



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E BIODIVERSIDADE**

**O ESCURECIMENTO E A CICATRIZAÇÃO EM INHAME
(*Dioscorea spp.*) MINIMAMENTE PROCESSADO É
MODULADO PELA REGIÃO DO TUBÉRCULO, APLICAÇÃO
DE ÁCIDO ASCÓRBICO E TEMPERATURA DE
CONSERVAÇÃO**

CRISTINA BANI CORRÊA



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E BIODIVERSIDADE**

CRISTINA BANI CORRÊA

**O ESCURECIMENTO E A CICATRIZAÇÃO EM INHAME (*Dioscorea spp.*)
MINIMAMENTE PROCESSADO É MODULADO PELA REGIÃO DO
TUBÉRCULO, APLICAÇÃO DE ÁCIDO ASCÓRBICO E TEMPERATURA DE
CONSERVAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Agricultura e Biodiversidade, área de concentração em Agricultura e Biodiversidade, para obtenção do título de “Doutora em Ciências”.

Orientador
Prof. Dr. Marcelo Augusto Gutierrez Carnelossi

SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL
2026

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

C824e Corrêa, Cristina Bani.
O escurecimento e a cicatrização em inhame (*Dioscorea spp.*) minimamente processado é modulado pela região do tubérculo, aplicação de ácido ascórbico e temperatura de conservação / Cristina Bani Corrêa; orientador Marcelo Augusto Gutierrez Carnelossi. – São Cristóvão, SE, 2026.
60 f.; il.

Tese (doutorado em Agricultura e Biodiversidade) – Universidade Federal de Sergipe, 2026.

1. Agrobiodiversidade. 2. Inhame. 3. Dioscoreacea. 4. Polifenóis. 5. Oxidação. 6. Lignina. 7. Antioxidantes. I. Carnelossi, Marcelo Augusto Gutierrez, orient. II. Título.

CDU 633.496

CRISTINA BANI CORRÊA

**O ESCURECIMENTO E A CICATRIZAÇÃO EM INHAME (*Dioscorea spp.*)
MINIMAMENTE PROCESSADO É MODULADO PELA REGIÃO DO
TUBÉRCULO, APLICAÇÃO DE ÁCIDO ASCÓRBICO E TEMPERATURA DE
CONSERVAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Agricultura e Biodiversidade, área de concentração em Agricultura e Biodiversidade, para obtenção do título de “Doutora em Ciências”.

APROVADA em 26 de fevereiro de 2026.

Dr. Adriano do Nascimento Simões	(UFRPE)
Dr(a). Poliana Cristina Spricigo	(UNESP)
Dr(a). Maria Aparecida Moreira	(UFS)
Dr(a). Roberta Pereira Miranda Fernandes	(PPGAGRI/UFS)

Prof. Dr. Marcelo Augusto Gutierrez Carnelossi
(Orientador)

SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL

A Deus, que até aqui me sustentou.
Dedico

AGRADECIMENTOS

A finalização desta tese representa mais do que a conclusão de um ciclo acadêmico — é a materialização de uma caminhada marcada por desafios, superações e crescimento pessoal. Por isso, inicio agradecendo a Deus por me sustentar em todos os momentos e por me dar força para vencer cada obstáculo que experienciei. Vivi momentos difíceis, mas em nenhum deles estive sozinha.

Agradeço profundamente à minha família, base de tudo que sou. Em especial, à minha mãe, Maria, e ao meu pai, Robson, que me deram a vida e foram instrumentos fundamentais para que eu chegasse até aqui. À minha tia Zulmira, que me criou como filha e é, para mim, uma referência de força, amor e dedicação.

À minha irmã Cristiane, minha grande amiga, por todo amor, carinho e apoio. Obrigada por estar presente em todos os momentos, por nunca me deixar caminhar sozinha e por compartilhar seu tempo e conhecimento comigo. Sua presença e generosidade foram essenciais nessa trajetória.

Ao meu filho, Igor, minha maior motivação e razão de tudo. Obrigada pela paciência, pelo carinho e por compreender minhas ausências ao longo desse período. Filho, você é a pessoa mais importante da minha vida.

Ao Emerson, por estar ao meu lado em tantos momentos importantes, especialmente durante a execução dos experimentos, oferecendo apoio, presença e incentivo. Muito obrigada.

Às minhas amigas do trabalho — Grasi, Aline, Patrícia e Celeste — pelo suporte, pela parceria e estarem ao meu lado durante toda essa jornada. Vocês tornaram esse percurso mais leve e significativo. Vocês são incríveis!

Aos alunos de pesquisa, em especial Sza, Tuânia, Airles e Alysson, pelo apoio, dedicação e carinho. Aos alunos do DTA, pelo incentivo e acolhimento ao longo dessa caminhada.

Ao Jileno, pela ajuda essencial e pelo suporte nas análises de microscopia. Sua generosidade em compartilhar conhecimento fez toda a diferença.

À professora Maria Terezinha (LAF), por disponibilizar o uso do HPLC, e às técnicas Juliete e Paula, pelo suporte, atenção e dedicação na realização das análises e entrega dos resultados.

Expresso minha profunda gratidão ao professor Marcelo Carnelossi, por me acolher como sua aluna e por compartilhar, com tanta generosidade, seus conhecimentos. Sua paciência, incentivo e orientação foram fundamentais nessa trajetória. Levo comigo não apenas aprendizados profissionais, mas também valiosas lições de vida.

Aos professores do Departamento de Tecnologia de Alimentos, pelo incentivo, apoio e generosidade ao longo de todo o processo. Aos membros da banca examinadora, pelas contribuições valiosas, meus sinceros agradecimentos.

Aos professores do PPGAGRI, pelos conhecimentos compartilhados e por todo o suporte acadêmico. À Jéssica, secretária do programa, pela competência, atenção e prontidão em ajudar sempre que necessário.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro, fundamental para a realização desta pesquisa.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, deixo aqui a minha sincera gratidão.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	9
4. ARTIGO 1	13
RESUMO.....	13
4.1. Introdução	14
4.2. Material e Métodos	15
4.3. Resultados.....	20
4.4. Discussão	26
4.5. Conclusões	30
4.6. Referências Bibliográficas	30
5. ARTIGO 2	34
RESUMO.....	34
5.1. Introdução	35
5.2. Material e Métodos	36
5.3. Resultados.....	39
5.4. Discussão	43
5.5. Conclusões	45
5.6. Referências Bibliográficas	45
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	47

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1

Figura		Página
1	Fluxograma do processamento mínimo do inhame (<i>Dioscorea cayenensis</i>) submetido a tratamento com ácido ascórbico e armazenamento refrigerado.	16
2	Aparência, análise visual (A) e perda de massa (B) de rodela de inhame sem AA e com AA, conservadas a 5 ± 2 °C. AP (–AA) = região apical sem AA; AP (+AA) = região apical com 1% de AA; ME (–AA) = região medial sem AA; ME (+AA) = região medial com 1% de AA; DI (–AA) = região distal sem AA; DI (+AA) = região distal com 1% de AA; AA = ácido ascórbico. As barras representam o erro padrão das médias (n = 3). Letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre tratamentos no mesmo tempo, e letras maiúsculas diferentes indicam diferenças ao longo do tempo para o mesmo tratamento (teste de Tukey, $p < 0,05$).....	21
3	Índice de escurecimento (IE) (A), índice de esbranquiçamento (IEB) (B), fenóis totais (C), atividade antioxidante (ABTS) (D), PPO (E) e SOD (F) de rodela de inhame sem AA e com AA, conservadas a 5 ± 2 °C. AP (–AA) = região apical sem AA; AP (+AA) = região apical com 1% de AA; ME (–AA) = região medial sem AA; ME (+AA) = região medial com 1% de AA; DI (–AA) = região distal sem AA; DI (+AA) = região distal com 1% de AA; AA = ácido ascórbico. As barras representam o erro padrão das médias (n = 3). Letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre tratamentos no mesmo tempo, e letras maiúsculas diferentes indicam diferenças ao longo do tempo para o mesmo tratamento (teste de Tukey, $p < 0,05$).....	24

ARTIGO 2

Figura		Página
1	Fluxograma do processamento mínimo do inhame (<i>Dioscorea cayenensis</i>) submetido a tratamento com ácido ascórbico e armazenado a 5 °C e 20 °C..	37
2	Firmeza a 5 °C (A) e a 20 °C (B), atividade da POD a 5 °C (C) e a 20 °C (D), atividade da FAL a 5 °C (E) e a 20 °C (F) em rodela de inhame sem AA e com AA, conservadas a 5 e 20 °C (± 2 °C) por 15 e 10 dias, respectivamente. AP (–AA) = região apical sem AA; AP (+AA) = região apical com 1% de AA; ME (–AA) = região medial sem AA; ME (+AA) = região medial com 1% de AA; DI (–AA) = região distal sem AA; DI (+AA) = região distal com 1% de AA; AA = ácido ascórbico. As barras representam o erro padrão da média (n = 3). Letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre tratamentos no mesmo tempo, e letras maiúsculas diferentes indicam diferenças ao longo do tempo para o mesmo tratamento (teste de Tukey, $p < 0,05$).....	40
3	Micrografias de campo claro (CC) e autofluorescência nas faixas espectrais azul (FA) e vermelha (FV) de rodela de inhame sem (–AA) e com (+AA) ácido ascórbico, conservadas a 5 e 20 °C (± 2 °C). AP (–AA) = região apical sem AA; AP (+AA) = região apical com 1% de AA; T0 = tempo inicial; T10 = 10 dias de armazenamento; T15 = 15 dias de armazenamento; AA = ácido ascórbico. CC = campo claro; FV = autofluorescência na faixa espectral vermelha; FA = autofluorescência na faixa espectral azul; L = lignina. Barra de escala = 100 μ m.....	41
4	Micrografias de campo claro e autofluorescência de rodela de inhame sem (–AA) e com (+AA) ácido ascórbico, conservadas a 5 e 20 °C (± 2 °C). ME (–AA) = região medial sem AA; ME (+AA) = região medial com 1% de AA; T0 = tempo inicial; T10 = 10 dias de armazenamento; T15 = 15 dias de armazenamento; AA = ácido ascórbico; CC = campo claro; FV = autofluorescência na faixa espectral vermelha; FA = autofluorescência na faixa espectral azul; L = lignina. Barra de escala = 100 μ m.....	42

- 5 Micrografias de campo claro e autofluorescência de rodela de inhame sem (–AA) e com (+AA) ácido ascórbico, conservadas a 5 e 20 °C (± 2 °C). DI (–AA) = região distal sem AA; DI (+AA) = região distal com 1% de AA; T0 = tempo inicial; T10 = 10 dias de armazenamento; T15 = 15 dias de armazenamento; AA = ácido ascórbico; CC = campo claro; FV = autofluorescência na faixa espectral vermelha; FA = autofluorescência na faixa espectral azul; L = lignina. Barra de escala = 100 μm 43

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

Tabela		Página
1	Escala visual utilizada para avaliar a aparência do inhame minimamente processado durante o armazenamento, considerando a intensidade do escurecimento enzimático, do esbranquiçamento superficial e do ressecamento do tecido.	17
2	Teor de ácido ascórbico e pH de rodela de inhame provenientes das regiões apical (AP), medial (ME) e distal (DI), sem (-AA) e com (+AA) tratamento com ácido ascórbico, conservadas a 5 ± 2 °C por 15 dias.	22
3	Efeito dos tratamentos e do tempo sobre o teor de sólidos solúveis totais (°Brix) e acidez titulável de rodela de inhame provenientes das regiões apical (AP), medial (ME) e distal (DI), sem (-AA) e com (+AA) tratamento com ácido ascórbico, durante o armazenamento a 5 ± 2 °C	22
4	Perfil de compostos fenólicos identificados por HPLC em diferentes regiões do inhame minimamente processado*	25

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AA	Ácido ascórbico
ABTS	2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico)
CAT	Catalase
DI	Região distal do tubérculo
AP	Região apical do tubérculo
ERO(s)	Espécie(s) reativa(s) de oxigênio
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrogênio
HPLC	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência
IE	Índice de escurecimento
IEB	Índice de esbranquiçamento
ME	Região medial do tubérculo
FAL	Fenilalanina amônia-liase
POD	Peroxidase
PPO	Polifenol oxidase
ROS	Reactive Oxygen Species
SOD	Superóxido dismutase

RESUMO

CORRÊA, Cristina Bani. **O escurecimento e a cicatrização em inhame (*Dioscorea spp.*) minimamente processado é modulado pela região do tubérculo, aplicação de ácido ascórbico e temperatura de conservação.** São Cristóvão: UFS, 2026. 60p. Tese – Doutorado em Agricultura e Biodiversidade.*

Os danos causados pelo descascamento e corte interferem em fatores bioquímicos e fisiológicos do inhame, desencadeando processos de oxidação por via enzimática, além de promover respostas rápidas do vegetal no combate ao dano, como a formação de barreiras estruturais no local da lesão. Este estudo teve como objetivo investigar, de forma integrada, as respostas fisiológicas, bioquímicas e estruturais de inhame (*Dioscorea cayenensis*) minimamente processado, avaliando os efeitos da região do tubérculo, da temperatura de armazenamento e da aplicação de ácido ascórbico sobre o escurecimento enzimático e a cicatrização. Rodelas das regiões apical (AP), medial (ME) e distal (DI) foram submetidas ao processamento mínimo, tratadas ou não com ácido ascórbico (1%, m/v) e armazenadas a 5 °C (escurecimento) e a 5 e 20 °C (lignificação). Foram avaliados parâmetros de qualidade, parâmetros físico-químicos, metabolismo fenólico, análises enzimáticas (PPO, SOD, CAT, POD e FAL) e deposição de lignina. A qualidade visual diminuiu progressivamente durante o armazenamento, sendo a perda mais acentuada na região apical (AP), enquanto o AA retardou o escurecimento e prolongou a aceitabilidade das regiões medial (ME) e distal (DI). A dinâmica do escurecimento foi modulada pela atividade das enzimas polifenol oxidase (PPO) e superóxido dismutase (SOD) e pelo conteúdo de compostos fenólicos, evidenciando que, quando a proteção enzimática se torna insuficiente, os fenóis atuam como defesa antioxidante. A análise cromatográfica revelou acúmulo seletivo de ácidos hidroxicinâmicos e flavonoides, destacando a ativação da rota dos fenilpropanoides como resposta ao estresse pós-processamento. O processo de cicatrização foi modulado pela temperatura. A 5 °C, predominou resposta antioxidante, sem deposição de lignina. A 20 °C, houve aumento das atividades de FAL e POD e deposição de lignina, caracterizando resposta estrutural. Os resultados demonstram que a qualidade do inhame minimamente processado é dependente da região do tubérculo, da temperatura de armazenamento e do ácido ascórbico, refletindo a importância multifatorial no controle do estresse oxidativo em inhame minimamente processado.

Palavras-chave: Dioscoreaceae, lignificação, polifenol oxidase, compostos fenólicos.

* Comitê Orientador: Marcelo Augusto Gutierrez Carnelossi – UFS (Orientador), Adriano do Nascimento Simões – UFRPE (Coorientador).

ABSTRACT

CORRÊA, Cristina Bani. **Browning and wound healing in minimally processed yams (*Dioscorea spp.*) are influenced by tuber region, ascorbic acid treatment, and storage temperature.** São Cristóvão: UFS, 2026. 60p. Dissertation - Doctor of Science in Agriculture and Biodiversity.*

Mechanical damage caused by peeling and cutting affects the biochemical and physiological processes of yam, triggering enzymatic oxidation and inducing rapid defense responses, such as the formation of structural barriers at the wound site. This study aims to investigate, in an integrated manner, the physiological, biochemical, and structural responses of minimally processed yam (*Dioscorea cayenensis*), evaluating the effects of tuber region, storage temperature, and ascorbic acid application on enzymatic browning and wound healing. Slices from the apical (AP), medial (ME), and distal (DI) regions were subjected to minimal processing, treated or not with ascorbic acid (1% w/v), and stored at 5 °C (browning) and at 5 and 20 °C (lignification). Quality and physicochemical parameters, phenolic metabolism, enzymatic activities (PPO, SOD, CAT, POD, and PAL), and lignin deposition were evaluated. Visual quality progressively declined during storage, with more pronounced losses in the apical region. ascorbic acid delayed browning and extended the acceptability of the medial and distal regions. Browning dynamics were modulated by polyphenol oxidase (PPO) activity, superoxide dismutase (SOD), and phenolic content, indicating that when enzymatic protection becomes insufficient, phenolic compounds act as non-enzymatic antioxidants. Chromatographic analysis revealed selective accumulation of hydroxycinnamic acids and flavonoids, indicating activation of the phenylpropanoid pathway in response to post-processing stress. The wound healing process was strongly influenced by temperature. At 5 °C, an antioxidant response predominated, with no detectable lignin deposition. In contrast, at 20 °C, increased activities of phenylalanine ammonia-lyase (PAL) and peroxidase (POD) were observed, along with lignin deposition, characterizing a structural response. Overall, the results demonstrate that the quality of minimally processed yam is determined by the interaction between tuber region, storage temperature, and ascorbic acid application, highlighting the multifactorial nature of oxidative stress regulation in minimally processed yam.

Key-words: Dioscoreaceae, lignification, polyphenol oxidase, phenolic compounds.

* Guidance Committee: Marcelo Augusto Gutierrez Canelossi (Advisor), Adriano do Nascimento Simões (Adjunct advisor).

1. INTRODUÇÃO GERAL

O inhame (*Dioscorea cayenensis*) é um tubérculo, pertencente à classe das monocotiledôneas, da família Dioscoreaceae, com aproximadamente 600 espécies distribuídas em regiões tropicais e subtropicais. Grande parte da sua produção mundial está concentrada no continente africano, sendo a Nigéria o maior produtor deste tubérculo, produzindo mais de 50 milhões de toneladas por ano (Wumbei *et al.*, 2022; FAO, 2025). No Brasil, a maior parte da produção está distribuída na região Nordeste, onde grande parte da produção nacional está concentrada nos estados da Paraíba, Bahia, Alagoas, Sergipe, Maranhão e Pernambuco (Devide *et al.*, 2025). Esse tubérculo desempenha um importante papel socioeconômico, pois a maior parte do seu cultivo é feito em pequenas propriedades familiares e nesse caso, o processamento mínimo pode ser uma alternativa para agregar valor comercial ao vegetal, além de minimizar as perdas pós-colheita (Wumbei *et al.*, 2022; Devide *et al.*, 2025).

O processamento mínimo envolve diferentes etapas que resultam em estresse ao tecido do vegetal. As injúrias decorrentes do descascamento e corte interferem nos processos bioquímicos e fisiológicos, promovendo o aumento da taxa de respiração e desencadeando processos de oxidação por via enzimática e, como consequência, aceleram o escurecimento e a deterioração do produto (Brecht *et al.*, 2010; Moretti, 2007). Além destas, respostas rápidas do vegetal no combate ao dano envolvem a síntese de compostos fenólicos e a formação de barreiras estruturais no local da lesão, como a lignificação e a suberização do tecido, promovendo uma barreira física adjacente ao local danificado (Artés *et al.*, 2007; Moretti, 2007). Além disso, os danos causados durante o processamento mínimo podem levar à degradação lipídica e ao escurecimento enzimático, uma vez que promovem o rompimento de membranas celulares, provocando a descompartimentalização de enzimas e substratos na superfície do vegetal onde o corte foi realizado (Artés *et al.*, 2007).

O escurecimento enzimático é um dos principais fatores de perda de qualidade em vegetais minimamente processados. Este fenômeno é mediado principalmente pela enzima polifenol oxidase (PPO) e, em alguns casos, pela peroxidase (POD). A PPO catalisa a oxidação de compostos fenólicos a quinonas altamente reativas, que se polimerizam formando melaninas, responsáveis pela coloração marrom (Doorn & Ketsa, 2014; Hu *et al.*, 2022). A POD pode atuar secundariamente, utilizando peróxido de hidrogênio (H₂O₂) como cofator para oxidar fenólicos, contribuindo para o escurecimento e também para a lignificação. Além disso, espécies reativas de oxigênio (EROs) podem acelerar a oxidação de fenólicos, intensificando o escurecimento enzimático (Zhou & Jiang, 2019; Moon *et al.*, 2020; Hu *et al.*, 2022).

A enzima fenilalanina amônia-liase (FAL) é uma enzima chave para a síntese de compostos fenólicos. Situações de estresse, como o descascamento e corte, induzem o aumento da atividade dessa enzima. Portanto, à medida que os compostos fenólicos são oxidados pela PPO (escurecimento enzimático) e/ou pela POD (escurecimento e lignificação), a FAL atua em sua síntese, a fim de combater o estresse inicial. Esse mecanismo de defesa PAL, PPO e POD gera compostos que irão intensificar o escurecimento do tecido e aumentar as barreiras físicas (Artés *et al.*, 2007; Monteiro *et al.*, 2004).

Um dos artifícios tecnológicos que se utiliza para minimizar os efeitos das reações causadas pelo processamento mínimo é o uso de agentes antioxidantes associados à refrigeração (Al-Abbasy *et al.*, 2025). O ácido ascórbico é amplamente utilizado como agente antiescurecimento devido à sua capacidade de reduzir as quinonas formadas pela oxidação de compostos fenólicos, revertendo-as a difenóis e retardando o escurecimento enzimático. Como antioxidante, pode atuar removendo espécies reativas de oxigênio geradas durante o processamento. A predominância de cada função depende do estágio da resposta ao estresse e da intensidade da oxidação tecidual (Jiang & Penner, 2021; Smirnoff, 2018).

O inhame apresenta heterogeneidade nas respostas bioquímicas em função das suas regiões morfológicas (apical, medial e distal). Dentre essas respostas estão a variação na atividade de enzimas envolvidas no escurecimento, como a PPO e a POD, alterações nas

enzimas associadas ao metabolismo de carboidratos, bem como diferenças nos teores de fenóis totais, sólidos solúveis e pH (Graham-Acquaah *et al.*, 2014; Oluoha, 1988). A compreensão dessas respostas regionais é fundamental para explicar por que diferentes partes do tubérculo apresentam comportamentos distintos em relação ao escurecimento e à estabilidade metabólica. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo investigar o escurecimento enzimático e a lignificação nas regiões apical, medial e distal do inhame minimamente processado, com e sem aplicação de ácido ascórbico, integrando parâmetros físico-químicos, enzimáticos e metabólicos, visando identificar a região mais adequada para a comercialização e melhor compreensão das respostas ao processamento.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A importância econômica do inhame para a agricultura familiar

O inhame (*Dioscorea cayenensis*) é uma monocotiledônea, pertencente à família Dioscoreaceae, com mais de 600 espécies distribuídas pela África, Ásia, partes da América do Sul, Caribe e ilhas do Pacífico Sul, das quais apenas um pequeno número apresenta relevância alimentar e econômica. A produção mundial está concentrada no continente africano, onde a África Ocidental responde por mais de 90% da produção mundial, sendo a Nigéria o maior produtor individual seguido por Gana e Costa do Marfim. Em 2024, a produção mundial de inhame alcançou 92 milhões de toneladas, das quais a Nigéria produziu mais de 50 milhões de toneladas, representando cerca de 69% da produção mundial (FAO, 2025; Wumbei *et al.*, 2022; Akissoe *et al.*, 2003).

