ReGeo
ISSN: 2177-3246

ESTUDO DO POTENCIAL ANTIOXIDANTE DO EXTRATO ETANÓLICO DA *Amburana cearensis* COMO FATOR DETERMINANTE NA ESTABILIDADE OXIDATIVA DO BIODIESEL DE SOJA

STUDY OF THE ANTIOXIDANT POTENTIAL OF THE ETHANOLIC EXTRACT OF *Amburana cearensis* AS A DETERMINING FACTOR IN THE OXIDATIVE STABILITY OF SOYBEAN BIODIESEL

ESTUDIO DEL POTENCIAL ANTIOXIDANTE DEL EXTRACTO ETANÓLICO DE *Amburana cearensis* COMO FACTOR DETERMINANTE EN LA ESTABILIDAD OXIDATIVA DEL BIODIESEL DE SOJA

https://doi.org/10.56238/revgeov17n10-081

Data de submissão: 14/09/2026 **Data de publicação:** 14/10/2026

Bárbara Beatriz Caxilé Costa
Instituição: Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
E-mail: caxileb@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0009-0002-6843-9186
Lattes: http://lattes.cnpq.br/6745319435730351

Patricia Gabrielle Costa Andrade Macilon
Instituição: Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Grupo de Pesquisa e Inovação em micro e nanotecnologias (GPIMN), Universidade Federal do Rio Grande do Norte
E-mail: patricia.macilon.037@ufrn.edu.br
Orcid: https://orcid.org/0009-0003-2961-863X
Lattes: http://lattes.cnpq.br/8144997851337456

Alyne Rodrigues de Araujo-Nobre
Instituição: Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPar), Centro de Pesquisa em Biodiversidade e Biotecnologia (BIOTEC) – Laboratório de Microbiologia
E-mail: alyne.rdearaujo@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-2801-1401
Lattes: http://lattes.cnpq.br/3869367040911274

Thaís Danielle Santos Araújo
Instituição: Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPar), Centro de Pesquisa em Biodiversidade e Biotecnologia (BIOTEC) – Laboratório de Microbiologia
E-mail: thais_danyelle@uvanet.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-5570-4003
Lattes: http://lattes.cnpq.br/2627210760657375

Carla Eiras
Instituição: Universidade Federal do Piauí (UFPI) – Departamento de Engenharia de Materiais
E-mail: eirasc@ufpi.edu.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-8861-774X
Lattes: http://lattes.cnpq.br/6422282278596618

Hernane da Silva Barud
Instituição: Universidade de Araraquara (UNIARA) – Grupo BioPolMat
E-mail: grupobiopolmat@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-9081-2413
Lattes: http://lattes.cnpq.br/7020467292690112

Gerardo Magela Vieira Júnior
Instituição: Universidade Federal do Piauí (UFPI), Centro de Ciências Naturais (CCN) – Laboratório de Produtos Naturais (LPN/UFPI)
E-mail: magela@ufpi.edu.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-8113-8957
Lattes: http://lattes.cnpq.br/8484684765493808

Renato Pinto de Sousa
Instituição: Universidade Federal do Piauí (UFPI) – Centro de Ciências Naturais (CCN) – Laboratório de Produtos Naturais (LPN/UFPI)
E-mail: renatopintto@ufpi.edu.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-8217-3655
Lattes: http://lattes.cnpq.br/1907412418149003

Francisco Cardoso Figueiredo
Instituição: Universidade Federal do Piauí (UFPI) – Departamento de Química, CTT – Faculdade Técnica de teresina
E-mail: franciscofigueiredo@ufpi.edu.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-2938-6480
Lattes: http://lattes.cnpq.br/2406328081485023

Adriano Gomes de Castro
Instituição: Universidade Federal do Piauí (UFPI) – Departamento de Química
E-mail: acastro@ufpi.edu.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-9930-6565
Lattes: http://lattes.cnpq.br/7015886017267497

Ionara Nayana Gomes Passos
Instituição: Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
E-mail: ionara.passos@ufma.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-4729-4977
Lattes: http://lattes.cnpq.br/4430538507381384

RESUMO
O presente artigo visa mostrar o estudo da estabilidade à oxidação do biodiesel pelo uso do extrato etanólico obtido do exsudato da *Amburana cearensis* como aditivo antioxidante natural. A incorporação de antioxidantes é uma estratégia amplamente empregada para mitigar a degradação oxidativa do biodiesel; entretanto, os antioxidantes sintéticos estão frequentemente associados a alto custo, potencial toxicidade e baixa biodegradabilidade a descoberta de novas substâncias químicas tem se tornado uma área de grande avanço científico. Os resultados experimentais do extrato etanólico da *Amburana cearensis* mostraram eficiência antioxidante conforme determinado pelo ensaio de sequestro de radical ABTS $\bullet^{+}$, que mostrou alta atividade antioxidante mesmo com perda de massa em relação ao tempo. Na análise termogravimétrica e térmica diferencial (TG/DTA) revelou sua

estabilidade térmica em altas temperaturas começando a se degradar a partir de 281°C. A caracterização química por HPLC e o DI-ESI-IT-MSn identificaram os compostos responsável pela atividade antioxidante, o metabólito predominante foi associado a cumarinas, flavonoides e ácidos fenólicos. Fragmentos de 5 compostos foram identificados como buteina, calicosina, cirsimaritina, 3,5,3 -tri-hidroxi-7,4-dimetoxiflavona e nevadensiva. A eficácia do extrato como antioxidante no biodiesel foi avaliada pelo método Rancimat (EN 14112). A amostra tratada apresentou um tempo de indução de 11,03 h, com 3000 ppm do extrato etanólico, aproximando-se bastante dos limites estabelecidos pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). De modo geral, os fitoquímicos presentes no exsudato da *Amburana cearensis* evidenciam relevante potencial científico, ambiental e socioeconômico, apoiando seu uso como alternativa verde e regional aos antioxidantes sintéticos.

Palavras-chave: Biodiesel. Antioxidante Natural. *Amburana cearensis*. Estabilidade Oxidativa. Extrato Etanólico.

ABSTRACT
This article aims to present a study of the oxidation stability of biodiesel using ethanolic extract obtained from the exudate of *Amburana cearensis* as a natural antioxidant additive. The incorporation of antioxidants is a widely employed strategy to mitigate the oxidative degradation of biodiesel; however, synthetic antioxidants are frequently associated with high cost, potential toxicity, and low biodegradability. The discovery of new chemical substances has become an area of great scientific advancement. The experimental results of the ethanolic extract of *Amburana cearensis* showed antioxidant efficiency as determined by the ABTS•$^{+}$ radical scavenging assay, which demonstrated high antioxidant activity even with mass loss over time. Thermogravimetric and differential thermal analysis (TG/DTA) revealed its thermal stability at high temperatures, beginning to degrade from 281°C. Chemical characterization by HPLC and DI-ESI-IT-MSn identified the compounds responsible for the antioxidant activity; the predominant metabolite was associated with coumarins, flavonoids, and phenolic acids. Fragments of 5 compounds were identified as butein, calicosine, cirsimaritin, 3,5,3-trihydroxy-7,4-dimethoxyflavone, and nevadensiva. The extract's effectiveness as an antioxidant in biodiesel was evaluated using the Rancimat method (EN 14112). The treated sample showed an induction time of 11.03 h with 3000 ppm of the ethanolic extract, closely approaching the limits established by the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP). In general, the phytochemicals present in the exudate of *Amburana cearensis* demonstrate significant scientific, environmental, and socioeconomic potential, supporting its use as a green and regional alternative to synthetic antioxidants.

Keywords: Biodiesel. Natural Antioxidant. *Amburana cearensis*. Oxidative Stability. Ethanolic Extract.

RESUMEN
Este artículo tiene como objetivo presentar un estudio de la estabilidad oxidativa del biodiesel utilizando un extracto etanólico obtenido del exudado de *Amburana cearensis* como aditivo antioxidante natural. La incorporación de antioxidantes es una estrategia ampliamente empleada para mitigar la degradación oxidativa del biodiesel; sin embargo, los antioxidantes sintéticos suelen estar asociados con un alto costo, toxicidad potencial y baja biodegradabilidad. El descubrimiento de nuevas sustancias químicas se ha convertido en un área de gran avance científico. Los resultados experimentales del extracto etanólico de *Amburana cearensis* mostraron eficiencia antioxidante según lo determinado por el ensayo de eliminación de radicales ABTS•$^{+}$, que demostró alta actividad antioxidante incluso con pérdida de masa con el tiempo. El análisis termogravimétrico y térmico

diferencial (TG/DTA) reveló su estabilidad térmica a altas temperaturas, comenzando a degradarse a partir de 281 °C. La caracterización química por HPLC y DI-ESI-IT-MSn identificó los compuestos responsables de la actividad antioxidante; el metabolito predominante se asoció con cumarinas, flavonoides y ácidos fenólicos. Se identificaron fragmentos de cinco compuestos como buteína, calicosina, cirsimaritina, 3,5,3-trihidroxi-7,4-dimetoxiflavona y nevadensiva. Se evaluó la eficacia del extracto como antioxidante en biodiésel mediante el método Rancimat (EN 14112). La muestra tratada presentó un tiempo de inducción de 11,03 h con 3000 ppm del extracto etanólico, muy cercano a los límites establecidos por la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (ANP). En general, los fitoquímicos presentes en el exudado de *Amburana cearensis* demuestran un importante potencial científico, ambiental y socioeconómico, lo que respalda su uso como una alternativa ecológica y regional a los antioxidantes sintéticos.

