insert”-> e selecionar “Dynamics Text-> “Coordinate system” Ir em “Insert”-> e selecionar “Dynamics Text”-> “Author”, na aba que abrir escrever o nome do autor do mapa.

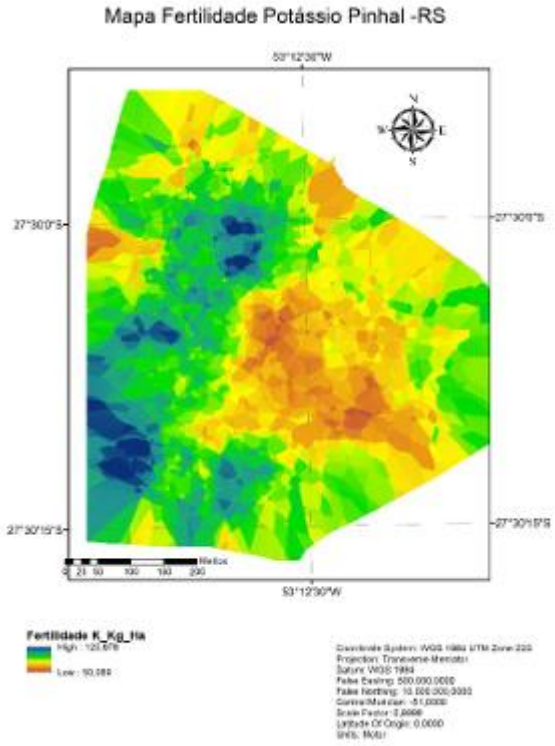
5.25. Exportação dos mapas

Ir em “File”-> “Export Map”->selecionar o formato “BMP” e alterar a “resolution” para 700.Selecionar a pasta em que se deseja salvar a imagem e clicar em “Salvar”.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

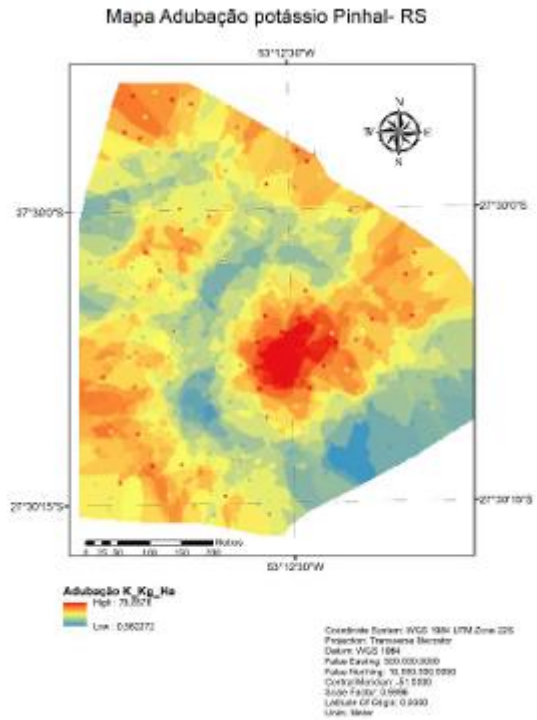
As Figuras 1 a 4 apresentam os resultados referentes à fertilidade e à adubação com potássio (K) e fósforo (P), permitindo visualizar a distribuição e as condições desses nutrientes no solo, bem como as respectivas necessidades de adubação. As informações obtidas possibilitam comparar os níveis de fertilidade de K e P com as recomendações de manejo, contribuindo para a avaliação da disponibilidade desses nutrientes e para a definição de estratégias de adubação mais adequadas às condições da área estudada.

Figura 1 - Fertilidade de K



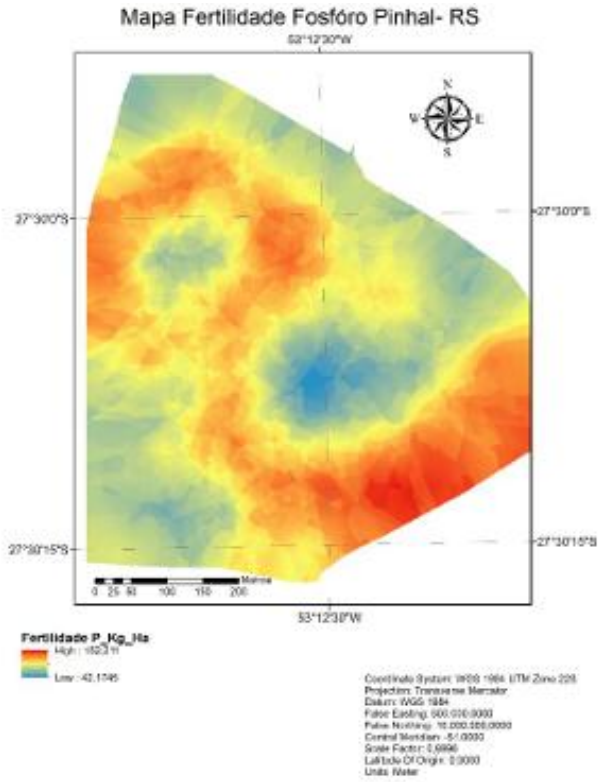
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 2 - Adubação de K