No contexto sul-americano, o Brasil se destaca como o segundo maior produtor, com produção estimada em cerca de 250.000 t em 2016, onde as espécies de maior importância econômica são a *D. cayennensis* e *D. alata*, com predominância da primeira. A região Nordeste concentra a maior parte da produção nacional, especialmente nos estados da Paraíba, Pernambuco, Bahia, Alagoas, Sergipe e Maranhão (Devide *et al.*, 2025). Em Rondônia, na região do Vale do Guaporé, o inhame segue ganhando espaço, em função de sua alta produtividade mesmo em pequenas áreas. Outro atrativo é o preço do produto e a facilidade de comercialização em novos mercados (Ribeiro, 2022).

Entre as espécies do gênero *Dioscorea*, apenas uma fração é explorada na alimentação básica. As que mais se destacam são *D. rotundata* (inhame branco), *D. cayennensis* (inhame amarelo), *D. alata* (inhame-d'água), *D. dumetorum* (inhame trifoliado), *D. bulbifera* (inhame aéreo), *D. polystachya* (inhame chinês) e *D. esculenta* (inhame menor). Entre essas espécies economicamente importantes, a *D. rotundata* apresenta maior relevância econômica e área cultivada, seguida por *D. alata*, *D. cayennensis* e *D. bulbifera* (Wumbei *et al.*, 2022).

O inhame é um alimento importante para a população africana, contribuindo, em média, com 28% da ingestão calórica total consumida. Em Gana, é a segunda fonte calórica mais importante, atrás apenas da mandioca. Desempenha também um papel fundamental na geração de renda e na vida sociocultural de pelo menos 60 milhões de pessoas. Apesar dos altos custos de produção e das flutuações de preços nos mercados, mais de 60% das pessoas cultivam o inhame como fonte primária de subsistência e renda, pois é considerado uma cultura muito lucrativa (Wumbei *et al.*, 2022). No Brasil, a produção do inhame predomina em áreas de agricultura familiar, onde também se concentra a comercialização e o consumo, nos quais desempenha importante papel sociocultural e econômico (Couto *et al.*, 2015; Devide *et al.*, 2025).

2.2. Caracterização anatômica e maturação fisiológica do inhame

A organização anatômica das túberas de inhame varia em função da espécie e do estágio de desenvolvimento. O “inhame da terra” apresenta túberas de formato cilíndrico, recobertas por uma espessa camada de cortiça e podendo apresentar fissuras na sua superfície (Figura 1A). O crescimento da túbera acontece a partir de uma estrutura maciça semelhante a um rizoma, denominada de complexo nodal primário, que fica localizada na região apical do inhame. Este complexo nodal forma-se logo após a germinação e dele surgem as principais raízes alimentadoras e, mais tarde, o tubérculo (Cock, 1986; Onwueme & Charles, 1994).

Anatomicamente, o inhame maduro é circundado por múltiplas camadas de cortiça resultantes da atividade sucessiva de câmbios suberizados, com células organizadas em fileiras radiais (Figura 1B). Internamente à cortiça está o córtex, composto por células de paredes finas com pouco amido armazenado. Abaixo do córtex há um anel de células meristemáticas, composto por várias camadas de células tangencialmente alongadas e de paredes finas, dispostas em fileiras radiais. A porção central da túbera é composta por células de paredes

espessas, preenchidas densamente com grãos de amido (Onwueme & Charles, 1994; Degbeu *et al.*, 2019).

O câmbio produz células na extremidade inferior do ápice. Essas células se diferenciam dando origem às regiões medial e apical do tubérculo. A região distal permanece relativamente imatura em relação às demais (Degbeu *et al.*, 2019).

Os feixes vasculares ramificam-se através do tecido fundamental e apresentam organização colateral, com floema voltado para a periferia e xilema para a região interna. Os grãos de amido apresentam formato arredondado ou elíptico e geralmente estão mais concentrados nas células do parênquima que circundam os feixes vasculares. Podem ser encontradas células contendo ráfides, bem como células de tanino (Onwueme & Charles, 1994).

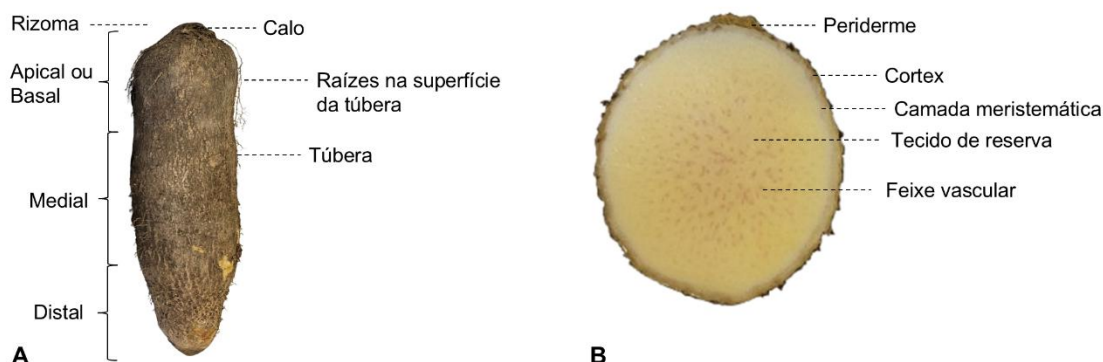


Figura 1. Morfologia (A) e seção transversal (B) do inhame, adaptado de Onwueme & Charles (1994).

A maturação fisiológica do inhame exerce influência direta sobre sua composição química e suas propriedades estruturais. A colheita comercial ocorre, em geral, aos sete meses após o plantio (capação), enquanto a maturação completa é atingida aproximadamente aos nove meses (Silva, 2021). Segundo Martin (1976), túberas colhidas próximo à maturidade fisiológica apresentam maiores teores de matéria seca e amido, em comparação às colhidas precocemente.

Diferenças longitudinais ao longo da túbera refletem gradientes de maturação. Em *Dioscorea rotundata*, a extremidade proximal amadurece mais precocemente que a distal, resultando em variações na coloração do parênquima e na chamada “cremosidade” do tecido, associada à maturidade fisiológica. Tubérculos imaturos apresentam coloração predominantemente branca, sobretudo na região distal (Sertie & Asiedu, 2009).

Estudos moleculares demonstram que *D. cayennensis* e *D. rotundata* derivam de uma mesma linhagem ancestral, sendo segregadas ao longo do processo de domesticação de espécies silvestres. Essa proximidade filogenética explica, em parte, a elevada similaridade morfoanatômica e bioquímica entre essas espécies (Sartie *et al.*, 2012).

2.3. Respostas ao processamento mínimo

O fermento não apenas induz a expressão de genes de defesa, como também desencadeia uma série de sinais através de alterações fisiológicas que se propagam do local da lesão para tecidos distantes, promovendo uma resposta sistêmica no vegetal. Esses sinais podem ser elétricos, químicos ou hidráulicos (Choi *et al.*, 2017). A sinalização elétrica é desencadeada por alterações no potencial de membrana e se propaga nos tecidos juntamente com os sinais químicos e hidráulicos, atingindo tecidos distantes por meio dos feixes vasculares, sendo capaz de transmitir sinais com maior rapidez do que os sinais hormonais. A intensidade da sinalização elétrica está associada à gravidade do fermento e à distância dos locais lesionados. Com base nessas informações, as plantas induzem respostas apropriadas ao dano, regulando a intensidade dos sinais químicos (Lee & Seo, 2022).

A sinalização química está relacionada à produção de EROs através da NADPH oxidase e ao acúmulo imediato de Ca^{2+} citosólico no local da lesão, o que gera uma onda de Ca^{2+} que se propaga para os tecidos distantes, através do tecido vascular, ativando genes responsáveis pela biossíntese do ácido jasmônico. A sinalização hidráulica ocorre devido a mudanças axiais rápidas na pressão hidrostática no xilema, provocadas pelo ferimento que, em seguida, se convertem em mudanças de pressão mais lentas e radialmente dispersas (Choi *et al.*, 2017; Lee & Seo, 2022).

As respostas fisiológicas subsequentes se caracterizam pelo aumento da atividade respiratória, elevação dos níveis de etileno, indução do metabolismo de compostos fenólicos e ativação do processo de cicatrização (Artés *et al.*, 2007). Além do ácido jasmônico e do etileno, outros reguladores como o ácido abscísico e o ácido salicílico são ativados. Observam-se ainda oxidação de lipídeos e liberação de ácidos graxos livres devido à ação de hidrolases, fosfolipases e lipoxigenases, em função da desorganização da membrana celular e do contato dessas enzimas com seus respectivos substratos (Brecht *et al.*, 2010; Moretti, 2007).

Devido à eliminação das barreiras naturais presentes na superfície do vegetal, além da perda acelerada de água, ocorrem também alterações na difusão de gases. Em consequência, podem ser observados esbranquiçamento, alteração do formato e formação de rachaduras ou fraturas (Artés *et al.*, 2007; Moretti, 2007).

O estresse também induz a síntese de enzimas envolvidas nas reações de escurecimento e na rota dos fenilpropanoides (Brecht *et al.*, 2010; Moretti, 2007). Em função do ferimento, a PAL, enzima inicial na síntese de compostos fenólicos, é ativada. À medida que os compostos fenólicos são oxidados pela PPO (escurecimento enzimático) e/ou pela POD (escurecimento e lignificação), a FAL atua na reposição desses metabólitos, auxiliando na resposta ao estresse inicial (Artés *et al.*, 2007; Monteiro *et al.*, 2004).

Esse mecanismo integrado envolvendo PAL, PPO e POD resulta na formação de compostos que intensificam o escurecimento do tecido e reforçam as barreiras físicas, como a deposição de suberina e lignina no local da lesão (Barcel, 1995).

2.4. O ácido ascórbico e o escurecimento enzimático

O escurecimento enzimático é um processo biológico que pode acarretar consequências significativas para produtos frescos, como a redução da qualidade de frutas e hortaliças. Ocorre principalmente durante a colheita, o transporte, o armazenamento e o processamento. Estímulos mecânicos e físicos decorrentes do processamento, como descascar, cortar, fatiar, picar e ralar, assim como mudanças bruscas de temperatura, podem causar danos aos tecidos vegetais. Como consequência, os compostos fenólicos e as polifenol oxidases (PPOs) ficam expostos ao oxigênio, iniciando a oxidação desses compostos (Moon *et al.*, 2020). O escurecimento é iniciado pela PPO, que catalisa a oxidação de compostos fenólicos, porém, reações não enzimáticas subsequentes resultam na polimerização desses compostos em pigmentos marrons conhecidos como melanina (Tilley & Bayliss, 2023) (Figura 2).

A PPO está presente nos tecidos de plantas e animais, especialmente em frutas (maçã, pêssego, pera, banana, damasco, frutas vermelhas, manga, abacate e uva) e vegetais (batata, inhame, alface, goiaba, melão, berinjela e cogumelo) (Tilley & Bayliss, 2023; Moon *et al.*, 2020; Hu *et al.*, 2021; Moraes, 2021). Como a atividade da PPO é crucial para o desenvolvimento do escurecimento enzimático, os fatores que influenciam essa atividade, como o tipo e a concentração de compostos fenólicos endógenos, a disponibilidade de oxigênio e o pH do tecido, têm sido amplamente investigados como estratégias para a prevenção desse processo (Fennema *et al.*, 2010).

A prevenção do escurecimento enzimático pode ser baseada em abordagens físicas e químicas. Entre os métodos físicos, destacam-se o tratamento térmico, a redução da exposição ao oxigênio, o uso de baixas temperaturas e a irradiação (Moon *et al.*, 2020).

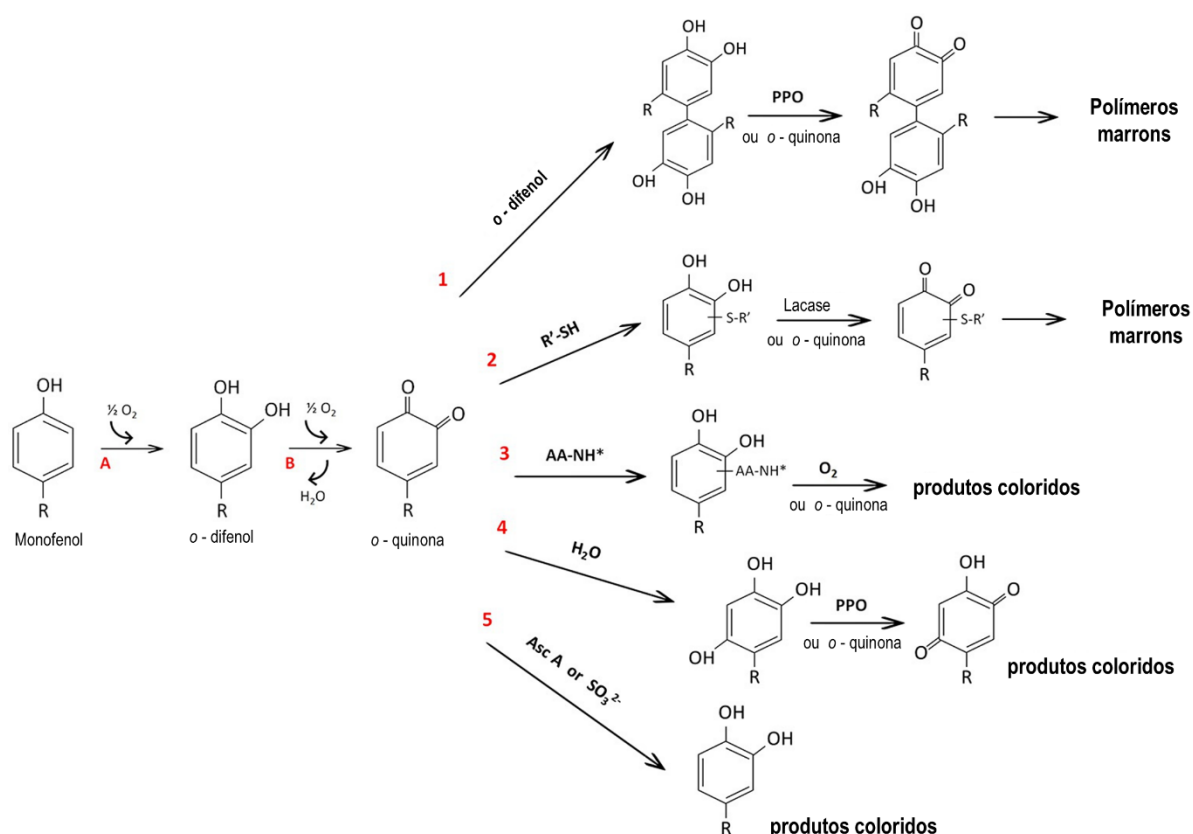


Figura 2. Reações catalisadas pela polifenol oxidase (PPO) (A e B) e reações da *o*-quinona (1–6). Adaptado de Glagoleva *et al.* (2020). Hidroxilação de monofenóis em *o*-difenóis (A) e oxidação de *o*-difenóis em *o*-quinonas (B), pela PPO. As *o*-quinonas resultantes podem reagir com outra molécula de fenol com a formação de dímeros do fenol original (reação 1). Esses dímeros com estrutura *o*-difenólica podem ser oxidados enzimaticamente ou por outra *o*-quinona a um polímero marrom. Por adição nucleofílica, as *o*-quinonas podem interagir com grupos tiol (reação 2) ou grupos amino de aminoácidos ou peptídeos (reação 3), resultando em compostos com estrutura *o*-difenólica que podem ser posteriormente oxidados (por lacase ou oxigênio) ou reagir com excesso de *o*-quinonas para formar produtos coloridos. Água pode ser adicionada às *o*-quinonas, levando a trifenóis que podem ser oxidados por PPO ou por *o*-quinonas com a formação de *p*-quinonas (reação 4). Finalmente, as reações com ácido ascórbico ou sulfitos levam à regeneração do fenol original (reação 5). Todas as reações são não enzimáticas, exceto aquelas com lacase e PPO. $AA-NH^*$, aminoácidos ou peptídeos; Asc A, ácido ascórbico; $R'-SH$, pequenos compostos tiol (por exemplo, cisteína ou glutatona).

Os métodos químicos para a inibição da atividade da PPO incluem o uso de antioxidantes, agentes acidificantes, agentes quelantes ou extratos naturais. Assim, agentes acidificantes, como ácido cítrico, ácido ascórbico e glutatona, reduzem a atividade da enzima através da diminuição do pH do tecido. Além disso, agentes redutores, como os sulfitos e seus derivados, atuam como inibidores irreversíveis da PPO. Antioxidantes, incluindo ácido ascórbico, L-cisteína e 4-hexilresorcinol, também previnem a formação de melaninas ao reagirem com os intermediários quinônicos. Por sua vez, agentes quelantes de cobre, como os ácidos cítrico e oxálico, suprimem a atividade da PPO ao se ligarem aos cofatores metálicos presentes no sítio ativo da enzima (Meitha *et al.*, 2020; Moon *et al.*, 2020; Fennema *et al.*, 2010).

A adição exógena de ácido ascórbico modula o estado redox do tecido vegetal, mantendo um ambiente reduzido que diminui a formação de ROS e protege antioxidantes endógenos como a glutatona. Isso não apenas retarda a oxidação enzimática de fenólicos, mas também pode influenciar a expressão de enzimas antioxidantes endógenas, criando um efeito

prolongado na preservação da cor (Smirnoff, 2018). Além disso, ao manter elevados os níveis de antioxidantes endógenos, contribui para a redução do dano oxidativo em lipídios, proteínas e pigmentos, retardando não apenas o escurecimento enzimático, mas também processos de degradação celular associados ao estresse oxidativo (Meitha *et al.*, 2020).

Apesar da eficácia, a proteção conferida pelo ácido ascórbico é temporária, limitada à quantidade de ácido não oxidado presente no tecido. Quando todo o ácido ascórbico é convertido em desidroascórbico, a PPO e outras enzimas podem retomar a oxidação de fenólicos (Smirnoff, 2018).

2.5. Relação da enzima fenilalanina amônia-liase com o processo de cicatrização do vegetal após o processamento mínimo

O processo de cicatrização está relacionado à produção e deposição de suberina e lignina nas paredes celulares no local da lesão. Na região do corte ocorre a dessecação da primeira camada de células lisadas e uma ou algumas camadas adicionais de células subtendidas. A suberização e a formação da periderme da ferida são influenciadas pelo ambiente ao redor do tecido (Donaldson, 2020; Zhou & Jiang, 2021).

A lignina é um polímero de caráter hidrofóbico, depositado preferencialmente em regiões adjacentes à lesão, onde limita a difusão de oxigênio, a perda de água e a progressão de microrganismos (Vanholme *et al.*, 2010). Sua polimerização depende da ação coordenada de peroxidases (POD) e da disponibilidade de peróxido de hidrogênio, estabelecendo um elo funcional entre metabolismo redox e reorganização estrutural da parede celular (Donaldson, 2020). Esse processo consome precursores fenólicos e pode competir diretamente com a formação de melaninas via polifenoloxidase (PPO), modulando o perfil de escurecimento em tecidos minimamente processados (Hu *et al.*, 2022; Smirnoff, 2018).

A fenilalanina amônia-liase (FAL) atua catalisando a reação de desaminação da L-fenilalanina, produzindo ácido *trans*-cinâmico e amônia. Ela catalisa a reação da formação de muitos compostos fenólicos, como ácidos fenólicos livres, ésteres fenólicos, flavonoides, lignina e fitoalexinas. Os compostos fenólicos também são substratos de enzimas oxidativas como a polifenoloxidase (PPO) e a peroxidase (POD), responsáveis pelo escurecimento enzimático e que juntamente com a PAL, atuam no processo de cicatrização do vegetal após o processamento mínimo (Smirnoff, 2018; Hu *et al.*, 2022) (Figura 3).

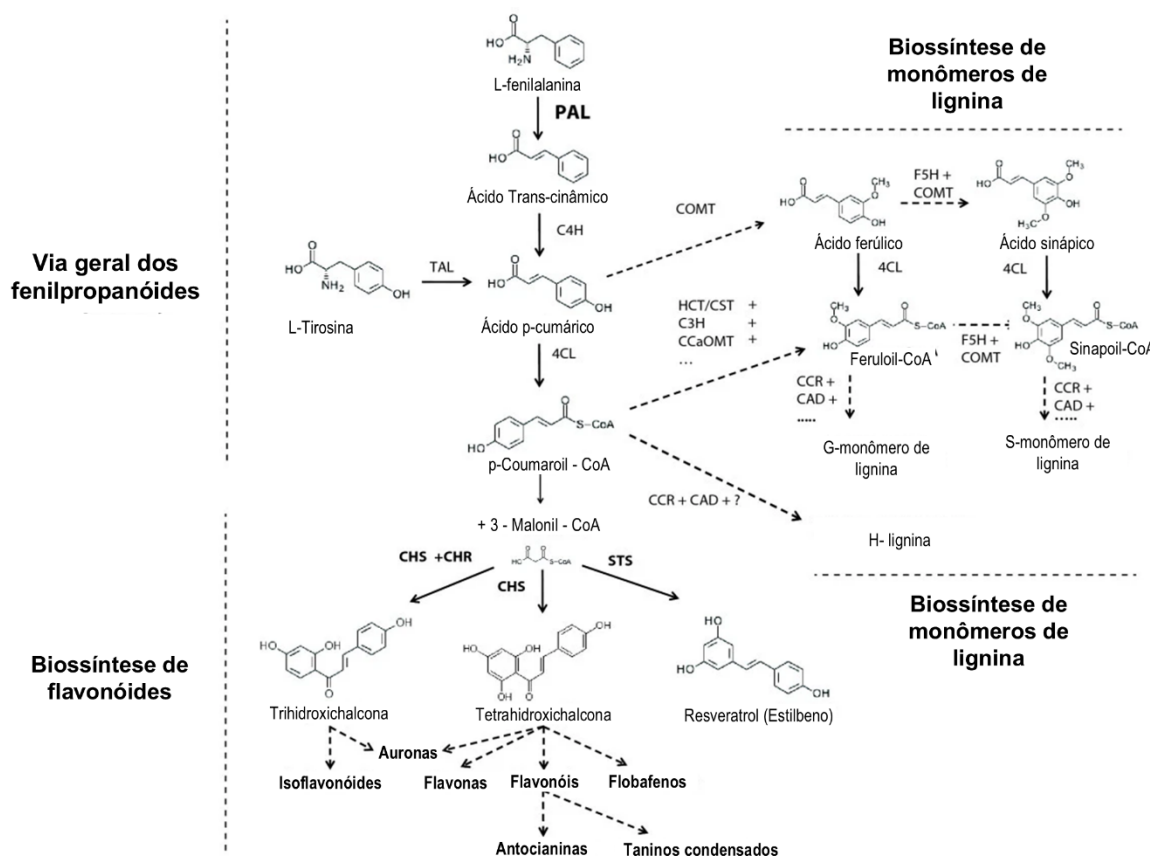


Figura 3. Representação esquemática do metabolismo dos fenilpropanóides. PAL, fenilalanina amônia-liase; TAL, tirosina amônia-liase; C4H, cinamato 4-hidroxilase; 4CL, 4-cumarato CoA ligase; COMT, ácido cafeico/ácido 5-hidroxiferúlico O-metiltransferase; HCT/CST, hidroxicinamoil-CoA:shiquimato/quinato hidroxicinamoiltransferase; C3H, *p*-cumaril shikimato/quinato 3-hidroxilase; CCoAOMT, cafeoil CoA O-metiltransferase; CCR, (hidroxi)cinamoil CoA redutase; CAD, (hidroxi)cinamil álcool desidrogenase; F5H ferulato 5-hidroxilase; CHS, chalcona sintase; STS, estilbeno sintase. Adaptado de Emiliani *et al.* (2009).