Palabras clave: Biodiésel. Antioxidante Natural. *Amburana cearensis*. Estabilidad Oxidativa. Extracto Etanólico.

1 INTRODUÇÃO

O biodiesel é um biocombustível obtido por meio da transesterificação de óleos e gorduras, amplamente reconhecido por sua origem renovável e por sua contribuição para a redução das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, a instabilidade oxidativa permanece como um dos principais desafios técnicos e comerciais para sua produção e uso eficiente. Tal limitação decorre da suscetibilidade dos ésteres metílicos de ácidos graxos à oxidação durante as etapas de armazenamento e transporte, o que pode resultar em alterações indesejáveis nas propriedades físico-químicas do combustível, como aumento da acidez e da viscosidade, além da formação de sedimentos, comprometendo o desempenho de motores a diesel (David; Kopac, 2023).

Com o objetivo de assegurar a qualidade e a competitividade do biodiesel brasileiro, a Resolução ANP nº 920, de 4 de abril de 2023, estabeleceu as especificações técnicas para o biodiesel comercializado no País, incluindo requisitos relacionados à estabilidade à oxidação. Essa normativa define o aditivo antioxidante como uma substância capaz de retardar a oxidação lipídica de óleos e gorduras, determinando que o biodiesel em circulação contenha aditivos com essa função. Além disso, o tipo e a concentração do antioxidante utilizado devem constar no certificado de qualidade do produto (Brasil, 2023).

Diversos estudos relatam que antioxidantes sintéticos, como o butil-hidroxitolueno (BHT), o butil-hidroxianisol (BHA) e a tert-butil-hidroquinona (TBHQ), são tradicionalmente empregados para aumentar a estabilidade oxidativa do biodiesel, atuando na interrupção das reações em cadeia responsáveis pela degradação do combustível. Entretanto, esses compostos apresentam limitações relevantes, tais como impactos ambientais negativos, restrições de desempenho em baixas temperaturas e baixa biodegradabilidade, o que tem estimulado a busca por alternativas mais sustentáveis e alinhadas aos princípios da Química Verde (David; Kopac, 2023).

Nesse contexto, antioxidantes naturais extraídos de fontes vegetais têm emergido como alternativas promissoras, em razão de sua menor toxicidade, maior biodegradabilidade e ampla disponibilidade de compostos fenólicos com reconhecida atividade antioxidante. As principais fontes naturais de polissacarídeos incluem fungos, celulose, exsudatos vegetais e algas (De Paula et al., 1998; De Oliveira Farias et al., 2025). Estudos envolvendo extratos vegetais demonstram que compostos fenólicos naturais podem atuar como doadores de elétrons ou de hidrogênio para radicais livres, interrompendo as cadeias reativas de oxidação, de maneira semelhante àquela observada em sistemas lipídicos como o biodiesel.

A goma de Amburana cearensis (GAmb) é um polissacarídeo de caráter polieletrólito, obtido a partir do exsudato do tronco dessa espécie, e tem sido amplamente investigada devido à sua

composição fitoquímica rica em cumarinas e outros compostos fenólicos com atividade antioxidante relevante. Estudos etnobotânicos e fitoquímicos indicam que extratos etanólicos e frações da Amburana cearensis apresentam significativa atividade antioxidante em ensaios com radicais livres, atribuída principalmente à presença de flavonoides e fenóis, evidenciando seu potencial como fonte de antioxidantes naturais para aplicações tecnológicas (De Oliveira Farias et al., 2025). Diante desse perfil fitoquímico, o extrato etanólico da Amburana cearensis surge como candidata potencial para aplicação como aditivo antioxidante em sistemas lipídicos, incluindo o biodiesel.

Considerando a necessidade da adição de antioxidantes ao biodiesel para aumentar sua estabilidade oxidativa, em razão da presença de sítios reativos associados aos carbonos metilênicos adjacentes às insaturações, os quais são suscetíveis ao processo de auto-oxidação, torna-se relevante o desenvolvimento de alternativas aos antioxidantes sintéticos atualmente utilizados. Nesse sentido, esta pesquisa avalia o extrato etanólico obtido a partir da goma da Amburana cearensis como um antioxidante de origem natural uma abordagem inovadora ao destacar o potencial científico, ambiental e socioeconômico de antioxidantes naturais aplicados à estabilização oxidativa do biodiesel.

2 METODOLOGIA

2.1 OBTENÇÃO DO EXSUDADO BRUTO DA AMBURANA CEARENSIS

A coleta do exsudato da Amburana cearensis (Sis-Gen with number A5A1D05) foi realizada nos meses de julho a setembro de 2022, período de estiagem na região, considerado melhor época para estimulação e coleta do material. O exsudado bruto foi coletado na região de Cocal da Estação–PI, Brasil (Latitude: 3°28'33" S; Longitude: 41°33'28" W). Após a coleta, o material vegetal foi seco ao sol por um período de duas semanas, ou até a completa solidificação da resina. Em seguida, o exsudato bruto foi obtido por meio da remoção de resíduos macroscópicos, tais como fragmentos de casca do tronco e galhos. O material foi então triturado e peneirado em peneira com granulometria de 425 µm.

2.2 OBTENÇÃO DO EXTRATO ETANÓLICO DE AMBURANA CEARENSIS

O material peneirado foi submetido ao processo de extração etanólica, conforme metodologia descrita por Samrot et al. (2019). Para isso, 10,0 g do exsudato foram pesados em balança analítica (Sartorius ED124s Extend) e transferidos para um béquer de 150 mL, ao qual foram adicionados 50,0 mL de etanol (ACS Dinâmica, P.A., 95%). A mistura foi mantida sob agitação magnética, à temperatura ambiente, por um período de 2 horas. Após esse intervalo, o sistema permaneceu em repouso para decantação, sendo a fase líquida cuidadosamente separada e armazenada para posterior utilização.

O extrato obtido foi concentrado por evaporação do solvente, realizada por gotejamento em béquer sob placa de aquecimento em temperatura constante de 70°C. Após a completa secagem do material em dessecador, procedeu-se à pesagem do sólido resultante em balança analítica, obtendo-se, assim, o extrato etanólico do exsudato da Amburana cearensis.

2.3 ATIVIDADE ANTIOXIDANTE

A atividade antioxidante do extrato etanólico do exsudato da Amburana cearensis foi determinada pelo ensaio de sequestro do radical catiônico ABTS•⁺ [2,2′-azino-bis(ácido 3-etilbenzotiazolina-6-sulfônico)], conforme metodologia descrita por Gião et al. (2007), com adaptações. A análise estatística foi realizada por meio de análise de variância de uma via (one-way ANOVA), seguida do teste de comparações múltiplas de Tukey (Gião et al., 2007).

Os ensaios foram realizados em triplicata, e os resultados foram expressos como média de desvio padrão, adotando-se nível de significância de $p < 0,05$. O extrato foi solubilizado em etanol e preparado em uma série de diluições, com concentrações variando de 31,25 a 0,24 μg mL^{-1}. A solução do radical ABTS•⁺ foi preparada previamente e mantida em repouso ao abrigo da luz. Alíquotas das soluções do extrato foram adicionadas à solução do radical, e a mistura foi incubada no escuro por 6 min.

A capacidade de sequestro do radical ABTS•⁺ pelo extrato foi monitorada em três tempos de reação (6, 30 e 60 min), utilizando um leitor de microplacas do tipo ELISA (SpectraMax, Molecular Devices, EUA). A atividade antioxidante foi expressa como porcentagem de inibição do radical em relação ao controle, e os valores de concentração inibitória média (CI_{50}) foram determinados a partir das curvas de inibição em função da concentração do extrato.

2.4 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA/DTG)

As análises térmicas foram realizadas utilizando um analisador térmico Shimadzu DTG-60H. Aproximadamente 5–10 mg da amostra foram colocados em cadinhos de alumina (ou platina), previamente limpos e secos. Foi utilizada a Norma ASTM E2550 Método Padrão para Estabilidade Térmica por Termogavimetria. Foram aplicadas duas condições atmosféricas: uma atmosfera inerte de árgon e uma atmosfera oxidativa de oxigénio, ambas com uma taxa de fluxo de 100 mL min^{-1} e uma taxa de aquecimento de 20 °C min^{-1} da temperatura ambiente até 600 °C. Os dados foram adquiridos utilizando um SDT Q600 V20.9 Build 20 Module: analisador térmico padrão DSC-TGA.

2.5 HPLC-DAD DO EXTRATO ETANÓLICO

O extrato etanólico de Amburana foi analisado por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE/HPLC) em sistema analítico equipado com desgaseificador (DGU-20A5R), bomba (LC-20AT), válvula LPGE kit, injetor automático (SIL-20AHT), forno de coluna (CTO-20A), detector de arranjo de diodos (DAD, SPD-M20A) e controlador (CBM-20A), todos da marca Shimadzu. O controle instrumental e a aquisição dos dados foram realizados por meio do software LabSolutions (Shimadzu).