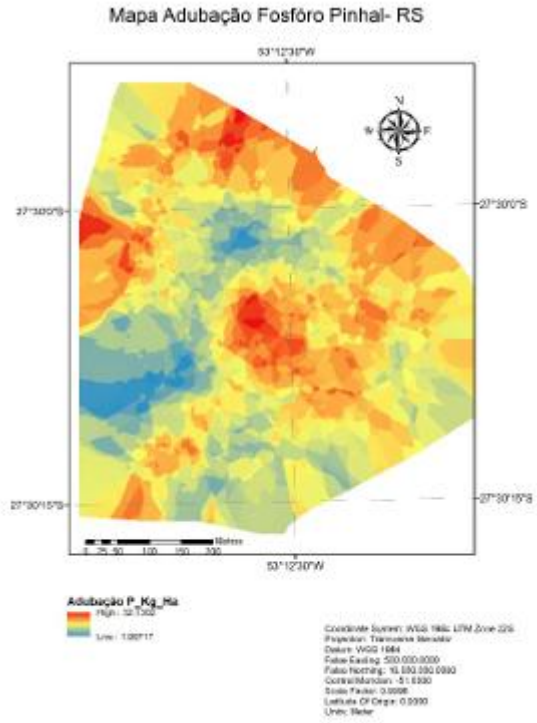
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 3 - Fertilidade de P



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 4 - Adubação de P



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A adoção da agricultura de precisão (AP) no manejo de fertilidade do solo tem se consolidado como uma ferramenta estratégica para otimizar o uso de insumos, reduzir custos e aumentar a eficiência produtiva. No entanto, os resultados obtidos dependem diretamente da variabilidade espacial real da área e das condições do sistema de produção.

No presente estudo, conduzido em uma área de 44,162 hectares, a aplicação de fertilizantes em taxa variável não apresentou o desempenho esperado, evidenciando um fracasso técnico e econômico diante das condições específicas do local. Os valores médios dos fertilizantes utilizados reforçam esse cenário: o fósforo apresentou custo de R$ 3.532,56 no manejo convencional, enquanto a AP elevou esse valor para R$ 3.586,20. Situação semelhante ocorreu no potássio, passando de R$ 4.397,00 no sistema convencional para R$ 4.582,00 na taxa variável. Assim, ao contrário do esperado — redução ou otimização do gasto — observou-se um aumento direto no custo por hectare quando se empregou a tecnologia.

A principal explicação técnica para esse resultado está no excesso de fezes suínas presentes ao longo da área, consequência de aplicações históricas e concentradas de dejetos. Esse aporte contínuo de nutrientes promoveu uma homogeneização artificial da fertilidade, sobretudo nos teores de P e K, reduzindo drasticamente a variabilidade espacial detectável pela AP. Com baixa

variância, a recomendação de taxa variável perdeu eficiência, tornando-se, na prática, mais cara e sem retorno agronômico correspondente.

Além disso, a saturação de alguns nutrientes — especialmente fósforo — pode ter mascarado ainda mais a heterogeneidade natural do solo, levando o sistema de precisão a delimitar zonas de manejo pouco representativas ou até desnecessárias. Nesse contexto, o manejo convencional mostrou-se mais adequado, tanto pela simplicidade operacional quanto pelo menor custo final. Portanto, conclui-se que a agricultura de precisão não deve ser aplicada de forma generalizada, mas sim analisada caso a caso, considerando o histórico da área, a presença de fontes externas de nutrientes (como dejetos animais) e o real grau de variabilidade espacial. Em áreas como esta, marcadas por forte aporte orgânico e baixa variação entre glebas, o manejo convencional em taxa fixa pode ser economicamente superior, evitando investimentos que não se convertem em ganhos produtivos ou ambientais.

Assim, este estudo reforça a importância de diagnósticos prévios robustos, integrando análise de solo, histórico de manejo e avaliação crítica da variabilidade, para que a agricultura de precisão seja aplicada de forma eficiente, sustentável e economicamente justificável.

4. CONCLUSÃO

Com o presente projeto, conclui-se que o ArcMap é uma ferramenta poderosa e de diversos usos para dados geoespaciais, podendo interpolar informações e gerar mapas úteis. É uma ferramenta que, como neste trabalho, pode ser utilizada a favor da agricultura de precisão, gerando mapas preciso que mostram as demandas específicas de cada área. É um software que se mostra eficiente, no entanto, possui um certo grau de dificuldade para leigos em tecnologias. Mas, os objetivos do presente trabalho foram alcançados. Um dos dados evidenciados pelo trabalho foi a eficácia ao se aplicar a agricultura de precisão, pois os gastos usando os dados fornecidos de adubação pelo software geraram custos muitos menores comparados com a aplicação feita da forma mais convencional, mas esse resultado pode ser questionado. Portanto, o ArcGis cumpriu com o esperado de gerar e elaborar mapas, fornecendo informações sobre a adubação. Por fim, as aulas e o ArcGis cumpriram com o esperado e o objetivo da disciplina foi alcançado.

REFERÊNCIAS

MANZATTO, C. V.; FREITAS JUNIOR, E.; PERES, J. R. R. **Agricultura de precisão: diagnóstico e perspectivas**. Brasília: Embrapa, 1999.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 2. ed. Viçosa: UFV, 1998.

ROZA, D. Agricultura de precisão: conceitos e aplicações. Porto Alegre: UFRGS, 2000.

ESRI. *ArcGIS* **Desktop: Release 10**. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2011. (Opcional, caso queira citar o software usado)