A lignina resulta do acoplamento combinatório oxidativo de 4-hidroxifenilpropanóides. Sua biossíntese pode ser induzida por diversas condições de estresse, como fermentos, infecção por patógenos, estresse metabólico e perturbações na estrutura da parede celular (Vanholme *et al.*, 2010; Krzyzanowski *et al.*, 2022). Os principais componentes da lignina são os álcoois hidroxicinâmicos (ou monolignóis), o álcool coniferílico e o álcool sinapílico, apresentando quantidades menores de álcool *p*-cumarílico. As unidades resultantes dos monolignóis, quando incorporadas ao polímero de lignina, são denominadas unidades guaiacil (G), siringil (S) e *p*-hidroxifenil (H). Após sua biossíntese, os monolignóis são translocados para a parede celular através da membrana plasmática por meio de suas formas 4-*O*-glicosiladas, coniferina e siringina, que são deglicosiladas por glicosidases localizadas na parede celular (Vanholme *et al.*, 2010).

Quando o processo de lignificação é completado, geralmente coincide com a morte da célula, formando o que se denomina tecido de resistência, daí conclui-se que a lignina é um produto final do metabolismo da planta (Krzyzanowski, 2022).

Em tecidos minimamente processados, a lignificação induzida por estresse tem sido associada a alterações na textura, redução da aceitabilidade sensorial e intensificação de defeitos visuais, particularmente em raízes e tubérculos ricos em fenólicos (Zhou & Jiang, 2021; Zhang *et al.*, 2023). A formação de camadas lignificadas na região do corte, característica de proteção contra o dano, compromete a extensibilidade da parede celular e promove o endurecimento do tecido, impactando negativamente a qualidade do produto vegetal.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKISSOE, N.; MESTRES, C.; HOUNHOUIGAN, J.; NAGO, M. Biochemical origin of browning during the processing of fresh yam (*Dioscorea spp.*) into dried product. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 53, p. 2552 – 2557, 2003.
- AL-ABBASY, O.; ALSARRAF, Z.; MAHDI, N.; AL-BARWARI, A. Ascorbic acid: Rationale and applications in inhibiting enzymatic browning of fruits and vegetables – A comprehensive review. **Iranian Food Science and Technology Research Journal**, v. 21, n. 6, p. 697-715, 2025.
- ARTÉS, F.; GÓMEZ, P.A.; ARTÉS-HERNÁNDEZ, F. Physical, Physiological and Microbial Deterioration of Minimally Fresh Processed Fruits and Vegetables. **Food Science and Technology**, v. 13, n. 3, p.177–188, 2007. DOI:10.1177/10820132013207079610.
- BARCEL, A. R. Peroxidase and not laccase is the enzyme responsible for cell wall lignification in the secondary thickening of xylem vessels in *Lupinus*. **Protoplasma**, v. 186, p. 41-44, 1995.
- BRECHT, J.; SALTVEIT, M.; TALCOTI, S.; SCHNEIDER, K.; FELKEY, K.; BARTZ, J. Fresh-cut vegetables and fruits. In: JANICK, J. (ed.). **Horticultural Reviews**, v. 30, p. 185-251, 2003. DOI:10.1002/9780470650837.ch6.
- CHOI, W.-G.; MILLER, G.; WALLACE, I.; HARPER, J.; MITTLER, R.; GILROY, S. Orchestrating rapid long-distance signaling in plants with Ca^{2+} , ROS and electrical signals. **The Plant Journal**, v. 90, n. 4, p. 698–707, 2017. DOI: 10.1111/tpj.13492.
- COCK, J. H. (ed.). Global Workshop on Root and Tuber Crops Propagation (1983, Cali, Colombia). Proceedings of a regional workshop. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 1986. 235 p.
- COUTO, R. S.; LOPES, R. C.; BRAGA, J. M. A. *Dioscorea flabellispina* (Dioscoreaceae), a new endangered species from the Brazilian Atlantic Rainforest. **Phytotaxa**, v. 231, n. 1, p. 89–94, 2015.
- DEGBEU, K. C.; COULIBALY, A.; TETCHI, A. F.; N'GUESSAN, G. A. Histological study of the polarity of yam tuber (*Dioscorea spp.*) at the beginning of tuberization. **Asian Food Science Journal**, v. 12, n. 2, p. 1–15, 2019. Article no. AFSJ.51369. ISSN: 2581-7752.
- DEVIDE, A. C. P.; CASTRO, C. M. de; BERNACCI, L. C.; FELTRAN, J. C.; BARROS, P. M.; COELHO, G. M. O. Origem, cultivo e conservação da cultura alimentar e medicinal dos carás (*Dioscorea spp.*). **Revista Brasileira de Agropecuária**, Brasília, v. 20, n. 4, p. 547-571, 2025. DOI: 10.33240/rba.v20i4.57557. Acesso em: 1 fev. 2026.
- DONALDSON, L. Autofluorescence in plants. **Molecules**, v. 25, n. 10, p. 2393, 2020. DOI: 10.3390/molecules25102393.
- DOORN, W. G. van; KETSA, S. Cross reactivity between ascorbate peroxidase and phenol (guaiacol) peroxidase. **Postharvest Biology and Technology**, v. 95, p. 64–69, 2014.

EMILIANI, G.; FONDI, M.; FANI, R.; GRIBALDO, S. A horizontal transfer at the origin of phenylpropanoid metabolism: a key adaptation of plants to land. **Biology Direct**, V. 4 (7), p. 1 - 12, 2009.

FAO. **Agricultural production statistics– 2010–2024**. FAOSTAT Analytical Briefs, n. 121. Rome, 2025. DOI: 10.4060/cd8035en. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/items/f9b4475e-6e01-4f64-879c-f2606fed2d4b>. Acesso em: 1 fev. 2026.

FENNEMA, O. R.; DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L. **Química de Alimentos de Fennema**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

GLAGOLEVA, A. Y.; SHOEVA, O. Y.; KHLESTKINA, E. K. Melanin pigment in plants: current knowledge and future perspectives. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 11, art. 770, 2020. DOI: 10.3389/fpls.2020.00770.

GRAHAM-ACQUAAH, S.; AYERNOR, G. S.; BEDIAKO-AMOA, B.; SAALIA, F. K.; AFOAKWA, E. O. Spatial distribution of total phenolic content, enzymatic activities and browning in white yam (*Dioscorea rotundata*) tubers. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. 10, p. 2833–2838, 2014.

HU, W.; GUAN, Y.; JI, Y.; YANG, X. Effect of cutting styles on quality, antioxidant activity, membrane lipid peroxidation, and browning in fresh-cut potatoes. **Food Bioscience**, v. 44, p. 101435, 2021.

HU, W.; SARENGAOWA; GUAN, Y.; FENG, K. Biosynthesis of phenolic compounds and antioxidant activity in fresh-cut fruits and vegetables. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, 2022.

JIANG, S.; PENNER, M. H. Role of ascorbic acid in the extraction and quantification of potato polyphenol oxidase activity. **Foods**, v. 10, n. 10, p. 2486, 2021. DOI: 10.3390/foods10102486.

KRZYZANOWSKI, F. C.; FRANÇA-NETO, J. B.; HENNING, F. A. Importância do conteúdo de lignina da parede celular da vagem e do tegumento da semente de soja sobre o seu desempenho fisiológico e sanitário. **Circular Técnica**, n. 180. Londrina, PR: Embrapa, 2022. ISSN 2176-2899.

LEE, K.; SEO, P. J. Wound-induced systemic responses and their coordination by electrical signals. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.880680.

MARTIN, F.W. **Tropical yams and their potential**. Washington: USDA, 1976. 40 p. (Agriculture Handbook, 495).

MEITHA, K.; PRAMESTI, Y.; SUHANDONO, S. Reactive Oxygen Species and Antioxidants in Postharvest Vegetables and Fruits. **International Journal of Food Science**, v. 11, p. 1 – 11, 2020. DOI: 10.1155/2020/8817778.

MONTEIRO, M. B. O.; PEREIRA, R. P. W.; ABREU, H. S. Bioquímica da lignificação de células xilêmicas. **Floresta e Ambiente**, v. 11, n. 2, p. 48-57, 2004.

MOON, M. K.; KWON, E. -B.; LEE, B.; KIM, Y.C. Recent Trends in Controlling the Enzymatic Browning of Fruit and Vegetable Products. **Molecules**, v. 25, p. 2754, 2020. DOI:10.3390/molecules25122754.

MORAIS, M. A. S.; FONSECA, K. S.; MEDEIROS, R. A.; ANDRADA, L. V. P.; SARAIVA, R. A.; FERREIRA-SILVA, S. L.; LIMA, A. L. A.; SIMOES, A. N. Use of the abrasion technique in minimal processing as an alternative to increase purchase acceptability and minimize browning in yam. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v 102 (1), p. 121-131, 2021.

MORETTI, C. L. **Manual de processamento mínimo de frutas e hortaliças**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2007. 531 p.

OLUOHA, U. K. Delimitation of physiological regions in yam tubers. **Plant Foods for Human Nutrition**, v. 30, p. 210–218, 1988.

ONWUEME, I.C.; CHARLES, W. B. **The tropical root and tuber crops: production, perspectives and future prospects**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1994. 228p.

RIBEIRO, A. K. Produção de inhame na região do Vale do Guaporé deixa produtores otimistas com a colheita para a safra 2020/21. Disponível em: <https://www.agrorondonia.com.br/noticias/agricultura/producao-de-inhame-na-regiao-do-vale-do-guapore-deixa-produtores-otimistas-com-a-colheita-para-a-safra-202021>. Acesso em: 01 nov. 2025.

SARTIE, A.; ASIEDU, R.; FRANCO, J. Genetic and phenotypic diversity in a germplasm working collection of cultivated tropical yams (*Dioscorea spp.*). **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 59, n. 8, p. 1753-1765, 2012.

SERTIE, A.; ASIEDU, R. Tuber maturity of white yam (*Dioscorea rotundata*). In: **15th Triennial ISTRC Symposium**. International Institute of Tropical Agriculture (IITA), 2009. p. 75–81.

SILVA, A. D. A da. Inhame. Embrapa Tabuleiros Costeiros. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/territorios/territorio-mata-sul-pernambucana/atividades-economicas/cultivos/raizes-e-tuberculos/inhame>. Acesso em: 29 maio 2025.

SMIRNOFF, N. Ascorbic acid metabolism and functions: A comparison of plants and mammals. **Free Radical Biology and Medicine**, v. 122, p. 116–129, jul. 2018. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2018.03.033.

TILLEY, A.; BAYLISS, K. Enzymatic browning: The role of substrates in polyphenol oxidase mediated browning. **Current Research in Food Science**, v. 7, art. 100623, 2023.

VANHOLME, R.; DEMEDTS, B.; MORREEL, K.; RALPH, J.; BOERJAN, W. Lignin biosynthesis and structure. **Plant Physiology**, v. 153, n. 3, p. 895–905, 2010. DOI: 10.1104/pp.110.155119.

WUMBEI, A.; GAUTIER, S. K. N.; KWODAGA, J. K.; JOSEPH, D. F.; GALANI, Y. J. H. State of the Art of Yam Production. In: KAUSHIK, P. (ed.). **Root Vegetables**, 2022. DOI: 10.5772/intechopen.106504.

ZHANG, J.; YAO, J.; MAO, L.; LI, Q.; WANG, L.; LIN, Q. Low temperature reduces potato wound formation by inhibiting phenylpropanoid metabolism and fatty acid biosynthesis. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1109953, 18 jan. 2023. DOI: 10.3389/fpls.2022.1109953.

ZHOU, F.; JIANG, A. Ascorbic acid treatment inhibits wound healing. **Postharvest Biology and Technology**, v. 181, p. 111644, 2021.

ZHOU, F.; JIANG, A.; FENGA, K.; GUA, S.; XUA, D.; HU, W. Effect of methyl jasmonate on wound healing and resistance in fresh-cut potato cubes. **Postharvest Biology and Technology**, v. 157, p. 111644, 2019.

4. ARTIGO 1

ESCURECIMENTO ENZIMÁTICO E EFEITO DO ÁCIDO ASCÓRBICO EM DIFERENTES REGIÕES DO INHAME (*Dioscorea cayenensis*) MINIMAMENTE PROCESSADO

RESUMO

O escurecimento enzimático é uma das principais limitações para a qualidade do inhame. O escurecimento enzimático é uma das principais limitações para a qualidade do inhame minimamente processado, comprometendo sua aceitabilidade e viabilidade comercial. Este estudo teve como objetivo investigar o escurecimento enzimático nas regiões apical, medial e distal do inhame minimamente processado, avaliando o efeito da aplicação de ácido ascórbico e sua relação com parâmetros físico-químicos e metabólicos. Rodelas das regiões apical (AP), medial (ME) e distal (DI) foram submetidas ou não à aplicação de ácido ascórbico (AA) (1%, m/v) e armazenadas a 5 °C por 15 dias, sendo avaliadas quanto à qualidade visual, parâmetros físico-químicos, atividade das enzimas polifenol oxidase (PPO), superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT), compostos fenólicos, capacidade antioxidante e perfil fenólico. Observou-se perda progressiva da qualidade visual e aumento da perda de massa, com variações entre as regiões. O AA retardou o escurecimento e manteve a aceitabilidade das amostras ME e DI até o décimo dia. A região AP apresentou escurecimento imediato, alta atividade inicial da PPO e rápida oxidação do AA, ME mostrou maior estabilidade oxidativa e DI apresentou resposta tardia, porém mais intensa em relação ao aumento da atividade da PPO e do escurecimento. Houve aumento dos compostos fenólicos e da atividade antioxidante ao longo do armazenamento, indicando ativação de mecanismos não enzimáticos de defesa, atuando na contenção do estresse oxidativo quando a proteção enzimática se torna limitada. A análise cromatográfica revelou acúmulo de ácidos hidroxicinâmicos e flavonoides aos 15 dias, evidenciando a ativação da rota dos fenilpropanóides em resposta ao estresse pós-processamento, pela presença de compostos como ácido *p*-cumárico, ferúlico e clorogênico, assim como a catequina, presente em praticamente todas as amostras. Em conjunto, esses resultados indicam que as respostas bioquímicas do inhame são moduladas pela região do tubérculo e pela aplicação de AA. A região medial apresenta maior estabilidade ao longo do armazenamento, mostrando-se mais adequada para o processamento mínimo e comercialização, especialmente quando associada ao uso de ácido ascórbico.

Palavras-chave: polifenol oxidase, compostos fenólicos, espécies reativas de oxigênio, atividade antioxidante.

4. ARTICLE 1

ENZYMATIC BROWNING AND THE EFFECT OF ASCORBIC ACID IN DIFFERENT REGIONS OF MINIMALLY PROCESSED YAM (*Dioscorea cayenensis*)

ABSTRACT

Enzymatic browning is one of the main limitations to the quality of minimally processed yam, compromising its acceptability and commercial viability. This study aimed to investigate enzymatic browning in the apical, medial, and distal regions of minimally processed yam, evaluating the effect of ascorbic acid application and its relationship with physicochemical and metabolic parameters. Slices from the apical (AP), medial (ME), and distal (DI) regions were subjected to ascorbic acid (AA) treatment (1% w/v), with a non-subjecte3d control group, both stored at 5 °C for 15 days, and were evaluated for visual quality, physicochemical parameters, activities of the enzymes polyphenol oxidase (PPO), superoxide dismutase (SOD), and catalase (CAT), phenolic compounds, antioxidant capacity, and phenolic profile. A progressive loss of visual quality and mass were observed, with variations among regions. AA delayed browning and maintained the acceptability of ME and DI samples until day 10. The AP region showed immediate browning, high initial PPO activity, and rapid AA oxidation. ME showed greater oxidative stability, and DI showed a delayed but more intense response, associated with increased PPO activity and browning. An increase in phenolic compounds and antioxidant activity was observed throughout storage, indicating the activation of non-enzymatic defense mechanisms involved in mitigating oxidative stress when enzymatic protection becomes limited. Chromatographic analysis revealed the accumulation of hydroxycinnamic acids and flavonoids at day 15, indicating activation of the phenylpropanoid pathway in response to post-processing stress, as evidenced by the presence of compounds such as *p*-coumaric, ferulic, and chlorogenic acids, as well as catechin, detected in nearly all samples. Altogether, these results indicate that the biochemical responses of yam are modulated by tuber region and ascorbic acid application. The medial region shows greater stability during storage, making it more suitable for minimal processing and commercialization, especially when associated with the use of ascorbic acid.

Keywords: polyphenol oxidase, phenolic compounds, reactive oxygen species, antioxidant activity.

4.1. Introdução

O inhame (*Dioscorea cayenensis*) é uma túbera caulinar pertencente à classe das monocotiledôneas, da família Dioscoreaceae, que compreende mais de 600 espécies distribuídas em regiões tropicais e subtropicais (Salehi *et al.*, 2019). A produção mundial concentra-se no continente africano, com destaque para a Nigéria, responsável por produzir aproximadamente 62 milhões de toneladas em 2022 (FAO, 2025). No Brasil, aproximadamente 90% da produção está concentrada nos estados do Nordeste, especialmente na Paraíba, Bahia, Alagoas, Sergipe, Maranhão e Pernambuco (Devide *et al.*, 2025).

O inhame apresenta em sua composição carboidratos complexos, principalmente amido, como principal fonte energética, além de fibras e minerais, como potássio e ferro, apresentando-se como um alimento energético, principalmente para populações cuja dieta é baseada em raízes e tubérculos (Salehi *et al.*, 2019; Wumbei *et al.*, 2022). Além disso, desempenha um importante papel socioeconômico, pois grande parte do cultivo é realizado em pequenas propriedades familiares. Nesse contexto, o processamento mínimo pode ser uma

alternativa para agregar valor comercial ao inhame, além de minimizar as perdas pós-colheita (Couto *et al.*, 2015; Wumbei *et al.*, 2022).

O processamento mínimo envolve diferentes etapas que resultam em estresse ao tecido do vegetal. Os danos causados pelo descascamento e corte interferem em fatores bioquímicos e fisiológicos, desencadeando processos de oxidação por via enzimática, acelerando o escurecimento e a deterioração do produto, podendo comprometer a aparência, a aceitabilidade e a estabilidade metabólica dos tecidos durante o armazenamento (Brecht, 1995; Moon *et al.*, 2020).

O escurecimento decorrente da oxidação de compostos fenólicos é catalisado pela enzima polifenol oxidase (PPO) e resulta na formação de quinonas que se polimerizam gerando pigmentos escuros. A intensidade desse processo é modulada pela disponibilidade de substratos fenólicos, pela atividade da enzima e pela disponibilidade de oxigênio, fatores que são alterados durante o processamento, devido à descompartimentalização celular. Os compostos fenólicos também atuam como substratos para peroxidases, que catalisam sua oxidação na presença de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), promovendo a geração de radicais fenólicos que irão contribuir com a propagação do escurecimento enzimático ou para modificações da parede celular (Doorn & Ketsa, 2014; Hu *et al.*, 2022). O fermento mecânico ativa a rota dos fenilpropanoides, mediada principalmente pela fenilalanina amônia-liase (FAL), resultando no aumento da síntese de compostos fenólicos com funções antioxidantes, defensivas ou estruturais (Dixon & Paiva, 1995; Vogt, 2010). Além disso, as enzimas antioxidantes, incluindo a superóxido dismutase (SOD) e a catalase (CAT), também são ativadas e atuam eliminando as espécies reativas de oxigênio (EROs) produzidas em decorrência do estresse (Hu *et al.*, 2022).

Um dos métodos mais empregados para atenuar os efeitos das reações causadas pelo processamento mínimo é a aplicação de agentes químicos antioxidantes combinada à refrigeração. O ácido ascórbico é amplamente utilizado como agente antiescurecimento devido à sua capacidade de reduzir as quinonas formadas pela oxidação de compostos fenólicos, revertendo-as a difenóis (retardando o escurecimento enzimático), além de atuar na remoção de EROs geradas durante o processamento (Zhou & Jiang, 2019; Moon *et al.*, 2020).

O escurecimento enzimático no inhame não ocorre de forma uniforme, mas de maneira mais pronunciada em regiões específicas. Graham-Acquaah *et al.* (2014) observaram diferenças regionais no teor de fenóis totais e nas atividades das enzimas PPO e POD em duas variedades de inhame (*D. rotundata*). Oluoha (1988) também observou heterogeneidade metabólica nas diferentes regiões do inhame, evidenciando variações nas atividades de diferentes enzimas (hexocinase, fosforilase, desidrogenase, fosfofrutocinase e piruvato cinase), bem como no pH e no teor de proteínas nas diferentes regiões estudadas. A compreensão dessas respostas é essencial para explicar por que diferentes regiões do tubérculo apresentam comportamentos contrastantes quanto ao escurecimento e à estabilidade metabólica.

As respostas bioquímicas e enzimáticas são distintas nas diferentes regiões morfológicas (apical, medial e distal) do inhame minimamente processado e o ácido ascórbico atua na inibição do escurecimento enzimático. Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo investigar o escurecimento enzimático nas regiões apical, medial e distal do inhame minimamente processado com e sem aplicação de ácido ascórbico, integrando parâmetros físico-químicos, enzimáticos e metabólicos, a fim de identificar a região do inhame mais adequada para a comercialização na forma minimamente processada.

4.2. Material e Métodos

4.2.1. Processamento e delineamento experimental

As túberas de inhame (*Dioscorea cayenensis*) foram adquiridas no mercado atacadista local (Aracaju, SE, Brasil), selecionadas quanto ao tamanho, integridade e ausência de defeitos visuais, e conservadas a 18 ± 2 °C até o processamento.

Durante o processamento, foram lavadas em água corrente e seccionadas transversalmente com uma faca afiada em três regiões morfológicas: apical (AP), medial (ME) e distal (DI), considerando entre 1,5 a 2 cm para cada região, de acordo com Graham-Acquaah *et al.* (2014). As regiões foram descascadas e cortadas em rodela de aproximadamente 0,5 cm de espessura, sendo imediatamente imersas em água refrigerada (5 °C).

As rodela foram sanitizadas com cloro ativo (200 mg L⁻¹) por 10 min a 5 °C, seguidas de rinsagem em água clorada (3 mg L⁻¹) por 5 min a 5 °C. Durante essa etapa, metade das amostras foi tratada com ácido ascórbico (1% m/v), enquanto a outra metade não recebeu qualquer tratamento, constituindo o controle (-AA). As amostras foram drenadas por 10 min em tela plástica, acondicionadas em bandejas de poliestireno expandido (EPS), envoltas com filme de PVC e conservadas sob refrigeração (5 ± 2 °C) (Figura 1).