A separação cromatográfica foi conduzida em coluna C18 (Luna®, Phenomenex; 250,0 × 4,6 mm; 5 µm). Previamente à análise, a amostra foi submetida a um procedimento de limpeza (clean-up) por extração em fase sólida (SPE). Para isso, uma alíquota de 10 mg do extrato foi dissolvida em 2,0 mL de metanol (MeOH) e aplicada em cartucho C18 previamente condicionado com o mesmo solvente. A eluição foi realizada com 20,0 mL de MeOH. Após a secagem, 5 mg do material eluído foram redissolvidos em 2,0 mL de uma mistura MeOH/H_2O (1:1, v/v) e filtrados em membrana de nylon (47 mm de diâmetro e porosidade de 0,22 µm, Chromafil® Xtra).

A análise cromatográfica do extrato etanólico da Amburana (2,5 mg mL^{-1}) foi realizada em modo de eluição gradiente, conforme o seguinte programa: 0–50 min, 5–100% de solvente B; 50–60 min, 100% de solvente B. A fase móvel foi composta por água ultrapura (solvente A) e metanol (solvente B), com vazão de 1,0 mL min^{-1}, volume de injeção de 10 µL e temperatura da coluna mantida a 40 °C. A detecção foi realizada na faixa espectral de 200 a 800 nm.

2.6 DI-ESI-IT-MSN DO EXTRATO ETANÓLICO

O extrato etanólico foi dissolvido em álcool metílico a uma concentração de 0,1 mg/mL e filtrada por uma membrana de politetrafluoroetileno (PTFE) com porosidade de 0,22 µm antes da análise espectrométrica. Os espectros de massa foram adquiridos por inserção direta (DI) em um espectrômetro de massas equipado com analisador do tipo armadilha de íons (IT/MS, AmaZon X, Bruker Daltonics, Bremen, Alemanha) e fonte de ionização por eletrospray (ESI), operando no modo DI-ESI-IT-MSn.

As análises foram conduzidas no modo de íons negativos [ESI(−)], com faixa de varredura de m/z entre 100 e 1500 Da, vazão da seringa ajustada para 3,0 µL min^{-1}, tensão capilar de 4,5 kV, vazão do gás de secagem (N_2) de 5,0 L min^{-1}, pressão de nebulização de 8,0 psi e temperatura da fonte mantida a 250 °C. Para os experimentos de MS^n, a energia de colisão, a amplitude do sinal, o tempo de aquisição e os parâmetros de radiofrequência foram otimizados individualmente para cada íon precursor, a fim de maximizar a qualidade das informações espectrais obtidas.

A aquisição e o processamento dos dados foram realizados utilizando o software Bruker Compass Data Analysis (versão 4.3), fornecido pelo fabricante.

2.7 MÉTODO RANCIMAT

O método analítico atende às especificações internacionais para comercializar biodiesel, com aceitação na Europa, nos Estados Unidos e no Brasil, onde faz parte das especificações EN 14112 (2003) e Regulamento Técnico ANP n°920/2023. O método normatizado pela EN 14112 onde a oxidação é induzida por meio de uma corrente de ar injetada na amostra de biodiesel a uma vazão de 10 L.h-1, mantida à temperatura constante de 110°C.

A condutividade da solução é monitorada de forma contínua e uma curva de oxidação é obtida, cujo ponto de inflexão pode ser calculado pelo ponto de intersecção das duas tangentes. O período de indução foi obtido pelo ponto de intersecção das duas tangentes da curva de condutividade (Jain & Sharma, 2011).

3 RESULTADOS E DISCUSSAO

3.1 PROCESSAMENTO DO EXSUDADO E OBTENÇÃO DO EXTRATO ETANÓLICO DE AMBURANA CEARENSIS

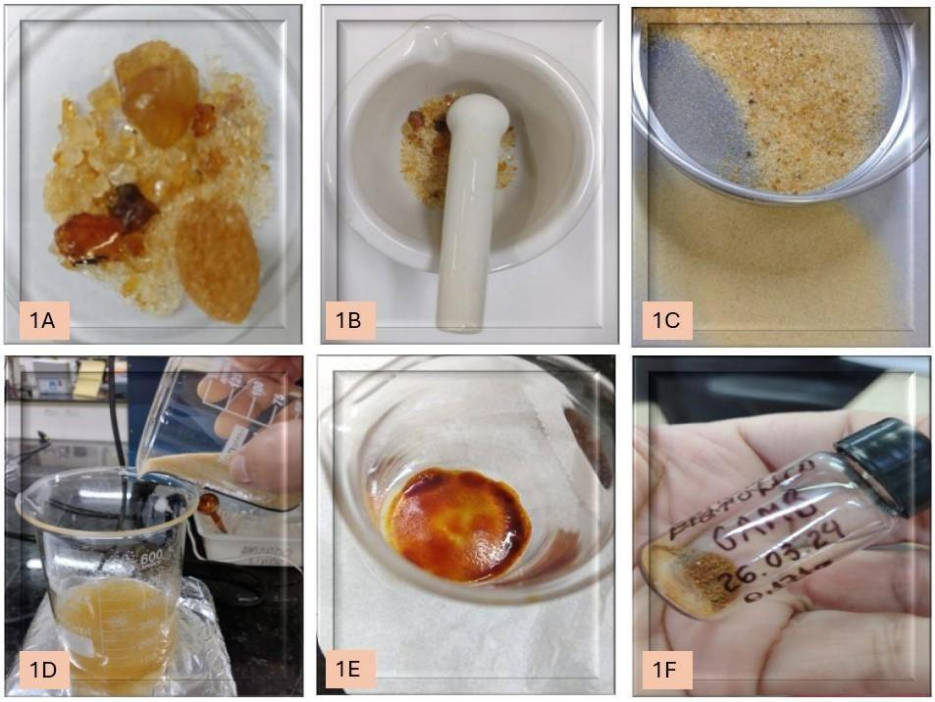
A sequência apresentada na Figura 1 evidencia a evolução visual e física do exsudado de Amburana cearensis ao longo do processo de obtenção do extrato etanólico. X O exsudado bruto apresenta-se X na forma de agregados sólidos irregulares, com coloração característica e elevada rigidez, aspectos que refletem o processo natural de exsudação e solidificação do material vegetal (Figura 1A). Após o processamento físico, observa-se uma redução significativa do tamanho das partículas e maior homogeneidade do material, o que favorece a liberação dos compostos bioativos presentes na matriz polissacarídica (Figuras 1B e 1C).

A interação do exsudado com o solvente etanólico resulta em mudanças visíveis no sistema, destacando-se a coloração da fase líquida, indicativa da solubilização de compostos orgânicos, possivelmente associados a fenóis, flavonoides e cumarinas previamente reportados na literatura para a espécie (Figura 1D). Esse comportamento sugere uma extração eficiente dos constituintes de interesse, corroborando estudos que apontam o etanol como um solvente adequado para a obtenção de antioxidantes naturais a partir de matrizes vegetais.

Dessa forma, o material apresentado na Figura 1F corresponde ao extrato etanólico seco do exsudato de Amburana cearensis, caracterizado pela sua aparência homogênea e estabilidade física, indicando boa conduta do processo de extração e a sua adequação para análises subsequentes e

aplicações tecnológicas propostas neste estudo. No estudo comparativo de obtenção do extrato etanólico obtido do exsudado da Amburana Cearensis a outros extratos etanólicos de diferentes fontes, foram constatadas quantidades diferentes para realização do processo, enquanto o extrato da Amburana utilizou 10g do exsudado macerado em 50 ml de etanol gerando em média 3,8g de extrato, outros estudos como o extrato etanólico das folhas da Annona squamosa (ATA) exigiu uma quantidade muito maior e mais tempo de preparo para obtenção de um extrato líquido. Informando usar 245g de folhas secas em recipiente de vidro adicionados a 1400ml de álcool etílico a 96%. Masserado por 15 dias e depois sendo filtrado duas vezes por gase e por filtro de papel. (Brito et al., 2007), não sendo informada quantidade e concentração final do extrato obtido. Diversos outros estudos envolvendo extrato etanólico das mais diferentes fontes não informaram o processo de obtenção do extrato.

Figura 1. Extração e purificação do extrato etanólico do exsudado da Amburana cearensis.



Fonte: Autores.

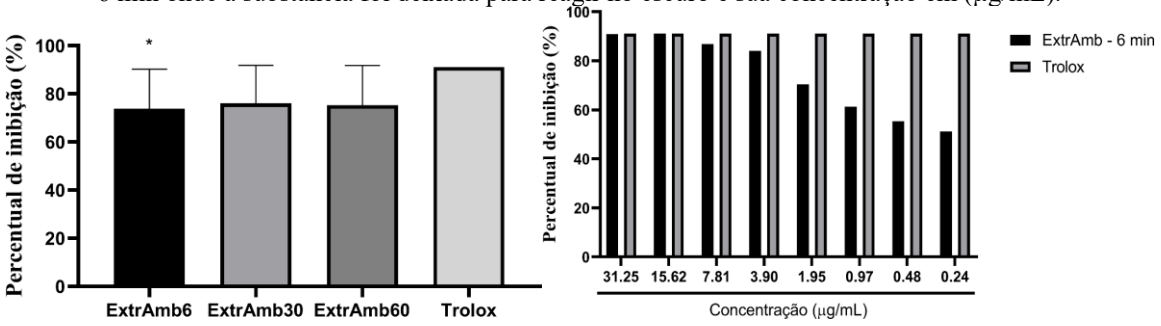
3.2 ATIVIDADE ANTIOXIDANTE DO EXTRATO ETANÓLICO DO EXSUDADO DA AMBURANA CEARENSIS

A atividade antioxidante do extrato etanólico do exsudado de Amburana cearensis foi avaliada por meio do ensaio de sequestro do radical ABTS•+, com análise estatística realizada por ANOVA de uma via, seguida do teste de comparações múltiplas de Tukey. Os resultados evidenciaram elevada capacidade antioxidante do extrato, com comportamento dependente do tempo de reação entre o radical e os compostos bioativos presentes na amostra(Sanches et al., 2025).