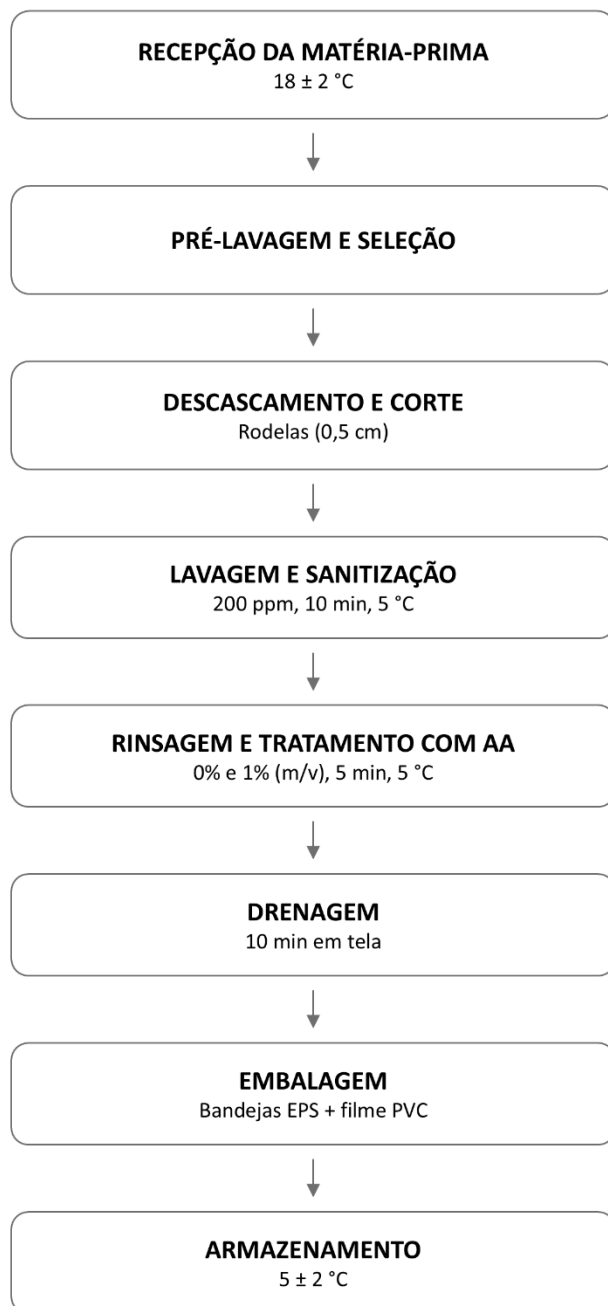


Figura 1. Fluxograma do processamento mínimo do inhame (*Dioscorea cayenensis*) submetido a tratamento com ácido ascórbico e armazenamento refrigerado.

4.2.2. Análise visual e perda de massa

A análise visual das amostras foi realizada por meio de uma escala subjetiva de cinco pontos (1–5), adaptada de Coelho Júnior *et al.* (2019), considerando a intensidade e a distribuição do escurecimento enzimático, do esbranquiçamento superficial e do ressecamento do tecido. Notas mais altas indicaram melhor qualidade visual e maior aceitabilidade do produto, de acordo com os critérios descritos na Tabela 1. As notas foram expressas como média $\pm$ desvio padrão das repetições e submetidas à análise estatística conforme descrito na seção de análise de dados.

Tabela 1. Escala visual utilizada para avaliar a aparência do inhame minimamente processado durante o armazenamento, considerando a intensidade do escurecimento enzimático, do esbranquiçamento superficial e do ressecamento do tecido.

Nota	Crítérios de avaliação visual
5 – Excelente	Superfície clara, homogênea e característica do inhame fresco. Ausência de escurecimento e esbranquiçamento. Tecido íntegro, sem sinais de ressecamento. Aparência visual totalmente aceitável.
4 – Boa	Leve escurecimento ou esbranquiçamento superficial. Alterações discretas e localizadas (na superfície ou bordas da rodela). Ausência de ressecamento perceptível. Aparência geral pouco comprometida.
3 – Aceitável	Escurecimento e/ou esbranquiçamento moderado. Alterações visíveis, porém não generalizadas. Início de ressecamento superficial. Produto ainda visualmente aceitável.
2 – Ruim	Escurecimento e/ou esbranquiçamento evidentes e mais disseminados. Bordas opacas ou escurecidas e aspecto seco. Ressecamento perceptível ao longo da superfície. Aparência visual comprometida.
1 – Muito ruim	Escurecimento intenso e generalizado. Esbranquiçamento acentuado associado a forte ressecamento. Tecido opaco, seco e visualmente deteriorado. Produto visualmente inaceitável.

As notas foram expressas como média $\pm$ desvio padrão das repetições e submetidas à análise estatística conforme descrito na seção de análise de dados.

A perda de massa (%) foi determinada pela diferença entre a massa inicial das amostras no tempo zero (T0) e as massas registradas nos demais tempos de armazenamento, conforme a Equação 1:

$$\text{Perda de massa (\%)} = \frac{(M_0 - M_t)}{M_0} \times 100$$

Em que M_0 corresponde à massa inicial da amostra e M_t à massa no tempo t .

4.2.3. Teor de ácido ascórbico, pH, Brix e acidez

O teor de ácido ascórbico foi determinado pelo método titulométrico de Tillmans, baseado na redução do corante 2,6-diclorofenolindofenol (DCPIP) pelo ácido ascórbico, conforme AOAC (2012), com adaptações. Foram pesados 2,5 g de amostra triturada, que foram homogeneizados com solução extratora de ácido oxálico a 1% (m/v). O extrato foi filtrado em gaze e o volume ajustado para 25 mL em balão volumétrico. O teor de ácido ascórbico foi calculado com base no fator de correção do titulante e expresso em mg de ácido ascórbico por 100 g de amostra fresca (mg 100 g⁻¹).

O pH foi determinado pesando-se 2,5 g de amostra triturada, homogeneizada com 25 mL de água destilada. A leitura foi realizada em peagâmetro digital modelo Tec-05 (Tecnal) (IAL, 2008).

O teor de sólidos solúveis totais foi determinado por refratometria, em refratômetro digital modelo HI 96801 (Hanna Instruments, Romênia). A amostra triturada foi envolvida em gaze e, em seguida, prensada para extração do suco, que foi aplicado diretamente no prisma do refratômetro. Os resultados foram expressos em °Brix (IAL, 2008).

A acidez total titulável foi determinada por titulometria. Foram pesados 2,5 g de amostra triturada e homogeneizados com 25 mL de água destilada. A suspensão foi titulada com solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 M, utilizando fenolftaleína como indicador (IAL, 2008). Os resultados foram expressos em g de ácido equivalente por 100 g de amostra fresca.

4.2.4. Índice de escurecimento (IE) e Índice de esbranquiçamento (IEB)

Os índices de escurecimento (IE) e de esbranquiçamento (IEB) foram calculados a partir dos valores de L^* , a^* e b^* , determinados em colorímetro Minolta CR300 (Konica Minolta Sensing, Osaka, Japan), usando o sistema CIELAB (Pathare *et al.*, 2013). As leituras foram realizadas em pontos distintos da superfície de cada rodela, e os valores médios foram utilizados para os cálculos.

O índice de escurecimento (IE) foi calculado de acordo com a Equação 2:

$$IE = \frac{100 (x - 0,31)}{0,17}$$

Em que:

$$x = \frac{a^* + 1,75L^*}{5,645L^* + a^* - 3,012b^*}$$

Valores mais elevados de IE, indicam maior intensidade de escurecimento.

O índice de esbranquiçamento (IEB) foi calculado a partir dos parâmetros L^* , a^* e b^* , conforme a Equação 3:

$$IEB = \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}}$$

Valores mais elevados de IEB indicam maior grau de esbranquiçamento da superfície.

4.2.5. Compostos fenólicos totais

Os compostos fenólicos totais foram determinados de acordo com Reyes *et al.* (2007), com modificações. A extração foi realizada por maceração de 2,0 g de amostra triturada, com adição de 10 mL de metanol. Os extratos foram incubados no escuro a 4 °C por 20 h e, em seguida, centrifugados a $12.857 \times g$ por 20 min a 2 °C. Uma alíquota de 150 µL do sobrenadante foi diluída em 2.400 µL de água destilada, seguida da adição de 150 µL do reagente de Folin–Ciocalteu (0,25 N). Após homogeneização por 3 min, foram adicionados 300 µL de carbonato de sódio (1,0 N). As amostras foram mantidas no escuro à temperatura ambiente por 2 h e a absorbância determinada a 725 nm. Os resultados foram expressos em mg de equivalente de ácido gálico por 100 g de massa fresca.

4.2.6. Atividade antioxidante por ABTS

A atividade antioxidante foi determinada pelo método do radical catiônico ABTS^{•+} [ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfônico)], conforme descrito por Nenadis *et al.* (2004), com adaptações. O radical ABTS^{•+} foi gerado pela reação entre a solução de ABTS (7 mM) e de persulfato de potássio (2,45 mM) e mantida no escuro à temperatura ambiente por 16 h. A solução foi posteriormente diluída em etanol até atingir absorbância de $0,700 \pm 0,050$ a 734 nm. A partir do extrato obtido no item 4.2.5., uma alíquota de 30 µL do extrato foi adicionada a 3,0 mL da solução de ABTS^{•+}.

As leituras foram realizadas após 6 minutos, a 734 nm, e o etanol foi utilizado como branco. A atividade antioxidante foi expressa em μmol equivalentes de Trolox por g de massa fresca ($\mu\text{mol TE g}^{-1}$), a partir de curva padrão de Trolox.

4.2.7. Perfil de compostos fenólicos

O perfil de compostos fenólicos foi determinado por cromatografia líquida de alta eficiência com detector de arranjo de diodos (RP-HPLC/DAD), de acordo com o método proposto por Lima *et al.* (2024), utilizando um sistema Shimadzu (Kyoto, Japão).

As amostras de inhame foram previamente trituradas e liofilizadas. Para a extração dos compostos fenólicos, 250 mg de amostra foram suspensos em 1,0 mL de metanol/HCl 1,5 N (85:15, v/v) e submetidos à agitação a 150 rpm por 30 min, à temperatura ambiente, em agitador tipo “shaker”, conforme descrito por Akissioe *et al.* (2003). Após esse período, a suspensão foi centrifugada a $7.000 \times g$ por 5 min, a temperatura ambiente. O sobrenadante foi coletado, filtrado em filtro de seringa PTFE (0,22 μm) e utilizado para a análise cromatográfica.

A fase móvel consistiu em ácido fosfórico 0,52% (v/v) em água (fase A) e metanol acidificado com ácido fosfórico 0,52% (v/v) (fase B). A vazão foi mantida em $0,8 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, com a coluna a 35 °C, e o volume de injeção foi de 20 μL . O gradiente de eluição foi programado da seguinte forma: 0 min: 5% B; 5 min: 23% B; 14 min: 26% B; 30 min: 50% B; 33–34 min: 80% B; 34,1–36,6 min: 100% B; 36,7 min: 5% B, seguido de 4,5 min de reequilíbrio.

A detecção foi realizada nos comprimentos de onda de 220, 280, 320, 360 e 520 nm. A identificação e quantificação dos compostos fenólicos foram realizadas por comparação com padrões externos, considerando os tempos de retenção, a similaridade espectral e as curvas de calibração. Padrões fenólicos comerciais (catequina, luteolina, ácido gálico, ácido sirínico, naringina, hesperidina, ácido trans-cinâmico, naringenina, ácido clorogênico, ácido *p*-cumárico, ácido ferúlico, quercetina-3-glicosídeo, rutina, miricetina e quercetina) foram analisados individualmente sob as mesmas condições cromatográficas e utilizados para a identificação dos compostos presentes nas amostras. As análises foram realizadas em triplicata.

4.2.8. Atividade da enzima PPO

A atividade da PPO foi determinada de acordo com Simões *et al.* (2015), com adaptações. Para a extração, 0,25 g de amostra foram homogeneizados em 3 mL de tampão fosfato de sódio 0,2 M (pH 6,0), previamente resfriado a 4 °C. Em seguida, o material foi centrifugado a $12.857 \times g$ por 20 min, a 4 °C, e o sobrenadante utilizado como extrato enzimático.

A atividade da PPO foi avaliada pela adição de 25 μL do extrato a um meio de reação contendo 1,5 mL de catecol e 1,375 mL de tampão fosfato de sódio 0,2 M (pH 6,0). O aumento da absorbância foi monitorado a 425 nm, a 30 °C, com leituras a cada 30 s por 3 minutos. A atividade enzimática foi expressa em unidades de PPO g^{-1} de massa fresca ($\text{U g}^{-1}\text{MF}$).

4.2.9. Atividade das enzimas SOD e CAT

A atividade da SOD foi determinada de acordo com o método descrito por Shi *et al.* (2007), com adaptações. Para a extração enzimática, 0,25 g de tecido foram homogeneizados em 6 mL de tampão fosfato de sódio 0,1 M (pH 7,0), em seguida, centrifugados a $12.857 \times g$ por 20 min, a 4 °C e o sobrenadante utilizado como extrato enzimático.

Para a reação, 100 μL do extrato foram adicionados a 1.660 μL de tampão fosfato de sódio 50 mM (pH 7,8), contendo 1,0 μM de EDTA, 13 mM de metionina, 40 μL de riboflavina (1,0 mM) e 200 μL de nitro blue tetrazolium (NBT) (750 μM). As misturas reacionais foram expostas à luz incidente (lâmpada fluorescente de 18 W) por 5 min, e as leituras foram realizadas a 560 nm. A atividade da SOD foi determinada com base na inibição da fotoredução do NBT, definindo-se uma unidade de atividade (UA) como a quantidade de enzima necessária para inibir 50% da reação. Os resultados foram expressos em $\text{UA s}^{-1} \text{g}^{-1}$ de massa fresca.

A atividade da catalase (CAT) foi determinada conforme Pukacka e Ratajczak (2005). Uma alíquota de 300 μL do sobrenadante foi adicionada a 2,7 mL de tampão fosfato de sódio 50 mM (pH 7,0) contendo 20 mM de H_2O_2 . A reação foi conduzida a 30 °C e monitorada pela diminuição da absorbância a 240 nm durante 3 min, com leituras a cada 30 s. A atividade enzimática foi calculada utilizando o coeficiente de extinção molar de 36 $\text{M}^{-1} \text{cm}^{-1}$ para H_2O_2 e expressa em nmol de $\text{H}_2\text{O}_2 \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ de massa fresca.

4.2.10. Análise estatística

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 6 (correspondente às regiões do tubérculo (AP, ME e DI) e aos tratamentos com ácido ascórbico (-AA e +AA)) $\times$ 4 (tempos de armazenamento (0, 5, 10 e 15 dias), com três repetições por tratamento).

Todos os dados foram analisados pelo programa SISVAR versão 5.8 e expressos como médias $\pm$ erro padrão. Foi realizada análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$).

4.3. Resultados

4.3.1. Análise visual e perda de massa

A análise visual evidenciou que o escurecimento das rodela de inhame teve início principalmente ao redor dos feixes vasculares, intensificando-se progressivamente com o tempo (Figura 2A). A região apical (AP) apresentou escurecimento intenso, distribuído na superfície das rodela desde o início do armazenamento, independentemente da aplicação de ácido ascórbico, resultando em baixos escores na análise visual. As regiões medial (ME) e distal (DI) apresentaram escurecimento a partir do quinto dia, nas áreas próximas aos feixes vasculares e nas bordas, com posterior intensificação com escores acima do limite aceitável até o quinto dia. Nessas regiões, a aplicação de ácido ascórbico atenuou o escurecimento, mantendo escores acima do limite aceitável até o décimo dia. O esbranquiçamento superficial foi observado em todas as regiões a partir do quinto dia.

A perda de massa aumentou progressivamente ao longo do armazenamento em todas as amostras (Figura 2B), sendo mais pronunciada na região distal (DI), intermediária em AP (+AA) e menor na região medial (ME).

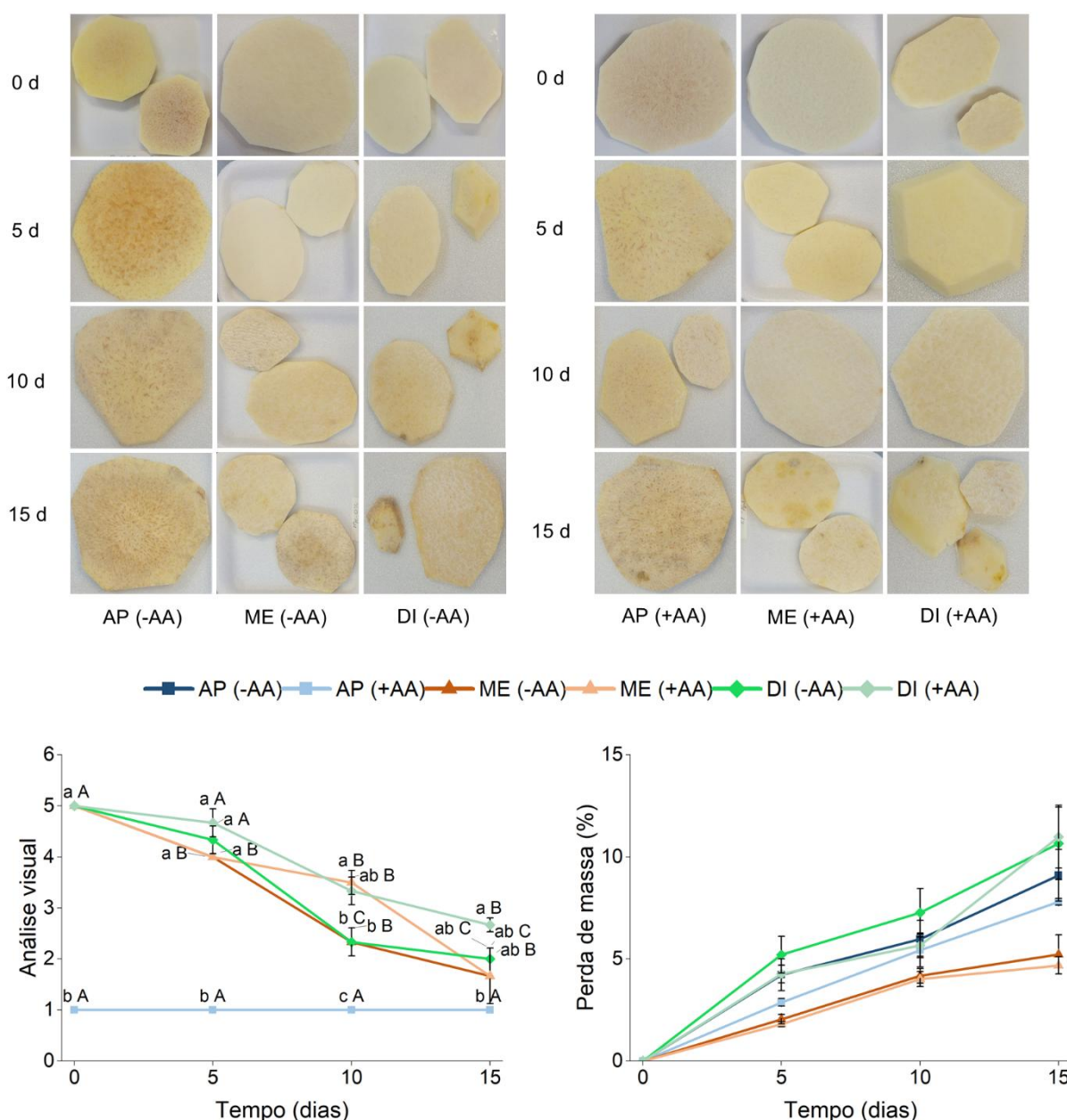


Figura 2. Aparência, análise visual (A) e perda de massa (B) de rodela de inhame sem AA e com AA, conservadas a 5 ± 2 °C. AP (-AA) = região apical sem AA; AP (+AA) = região apical com 1% de AA; ME (-AA) = região medial sem AA; ME (+AA) = região medial com 1% de AA; DI (-AA) = região distal sem AA; DI (+AA) = região distal com 1% de AA; AA = ácido ascórbico. As barras representam o erro padrão das médias ($n = 3$). Letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre tratamentos no mesmo tempo, e letras maiúsculas diferentes indicam diferenças ao longo do tempo para o mesmo tratamento (teste de Tukey, $p < 0,05$).

4.3.2. Teor de ácido ascórbico, pH, Brix e acidez

Os teores de ácido ascórbico diferiram significativamente entre os tratamentos no início do armazenamento, com os maiores valores observados em DI (+AA) e os menores em AP (+AA) (Tabela 2). As amostras da região apical (AP) apresentaram queda acentuada nos teores de ácido ascórbico no primeiro dia de armazenamento.

Verificou-se variação nos valores de pH ao longo do período de armazenamento para todos os tratamentos avaliados (Tabela 2). No tempo inicial, os valores de pH foram semelhantes entre os tratamentos, com exceção de DI (+AA), que apresentou pH significativamente menor.

Tabela 2. Teor de ácido ascórbico e pH de rodela de inhame provenientes das regiões apical (AP), medial (ME) e distal (DI), sem (-AA) e com (+AA) tratamento com ácido ascórbico, conservadas a 5 ± 2 °C por 15 dias.

Tratamentos		Tempo (dias)			
		0	5	10	15
Ácido ascórbico (mg/100g)	AP (-AA)	0,22 $\pm$ 0,18 cd A	0,66 $\pm$ 0,003 b A	0,00 $\pm$ 0,00 a A	0,00 $\pm$ 0,00 a A
	AP (+AA)	0,00 $\pm$ 0,00 d A	1,52 $\pm$ 0,18 b A	0,00 $\pm$ 0,00 a A	0,00 $\pm$ 0,00 a A
	ME (-AA)	1,97 $\pm$ 0,31 cd A	1,10 $\pm$ 0,36 b AB	0,00 $\pm$ 0,00 a B	0,00 $\pm$ 0,00 a B
	ME (+AA)	13,93 $\pm$ 0,82 b A	1,30 $\pm$ 0,30 b B	0,00 $\pm$ 0,00 a B	0,88 $\pm$ 0,71 a B
	DI (-AA)	2,17 $\pm$ 0,17 c A	1,53 $\pm$ 0,71 b AB	0,00 $\pm$ 0,00 a B	1,96 $\pm$ 0,30 a A
	DI (+AA)	29,84 $\pm$ 0,74 a A	8,49 $\pm$ 0,93 a B	0,66 $\pm$ 0,0011 a C	0,43 $\pm$ 0,35 a C
pH	AP (-AA)	7,01 $\pm$ 0,0054 a A	6,62 $\pm$ 0,034 ab B	5,74 $\pm$ 0,068 ab C	5,53 $\pm$ 0,035 c D
	AP (+AA)	6,95 $\pm$ 0,021 a A	6,43 $\pm$ 0,022 c B	5,61 $\pm$ 0,029 b C	5,53 $\pm$ 0,04 c C
	ME (-AA)	6,92 $\pm$ 0,015 a A	6,73 $\pm$ 0,0072 a B	5,9 $\pm$ 0,031 a C	5,91 $\pm$ 0,065 ab C
	ME (+AA)	6,88 $\pm$ 0,012 ab A	6,63 $\pm$ 0,05 ab B	5,87 $\pm$ 0,023 a C	5,95 $\pm$ 0,047 a C
	DI (-AA)	6,84 $\pm$ 0,015 ab A	6,62 $\pm$ 0,056 ab B	5,73 $\pm$ 0,031 ab C	5,80 $\pm$ 0,010 ab C
	DI (+AA)	6,71 $\pm$ 0,029 b A	6,46 $\pm$ 0,019 bc B	5,79 $\pm$ 0,012 a C	5,77 $\pm$ 0,043 b C

Médias $\pm$ erro padrão (n = 3). Letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa na coluna entre tratamentos no mesmo tempo, e letras maiúsculas diferentes indicam diferença significativa na linha entre tempos dentro do mesmo tratamento, pelo teste de Tukey (p < 0,05). AA = ácido ascórbico.

Os teores de sólidos solúveis (°Brix) foram maiores nas amostras da região apical (AP) em comparação às demais regiões e verificou-se aumento progressivo em todas as amostras ao longo do armazenamento (Tabela 3). Quanto à acidez titulável, a região distal (DI) apresentou maiores valores em comparação às demais regiões. Além disso, verificou-se aumento progressivo da acidez em todos os tratamentos ao longo do período de armazenamento (Tabela 3).

Tabela 3. Efeito dos tratamentos e do tempo sobre o teor de sólidos solúveis totais (°Brix) e acidez titulável de rodela de inhame provenientes das regiões apical (AP), medial (ME) e distal (DI), sem (-AA) e com (+AA) tratamento com ácido ascórbico, durante o armazenamento a 5 ± 2 °C.

Tratamento	Brix	Acidez
AP (-AA)	10,94 $\pm$ 0,68 a	0,14 $\pm$ 0,0073 b
AP (+AA)	11,13 $\pm$ 0,70 a	0,15 $\pm$ 0,0088 b
ME (-AA)	7,33 $\pm$ 0,49 b	0,15 $\pm$ 0,0065 b
ME (+AA)	7,19 $\pm$ 0,39 b	0,16 $\pm$ 0,0092 b
DI (-AA)	7,22 $\pm$ 0,25 b	0,20 $\pm$ 0,0051 a
DI (+AA)	8,33 $\pm$ 0,73 b	0,20 $\pm$ 0,0035 a
Tempo		
0	7,46 $\pm$ 0,52 C	0,105 $\pm$ 0,00548 D
5	7,95 $\pm$ 0,59 BC	0,156 $\pm$ 0,00724 C
10	9,16 $\pm$ 0,71 AB	0,182 $\pm$ 0,00733 B
15	9,99 $\pm$ 0,33 A	0,219 $\pm$ 0,00684 A

Médias $\pm$ erro padrão (n = 3), obtidas a partir da média dos tempos de armazenamento. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa entre tratamentos pelo teste de Tukey (p < 0,05). AA = ácido ascórbico.

4.3.3. Índices de escurecimento, esbranquiçamento, compostos fenólicos e ABTS

As amostras da região distal (DI) exibiram os menores valores de índice de escurecimento (IE) ao longo do armazenamento, enquanto as amostras da região apical (AP) apresentaram maior IE (Figura 3A). As amostras da região medial (ME) apresentaram comportamento intermediário, com valores de IE mais próximos aos observados para a CB.

Além do escurecimento, realizou-se também a avaliação do índice de esbranquiçamento (IEB) das amostras (Figura 3B). O IEB mostrou que as amostras de DI apresentaram os maiores

valores, seguidas por ME, enquanto AP exibiram os menores valores. Porém, ao longo do período de armazenamento nenhum tratamento apresentou alterações significativas nesse parâmetro.

Os teores de compostos fenólicos totais variaram significativamente em função da região do tubérculo, do tempo de armazenamento e da aplicação de ácido ascórbico (AA) (Figura 3C). De modo geral, observou-se aumento dos teores de compostos fenólicos totais ao longo do armazenamento em todas as regiões avaliadas, sendo esse aumento mais pronunciado nas amostras tratadas com ácido ascórbico. Na região apical (AP), não foram observadas diferenças entre os tratamentos no tempo inicial; no entanto, ao longo do armazenamento, as amostras tratadas com ácido ascórbico apresentaram maiores teores de compostos fenólicos em comparação às não tratadas, mantendo essa diferença até o final do período. Na região medial (ME), houve um aumento no teor de compostos fenólicos em ambos os tratamentos ao longo do armazenamento, porém as amostras tratadas com ácido ascórbico apresentaram valores superiores desde o início do armazenamento. Na região distal (DI), as amostras tratadas com ácido ascórbico apresentaram teores iniciais mais elevados de compostos fenólicos, enquanto as amostras não tratadas com ácido ascórbico mostraram aumento mais expressivo ao longo do armazenamento, reduzindo as diferenças entre os tratamentos.

A atividade antioxidante, determinada pelo método ABTS, apresentou comportamento distinto entre regiões do tubérculo, tratamentos com ácido ascórbico e tempo de armazenamento, indicando respostas metabólicas regionalmente específicas ao estresse de processamento (Figura 3D). Na região apical (AP), observou-se aumento da atividade antioxidante ao longo do armazenamento em ambos os tratamentos, com resposta mais pronunciada nas amostras tratadas com ácido ascórbico, porém tornaram-se estatisticamente semelhantes entre si ao final do período de armazenamento. Em contraste, a região medial (ME) não apresentou variação significativa da atividade antioxidante ao longo do tempo em nenhum dos tratamentos. Na região distal (DI), as amostras não tratadas com ácido ascórbico apresentaram aumento progressivo da atividade antioxidante, enquanto aquelas tratadas mantiveram valores mais estáveis, resultando em valores semelhantes entre os tratamentos ao final do armazenamento.

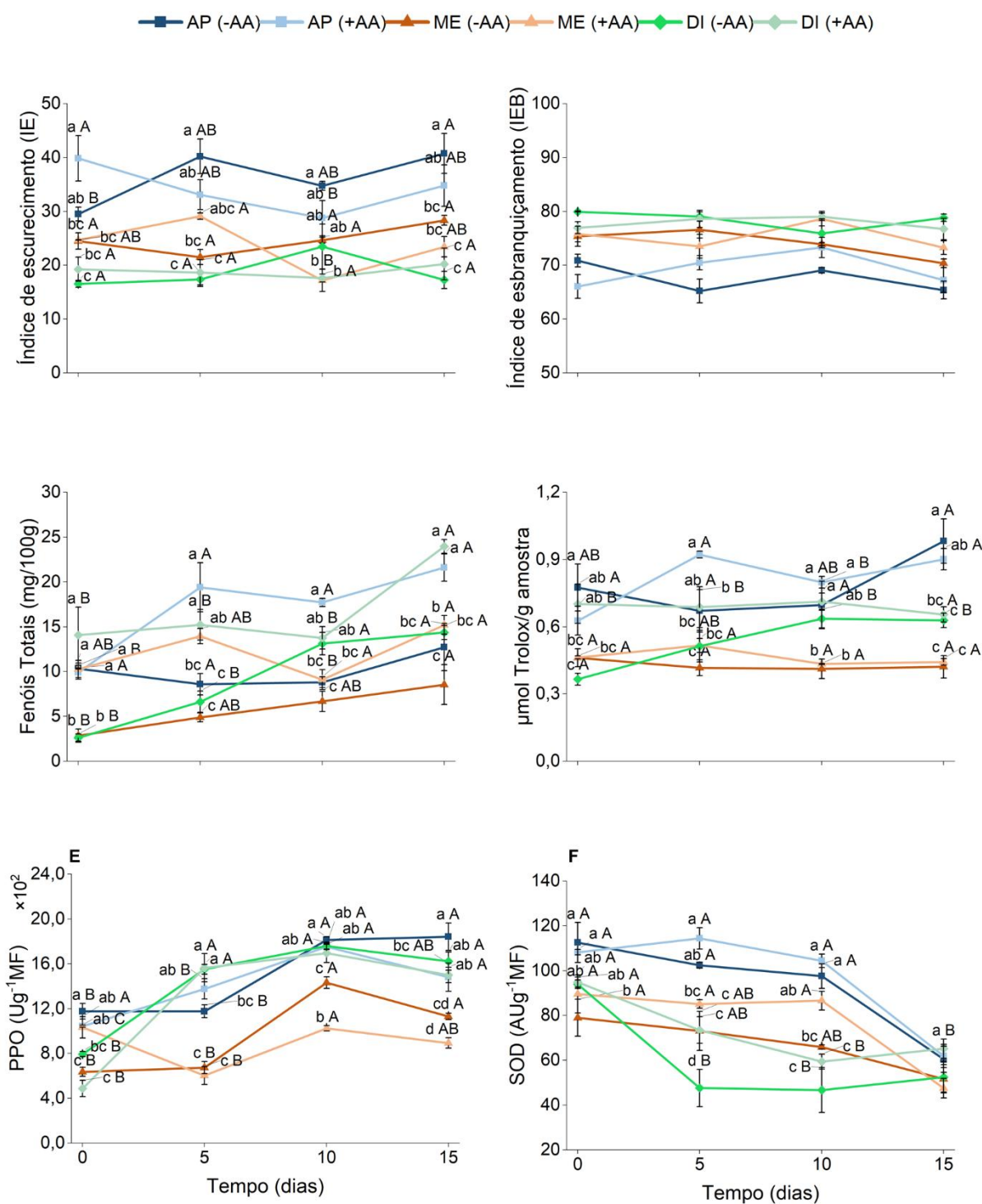


Figura 3. Índice de escurecimento (IE) (A), índice de esbranquiçamento (IEB) (B), fenóis totais (C), atividade antioxidante (ABTS) (D), PPO (E) e SOD (F) de rodela de inhame sem AA e com AA, conservadas a 5 ± 2 °C. AP (-AA) = região apical sem AA; AP (+AA) = região apical com 1% de AA; ME (-AA) = região medial sem AA; ME (+AA) = região medial com 1% de AA; DI (-AA) = região distal sem AA; DI (+AA) = região distal com 1% de AA; AA = ácido ascórbico. As barras representam o erro padrão das médias (n = 3). Letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre tratamentos no mesmo tempo, e letras maiúsculas diferentes indicam diferenças ao longo do tempo para o mesmo tratamento (teste de Tukey, p < 0,05).

4.3.4. Atividade das enzimas PPO, SOD e CAT

Nas regiões apical (AP) e distal (DI), a atividade da PPO aumentou ao longo do armazenamento, com valores inicialmente elevados em AP e incremento progressivo, enquanto em DI o aumento ocorreu a partir do quinto dia, mantendo-se estável após esse período (Figura 3F). Na região medial (ME), observou-se comportamento distinto entre os tratamentos, com redução da atividade em ME (+AA) ao longo do tempo, resultando nos menores valores ao final do armazenamento.

A atividade da SOD manteve-se relativamente estável nas regiões apical (AP) e medial (ME) até o décimo dia, com redução ao final do armazenamento. Nessas regiões, as amostras tratadas com ácido ascórbico apresentaram valores ligeiramente superiores àqueles sem AA (-AA). Em contraste, na região distal (DI), a atividade da SOD diminuiu precocemente, mantendo-se reduzida ao longo do armazenamento, embora com valores mais elevados nas amostras tratadas com AA.

A atividade da catalase (CAT) não foi detectada nas amostras de inhame ao longo de todo o período de armazenamento, nas condições experimentais adotadas.

4.3.5. Perfil de compostos fenólicos

A análise cromatográfica por HPLC permitiu a identificação de diferentes compostos fenólicos nas amostras de inhame avaliadas no tempo zero e aos 15 dias de armazenamento (Tabela 4). Dentre os compostos analisados, a catequina foi o metabólito mais frequentemente quantificado, apresentando concentrações acima do limite de quantificação na maioria das amostras, independentemente da região, do tempo de armazenamento e da aplicação de ácido ascórbico.

A luteolina foi detectada em níveis inferiores ao limite de quantificação ou não detectada, variando conforme a região e o tempo de armazenamento. De forma semelhante, quercetina-3-glicosídeo e miricetina foram majoritariamente detectadas em concentrações inferiores ao limite de quantificação, sendo quantificáveis apenas em amostras específicas da região apical (AP), tanto no tempo inicial quanto no 15º dia de armazenamento.

O ácido *p*-cumárico foi identificado exclusivamente no dia 15, apresentando concentrações acima do limite de quantificação em ME e DI, independentemente da aplicação de ácido ascórbico. O ácido ferúlico foi detectado apenas em parte das amostras no tempo 15, especificamente em AP e DI, sempre em concentrações inferiores ao limite de quantificação. O ácido clorogênico foi quantificado exclusivamente em DI no final do armazenamento, com valores mais elevados em DI (+AA).

Compostos fenólicos detectados em concentrações inferiores ao limite de quantificação (<LQ) foram reportados por indicarem a presença efetiva do metabólito no tecido, ainda que em níveis muito baixos. A transição entre condições de não detecção (ND), detecção abaixo do limite de quantificação (<LQ) e posterior quantificação reflete alterações no perfil fenólico associadas ao armazenamento e à região do tubérculo, sendo biologicamente relevante para a caracterização da resposta metabólica do inhame minimamente processado.

Tabela 4. Perfil de compostos fenólicos identificados por HPLC em diferentes regiões do inhame minimamente processado*.

Região	- AA		+ AA	
	T0	T15	T0	T15
AP				
Catequina	16,64 ± 5,01	9,57 ± 2,28	10,39 ± 1,53	16,16 ± 4,05
Luteolina	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Ácido Clorogênico	ND	ND	ND	ND
Ácido <i>p</i> -cumárico	ND	<LQ	ND	<LQ
Ácido ferúlico	ND	<LQ	ND	<LQ
Quercetina-3-glicosídeo	8,73 ± 2,01	7,82 ± 0,02	<LQ	13,8 ± 3
Miricetina	7,35 ± 2,1	5,52 ± 0,28	<LQ	8,84 ± 1,16

ME				
Catequina	6,59 ± 1,1	<LQ	<LQ	<LQ
Luteolina	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Ácido Clorogênico	ND	ND	ND	ND
Ácido <i>p</i> -cumárico	ND	5,95 ± 2,19	ND	6,08 ± 0,96
Ácido ferúlico	ND	ND	ND	ND
Quercetina-3-glicosídeo	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Miricetina	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
DI				
Catequina	<LQ	4,24 ± 0,24	<LQ	<LQ
Luteolina	<LQ	ND	<LQ	ND
Ácido Clorogênico	ND	3,48 ± 0,45	ND	8,51 ± 0,15
Ácido <i>p</i> -cumárico	ND	13,14 ± 0,18	ND	6,4 ± 1,24
Ácido ferúlico	ND	<LQ	ND	<LQ
Quercetina-3-glicosídeo	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Miricetina	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ

*Valores expressos em mg/g de massa seca, como média ± desvio padrão. AP: região apical; ME: região medial; DI: região distal. T0: tempo inicial; T15: 15 dias de armazenamento. -AA: amostras sem aplicação de ácido ascórbico; +AA: amostras tratadas com ácido ascórbico. ND: não detectado; LQ: limite de quantificação do método cromatográfico; <LQ: detectado abaixo do limite de quantificação do método. LQ variaram entre 0,28 e 2,63 mg L⁻¹, dependendo do composto.

4.4. Discussão

A qualidade visual do inhame minimamente processado diminuiu progressivamente ao longo do armazenamento nas regiões medial (ME) e distal (DI), enquanto as amostras da região apical (AP) apresentaram redução acentuada da qualidade visual imediatamente após o corte. A aplicação de ácido ascórbico retardou a perda de qualidade visual, resultando em notas significativamente mais elevadas no décimo dia nas regiões ME e DI, quando comparadas às amostras sem AA, indicando manutenção da aceitabilidade por maior período. Coelho Júnior *et al.* (2019) relataram escores de qualidade visual acima do limite aceitável até o 12º dia de armazenamento, em inhame armazenado a 5 °C, valores superiores aos observados no presente estudo para as regiões ME e DI sem adição de ácido ascórbico.

A perda de massa aumentou de forma progressiva e significativa em todos os tratamentos ao longo do tempo. As amostras da região medial (ME) exibiram as menores perdas, indicando maior capacidade de retenção de água, enquanto as amostras da região distal (DI) apresentaram as maiores perdas. Esse fato pode ser explicado, ao menos em parte, por fatores físicos e morfo-anatômicos. As rodela provenientes dessa região apresentaram menor diâmetro, o que exigiu maior número de unidades por bandeja, aumentando a área superficial total exposta ao ambiente e, conseqüentemente, a taxa de evaporação. Além disso, a região DI corresponde a tecidos mais jovens, caracterizados por maior teor de água e paredes celulares mais finas, o que favorece a perda de massa durante o armazenamento (Degbeu *et al.*, 2019). Hu *et al.* (2021) verificaram perda de massa gradual em batatas minimamente processadas conservadas por seis dias a 4 °C. Resultados semelhantes foram obtidos por Zhou *et al.* (2021), que notaram crescente perda de massa em batatas minimamente processadas durante todo o período de armazenamento, porém esta foi mais acentuada nas amostras sem tratamento com AA quando comparadas a amostras submetidas ao tratamento com AA.

O ácido ascórbico foi rapidamente consumido na região AP no tempo inicial e reduzido nas regiões ME e DI até o dia cinco, mesmo nos tratamentos com aplicação exógena de ácido ascórbico, indicando utilização metabólica do antioxidante em resposta ao estresse do

processamento. No entanto, em algumas amostras das regiões ME (-AA) e DI (-AA), os teores de ácido ascórbico se mantiveram detectáveis ao longo do armazenamento, o que pode ser atribuído à preservação do ácido ascórbico endógeno presente no tecido.

Os valores de pH, no tempo inicial, foram semelhantes entre os tratamentos, com exceção de DI (+AA), que apresentou pH significativamente menor. Esse comportamento pode ser explicado pelo menor tamanho das rodela provenientes dessa região do tubérculo e, consequentemente, pelo maior número de unidades por bandeja, o que pode ter favorecido maior retenção do ácido ascórbico. Esses resultados corroboram os de Oluoha (1988), que não observaram diferenças significativas no pH entre as regiões morfológicas de inhames *Dioscorea rotundata* e *D. alata* recém-colhidos. Em contraste, após armazenamento prolongado (seis meses), notaram diferenças de pH entre a região DI e as demais.

O teor de sólidos solúveis totais (°Brix) e a acidez titulável apresentaram variações graduais e relativamente homogêneas entre regiões e tempos de armazenamento, sem evidência de efeito protetor do ácido ascórbico sobre esses parâmetros. As amostras da região apical (AP) apresentaram maiores teores de sólidos solúveis (°Brix) quando comparadas aos demais tratamentos, indicando que o teor de sólidos solúveis é intrinsecamente mais elevado nessa região do tubérculo. Em relação ao período de armazenamento, observou-se aumento progressivo dos valores de °Brix, sugerindo concentração de sólidos solúveis, provavelmente associada à perda de água e, possivelmente, à degradação de polímeros estruturais. A acidez titulável nas amostras da região distal (DI) foi significativamente mais elevada em comparação às demais regiões. Além disso, verificou-se aumento progressivo da acidez em todos os tratamentos ao longo do período de armazenamento, indicando acidificação dos tecidos, a qual pode estar relacionada ao estresse oxidativo e ao metabolismo induzido pelo corte, e/ou à ação de microrganismos durante o armazenamento. Tendência semelhante foi observada por Sharma *et al.* (2018) em cenouras minimamente processadas, reforçando a ocorrência de alterações físico-químicas durante o armazenamento.

Os índices de escurecimento e de esbranquiçamento foram utilizados de forma complementar para caracterizar as alterações visuais das rodela de inhame entre as regiões analisadas e durante o armazenamento. Enquanto o índice de escurecimento reflete predominantemente a formação de pigmentos escuros resultantes da oxidação de compostos fenólicos, o índice de esbranquiçamento está associado a alterações estruturais do tecido, como perda de água e colapso celular, que aumentam a dispersão da luz. Assim, os valores obtidos por colorimetria representam a resultante de dois processos opostos: o escurecimento induzido por oxidação fenólica e o clareamento decorrente do esbranquiçamento, limitando o uso dessa análise para avaliação de escurecimento e esbranquiçamento em inhame minimamente processado.

O estresse oxidativo induzido pelo processamento mínimo promove a geração de EROs, que desestabilizam a homeostase redox celular e ativam respostas metabólicas direcionadas para o combate ao estresse (Meitha *et al.*, 2020; Decros *et al.*, 2019). No presente estudo, as respostas enzimáticas (PPO, SOD e CAT) e antioxidante (ABTS), juntamente com o teor de fenóis totais revelam uma resposta redox fortemente dependente da região analisada e do tratamento empregado.

Em AP, o escurecimento imediato após o corte, a rápida depleção do ácido ascórbico e a elevada atividade inicial da PPO indicam maior suscetibilidade à oxidação fenólica. Paralelamente, a elevada atividade da SOD e o aumento progressivo dos compostos fenólicos e da atividade antioxidante sugerem que o tecido ativou precocemente a rota dos fenilpropanoides, como mecanismo compensatório frente ao estresse oxidativo. A rápida oxidação do ácido ascórbico nessa região indica que a defesa antioxidante inicial esteve associada principalmente à atuação enzimática, sendo posteriormente comprometida com o avanço do armazenamento, como evidenciado pela redução da SOD ao final do armazenamento. O tamanho e a densidade dos feixes vasculares nessa região também podem ter contribuído para uma maior difusão de EROs e exposição dos compostos fenólicos à PPO,

intensificando o escurecimento nessa região. De acordo com Foyer & Noctor (2005), o H_2O_2 pode se propagar através do sistema vascular, permanecendo por mais tempo no tecido.

Em ME, observou-se comportamento metabólico baixo em comparação às demais regiões, com atividade antioxidante estável ao longo do tempo. A baixa atividade da PPO, associada à atividade contínua da SOD até o décimo dia, indica menor intensidade de estresse oxidativo nessa região em comparação com CB, o que pode ter contribuído para uma ativação mais moderada da rota fenilpropanoide e, conseqüentemente, em menores teores finais de fenólicos, particularmente em ME (-AA).

Na região DI, o pico de atividade da PPO no quinto dia, concomitante à queda abrupta da SOD, caracteriza um ponto crítico de transição metabólica, no qual a defesa antioxidante enzimática se torna insuficiente e favorece a oxidação de compostos fenólicos. Esse comportamento indica que, após a resposta inicial ao estresse induzido pelo processamento, o tecido entra em uma fase de maior suscetibilidade ao dano oxidativo, com intensificação das reações catalisadas pela PPO (Apel & Hirt, 2004; Gill & Tuteja, 2010). Em DI (-AA), o aumento linear do teor de fenólicos ($\approx 5\times$ entre o início e o final do armazenamento), associado à elevação progressiva da atividade antioxidante, sugere que a biossíntese superou a taxa de oxidação, configurando uma resposta compensatória à perda da defesa enzimática. Em DI (+AA), a estabilidade dos fenólicos até o décimo dia, seguida de pico tardio no final do armazenamento, juntamente com a atividade antioxidante constante, indica que o ácido ascórbico atuou como antioxidante, retardando a mobilização do metabolismo fenólico (Tomás-Barberán & Espín, 2001). A magnitude dessas respostas em DI é amplificada pela condição fisiológica do tecido. Tecidos jovens apresentam maior plasticidade metabólica, maior geração de ROS e maior responsividade das rotas antioxidantes e do metabolismo fenólico, atingindo mais rapidamente o limiar de tolerância ao estresse e promovendo a transição da defesa enzimática para a defesa não enzimática baseada em fenólicos (Noctor *et al.*, 2018).