Os valores de concentração inibitória média (CI_{50}) diminuíram progressivamente ao longo do tempo, indicando aumento da eficiência antioxidante com o prolongamento da reação. Foram observados valores de CI_{50} de 1,562 µg/mL após 6 minutos, 1,176 µg/mL após 30 minutos e 0,9961 µg/mL após 60 minutos. Esse comportamento sugere uma sinergia oxidativa, na qual os compostos antioxidantes do extrato continuam a neutralizar o radical ABTS•+ de forma eficiente ao longo do tempo. A redução do (CI_{50}) ao longo do tempo pode indicar também uma cinética dependente de difusão e interação molecular; presença de compostos com diferentes velocidades de reação; ou um mecanismo não exclusivamente instantâneo.

A comparação com o antioxidante padrão Trolox revelou diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) apenas no tempo inicial de 6 minutos. Nos tempos de 30 e 60 minutos, não foram observadas diferenças estatísticas significativas, indicando que o percentual médio de inibição do radical ABTS•+ pelo extrato foi equivalente ao do Trolox. Esses resultados são ilustrados na Figura 2A, que demonstra a similaridade da atividade antioxidante entre o extrato e o padrão nos tempos mais longos de reação, enquanto a Figura 2B evidencia a resposta antioxidante no tempo inicial de 6 minutos em função da concentração do extrato.

Figura 2. (A) Percentual de inibição da atividade antioxidante semelhante ao padrão Trolox nos tempos de 30 e 60 minutos. (B) Percentual de inibição da atividade antioxidante em comparação ao padrão Trolox considerando o tempo de 6 min onde a substância foi deixada para reagir no escuro e sua concentração em (µg/mL).



Fonte: Autores.

3.3 ANÁLISE DE TGA DO EXTRATO ETANÓLICO DA AMBURANA CEARENSIS

Os ensaios experimentais foram realizados empregando o extrato etanólico do exsudado da Amburana cearensis, bem como a goma purificada (GAmb), obtida a partir do mesmo material vegetal. Verificou-se que a GAmb apresentou elevada hidrossolubilidade, característica que impôs limitações significativas quanto à sua dispersão e solubilização em biodiesel, um sistema de natureza predominantemente lipofílica. Essa incompatibilidade comprometeu a homogeneidade das formulações e inviabilizou sua aplicação direta como aditivo antioxidante, motivando a

descontinuidade dos ensaios com essa fração. Em contraste, o extrato etanólico demonstrou maior afinidade com a matriz lipídica do biodiesel, evidenciando maior potencial de aplicação tecnológica. Ademais, esse extrato é obtido a partir de uma etapa do processo de purificação anteriormente descartada, o que reforça seu aproveitamento sob as perspectivas tecnológica, econômica e ambiental.

A análise termogravimétrica (TGA), associada às curvas derivadas de perda de massa (DTG), do extrato etanólico e da GAmb (Figuras 4A e 4B), revelou comportamento térmico globalmente semelhante, caracterizados pela ocorrência de dois eventos principais de degradação ao longo do aquecimento. O primeiro evento foi observado entre 40 e 120 °C para o extrato etanólico e entre 45 e 151 °C para a GAmb, com perdas de massa superiores a 8%. Esse estágio é atribuído, predominantemente, à eliminação de umidade residual e à volatilização de compostos de baixa massa molar. As curvas DTG evidenciaram a presença de múltiplos picos nessa faixa de temperatura, indicando que a perda de massa ocorre de forma escalonada. Observou-se, ainda, o alargamento e a suavização dos picos, especialmente para a GAmb, sugerindo redução no teor de constituintes voláteis e hidrofílicos em decorrência do processo de purificação do exsudado (Mothé; de Freitas, 2014; Sampaio et al., 2016).

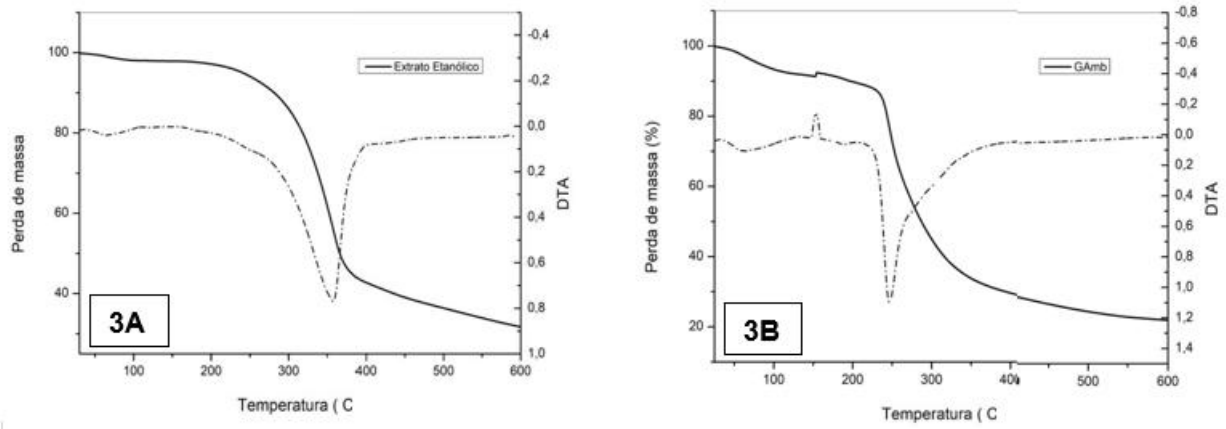
O segundo evento de perda de massa ocorreu em faixas de temperatura mais elevadas, entre 281 e 600 °C para o extrato etanólico e entre 250 e 600 °C para a GAmb, com perdas médias de aproximadamente 50,0% e 54,7%, respectivamente. Esse estágio está associado à degradação térmica da estrutura polimérica, envolvendo mecanismos de despolimerização, descarbonilação e decomposição pirolítica, com a consequente formação e liberação de produtos gasosos, tais como água, monóxido de carbono e hidrocarbonetos leves. A temperatura inicial de degradação indica que o extrato etanólico apresenta estabilidade térmica até aproximadamente 281 °C, enquanto a GAmb mantém estabilidade até cerca de 250 °C. Esses valores são significativamente superiores às temperaturas usuais de armazenamento, manuseio e aplicação do biodiesel, o que evidencia a adequação térmica do extrato etanólico para uso como aditivo antioxidante (Mothé; de Freitas, 2014; Sampaio et al., 2016).

De modo geral, os resultados demonstram que, embora o extrato etanólico e a goma purificada de Amburana cearensis apresentem comportamentos térmicos semelhantes, as diferenças de solubilidade e compatibilidade com a matriz lipídica são determinantes para sua aplicação em biodiesel. O extrato etanólico destacou-se como a fração mais promissora, não apenas pela maior afinidade com o biodiesel, mas também pela elevada estabilidade térmica e pelo potencial antioxidante associado à presença de compostos fenólicos, consolidando sua viabilidade como alternativa natural, eficiente e sustentável aos antioxidantes sintéticos empregados na estabilização oxidativa do biodiesel.

A análise termogravimétrica (TGA) é utilizada para investigar processos relacionados à estabilidade térmica e decomposição, desidratação e oxidação, medindo as variações da massa de uma amostra em função da temperatura e do tempo durante o aquecimento (TENGKU-ROZAINA, BIRCH, 2019; XIAO et al., 2014).

Em estudos analisados que apresentaram parte experimental em termogavimetria podemos citar análises de outras substâncias com elementos antioxidantes, como a análise de micropartículas contidas no óleo de pequi (Caryocar coriaceum), segundo o estudo publicado por Castelo et al., 2020, o óleo de pequi teve sua degradação a 424°C. Temperatura superior à temperatura de degradação do extrato etanólico da Amburana Cearensis, lembrando a diferença entre os dois, onde o extrato aqui estudado foi obtido por evaporação em placa de aquecimento e sua forma final é sólida e o óleo de pequi apesar de passar por alguns processos não era um extrato etanólico e sua forma final é líquida.

Figura 3. Gráficos mostrando resultado da análise térmica do extrato etanólico (3A) e da GAmb (3B) mostrando a perda de massa em relação ao aumento de temperatura.

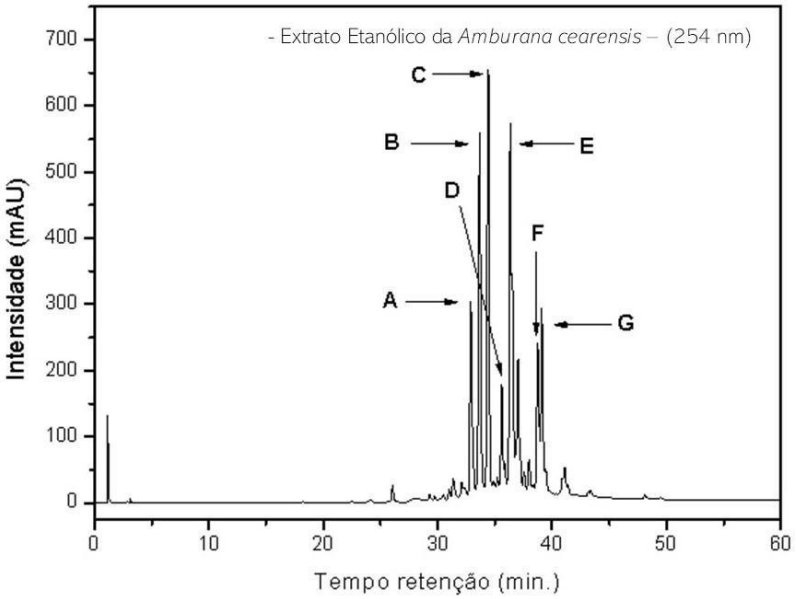


Fonte: Autores.

3.4 ANÁLISE DE HPLC DO EXTRATO ETANÓLICO DA AMBURANA CEARENSIS

O cromatograma HPLC-DAD do extrato etanólico de Amburana registrado a 254 nm em coluna C18 revelou um perfil dominado por compostos de polaridade intermediária a baixa, com a maior parte dos sinais eluindo entre aproximadamente 28 e 45 min. Um pico majoritário foi observado em torno de 36–37 min, indicando a presença de um metabólito predominante, possivelmente associado a derivados cumarínicos, amplamente descritos como marcadores químicos da espécie (cumarinas, flavonoides, ácidos fenólicos). Picos secundários nas regiões de 30–34 min e 40–45 min sugerem a presença de flavonoides e outros compostos fenólicos menos polares. A linha de base estável e a boa resolução entre os principais picos indicam adequada eficiência cromatográfica e preparo de amostra (Dantas et al., 2015; Maia et al., 2020).

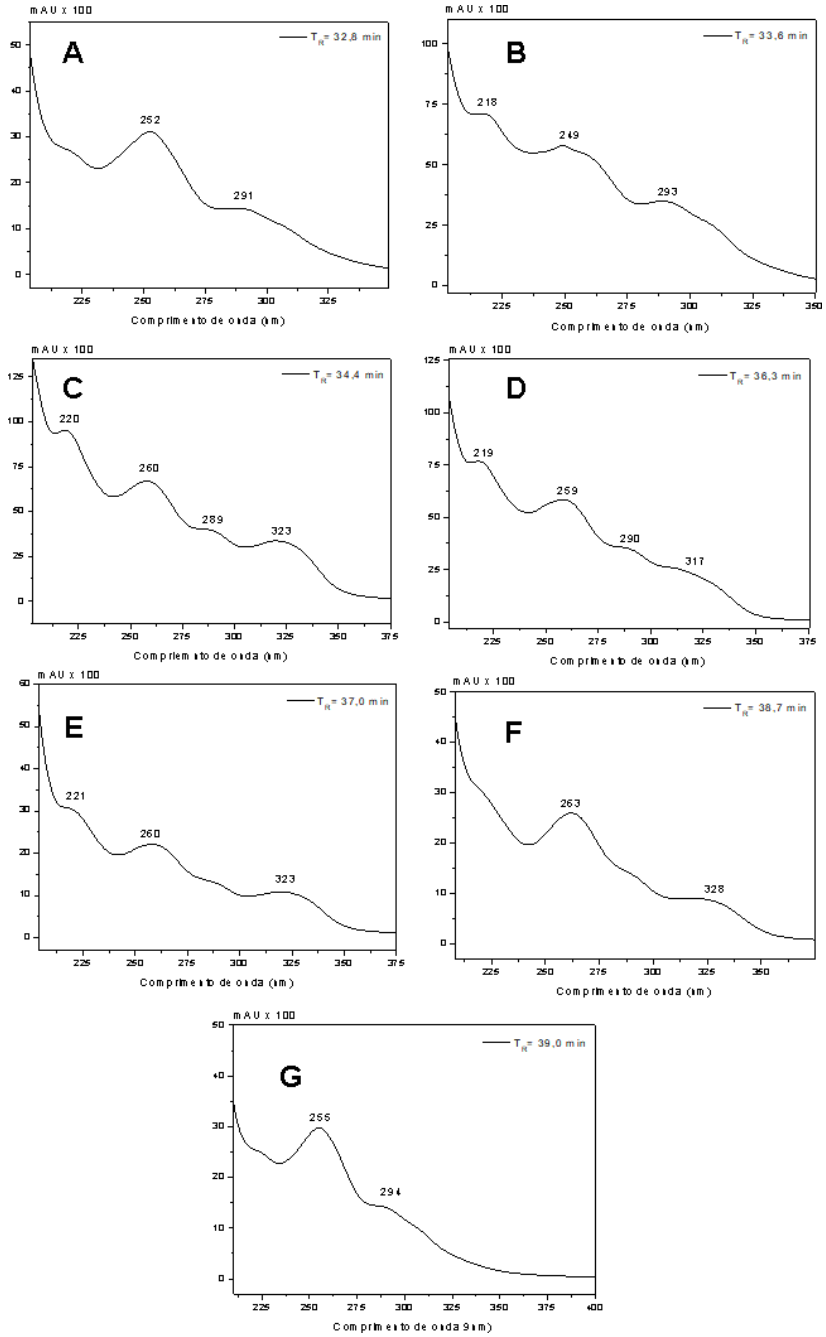
Figura 4 - Cromatograma do extrato etanólico de Amburona. l=254 nm. coluna C-18, fase móvel: MeOH-H2O, gradiente exploratório: 0-50min, 5-100% MeOH; 50-60min, 100% MeOH, vazão da fase móvel de 1,0 mL min-1.



Fonte: Autores.

A figura 5 apresenta os espectros UV-DAD (200-400 nm) dos compostos que eluíram do extrato etanólico de Amburana entre 30 e 40 minutos de tempo de retenção (Tr). Os picos de A-G correspondem a um pico cromatográfico diferente com tempos de retenção específicos de cada composto. Bandas entre 250-280 nm. Indicam presenças de anéis aromáticos e compostos fenólicos e uma Absorção entre 300-350 nm flavonoides e cumarinas (Benheim et al., 2011; Canuto et al., 2014).

Figura 5 - Espectros UV-DAD (200-400 nm, A-G) do extrato etanólico da Amburana nos tempos de retenção entre 30-40 min.

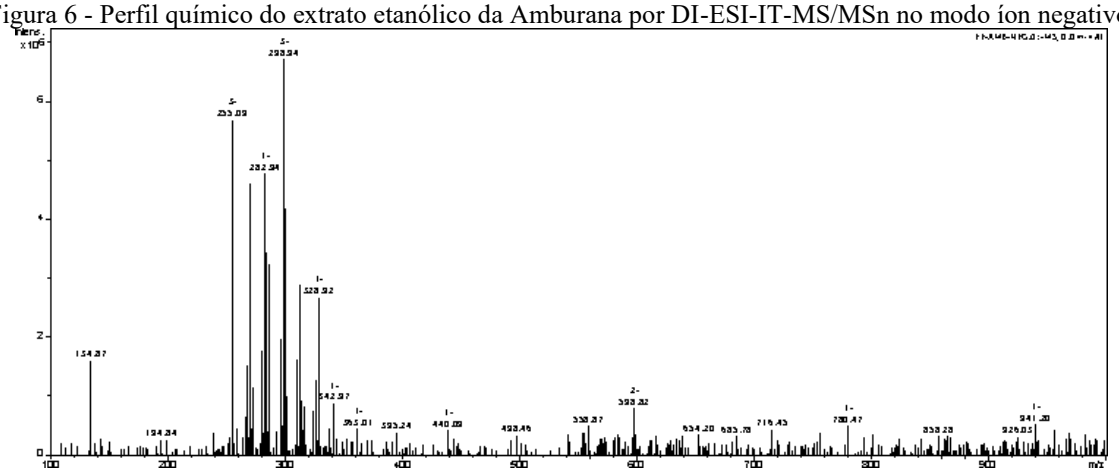


Fonte: Autores.

Na análise por DI-ESI-IT-MS/MSn no modo de iões negativos, um total de 5 compostos com tempos de retenção de 32,8–34,4 min pode indicar compostos fenólicos mais polares. O pico predominante em 36,3–37,0 min mostra o principal produto do extrato, provavelmente cumarina ou um derivado metoxilado. Compostos como flavonoides foram encontrados no extrato etanólico de Amburana: chacona (1), isoflavona (2), flavonas (3 e 5) e flavonol (4) (Figuras 6-7), corroborando os dados de HPLC-DAD. Na Figura 7, podemos observar os fragmentos dos compostos encontrados nos

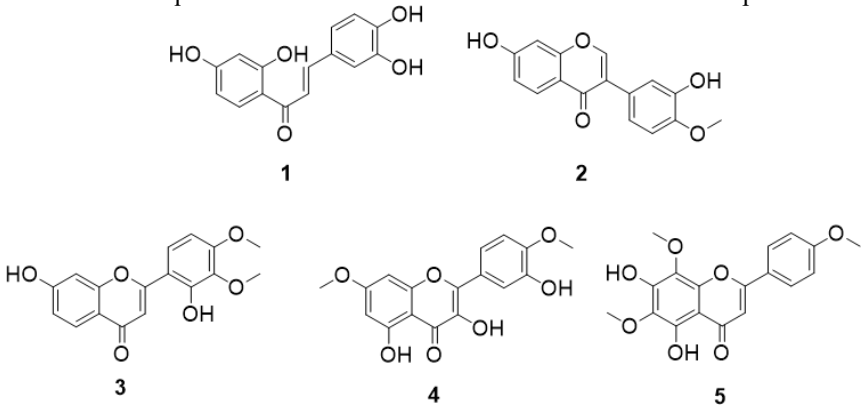
antioxidantes fornecidos pelo extrato (Silveira et al., 2022).