Em tecidos vegetais, a CAT e a POD, em conjunto com a SOD, integram o sistema enzimático antioxidante responsável pela remoção de EROs. No entanto, no inhame, a contribuição da CAT para a detoxificação de H_2O_2 parece ser limitada. Coelho Júnior *et al.* (2019) investigaram a modulação das atividades enzimáticas e de metabólitos do metabolismo oxidativo e sua relação com a evolução do escurecimento na superfície e na região interna de fatias de inhame fresco cortado. Os autores observaram redução progressiva do teor de fenóis solúveis ao longo do armazenamento, em contraste com o aumento observado neste estudo. Quanto às enzimas relacionadas ao estresse oxidativo e ao escurecimento, eles verificaram aumento significativo da atividade de PPO até o 6º dia, elevação gradual da atividade de SOD e incremento expressivo da atividade de POD até o 9º dia. Essas informações convergem com os resultados observados neste trabalho para PPO e SOD nas regiões AP e ME. Em relação à catalase (CAT), embora Coelho Júnior *et al.* (2019) tenham observado baixa atividade desta enzima, no presente estudo a CAT permaneceu abaixo do limite de detecção, em todas as amostras, ao longo do período de análise. Morais *et al.* (2021) relataram que a atividade de POD em inhame é, em média, aproximadamente 400 vezes superior à da CAT, indicando a predominância de peroxidase na regulação do estado redox desse tecido. Essa predominância tem sido associada à ampla distribuição subcelular da POD, presente na parede celular, citosol e organelas, ao passo que a CAT apresenta localização mais restrita (Al-Hajaya *et al.*, 2022; Trenz & Margis-Pinheiro, 2021).

A análise cromatográfica por HPLC permitiu a caracterização qualitativa e quantitativa dos compostos fenólicos nas diferentes regiões do inhame minimamente processado nos tempos inicial e 15 dias de armazenamento, evidenciando alterações metabólicas induzidas pelo estresse de corte e pelo armazenamento. De modo geral, observou-se a presença de catequina (único composto quantificado em praticamente todas as amostras), luteolina, quercetina-3-glicosídeo e miricetina, presentes independentemente do tempo e da região analisada. Em contraste, compostos como o ácido *p*-cumárico, o ácido ferúlico (detectado em AP e DI) e o ácido clorogênico (detectado apenas em DI), foram detectados ou quantificados

predominantemente aos 15 dias. Esses resultados podem estar associados ao estresse devido ao processamento mínimo, resultando na ativação da rota dos fenilpropanoides através da ativação da enzima fenilalanina amônia-liase (FAL), direcionando o fluxo metabólico para a formação de ácidos hidroxicinâmicos e seus ésteres, precursores diretos de compostos antioxidantes e de polímeros de defesa estrutural, como a lignina (Dixon & Paiva, 1995; Vogt, 2010). Segundo Dixon & Paiva (1995), diversos fenilpropanoides simples (como os ácidos *p*-cumárico, cafeico, ferúlico e sinápico e cumarinas simples) são sintetizados a partir do cinamato. Estes raramente se acumulam em altos níveis dentro das células vegetais; em vez disso, são geralmente conjugados a açúcares, carboidratos da parede celular ou ácidos orgânicos (por exemplo, ácido clorogênico).

O acúmulo tardio de ácido *p*-cumárico em T15 reforça sua associação com processos de reforço da parede celular e com a formação de barreiras físicas, mecanismos clássicos de resposta estrutural ao estresse pós-processamento (Islam *et al.*, 2018). Paralelamente, a presença localizada de ácido clorogênico em DI sugere intensa ativação da rota do ácido chiquímico sob condições de estresse oxidativo prolongado (Soviguidi *et al.*, 2022). Segundo Soviguidi *et al.* (2022), o ácido clorogênico atua diretamente na eliminação de EROs e na redução da peroxidação lipídica, contribuindo para a manutenção da integridade das membranas celulares. Além disso, mecanismos de resistência induzida envolvem a modificação química da parede celular, especialmente por meio da esterificação de polissacarídeos da parede com ácidos hidroxicinâmicos, como o ácido *p*-cumárico, o ácido ferúlico e o ácido sinápico, os quais promovem maior rigidez e menor permeabilidade do tecido (Islam *et al.*, 2018). Entre os fenilpropanoides, o ácido *p*-cumárico ocupa posição central, atuando como precursor-chave para a biossíntese de flavonoides (via naringenina) e de ácidos hidroxicinâmicos conjugados, incluindo o ácido clorogênico (*p*-cumaroilquínico), integrando as rotas de defesa química e estrutural do tecido.

A detecção de quercetina-3-glicosídeo e miricetina evidencia uma regulação diferencial da via dos flavonoides, possivelmente modulada pela intensidade do estresse e pelo balanço redox celular durante o crescimento do inhame ou no período pós-colheita. Flavonóis glicosilados atuam não apenas como antioxidantes diretos, mas também como moduladores de sinalização redox, interagindo com EROs e regulando a expressão de genes de defesa (Zhang *et al.*, 2017).

Em seus estudos, Akissoe *et al.* (2003) analisaram inhames *D. rotundata* e *D. alata* por HPLC. Diversos picos foram detectados, porém apenas a catequina e o ácido ferúlico foram confirmados. Guan *et al.* (2024) investigaram os efeitos de diferentes concentrações de chá (rico em polifenóis) sobre o escurecimento e a qualidade de batatas frescas-cortadas. Observou-se correlação positiva entre o índice de escurecimento e os níveis de ácido cafeico, ácido *p*-cumárico e ácido ferúlico, enquanto o ácido clorogênico apresentou correlação negativa significativa. Esses resultados indicam que compostos fenólicos específicos, como ácido cafeico, ácido *p*-cumárico e ácido ferúlico, contribuem para a promoção do escurecimento enzimático, ao passo que o ácido clorogênico exerce efeito inibitório sobre esse processo. Zhou *et al.* (2021), ao analisarem o efeito do AA em batatas conservadas por 4 dias a 20 °C, observaram aumento dos teores de ácido cafeico e *p*-cumárico ao longo do armazenamento, porém esse aumento foi mais significativo em batatas controle (não tratadas). Comportamento semelhante foi observado para o teor de ácido ferúlico, detectado após 2 dias de armazenamento. Os autores sugeriram que os tratamentos com AA reduziram o acúmulo de lignina durante o armazenamento, e que esse efeito pode ser atribuído à diminuição da atividade das enzimas envolvidas na rota dos fenilpropanoides e, conseqüentemente, aos níveis mais baixos de produtos derivados do metabolismo dos fenilpropanoides.

A presença de compostos fenólicos em níveis <LQ no início do armazenamento e sua posterior quantificação no dia 15 reforçam a hipótese de que o armazenamento pós-processamento desencadeia uma reprogramação metabólica, na qual o tecido deixa de atuar como órgão de reserva e passa a se comportar como tecido de defesa ativa, redirecionando o

carbono da respiração e da glicólise para a biossíntese de metabólitos secundários (Widjaja *et al.*, 2025). Assim, o perfil cromatográfico obtido por HPLC revela que o inhame minimamente processado responde ao estresse por meio da ativação coordenada da rota dos fenilpropanoides, com produção seletiva de compostos fenólicos estruturais e antioxidantes, cuja dinâmica é modulada pelo balanço entre biossíntese (FAL), oxidação (PPO) e sistemas de defesa enzimáticos (SOD).

4.5. Conclusões

Este trabalho demonstrou que a região medial apresenta maior potencial para o processamento mínimo, o que está associado à menor intensidade de escurecimento, à maior estabilidade da atividade antioxidante e ao comportamento mais equilibrado entre PPO e SOD ao longo do armazenamento. Em contraste, as regiões apical e distal demonstraram maior suscetibilidade ao escurecimento, seja de forma imediata ou ao longo do armazenamento, incluindo escurecimento ao redor da região dos feixes e nas bordas das rodélas. Além disso, as amostras tratadas com ácido ascórbico apresentaram maior vida de prateleira, evidenciada pela manutenção da qualidade visual por maior período. Assim, a maior estabilidade observada na região medial, associada ao uso de ácido ascórbico, reforça seu potencial tecnológico como estratégia para prolongar a vida útil do inhame minimamente processado.

4.6. Referências Bibliográficas

- AKISOE, N.; MESTRES, C.; HOUNHOUIGAN, J.; NAGO, M. Biochemical origin of browning during the processing of fresh yam (*Dioscorea spp.*) into dried product. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 53, p. 2552 – 2557, 2003.
- AL-HAJAYA, Y.; KARPINSKA, B.; FOYER, C. H.; BAKER, A. Nuclear and peroxisomal targeting of catalase. **Plant, Cell & Environment**, v. 45, n. 4, p. 1096–1108, 2022. DOI: 10.1111/pce.14262.
- AOAC INTERNATIONAL. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. Method 967.21: Ascorbic Acid (2,6-Dichlorophenolindophenol Titrimetric Method). Gaithersburg: AOAC, 2012.
- APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. **Annual Review of Plant Biology**, v. 55, p. 373–399, 2004.
- BRECHT, J. K. Physiology of Lightly Processed Fruits and Vegetables. **HortScience**, p. 1 – 5, v. 30, 1995.
- COELHO JÚNIOR, L. F.; FONSECA, K. S.; MÉLO NETO, D. F.; ANDRADE, M. T.; COELHO, D. G.; FERREIRA-SILVA, S. L.; SIMÕES, A. N. Darkening, damage and oxidative protection are stimulated in tissues closer to the yam cut, attenuated or not by the environment. **Journal of Food Biochemistry**, v. 43, n. 5, p. e12840, 2019.
- COUTO, R. S.; LOPES, R. C.; BRAGA, J. M. A. *Dioscorea flabellispina* (Dioscoreaceae), a new endangered species from the Brazilian Atlantic Rainforest. **Phytotaxa**, v. 231, n. 1, p. 89–94, 2015.
- DECROS, G.; BALDET, P.; BEAUVOIT, B.; STEVENS, R.; FLANDIN, A.; COLOMBIÉ, S.; GIBON, Y.; PÉTRIACQ, P. Get the Balance Right: ROS Homeostasis and Redox Signalling in Fruit. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 1091, 2019.

- DEGBEU, K. C.; COULIBALY, A.; TETCHI, A. F.; N'GUESSAN, G. A. Histological study of the polarity of yam tuber (*Dioscorea spp.*) at the beginning of tuberization. **Asian Food Science Journal**, v. 12, n. 2, p. 1–15, 2019. Article no. AFSJ.51369. ISSN: 2581-7752.
- DEVIDE, A. C. P.; CASTRO, C. M.; BERNACCI, L. C.; FELTRAN, J. C.; BARROS, P. M.; COELHO, G. M. O. Origem, cultivo e conservação da cultura alimentar e medicinal dos carás (*Dioscorea spp.*). **Revista Brasileira de Agropecuária**, v. 20, n. 4, p. 547–571, 2025.
- DIXON, R. A.; PAIVA, N. L. Stress-induced phenylpropanoid metabolism. **The Plant Cell**, v. 7, p. 1085–1097, 1995.
- DOORN, W. G. van; KETSA, S. Cross reactivity between ascorbate peroxidase and phenol (guaiacol) peroxidase. **Postharvest Biology and Technology**, v. 95, p. 64–69, 2014.
- FAO. **Agricultural production statistics– 2010–2024**. FAOSTAT Analytical Briefs, n. 121. Rome, 2025. DOI: 10.4060/cd8035en. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/items/f9b4475e-6e01-4f64-879c-f2606fed2d4b>. Acesso em: 1 fev. 2026.
- FOYER, C. H.; NOCTOR, G. Redox homeostasis and antioxidant signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses. **Plant Cell**, v. 17, n. 7, p. 1866–1875, 2005.
- GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 48, p. 909–930, 2010.
- GRAHAM-ACQUAAH, S.; AYERNOR, G. S.; BEDIAKO-AMOA, B.; SAALIA, F. K.; AFOAKWA, E. O. Spatial distribution of total phenolic content, enzymatic activities and browning in white yam (*Dioscorea rotundata*) tubers. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. 10, p. 2833–2838, 2014.
- GUAN, Y.; LU, S.; SUN, Y.; ZHENG, X.; WANG, R.; LU, X.; PANG, L.; CHENG, J.; WANG, L. Tea polyphenols inhibit the occurrence of enzymatic browning in fresh-cut potatoes. **Plants**, v. 13, n. 1, art. 125, 2024.
- HU, W.; GUAN, Y.; JI, Y.; YANG, X. Effect of cutting styles on quality, antioxidant activity, membrane lipid peroxidation, and browning in fresh-cut potatoes. **Food Bioscience**, v. 44, p. 101435, 2021.
- HU, W.; SARENGAOWA; GUAN, Y.; FENG, K. Biosynthesis of phenolic compounds and antioxidant activity in fresh-cut fruits and vegetables. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, 2022.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. ZENEBON, O.; PASCUET, N. S.; TIGLEA, P. (coord.). São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p.
- ISLAM, M. T.; LEE, B.-R.; DAS, P. R.; LA, V. H.; JUNG, H.; KIM, T.-H. Characterization of *p*-coumaric acid-induced soluble and cell wall-bound phenolic metabolites. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 125, p. 172–177, 2018.

- LIMA, M. dos S.; MONTEIRO, L. I. da S.; CARVALHO, A. J. de B. A.; BASTOS, D. C.; PIMENTEL, T. C.; MAGNANI, M. A robust method for quantifying 42 phenolic compounds by RP-HPLC/DAD: Columns performance and characterization of Brazilian Citrus peels. **Food Chemistry**, v. 460, p. 140807, 2024.
- MEITHA, K.; PRAMESTI, Y.; SUHANDONO, S. Reactive Oxygen Species and Antioxidants in Postharvest Vegetables and Fruits. **International Journal of Food Science**, v. 11, p. 1 – 11, 2020. DOI: 10.1155/2020/8817778.
- MOON, K. M.; KWON, E.-B.; LEE, B.; KIM, C. Y. Recent trends in controlling enzymatic browning. **Molecules**, v. 25, n. 12, p. 2754, 2020.
- MORAIS, M. A. S.; FONSECA, K. S.; MEDEIROS, R. A.; ANDRADA, L. V. P.; SARAIVA, R. A.; FERREIRA-SILVA, S. L.; LIMA, A. L. A.; SIMOES, A. N. Use of the abrasion technique in minimal processing as an alternative to increase purchase acceptability and minimize browning in yam. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 102 (1), p. 121-131, 2021.
- NENADIS, N.; WANG, L.-F.; TSIMIDOU, M.; ZHANG, H.-Y. Estimation of scavenging activity of phenolic compounds using the ABTS•+ assay. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 52, n. 15, p. 4669–4674, 2004.
- NOCTOR, C.; REICHHELD, J. P.; FOYER, C. H. ROS-related redox regulation and signaling in plants. **Seminars in Cell & Developmental Biology**, v. 80, p. 3–12, 2018.
- OLUOHA, U. K. Delimitation of physiological regions in yam tubers. **Plant Foods for Human Nutrition**, v. 30, p. 210–218, 1988.
- PATHARE, P. B.; OPARA, U. L.; AL-SAID, F. A. J. Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. **Food and Bioprocess Technology**, v. 6, n. 1, p. 36–60, 2013.
- PUKACKA, S.; RATAJCZAK, E. Production and scavenging of reactive oxygen species in *Fagus sylvatica* seeds. **Journal of Plant Physiology**, v. 162, p. 873–885, 2005.
- REYES, L. F.; VILLARREAL, J. E.; CISNEROS-ZEVALLOS, L. The increase in antioxidant capacity after wounding depends on the type of fruit or vegetable tissue. **Food Chemistry**, v. 101, p. 1254-1262, 2007.
- SALEHI, B.; SENER, B.; KILIC, M.; SHARIFI-RAD, J.; NAZ, R.; YOUSAF, Z.; MUDAU, F. N.; FOKOUG, P. V. T.; EZZA, S. M.; EL BISHBISHY, M. H.; TAHERI, Y.; LUCARIELLO, G.; DURAZZO, A.; LUCARINI, M.; SULERIA, H. A. R.; SANTINI, A. *Dioscorea* plants: a genus rich in vital nutraceuticals – a review. **Iranian Journal of Pharmaceutical Research**, Teerã, v. 18, p. 68–89, 2019. DOI: 10.22037/ijpr.2019.112501.13795.
- SHARMA, S.; BANDRAL, J. D.; SOOD, M.; GUPTA, N.; MIR, A. A. Effect of minimal processing and storage on physicochemical quality of carrots. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 7, n. 5, p. 3301–3312, 2018.

SHI, Q.; DING, F.; WANG, X.; WEI, M. Exogenous nitric oxide protects cucumber roots against oxidative stress induced by salt stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 45, p. 542–550, 2007.

SIMÕES, A. N.; MOREIRA, S. I.; MOSQUIM, P. R.; SOARES, N. F. F.; PUSCHMANN, R. The effects of storage temperature on the quality and phenolic metabolism of whole and minimally processed kale leaves. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 37, p. 101–107, 2015.

SOVIGUIDI, D. R. J.; PAN, R.; LIU, Y.; RAO, L.; ZHANG, W.; YANG, X. Chlorogenic Acid Metabolism: The Evolution and Roles in Plant Response to Abiotic Stress. **Phyton – International Journal of Experimental Botany**, v. 91, n. 4, p. 667–684, 2022. DOI: 10.32604/phyton.2022.018284.

TOMÁS-BARBERÁN, F. A.; ESPÍN, J. C. Phenolic compounds and related enzymes as determinants of quality in fruits and vegetables. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 81, p. 853–876, 2001.

TRENZ, T. S.; MARGIS-PINHEIRO, M. Decoding redox pathways in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 160, p. 206–218, 2021.

VANHOLME, R.; DEMEDTS, B.; MORREEL, K.; RALPH, J.; BOERJAN, W. Lignin biosynthesis and structure. **Plant Physiology**, v. 153, n. 3, p. 895–905, 2010. DOI: 10.1104/pp.110.155119.

VOGT, T. Phenylpropanoid biosynthesis. **Molecular Plant**, v. 3, p. 2–20, 2010.

WIDJAJA, F.; STEENSMA, P.; ANNALA, L.; KLAMI, A.; KANGASJÄRVI, S.; LEHTONEN, M.; MIKKONEN, K. S. Non-targeted LC-MS metabolomics. **Current Research in Food Science**, v. 10, p. 100959, 2025.

WUMBEI, A.; GAUTIER, S. K. N.; KWODAGA, J. K.; JOSEPH, D. F.; GALANI, Y. J. H. State of the Art of Yam Production. In: KAUSHIK, P. (ed.). **Root Vegetables**, 2022. DOI: 10.5772/intechopen.106504.

ZHANG, J.; YAO, J.; MAO, L.; LI, Q.; WANG, L.; LIN, Q. Low temperature reduces potato wound formation by inhibiting phenylpropanoid metabolism and fatty acid biosynthesis. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1109953, 18 jan. 2023. DOI: 10.3389/fpls.2022.1109953.

ZHANG, Q.; LIU, M.; RUAN, J. Metabolomics analysis reveals flavonoids in tea leaves. **BMC Plant Biology**, v. 17, p. 64, 2017.

ZHOU, F.; JIANG, A. Ascorbic acid treatment inhibits wound healing. **Postharvest Biology and Technology**, v. 181, p. 111644, 2021.

ZHOU, F.; JIANG, A.; FENGA, K.; GUA, S.; XUA, D.; HU, W. Effect of methyl jasmonate on wound healing and resistance in fresh-cut potato cubes. **Postharvest Biology and Technology**, v. 157, p. 111644, 2019.

5. ARTIGO 2

A CICATRIZAÇÃO DE INHAME EM RESPOSTA AO CORTE É MODULADA PELA TEMPERATURA E APLICAÇÃO DE ÁCIDO ASCÓRBICO

RESUMO

Danos mecânicos em tubérculos, como a batata, desencadeiam respostas de cicatrização com formação de barreiras estruturais que reduzem a perda de água e a invasão de patógenos, sendo esse processo ainda pouco compreendido em inhame. Este estudo teve como objetivo investigar a resposta de cicatrização em inhame minimamente processado, avaliando o efeito da temperatura de armazenamento (5 e 20 °C), da aplicação de ácido ascórbico e das diferentes regiões do tubérculo (apical, medial e distal). As amostras foram armazenadas por até 15 dias a 5 °C e por até 10 dias a 20 °C, e analisadas quanto às atividades das enzimas fenilalanina amônia-liase (FAL) e peroxidase (POD), firmeza e deposição de lignina por microscopia de fluorescência. A 5 °C, as atividades de FAL e POD apresentaram aumentos discretos em função do AA, que atuou como antioxidante, limitando a disponibilidade de H₂O₂ e retardando o metabolismo fenólico, sem deposição detectável de lignina. Em contraste, a 20 °C, todas as regiões do tubérculo apresentaram aumento expressivo das atividades de FAL e POD, acompanhado pela deposição de lignina nas células adjacentes à superfície de corte, conforme evidenciado por microscopia de fluorescência. A região distal (DI) mostrou maior plasticidade metabólica, com aumento progressivo da atividade de FAL e da POD, enquanto a região apical (AP) manteve níveis mais baixos, especialmente com AA, sugerindo menor responsividade. Esses resultados indicam que a deposição de lignina no inhame minimamente processado foi dependente da temperatura, evidenciando a ativação da resposta estrutural ao estresse, com consequente reforço da parede celular, independentemente da região do tubérculo e da aplicação de ácido ascórbico.

Palavras-chave: cicatrização, peroxidase, temperatura, escurecimento, microscopia de fluorescência.

5. ARTICLE 2

YAM HEALING IN RESPONSE TO CUTTING IS MODULATED BY TEMPERATURE AND ASCORBIC ACID APPLICATION

ABSTRACT

Mechanical damage to tubers, such as potatoes, triggers healing responses involving the development of structural barriers that reduce both water loss and pathogen invasion. This process is still poorly understood in yams. This study aims to investigate the healing response in minimally processed yam, evaluating the effects of storage temperature (5 and 20 °C), ascorbic acid (AA) application, and different tuber regions (apical, medial, and distal). Samples were stored for up to 15 days at 5 °C and up to 10 days at 20 °C and were analyzed for phenylalanine ammonia-lyase (PAL) and peroxidase (POD) activities, firmness, and lignin deposition by fluorescence microscopy. At 5 °C, PAL and POD activities showed slight increases in response to AA, which acted as an antioxidant, limiting H₂O₂ availability and delaying phenolic metabolism, with no detectable lignin deposition. In contrast, at 20 °C, all tuber regions showed a marked increase in PAL and POD activities, accompanied by lignin deposition in cells adjacent to the cut surface, as evidenced by fluorescence microscopy. The distal region (DI) showed greater metabolic plasticity, with a progressive increase in PAL and POD activities, while the apical region (AP) maintained lower levels, particularly in the presence of AA, suggesting lower responsiveness. Overall, these results indicate that lignin deposition in minimally processed yam is temperature-dependent, reflecting the activation of a structural stress response leading to cell wall reinforcement, regardless of tuber region and ascorbic acid application.

Keywords: wound healing, peroxidase, temperature, browning, fluorescence microscopy.