Figura 6 - Perfil químico do extrato etanólico da Amburana por DI-ESI-IT-MS/MSn no modo íon negativo.



Fonte: Autores.

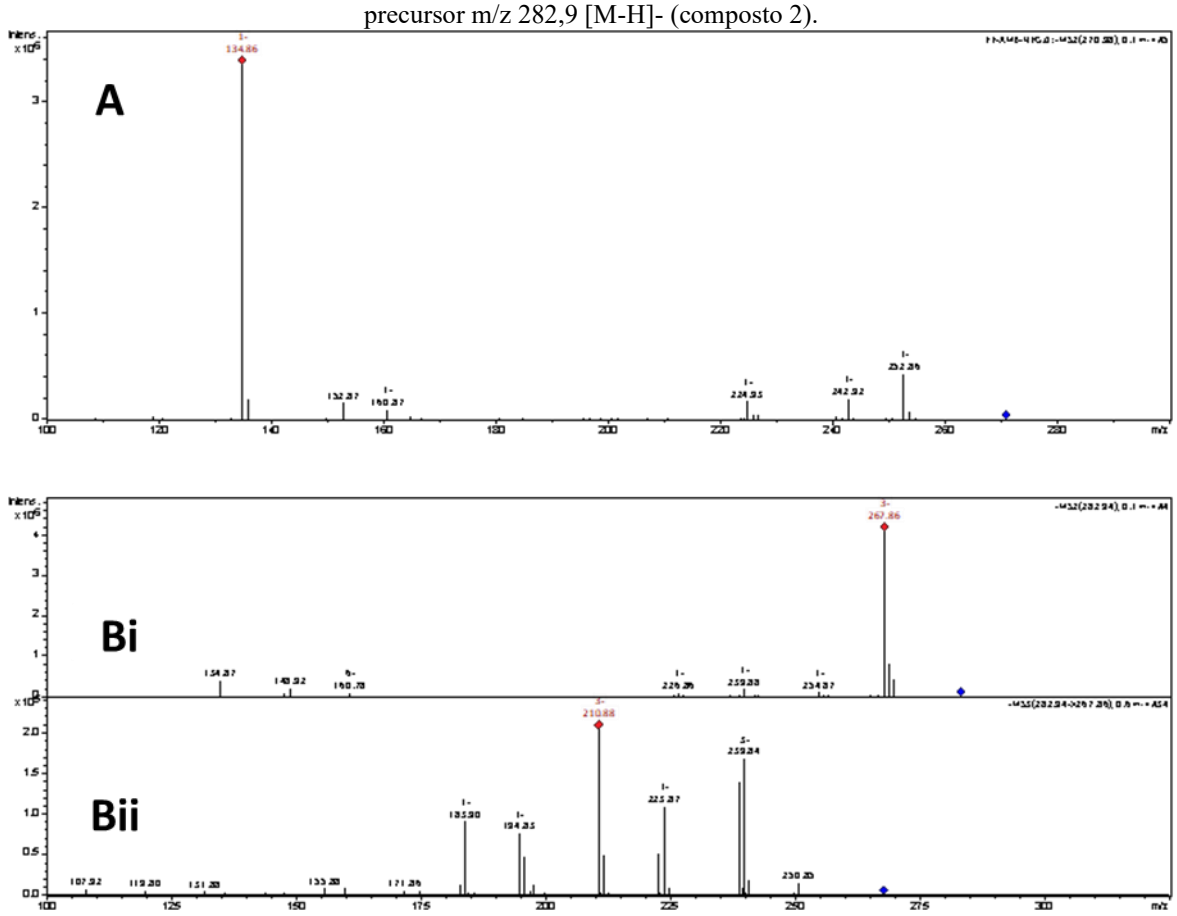
Figura 7 - Constituintes químicos anotados no extrato etanólico da Amburana por DI-ESI-IT-MS^n.



Fonte: Autores.

O íon da molécula desprotonada em m/z 271,0 [M-H]-, apresentou íons fragmentos em m/z 252,8 [M-H-H2O]-, 224,9 [M-H-H2O-CO]- e 134,8 [M-H-C6H7O2]-, referindo-se a uma clivagem alfa a carbonila (Figura 8A). O composto foi anotado como buteina (1) (Liu et al., 2020; Silveira et al., 2022). O composto 2, apresentou íon da molécula desprotonada em m/z 282,9 [M-H]- e íon fragmento no espectro MS2 em m/z 267,8 [M-H-CH3]-. O espectro MS3 apresentou íons fragmentos em m/z 238,9 [M-H-CH3-CO]-, 223,8 [M-H-CH3-CO2]- e m/z 210,8 [M-H-CH3-C2O2H]- (Figura 8Bi-Bii). O composto foi anotado como a calicosina (2). (Wang et al., 2008).

Figura 8 - Espectro de massas MS2 do (A) íon precursor m/z 271,0 [M-H]- (composto 1), (Bi) e MS3 (Bii) do íon precursor m/z 282,9 [M-H]- (composto 2).



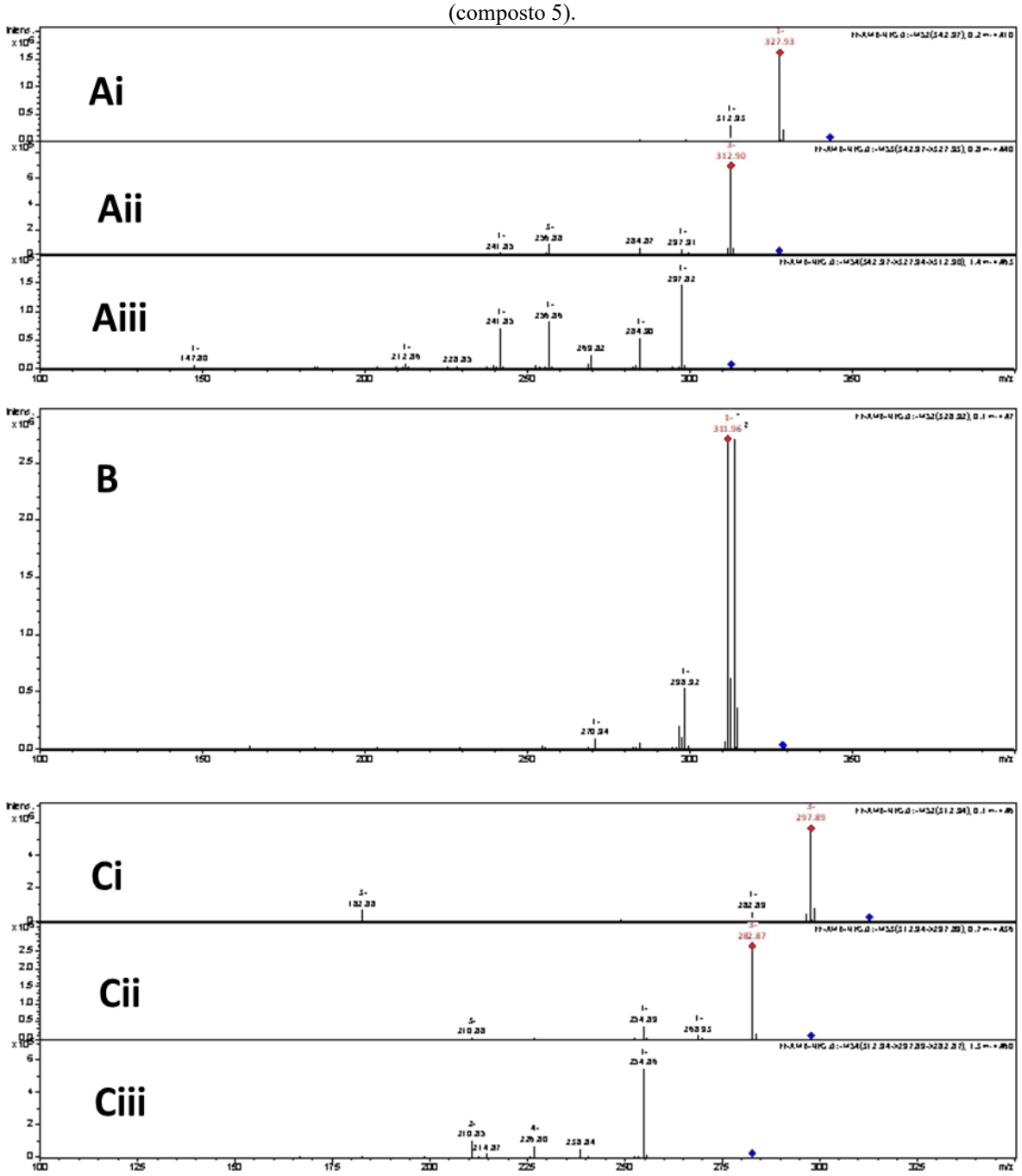
Fonte: Autores.

Os íons da molécula desprotonada m/z 312,9 [M-H]- e 342,9 [M-H]-, foram anotados como sendo flavonas metoxiladas. O composto 3, apresentou íon molecular desprotonado m/z 312,9 [M-H]- e íons fragmentos no espectro MS2 em m/z 297,8 [M-H-CH3]-, no espectro MS3 em m/z 282,8 [M-H-(CH3)2]- e MS4 m/z 254,8 [M-H-(CH3)2-CO]-(Figura 9Ai-Aiii), anotado como sendo cirsimaritina (3) (Boukhalkhal et al., 2020). O espectro de massas do composto 4 apresentou íon da molécula desprotonada em m/z 328,9 [M-H]-, no espectro MS2 foram observados os íons fragmentos m/z 313,9 [M-H-CH3]-, 298,9 [M-H-(CH3)2]-, 285 [M-H-CO2]-, 271 [M-H-(CH3)2-CO]- (Figura 9B).

O composto foi anotado como 3,5,3′-tri-hidroxi-7,4′-dimetoxiflavona (4) (Falcão et al., 2008). Para o composto 5, foi observado íon da molécula desprotona em m/z 342,9 [M-H]-, o espectro MS2 apresentou íon fragmento m/z 327,9 [M-H-CH3]-, o MS3 m/z 312,9 [M-H-(CH3)2]- e o MS4 m/z 297,8 [M-H-(CH3)3]-, correspondente a perdas sucessivas de grupos metilas. Além disso foram observados os íons fragmentos em m/z 284,8 [M-H-(CH3)2-CO]-, m/z 269,8 [M-H-(CH3)2-CO-CH3]- e m/z 241,8 [M-H-(CH3)2-CO-CH3-CO]-(Figura 9Ci-Ciii), sendo possível anotar o composto como a nevadensina (5) (Végh et al., 2017).

Todos esses resultados mostram que os constituintes contidos no extrato etanólico da Amburana que corroboraram para a melhoria do resultado na resistência à oxidação. Essa estabilidade superior a 11,03 horas sugere menor formação de compostos em motores e sistemas de combustível. Foi feito o teste no Rancimat EN 14112 a (B. B. Ferrari et al., 2021). Onde conseguimos identificar as substâncias adicionadas ao biodiesel capazes de minimizar as reações de oxidação, retardando o início das reações de oxidação, interrompendo a propagação radicalar. Para atestar a sua eficácia no biodiesel utilizamos o método Rancimat mostrado na figura 10. A tabela 1 mostra os compostos identificados pelo DI-ESI-IT-MS^n.

Figura 9 - Espectros de massas MS2 (Ai) e MS3 (Aii) e MS4 (Aiii) do íon precursor m/z 312,9 [M-H]- (composto 3). (B) íon precursor m/z 328,9 [M-H]- (composto 4). (Ci) e MS3 (Cii) e MS4 (Ciii) do íon precursor m/z 342,9 [M-H]- (composto 5).



Fonte: Autores.

Tabela 1 – Compostos anotados por DI-ESI-IT-MSn no extrato etanólico de Amburana

DI-ESI-IT-MSⁿ						
Nº	Formula Molecular	Massa Molecular	[M-H]⁻ (*m/z*)	MS/MSⁿ fragmentos (abundância em porcentagem/%)	Composto	Ref.
1	$C_{15}H_{12}O_5$	272	271,0	MS^2 [270,9]: 252,8 (13); 224,9 (15); **134,8** (100)	Buteina	Liu et al., 2020
2	$C_{16}H_{12}O_5$	284	282,9	MS^2 [282,9]: **267,8** (100); 238,9 (5) MS^3 [267,8]: 238,8 (68); 223,8 (53); **210,8** (100)	Calicosina	Wang et al., 2008
3	$C_{17}H_{14}O_6$	314	312,9	MS^2 [312,9]: **297,8** (100); 282,8 (11) MS^3 [297,8]: **282,8** (100); 254,8 (15) MS^4 [282,8]: **254,8** (100); 226,8 (13)	Cirsimaritina	Boukhalkhal et al., 2020
4	$C_{18}H_{16}O_7$	330	328,9	MS^2 [328,9]: **313,9** (100); 298,9 (19); 285 (1), 271 (3)	3,5,3′-tri-hidroxi-7,4′-dimetoxiflavona	Falcão et al., 2012
5	$C_{17}H_{14}O_7$	344	342,9	MS^2 [342,9]: **327,9** (100); 312,9 (19) MS^3 [327,9]: **312,9** (100); 297,9 (7), 284,8 (4), 256,8 (12) MS^4 [312,9]: **297,9** (100); 284,9 (36), 256,8 (55), 241,8 (24)	Nevadensina	Végh et al., 2017

Fonte: Autores.

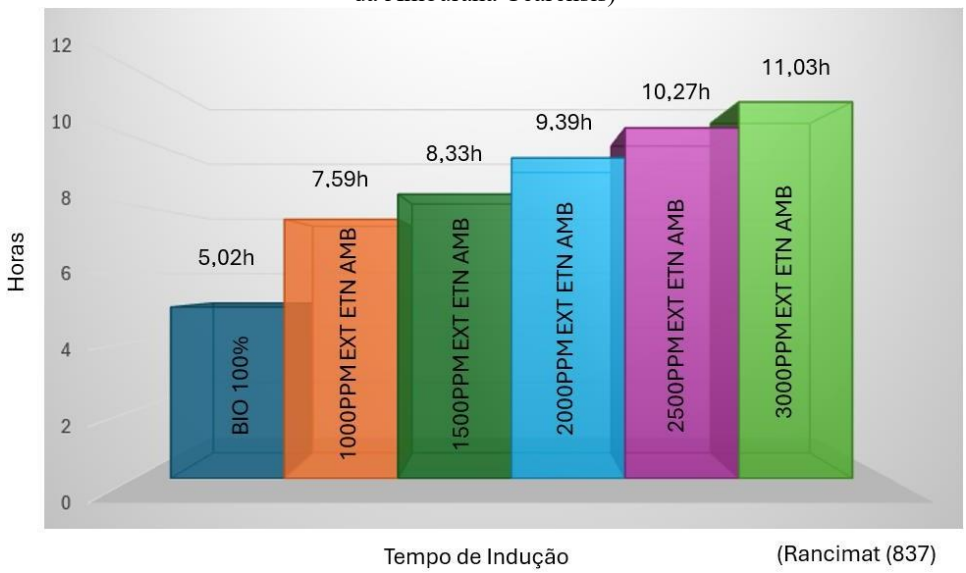
3.5 ANÁLISE DA ESTABILIDADE OXIDATIVA DO BIODIESEL DE SOJA COMERCIAL NA PRESENÇA E AUSÊNCIA DO EXTRATO ETANÓLICO DE AMBURANA CEARENSIS

O estudo da estabilidade oxidativa do biodiesel é essencial para avaliar sua resistência à degradação durante o armazenamento e a utilização. A oxidação promove a formação de compostos que alteram as propriedades físico-químicas do combustível e podem comprometer o desempenho e a durabilidade dos sistemas de injeção. Dessa forma, a avaliação da estabilidade oxidativa permite prever o comportamento do biodiesel ao longo do tempo, subsidiar a adequação às normas regulatórias e orientar estratégias, como a aditivação com antioxidantes, para assegurar desempenho e confiabilidade do biocombustível.

O ensaio de estabilidade à oxidação a 110°C, realizado pelo método Rancimat (EN 14112), determina o tempo de indução até a formação de produtos de oxidação, sendo um parâmetro fundamental para avaliar a resistência do biodiesel à degradação oxidativa.

A Figura 10 apresenta os resultados dos tempos de indução do biodiesel de soja puro, sem adição de antioxidantes, bem como do biodiesel aditivado com 1000, 1500, 2000, 2500 e 3000 ppm de extrato etanólico de Amburana empregado como aditivo antioxidante.

Figura 10 - Gráfico de estabilidade oxidativa para biodiesel de soja/BIOPAR - puro - 1000 a 3000 ppm (Extrato etanólico da Amburana Cearensis)



Fonte: Autores.

A Resolução ANP nº 920/2023 estabelece um valor mínimo de 13 horas para a estabilidade oxidativa de biocombustíveis, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Valores mínimos do período de indução (Lôbo et al., 2009)

Regulamento/Norma	**Período de Indução Mínimo**	**Método de Ensaio**
Brasil (ANP)	≥ 13 h	EN 14112 (Rancimat) ou equivalente
Europa (EN 14214)	≥ 06 h	EN 14112 (Rancimat)
EUA (ASTM D6751)	Não especificado	Testes podem ser feitos conforme métodos associados, mas nenhuma exigência mínima oficial no D6751

Fonte: Autores.

Os resultados obtidos evidenciam que o biodiesel de soja puro apresentou baixa estabilidade oxidativa, com período de indução de 5,02 h, valor inferior ao mínimo estabelecido pela norma europeia EN 14214 (6 h) e, de forma ainda mais expressiva, ao requisito vigente no Brasil, definido pela ANP como 13 h, mostrando o extrato etanólico da Amburana cearensis como potencial substituto a compostos sintéticos.