5.1. Introdução

O inhame (*Dioscorea cayenensis*) é uma espécie amplamente cultivada em regiões tropicais, incluindo África, Ásia, partes da América do Sul, Caribe e ilhas do Pacífico Sul. Destaca-se como alimento básico na África Ocidental, onde é produzido em larga escala (Akissoe *et al.*, 2003) e comercializado *in natura*, na forma de flocos secos ou farinha, tanto para exportação quanto para consumo em áreas urbanas (Graham-Acquaah *et al.*, 2014). No Brasil, é geralmente vendido inteiro em feiras livres, sendo amplamente consumido na região Nordeste (Devide *et al.*, 2025).

O ácido ascórbico é um composto muito utilizado na indústria de alimentos na prevenção do escurecimento enzimático, devido à sua grande eficácia na inibição do escurecimento (Al-Abbasy *et al.*, 2025). Atua como antioxidante e agente redutor, sendo capaz de reduzir as quinonas formadas pela ação da enzima polifenol oxidase (PPO) de volta aos fenóis originais, retardando assim o escurecimento enzimático. Essa ação protetora favorece a preservação de compostos fenólicos e dificulta a formação de pigmentos escuros característicos do escurecimento enzimático (Smirnoff, 2018). Além disso, o ácido ascórbico pode reagir com H₂O₂, contribuindo para a sua remoção e, consequentemente, reduzindo sua disponibilidade como cofator para a enzima peroxidase (POD), cuja atividade depende da presença de H₂O₂ para oxidar compostos fenólicos (Jiang & Penner, 2021).

A fenilalanina amônia-liase (FAL) catalisa a conversão da L-fenilalanina em ácido *trans*-cinâmico, etapa inicial da rota biossintética dos fenilpropanoides, dando origem a diversos compostos fenólicos, como ácidos fenólicos, flavonoides, lignina e fitoalexinas, envolvidos em respostas de defesa, atividade antioxidante e formação de barreiras estruturais. Sua atividade é regulada por diversos fatores de estresse e estímulos ambientais (Vanholme *et*

al., 2010). Entre os produtos dessa via, destaca-se a lignina, um polímero aromático resultante do acoplamento oxidativo de 4-hidroxifenilpropanoides, que é depositado na parede celular secundária, conferindo rigidez e impermeabilidade (Krzyzanowski *et al.*, 2022). Além disso, a lignina protege os polissacarídeos da parede celular contra a degradação microbiana, aumentando a resistência ao ataque de patógenos (Vanholme *et al.*, 2010).

O fermento em tecidos vegetais desencadeia respostas de cicatrização, entre as quais se destaca a lignificação, caracterizada pela deposição de lignina nas células adjacentes à região de corte (Zhou *et al.*, 2021; Hu *et al.*, 2021; Krzyzanowski *et al.*, 2022). Esse processo tem sido amplamente descrito em tubérculos de batata, nos quais o fermento induz a ativação da rota dos fenilpropanoides e a subsequente deposição de lignina (Guan *et al.*, 2020; Hu *et al.*, 2021; Jiang & Penner, 2021; Zhou & Jiang, 2021). No entanto, em inhame minimamente processado, os fatores que regulam essa resposta, especialmente sob diferentes condições de temperatura e na presença de antioxidantes, ainda não estão completamente elucidados. Nesse contexto, compreender como o ácido ascórbico e diferentes condições de temperatura regulam a lignificação em resposta ao fermento é essencial para elucidar as estratégias de defesa e a manutenção da qualidade do inhame minimamente processado. Sendo assim, este estudo teve como objetivo investigar a formação de lignina em túberas de inhame minimamente processado submetidas ao tratamento com ácido ascórbico e armazenamento em diferentes temperaturas, com o intuito de avaliar a influência do ácido ascórbico no processo de lignificação.

5.2. Material e Métodos

5.2.1. Obtenção de túberas, processamento mínimo e conservação

As túberas de inhame (*Dioscorea cayenensis*) foram adquiridas no mercado atacadista local (Aracaju, SE, Brasil), selecionadas quanto ao tamanho, integridade e ausência de defeitos visuais, e conservadas a 18 ± 2 °C até o processamento.

Durante o processamento, foram lavadas em água corrente e seccionadas transversalmente com uma faca afiada em três regiões morfológicas: apical (AP), medial (ME) e distal (DI), considerando entre 1,5 e 2 cm para cada região, de acordo com Graham-Acquaah *et al.* (2014). As regiões foram descascadas e cortadas em rodela de aproximadamente 0,5 cm de espessura, sendo imediatamente imersas em água refrigerada (5 °C).

As rodela foram sanitizadas com cloro ativo (200 mg L⁻¹) por 10 min a 5 °C, seguidas de rinsagem em água clorada (3 mg L⁻¹) por 5 min a 5 °C. Durante essa etapa, metade das amostras foi tratada com ácido ascórbico (1%, m/v), enquanto a outra metade constituiu o controle (-AA).

As amostras foram drenadas por 10 min em tela plástica, acondicionadas em bandejas de poliestireno expandido (EPS), envoltas com filme de PVC e conservadas a 5 ± 2 °C por 15 dias e a 20 ± 2 °C por 10 dias (Figura 1).



Figura 1. Fluxograma do processamento mínimo do inhame (*Dioscorea cayenensis*) submetido a tratamento com ácido ascórbico e armazenado a 5 °C e 20 °C.

5.2.2. Firmeza

As rodela de inhame de cada tratamento foram analisadas quanto à firmeza por meio de penetrômetro digital (Digital Fruit Firmness Test, Brand TR, Modelo 53205), utilizando-se uma sonda cilíndrica de 3 mm de diâmetro. Foram realizadas de 3 a 6 medições em cada rodela, e a média desses pontos foi utilizada como valor representativo da amostra. Os resultados foram expressos em Newton (N).

5.2.3. Atividade da enzima peroxidase (POD)

A atividade da POD foi determinada de acordo com Simões *et al.* (2015), com adaptações. Para a extração, 0,25 g de amostra foram homogeneizados em 3 mL de tampão fosfato de sódio 0,2 M (pH 6,0), previamente resfriado a 4 °C. Em seguida, o material foi

centrifugado a $12.857 \times g$ por 20 min, a 4 °C, e o sobrenadante utilizado como extrato enzimático.

A atividade da POD foi avaliada adicionando-se 300 µL do sobrenadante a um meio de reação contendo 2 mL de tampão fosfato 0,2 M (pH 6,0), 200 µL de guaiacol (5 g L^{-1}) e 200 µL de H_2O_2 ($0,8 \text{ g L}^{-1}$). O aumento da absorbância foi monitorado a 470 nm, a 30 °C, por 3 minutos, com leituras em intervalos de 30 s. A atividade da POD foi expressa em unidades por grama de massa fresca ($\text{U g}^{-1}\text{MF}$).

5.2.4. Atividade da enzima fenilalanina amônia-liase (FAL)

A atividade da FAL foi avaliada de acordo com Guan *et al.* (2024), com modificações. Para a extração, cerca de 1 g de amostra foram homogeneizados com tampão de extração contendo 5 mL de tampão borato (50 mM, pH 8,8), 2 mM de EDTA, 40 mg mL^{-1} de polivinilpirrolidona e 5 mM de β -mercaptoetanol. Em seguida, os extratos foram centrifugados a $12.857 \times g$ a 4 °C por 20 min. O sobrenadante foi utilizado como extrato enzimático.

Em um tubo de ensaio, 750 µL de tampão borato (50 mM, pH 8,8) e 3 mL de L-fenilalanina (20 mM) foram misturados e pré-incubados por 5 minutos a 37 °C. Em seguida, 250 µL do extrato foram adicionados. A absorbância inicial a 290 nm da mistura foi então medida rapidamente. A absorbância final foi medida a 290 nm, após 60 min a 37 °C. A atividade da FAL foi quantificada pela variação da absorbância antes e depois da incubação, sendo uma unidade definida como um aumento de 0,01 na absorbância por hora ($\text{U g}^{-1}\text{MF}$).

5.2.5. Microscopia de fluorescência

As rodela de inhame foram seccionadas em fragmentos de 0,50 x 0,25 x 0,25 cm (altura x largura x profundidade), imediatamente fixados em FAA (etanol 70%, ácido acético glacial 5% e formaldeído 5%) por 72 horas, e armazenados em etanol 70% (Kladnik, 2013). Os blocos foram retirados de regiões adjacentes à superfície do corte.

O material fixado foi submetido à desidratação em série crescente de etanol (70%, 80%, 90% e 100% I e II), seguida de diafanização em xilol (I e II), permanecendo por 1 h em cada solução. Em seguida, os fragmentos foram emblocados em parafina. Os blocos foram seccionados em micrótomo rotativo, obtendo-se cortes longitudinais de 10 µm de espessura.

As amostras foram desparafinadas em xilol por 25 minutos e reidratadas em série decrescente de etanol (100%, 90%, 80%, 70%, 50% e 30%), seguidas de lavagem em água destilada, permanecendo 5 min em cada etapa. A coloração foi realizada com azul de toluidina 0,05% (m/v) por 20 minutos e a montagem das lâminas foi realizada utilizando bálsamo do Canadá.

As amostras foram analisadas em microscópio de fluorescência invertido Olympus IX81 utilizando objetiva de 4x, de acordo com Lulai *et al.* (2006), com adaptações.

5.2.6. Análise estatística

As amostras conservadas a 5 °C, foram avaliadas em experimento conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 6 (correspondente às regiões do tubérculo (AP, ME e DI) e aos tratamentos com ácido ascórbico (-AA e +AA)) $\times$ 4 (tempos de armazenamento (0, 5, 10 e 15 dias), com três repetições por tratamento).

As amostras conservadas a 20 °C, em razão da rápida perda de qualidade, foram analisadas até o 10º dia de armazenamento. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 6 (correspondente às regiões do tubérculo (AP, ME e DI) e aos tratamentos com ácido ascórbico (-AA e +AA)) $\times$ 3 (tempos de armazenamento (0, 5 e 10 dias), com três repetições por tratamento).

As análises estatísticas foram realizadas separadamente para cada temperatura de armazenamento. Todos os dados foram analisados pelo programa SISVAR versão 5.8 e expressos como médias $\pm$ erro padrão. Foi realizada análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$).

5.3. Resultados

5.3.1. Firmeza

Durante o armazenamento a 5 °C, a região apical (AP) apresentou firmeza significativamente maior do que as regiões medial (ME) e distal (DI) (Figura 2A). Em AP (+AA), a firmeza permaneceu estável ao longo do armazenamento enquanto, em AP (-AA), houve aumento significativo a partir do quinto dia. Não foi verificada diferença significativa na firmeza entre as regiões ME e DI, exceto para ME (-AA), que apresentou aumento significativo no décimo dia, diferindo de DI (-AA) nesse mesmo período e de DI (+AA) no décimo quinto dia.

Todos os tratamentos a 20 °C apresentaram aumento da firmeza no final do armazenamento (Figura 2B). Os valores, no entanto, diferiram, seguindo a ordem AP > ME > DI. Amostras de uma mesma região apresentaram valores de firmeza semelhantes, independentemente do tratamento. A comparação dos gráficos não evidencia diferenças aparentes no padrão de firmeza das amostras entre as duas temperaturas avaliadas.

5.3.2. Atividade enzimática (FAL e POD)

Quanto à atividade da POD, todas as amostras conservadas a 5 °C apresentaram valores estatisticamente semelhantes no início, diferindo ao longo do armazenamento (Figura 2C). As amostras não tratadas com AA apresentaram aumento progressivo da atividade da POD ao longo do período, porém, ME (-AA) apresentou aumento mais expressivo aos 15 dias, com valores aproximadamente 1,5 vezes maiores do que os observados em AP (-AA) e DI (-AA).

Aos 5 dias, as amostras não tratadas com AA apresentaram atividade aproximadamente duas vezes maior do que as tratadas com AA, independentemente da região. Com 10 dias de armazenamento, essa diferença aumentou para cerca de três vezes entre DI (-AA) e DI (+AA) e 1,5 vezes entre ME (-AA) e ME (+AA), bem como entre AP (-AA) e AP (+AA). As amostras tratadas com AA apresentaram aumento significativo da atividade da POD aos 15 dias de armazenamento, porém, ainda com valores inferiores aos das amostras não tratadas. AP (-AA) e AP (+AA), nesse período, apresentaram valores estatisticamente semelhantes e ME (-AA) apresentou atividade 2,5 vezes maior do que ME (+AA).

As amostras conservadas a 20 °C apresentaram aumento progressivo da atividade da POD ao longo do armazenamento; com exceção das amostras da região distal (DI) que exibiram redução aos 10 dias, com queda pronunciada em DI (-AA) (Figura 2D). As diferenças entre os tratamentos foram significativas apenas no décimo dia de armazenamento, quando as maiores atividades da POD foram observadas nas amostras tratadas com AA, com exceção de ME (-AA). Ao final do período, AP (-AA) e DI (-AA) apresentaram as menores atividades.

Apesar da diferença na intensidade da resposta da POD em função da temperatura (sendo maior a 20 °C), nota-se que as amostras tratadas com ácido ascórbico apresentaram baixa atividade de POD a 5 °C, enquanto a 20 °C exibiram comportamento semelhante ao das amostras não tratadas com AA.

Todos os tratamentos apresentaram aumento na atividade da FAL durante o armazenamento a 5 °C, porém as respostas diferiram em função da região analisada (Figura 2E). No tempo zero, não foram observadas diferenças significativas entre as amostras. Aos cinco dias de armazenamento, as amostras AP (+AA), ME (-AA) e DI (-AA) apresentaram aumento da atividade, com redução a partir do décimo dia. DI (-AA), porém, apresentou aumento aos 15 dias de armazenamento. Os demais tratamentos, AP (-AA), ME (+AA) e DI (+AA), apresentaram elevação na atividade da FAL no décimo dia de armazenamento, com declínio no tempo 15. DI (+AA), porém, manteve os níveis de atividade.

Não houve diferença significativa na atividade da FAL entre as amostras conservadas a 20 °C no tempo zero; entretanto, verificou-se aumento progressivo da atividade ao longo do armazenamento, com exceção de AP (+AA), que se manteve constante (Figura 2F). Aos cinco

dias, a atividade da FAL foi estatisticamente semelhante entre as regiões, com exceção de ME (-AA). Ao final do armazenamento, apenas AP (+AA) diferiu significativamente das demais regiões, apresentando menor atividade. As maiores atividades foram observadas em DI.

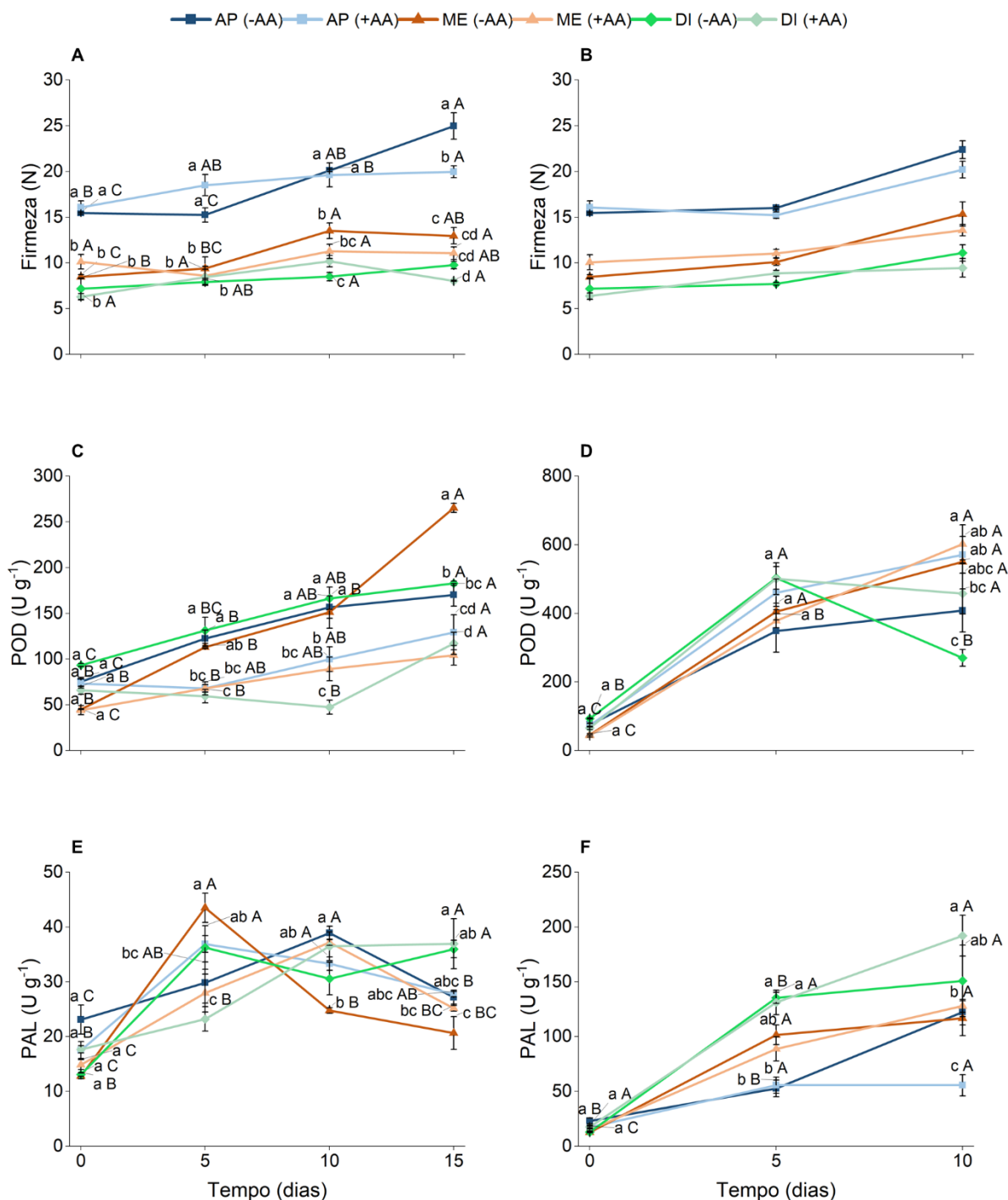


Figura 2. Firmeza a 5 °C (A) e a 20 °C (B), atividade da POD a 5 °C (C) e a 20 °C (D), atividade da FAL a 5 °C (E) e a 20 °C (F) em rodelas de inhame sem AA e com AA, conservadas a 5 e 20 °C (± 2 °C) por 15 e 10 dias, respectivamente. AP (-AA) = região apical sem AA; AP (+AA) = região apical com 1% de AA; ME (-AA) = região medial sem AA; ME (+AA) = região medial com 1% de AA; DI (-AA) = região distal sem AA; DI (+AA) = região distal com 1% de AA; AA = ácido ascórbico. As barras representam o erro padrão da média (n = 3). Letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre tratamentos no mesmo tempo, e letras maiúsculas diferentes indicam diferenças ao longo do tempo para o mesmo tratamento (teste de Tukey, $p < 0,05$).

5.3.3. Microscopia de fluorescência

A deposição de lignina foi avaliada nas amostras das regiões apical (Figura 3), medial (Figura 4) e distal (Figura 5) de inhame minimamente processado, conservadas a 5 e 20 °C. No tempo inicial, não foi observado sinal autofluorescente azul (FA), indicativo de lignina, em nenhuma das regiões analisadas, independentemente do tratamento com ácido ascórbico ou da temperatura de armazenamento. Observou-se presença de lignina exclusivamente nas amostras conservadas a 20 °C, aos 10 dias de armazenamento, tanto no controle (–AA) quanto no tratamento com ácido ascórbico (+AA). A autofluorescência predominou na parte externa das células adjacentes à região do corte, formando uma camada contínua, também observada nas micrografias em campo claro (CC), evidenciada pela cor azul. Não foi observada presença de lignina nas amostras conservadas por 15 dias a 5 °C, em nenhuma das regiões analisadas, apenas autofluorescência de fundo.

Em todas as amostras foi observada autofluorescência vermelha (FV), indicando conteúdo de amido, correspondendo espacialmente ao observado nas micrografias de campo claro.

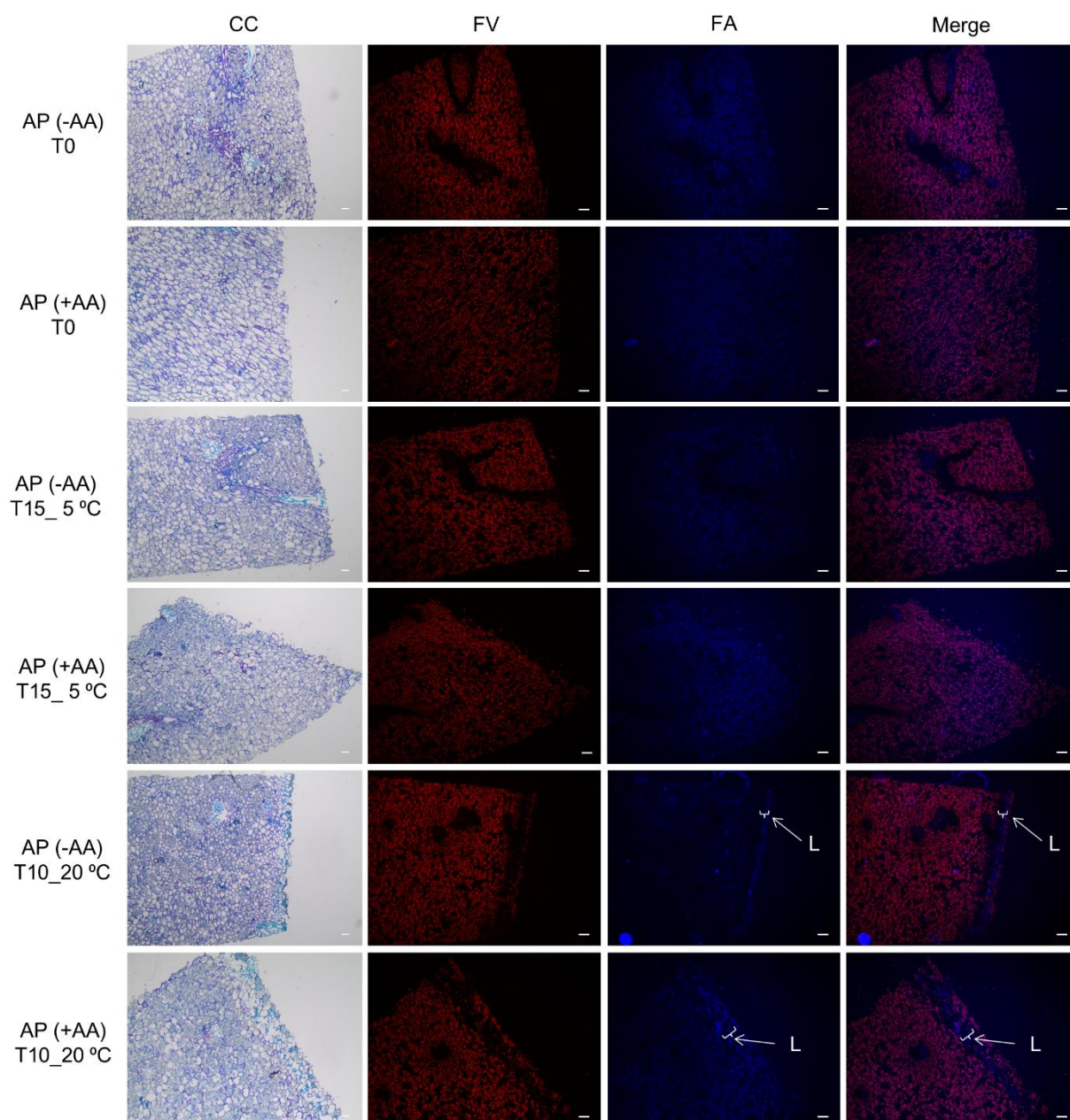


Figura 3. Micrografias de campo claro (CC) e autofluorescência nas faixas espectrais azul (FA) e vermelha (FV) de rodela de inhame sem (–AA) e com (+AA) ácido ascórbico, conservadas a 5 e 20 °C (± 2 °C). AP (–AA) = região apical sem AA; AP (+AA) = região apical com 1% de AA; T0 = tempo inicial; T10 = 10 dias de armazenamento; T15 = 15 dias de armazenamento; AA = ácido ascórbico. CC = campo claro; FV = autofluorescência na faixa espectral vermelha; FA = autofluorescência na faixa espectral azul; L = lignina. Barra de escala = 100 μ m.

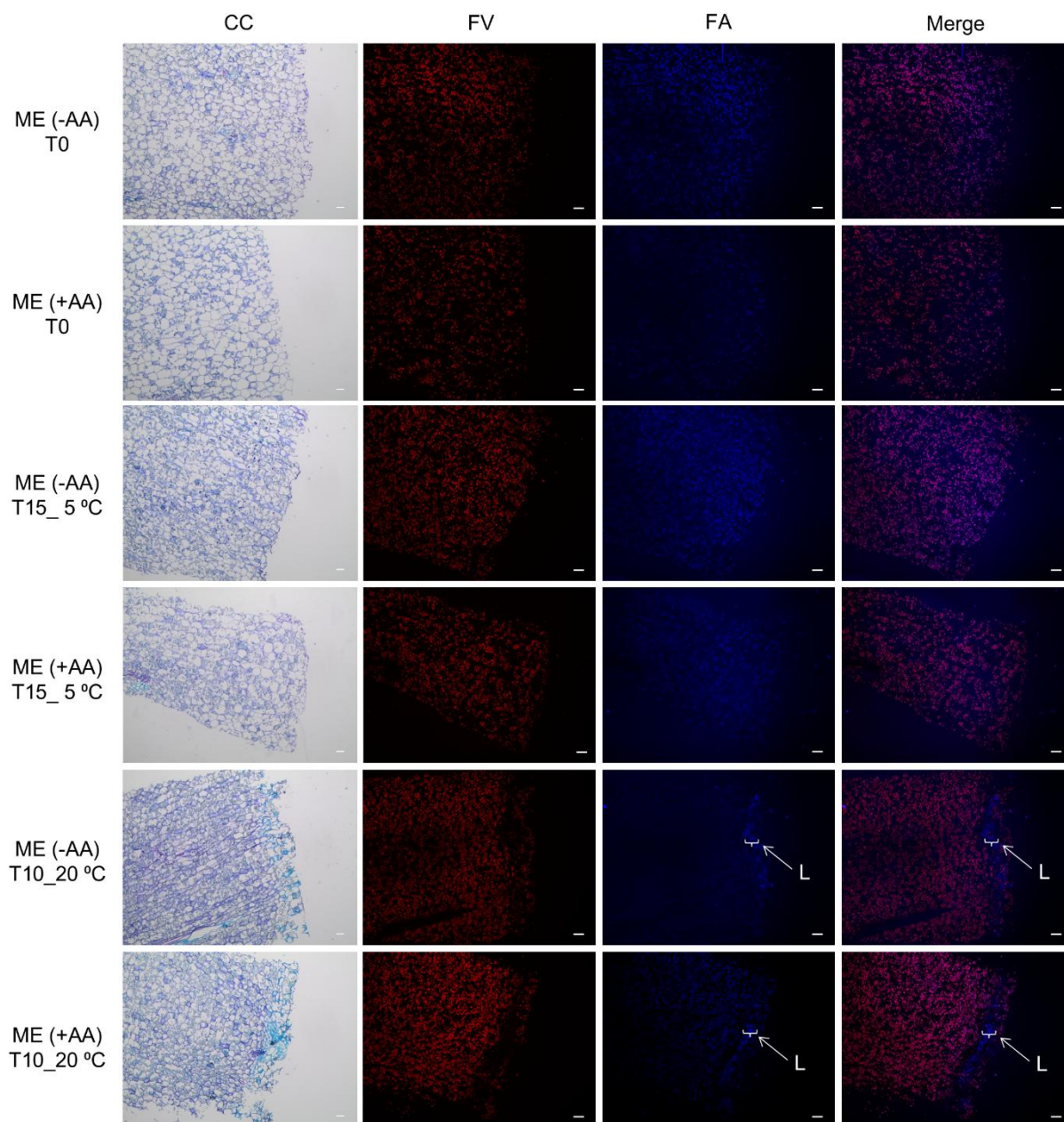


Figura 4. Micrografias de campo claro e autofluorescência de rodela de inhame sem (–AA) e com (+AA) ácido ascórbico, conservadas a 5 e 20 °C (± 2 °C). ME (–AA) = região medial sem AA; ME (+AA) = região medial com 1% de AA; T0 = tempo inicial; T10 = 10 dias de armazenamento; T15 = 15 dias de armazenamento; AA = ácido ascórbico; CC = campo claro; FV = autofluorescência na faixa espectral vermelha; FA = autofluorescência na faixa espectral azul; L = lignina. Barra de escala = 100 μ m.

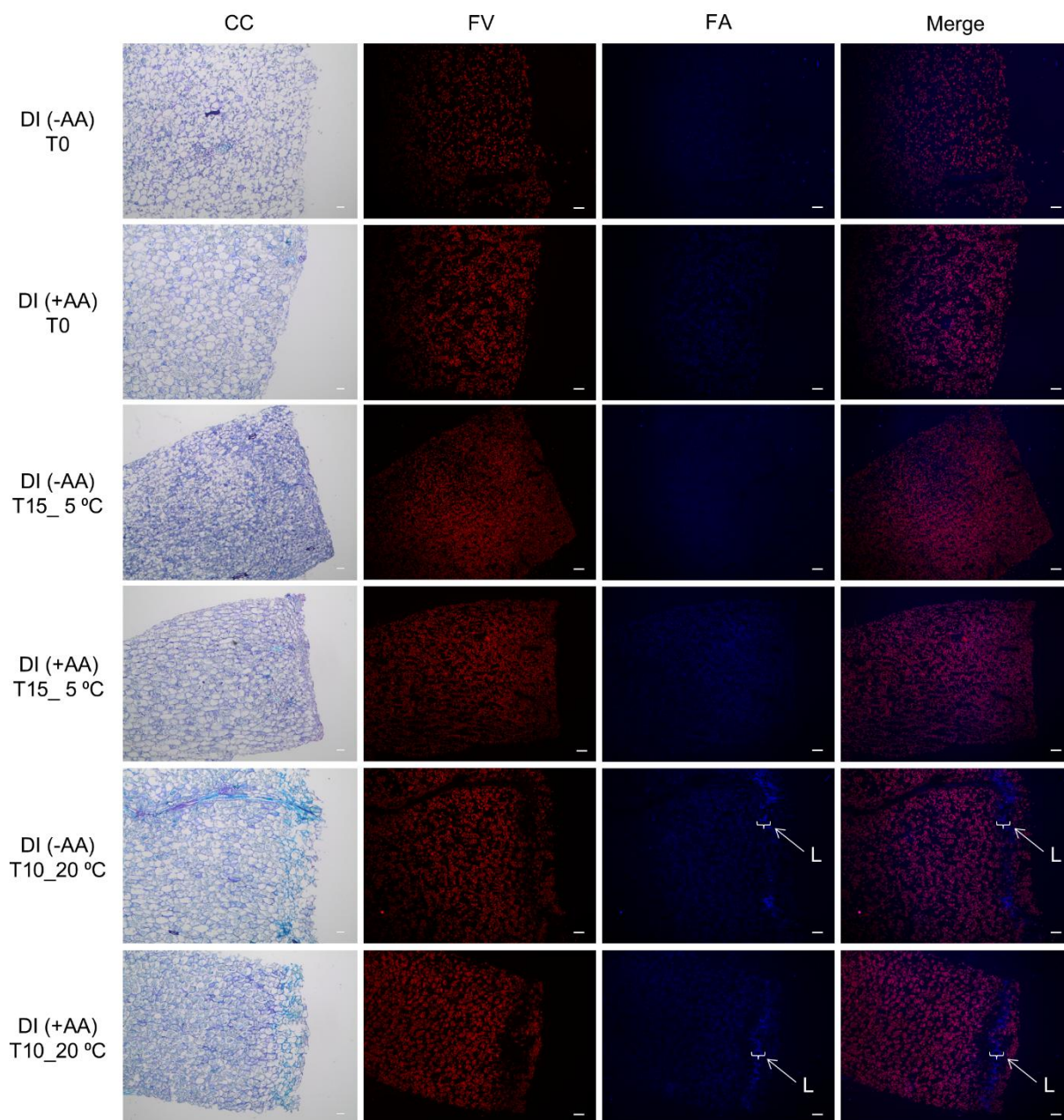


Figura 5. Micrografias de campo claro e autofluorescência de rodela de inhame sem (–AA) e com (+AA) ácido ascórbico, conservadas a 5 e 20 °C (± 2 °C). DI (–AA) = região distal sem AA; DI (+AA) = região distal com 1% de AA; T0 = tempo inicial; T10 = 10 dias de armazenamento; T15 = 15 dias de armazenamento; AA = ácido ascórbico; CC = campo claro; FV = autofluorescência na faixa espectral vermelha; FA = autofluorescência na faixa espectral azul; L = lignina. Barra de escala = 100 μ m.

5.4. Discussão

O processamento mínimo do inhame induz respostas fisiológicas associadas ao fermento, cuja intensidade pode ser modulada por fatores como temperatura, região do tubérculo e uso de antioxidantes. Neste estudo, verificou-se que a temperatura foi o principal fator determinante das respostas bioquímicas de cicatrização, promovendo maior ativação de enzimas como FAL e POD e induzindo a deposição de lignina, especialmente a 20 °C, conforme evidenciado pela microscopia de fluorescência (Figuras 3, 4 e 5), especialmente no décimo dia de armazenamento, em todas as regiões analisadas e em ambos os tratamentos (–AA e +AA).

Em contraste, a 5 °C, a resposta metabólica foi menos intensa, com menor atividade enzimática e ausência de deposição detectável de lignina.

Os aumentos transitórios na atividade da FAL aos 5 e 10 dias de armazenamento a 5 °C, com respostas tardias observadas nas amostras tratadas com AA (Figura 2E) e a maior atividade da POD, principalmente nas amostras não tratadas com AA (Figura 2C) confirmam o papel do AA como antioxidante, capaz de limitar a disponibilidade de H₂O₂ e retardar a oxidação de fenóis. Entretanto, mesmo nos tratamentos sem AA, a atividade da POD não atingiu níveis suficientes para desencadear lignificação detectável. Essa interpretação é reforçada pelos resultados observados nas análises de firmeza (Figura 2A) e pela ausência de lignina constatada nas análises microscópicas (Figuras 3, 4 e 5), especialmente aos 15 dias de armazenamento a 5 °C, em todas as regiões analisadas e em ambos os tratamentos (-AA e +AA). Esse comportamento indica que houve ativação da rota dos fenilpropanoides nesse período, porém apenas para suprimir a presença de H₂O₂, não sendo direcionada para a formação de lignina. Zhang *et al.* (2023) verificaram que a baixa temperatura inibe a expressão de genes associados à biossíntese de lignina e à conversão de compostos fenólicos para a formação de suberina em batatas, indicando que o frio atua como um fator limitante para a ativação da resposta estrutural ao ferimento.

Todas as amostras apresentaram aumento da atividade da POD e da FAL a 20 °C ao longo do armazenamento, com exceção de AP (+AA), onde a atividade da FAL foi constante. Esses resultados indicam ativação da rota fenilpropanoide, direcionada para a formação de lignina. A microscopia de fluorescência confirmou essa interpretação ao evidenciar deposição de lignina exclusivamente nas amostras conservadas por 10 dias a 20 °C, independentemente do tratamento com ácido ascórbico. A lignina localizou-se predominantemente nas células adjacentes à região de corte, formando uma camada contínua, conforme evidenciado nas imagens de autofluorescência na faixa espectral azul (FA) (Figuras 3, 4 e 5), aos 10 dias de armazenamento a 20 °C, em todas as regiões analisadas e em ambos os tratamentos (-AA e +AA).

A atividade da POD, mais elevada a 20 °C, sugere maior disponibilidade de H₂O₂, possivelmente associada ao aumento da taxa respiratória e da produção de espécies reativas de oxigênio durante o armazenamento. Nesse contexto, a POD atua não apenas como enzima antioxidante, mas também como catalisadora da polimerização de monolignóis, para a formação de lignina (Zhou *et al.*, 2021; Dastmalchi *et al.*, 2014). A FAL apresentou padrão consistente com essa resposta, com aumento progressivo ao longo do armazenamento, principalmente na região distal (DI). Essa região, portanto, mostrou-se metabolicamente mais ativa e mais responsiva ao ferimento, enquanto AP manteve menor atividade da PAL, especialmente em AP (+AA), sugerindo menor plasticidade metabólica. Estudos prévios também relatam aumento da atividade da POD e do teor de compostos fenólicos em inhames armazenados em temperatura ambiente (Asemota *et al.*, 1992), além de variações regionais nessa atividade, com maiores valores na região apical associados ao teor de fenóis solúveis (Graham-Acquaah *et al.*, 2014). No entanto, esses estudos foram conduzidos em tecidos recém-colhidos ou sem controle das condições de armazenamento, não considerando a resposta ao ferimento nem a deposição de lignina. No presente trabalho, demonstrou-se que, embora existam diferenças regionais, a lignificação foi predominantemente determinada pela temperatura de armazenamento.

O efeito do ácido ascórbico foi dependente da temperatura. A 5 °C, o AA manteve sua capacidade redutora, atuando na remoção de EROs e na redução de quinonas formadas pela oxidação de fenóis, o que contribui para a inibição da atividade da POD e o retardo das respostas oxidativas. Entretanto, a 20 °C, a provável oxidação do AA, associada à maior produção de EROs, reduziu sua eficácia, permitindo a ativação tardia da POD e a progressão da resposta estrutural. Por outro lado, a modulação da FAL pelo ácido ascórbico, especialmente nas regiões ME e DI, sugere que a redução do estresse oxidativo inicial posterga a ativação da rota dos fenilpropanoides, retardando o redirecionamento metabólico para a formação de lignina e

suberina, conforme também observado em outros vegetais minimamente processados, como batata e cenoura (Zhou *et al.*, 2021; Guan *et al.*, 2020; Hu *et al.*, 2021; Surjadinata & Cisneros-Zevallos, 2012).

5.5. Conclusões

Os resultados demonstram que a resposta de cicatrização do inhame minimamente processado é predominantemente regulada pela temperatura, a qual determina o direcionamento da rota dos fenilpropanoides. A 5 °C, observa-se ativação transitória da FAL e atividade da POD modulada pelo ácido ascórbico, sem deposição detectável de lignina, indicando predominância de uma resposta antioxidante. Em contraste, a 20 °C, o aumento das atividades de FAL e POD promove a deposição de lignina nas células adjacentes à região de corte, caracterizando uma resposta estrutural de cicatrização.

Embora diferenças regionais tenham sido observadas, com maior atividade metabólica na região distal (DI) e menor na região apical (AP), a lignificação ocorreu de forma semelhante entre as regiões e independentemente da aplicação de ácido ascórbico.

5.6. Referências Bibliográficas

- AL-ABBASY, O.; ALSARRAF, Z.; MAHDI, N.; AL-BARWARI, A. Ascorbic acid: Rationale and applications in inhibiting enzymatic browning of fruits and vegetables – A comprehensive review. **Iranian Food Science and Technology Research Journal**, v. 21, n. 6, p. 697-715, 2025.
- AKISSOE, N.; MESTRES, C.; HOUNHOUIGAN, J.; NAGO, M. Biochemical origin of browning during the processing of fresh yam (*Dioscorea spp.*) into dried product. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 53, p. 2552 – 2557, 2003.
- ASEMOTA, H. N.; WELLINGTON, M. A.; ODUTUGA, A. A.; AHMAD, M. H. Effect of short-term storage on phenolic content, o-diphenolase and peroxidase activities of cut yam tubers (*Dioscorea sp.*). **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 60, n. 3, p. 309–312, 1992. DOI: 10.1002/jsfa.2740600306.
- DASTMALCHI, K.; DAMTOFT, S.; SORENSEN, J. L.; STRACK, D.; JENSEN, S. R.; MADSEN, R.; KORNERUP, B.; JENSEN, P. L.; NIELSEN, J.; KREMER, D.; KÜMMERER, K.; PEDERSEN, H. A. Biosynthesis of phenylpropanoids in plants: regulation, function and metabolic engineering. **Phytochemistry Reviews**, v. 13, p. 103–123, 2014.
- DEVIDE, A. C. P.; CASTRO, C. M.; BERNACCI, L. C.; FELTRAN, J. C.; BARROS, P. M.; COELHO, G. M. O. Origem, cultivo e conservação da cultura alimentar e medicinal dos carás (*Dioscorea spp.*). **Revista Brasileira de Agropecuária**, v. 20, n. 4, p. 547–571, 2025.
- GRAHAM-ACQUAAH, S.; AYERNOR, G. S.; BEDIAKO-AMOA, B.; SAALIA, F. K.; AFOAKWA, E. O. Spatial distribution of total phenolic content, enzymatic activities and browning in white yam (*Dioscorea rotundata*) tubers. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. 10, p. 2833–2838, 2014.
- GUAN, Y.; HU, V.; JIANG, A.; XU, Y.; YU, J.; ZHAO, M.; JI, Y.; FENG, K.; SARENGAOWA; YANG, X. Influence of cut type on quality, antioxidant substances and antioxidant activity of fresh-cut broccoli. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 55, n. 8, p. 3019–3030, 2020. DOI: 10.1111/ijfs.14567.

GUAN, Y.; LU, S.; SUN, Y.; ZHENG, X.; WANG, R.; LU, X.; PANG, L.; CHENG, J.; WANG, L. Tea polyphenols inhibit the occurrence of enzymatic browning in fresh-cut potatoes. **Plants**, v. 13, n. 1, art. 125, 2024.

HU, W.; GUAN, Y.; JI, Y.; YANG, X. Effect of cutting styles on quality, antioxidant activity, membrane lipid peroxidation, and browning in fresh-cut potatoes. **Food Bioscience**, v. 44, p. 101435, 2021.

JIANG, S.; PENNER, M. H. Role of ascorbic acid in the extraction and quantification of potato polyphenol oxidase activity. **Foods**, v. 10, n. 10, p. 2486, 2021. DOI: 10.3390/foods10102486.

KLADNIK, A. Maize Kernels – Fixation in FAA, Embedding, Sectioning and Feulgen Staining. **Bio-Protocol**, v. 3, n. 15, p. e835, 2013. Disponível em: <https://bio-protocol.org/pdf/bio-protocol835.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2026.

KRZYŻANOWSKI, F. C.; FRANÇA-NETO, J. B.; HENNING, F. A. Importância do conteúdo de lignina da parede celular da vagem e do tegumento da semente de soja sobre o seu desempenho fisiológico e sanitário. **Circular Técnica**, n. 180. Londrina, PR: Embrapa, 2022. ISSN 2176-2899.

LULAI, E. C.; WEILAND, J. J.; SUTTLE, J. C.; SABBA, R. P.; BUSSAN, A. J. Pink eye is an unusual periderm disorder characterized by aberrant suberization: a cytological analysis. **American Journal of Potato Research**, v. 83, n. 5, p. 409–421, 2006.

SIMÕES, A. N.; MOREIRA, S. I.; MOSQUIM, P. R.; SOARES, N. F. F.; PUSCHMANN, R. The effects of storage temperature on the quality and phenolic metabolism of whole and minimally processed kale leaves. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 37, p. 101–107, 2015.

SMIRNOFF, N. Ascorbic acid metabolism and functions: A comparison of plants and mammals. **Free Radical Biology and Medicine**, v. 122, p. 116–129, jul. 2018. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2018.03.033.

SURJADINATA, B. B.; CISNEROS-ZEVALLOS, L. Biosynthesis of phenolic antioxidants in carrot tissue. **Food Chemistry**, v. 134, p. 615–624, 2012.

VANHOLME, R.; DEMEDTS, B.; MORREEL, K.; RALPH, J.; BOERJAN, W. Lignin biosynthesis and structure. **Plant Physiology**, v. 153, n. 3, p. 895–905, 2010. DOI: 10.1104/pp.110.155119.

ZHANG, J.; YAO, J.; MAO, L.; LI, Q.; WANG, L.; LIN, Q. Low temperature reduces potato wound formation by inhibiting phenylpropanoid metabolism and fatty acid biosynthesis. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1109953, 18 jan. 2023. DOI: 10.3389/fpls.2022.1109953.

ZHOU, F.; JIANG, A. Ascorbic acid treatment inhibits wound healing. **Postharvest Biology and Technology**, v. 181, p. 111644, 2021.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou que o inhame minimamente processado responde ao ferimento por meio de um conjunto coordenado de alterações fisiológicas, bioquímicas e estruturais, moduladas principalmente pela temperatura de armazenamento, pelo tratamento com ácido ascórbico (AA) e pela região do tubérculo.

Sob refrigeração (5 °C), o estresse induzido pelo processamento promoveu a ativação do sistema antioxidante, evidenciada pelo aumento da atividade da SOD, pela modulação da PPO e pela elevação da capacidade antioxidante (ABTS), associadas ao acúmulo de fenóis totais. A análise por HPLC confirmou a reprogramação metabólica, com acúmulo de ácidos hidroxicinâmicos e flavonoides, indicando ativação da rota dos fenilpropanoides. Nessas condições, a FAL apresentou ativação transitória e a POD atuou predominantemente na regulação do equilíbrio redox, utilizando fenóis como doadores de elétrons para remover H₂O₂. Entretanto, a baixa temperatura limitou o direcionamento do metabolismo para a formação de polímeros estruturais, o que explica a ausência de lignina nas análises microscópicas e o não estabelecimento de uma resposta estrutural de cicatrização. O ácido ascórbico mostrou-se mais eficaz a 5 °C, retardando a oxidação de fenóis, reduzindo a atividade da PPO e da POD, modulando a resposta da FAL e atenuando a intensificação do estresse oxidativo.

Em contraste, a 20 °C, as elevadas atividades da FAL e da POD promoveram a polimerização de fenóis e a deposição localizada de lignina, caracterizando a ativação de uma resposta estrutural de cicatrização. Dessa forma, a temperatura definiu o destino metabólico dos fenóis: sob refrigeração predominou a defesa antioxidante, enquanto em temperatura mais elevada ocorreu a transição para a lignificação.

De forma integrada, os resultados evidenciam que a temperatura regula o destino metabólico dos compostos fenólicos: sob refrigeração predominam respostas antioxidantes e metabólicas, enquanto em temperatura mais elevada ocorre a transição para uma barreira física de defesa. Esses achados contribuem para a compreensão da cicatrização em inhame (*Dioscorea cayenensis*) e para o desenvolvimento de estratégias de processamento e conservação mais eficientes.