A adição do extrato etanólico de Amburana resultou em aumento significativo e gradual da estabilidade oxidativa, alcançando 7,59 h (1000 ppm), 8,33 h (1500 ppm), 9,39 h (2000 ppm), 10,27 h (2500 ppm) e 11,03 h (3000 ppm), valores que, embora ainda não atendam à exigência brasileira, superam o limite mínimo europeu, indicando que o biodiesel aditivado nessas concentrações estaria apto para uso em mercados internacionais com especificações menos restritivas.

4 CONCLUSÃO

Foi possível identificar os compostos presentes no exsudado da Amburana cearensis, o produto natural utilizado mostrou-se relevante no combate à oxidação do biodiesel de soja, mostrando-se uma área promissora no campo científico no ambito de substituintes para antioxidantes sintéticos. As analises termoanalíticas mostraram que o uso do produto a altas temperaturas é estavel, indicando maior resistência do combustível à diferentes condições de armazenamento, temperatura e operação.

O ensaio de estabilidade à oxidação a 110°C , realizado pelo método Rancimat apresentou um período de indução de 11,03 horas, utilizando como aditivo antioxidante 3000ppm de extrato etanólico do exsudado da Amburana Cearensis, conseguindo um valor aproximado do mínimo exigido por lei. O que evidenciou sua eficiência na mitigação da oxidação em comparação ao biodiesel sem aditivos mostrando que a continuação da pesquisa é promissora.

Tal desempenho destaca o potencial do extrato como uma futura alternativa de substituição sustentável aos antioxidantes sintéticos tradicionalmente empregados, ou até estudos para realizar blendas, atendendo à demanda por insumos renováveis e ambientalmente seguros, mostrando o extrato como uma estratégia viável e eficiente para manter uma melhor estabilidade oxidativa do biodiesel, agregando valor a um produto natural que obteve bons resultado ao ser testado em um biodiesel comercial.

AGRADECIMENTOS

A Deus, a Universidade Federal do Maranhão - UFMA, Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental - PPGC&TAmb, CAPES, a Universidade Federal do Piauí - UFPI pelos laboratórios de química, Matsens e Lapetro, empresa BIOPAR, EMBRAPA Meio Norte - PI, Prefeitura Municipal de Bacabal - MA, através da Secretaria Municipal de Meio Ambiente, a empresa Analysis, ao Laboratório Biopolmat da Uniara - Araraquara SP.

As minhas amigas incentivadoras desde o início do projeto Klenne Novais Vilanova e Jennifer da Cruz Arouche Silva, aos colegas, familiares, ao meu pai pelo suporte financeiro, ao meu tio materno Vitorino Fontenele Freire pelo apoio e conselhos. E à minha mãe que sempre me incentivou (in memoriam).

REFERÊNCIAS

AABY, K.; EKEBERG, D.; SKREDE, G. Characterization of phenolic compounds in strawberry (Fragaria x Ananassa) fruits by different HPLC detectors and contribution of individual compound to total antioxidant capacity. Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 55, 2007 p. 4395-4406. doi.org/10.1021/jf0702592.

B. B. FERRARI et al. Evaluation of Antioxidant Additives for Biodiesel by EPR and UV-Vis Spectroscopies, and the Rancimat Method (EN 14112). Revista Virtual de Química, 13(4), 2021, 900–909. https://doi.org/10.21577/1984-6835.20210016.

BOUKHALKHAL, S. et al. UHPLC-DAD-ESI-MSn profiling variability of the phenolic constituents Artemisia compestris L. populations growing in Algeria. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, v. 23, p. 101483-101506, 2020. doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101483.

BRITO, Haissa Oliveira et al. Análise da composição fitoquímica do extrato etanólico das folhas da Annona squamosa (ATA). Rev. Bras. Farm, v. 89, n. 3, p. 180-184, 2008.

BRASIL. Resolução ANP nº 920, de 4 de abril de 2023. Estabelece a especificação do biodiesel e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializem o produto em território nacional. ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-920-2023.

CANUTO, K. M.; SILVEIRA, E. R. Constituintes químicos da casca do caule de Amburana cearensis A. C. SMITH. Química Nova, v. 29, n. 6, p. 1241-1243, 2006. doi.org/10.1590/S0100-40422006000600018.

CASTELO, R. M. , Silva, L. C. da ., Alexandre, J. de B. et al., Análise Termogavimétrica de Micropartículas de óleo de Pequi (Caryocar Coriaceum Wittm). Em matriz polimérica de alginato e quitosana. Revista Coleta Científica, 4 (8), 2020, 23-30. Disponível em: https://doi.org/10.5281/zenodo.4716820

DANTAS, A. C. et al. Acaricidal activity of Amburana cearensis on the cattle tick Rhipicephalus (Boophilus) microplus. Ciência Rural, 46(3),2015, 536–541. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20150334.

DAVID, E.; KOPAC, J. Survey on Antioxidants Used as Additives to Improve Biodiesel's Stability to Degradation through Oxidation. Molecules, 2023, 28, 7765. doi.org/10.3390/molecules28237765.

DE OLIVEIRA FARIAS, E. A. et al. Screen-printed electrode modified with a composite based on Amburana cearensis gum, multi-walled carbon nanotubes, and gold nanoparticles for electrochemical determination of total isoflavones in soybean cultivars. J Solid State Electrochem, 29, 2025, 1121–1137. Disponível em: doi.org/10.1007/s10008-024-05963-x.

DE PAULA, R. C. M. et al. Characterization of anacardium occidentale exudate polysaccharide. Polymer International, v. 45, n. 1, 1998.

FALCÃO, S. I. et al. Phenolic profiling of portuguese propolis by LC–MS spectrometry: uncommon propolis rich in flavonoid glycosides. Phytochemical Analysis, 2012, v. 24, n. 4, p. 309-318. Disponível em: doi.org/10.1002/pca.2412.

FERREIRA, M. J. G. et al. Antimicrobial activity and chemical characterization of the bark decoction of cumaru stem. Ciência Rural, 2020, v. 50, n3, p. e20190785-e20190791. Disponível em: doi.org/10.1590/0103-8478cr20190785.

GIÃO, M. S. et al. Infusions of Portuguese medicinal plants: Dependence of final antioxidant capacity and phenol content on extraction features. Journal of the Science of Food and Agriculture, 87(14), 2007, 2638–2647. Disponível em: https://doi.org/10.1002/jsfa.3023.

JAIN, S.; SHARMA, M. P. Correlation development for effect of metal contaminants on the oxidation stability of Jatropha curcas biodiesel. Fuel, 90(5), 2011, 2045–2050. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.02.002

LIU, J. et al. Simultaneous study of anti-ferroptosis and antioxidant mechanisms of butein and (S)-butin. Molecules, 2020, v. 25, p. 674-691. Disponível em: doi.org/10.3390/molecules25030674.

LÔBO, I. P. et al. Biodiesel: parâmetros de qualidade e métodos analíticos. Química Nova, 32(6), 2009, 1596–1608. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000600044.

OLIVEIRA, M. T. A. et al. Determination of phenolic compounds and antioxidant activity of green, black and white teas of Camellia sinensis (L.) Kuntze, Theaceae. Revista Brasileira de Plantas Medicinais, 2014, v. 16, n. 3, p. 490-498. doi.org/10.1590/1983-084X/13_061.

SANCHES, F. S. et al. (2025). Dichloromethane Extract from Amburana cearensis (Allemão) A.C. Sm. Seeds and Its Coumarin Reduce ROS Production and Protect PC12 Cells Against Glutamate Excitotoxicity and Oxygen-Glucose Deprivation. Antioxidants, 14(4), 2025, p. 440. Disponível em: https://doi.org/10.3390/antiox14040440.

SANTI, M. M. et al. Determinação do perfil fitoquímico de extrato com atividade antioxidante da espécie medicinal Cordia verbenacea DC. por HPLC-DA. Revista Brasileira de Plantas Medicinais, 2014, v. 16, n. 2, p. 256-261. Disponível em: doi.org/10.1590/S1516-05722014000200014.

SILVEIRA, Z. de S. et al. Phytochemistry and Biological Activities of Amburana cearensis (Allemão) ACSm. Molecules, 27(2), 2022, p. 505. Disponível em: https://doi.org/10.3390/molecules27020505.

TORRE, M. P.; CAVERO, R. Y.; CALVO, M. I. Anticholinesterase activity of selected medicinal plants from Navarra region of Spain na a detailed phytochemical investigation of Origanum vulgare L. ssp. Vulgare. Molecules, 2022, v. 27, p. 7100-7124. Disponível em: doi.org/10.3390/molecules27207100.

TENGKU-ROZAINA, T.M.; BIRCH, E.J.; Thermal Analysis for Lipid Decomposition by DSC and TGA. Encyclopedia of food chemistry, v.2, 345-352, 2019

VÉGH, A. K. et al. Three newly identified lipophilic flavonoids in Tanacetum parthenium supercritical fluid extract penetrating the Blood-Brain Barrier. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2017, v. 149, p. 488-493. Disponível em: doi.org/10.1016/j.jpba.2017.11.029.

WANG, Y. et al. Characterization of fifty-one flavonoids in a Chinese herbal prescription Longdan Xiegan Decoction by high-performance liquid chromatography coupled to electrospray ionization tandem mass spectrometry and photodiode array detection. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2008, v. 22, p. 1767-1778. Disponível em: doi.org/10.1002/rcm.3536