



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

VANESSA DA SILVA LINS

**APLICAÇÃO DE UM SECADOR HÍBRIDO PARA O ESTUDO DE LIBERAÇÃO DE
RINCOFOROL ADSORVIDO EM MATRIZ CARBONÁCEA**

Maceió
2024

VANESSA DA SILVA LINS

**APLICAÇÃO DE UM SECADOR HÍBRIDO PARA O ESTUDO DE LIBERAÇÃO DE
RINCOFOROL ADSORVIDO EM MATRIZ CARBONÁCEA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof. Dr. Livia Maria de Oliveira Ribeiro.

Coorientadora: Msc. Larissa Lima de Arruda Melo.

Maceió
2024

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

L759a Lins, Vanessa da Silva.
Aplicação de um secador híbrido para o estudo de liberação de rincoforol adsorvido em matriz carbonácea / Vanessa da Silva Lins. – 2024.
43 f. il. : figs. ; tabs. color.

Orientadora: Lívia Maria de Oliveira Ribeiro.
Co-orientadora: Larissa Lima de Arruda Melo.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química).
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 41-43.

1. Rincoforol. 2. Liberação prolongada. 3. Planejamento fatorial 2³. I.
Título.

CDU:665.777

Dedico a Deus, por toda a força e determinação concedidas a mim para continuar, e aos meus pais e irmãos pelo esforço concedido à minha educação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço de coração aos meus pais e irmão, Cícera, Abidoral e William, que não mediram esforços para me proporcionar as melhores condições de estudo e investiram na minha educação, sempre acreditando no meu potencial. O apoio incondicional deles foi fundamental para minha trajetória acadêmica, dando-me força e incentivo para seguir em frente.

À minha orientadora, Livia Maria, sou imensamente grata pela oportunidade de realizar este trabalho e pela sua paciência em me orientar em todas as etapas do processo. Sua orientação foi fundamental para o sucesso deste projeto.

Também quero expressar minha gratidão à minha coorientadora, Larissa Melo, por aceitar o desafio de me auxiliar neste trabalho e por estar sempre disponível para esclarecer minhas dúvidas. Sua coorientação foi essencial para o sucesso deste projeto.

Aos meus amigos do curso de Engenharia Química, especialmente a Layne Leite, Maria Regina, Douglas Cavalcante, Juliana Vanessa, Matheus, Ítalo Brito e Ana Carolina, agradeço por compartilharem comigo não só os desafios acadêmicos, mas também momentos de descontração e apoio mútuo. Vocês foram parte fundamental da minha jornada acadêmica.

Expresso minha sincera gratidão a todos os professores que contribuíram para minha formação, em especial aos que me orientaram no final do curso, como Vânia Teles, Albanise Enide, Rodolfo Brandão e Carlos Eduardo. Agradeço também à instituição, por proporcionar uma experiência única de estudo e crescimento pessoal e profissional.

Ao meu namorado, Raul Sales, sou profundamente grata por seu apoio constante ao longo da graduação. Sua generosidade, incluindo o empréstimo do seu notebook para a finalização do meu TCC, foi fundamental para o sucesso deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Muito obrigada pelo apoio e pela confiança em mim depositada.

RESUMO

A cultura do coco (*Cocos nucifera L.*) apresenta-se de forma bastante desenvolvida no Brasil. No entanto, essa cultura sofre com o ataque de inúmeras pragas que causam danos irreparáveis ao coqueiro. Dentre as principais pragas, encontra-se o besouro *Rhynchophorus palmarum*, agente transmissor do nematoide *Bursaphelenchus cocophilus*, responsável pela doença do anel-vermelho, a qual é considerada uma das principais causadoras de danos à produção de frutos e mortalidade de plantas. Atualmente, a maioria das estratégias de controle de insetos nas culturas agrícolas utiliza pesticidas. No entanto, grandes avanços estão relacionados com o uso de semioquímicos, que se baseia na liberação destes para o meio ambiente, podendo ser considerado como substâncias que transmitem informações durante interações entre indivíduos. Quando essas substâncias são específicas para a comunicação dentro da mesma espécie, são chamadas de feromônios. O uso de feromônios associado às armadilhas com alimentos tem-se mostrado bastante eficiente na captura do inseto-praga, porém, em virtude das condições ambientais, a cinética de volatilização dessa substância pode ser prejudicada, ocasionando taxas de liberação excessivas, provocando custos elevados ao processo, ou muito baixas, a ponto de não serem identificadas pelos insetos. O feromônio utilizado para a captura do *R. palmarum* é denominado como rincoforol e é disponibilizado em eppendorfs de plástico. Estudos voltados para a redução no consumo de plástico no manuseio de feromônios estão em desenvolvimento, cuja aplicação do agente de captura seria realizada em matrizes sólidas, como o carvão ativado. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a capacidade do carvão ativado do endocarpo do coco de dendê como matriz sólida para incorporação e liberação do rincoforol. Para isso, foi elaborado um planejamento experimental completo 2^3 a fim de investigar a influência da temperatura (30°C e 40°C), velocidade do ar (1,0 m/s e 2,0 m/s) e da granulometria do carvão ($0,5 \text{ mm} < \text{Ø} < 0,6 \text{ mm}$ e $1,19 \text{ mm} < \text{Ø} < 2,80 \text{ mm}$), avaliando a difusividade efetiva do rincoforol como variável resposta. Nos experimentos realizados, utilizou-se 0,1 g de carvão ativado saturado com rincoforol, que foram inseridos em sachês de polietileno, com aproximadamente 6,0 cm de comprimento e 4,0 cm de altura, previamente perfurados. Os ensaios foram realizados em um secador híbrido, de modo que os dispensadores foram alocados em um suporte interno, mantendo uma distância fixa uns dos outros para não haver interferência na liberação do semioquímico proveniente de cada dispositivo. Para compreender melhor o fenômeno em estudo, adsorvente foi submetido à análise de adsorção e dessorção de nitrogênio para determinar os tipos de microporos predominantes no material. Mediante os resultados do planejamento, foi possível verificar os efeitos das variáveis principais e duas interações, de modo que todos foram significativos, revelando a difusividade do rincoforol varia linearmente com variação da temperatura e da granulometria, e apresenta um maior valor ao empregar uma menor velocidade do ar de entrada. Também foi realizada uma análise do comportamento da transferência de massa através de modelos matemáticos de secagem de Lewis e Page. Verificou-se que a melhor condição encontrada foi a utilização do rincoforol com uma temperatura de 30°C, com velocidade do ar de 1,0 m/s e granulometria entre $0,5 \text{ mm} < \text{Ø} < 0,6 \text{ mm}$, o qual apresentou uma menor perda de massa.

Palavras-Chave: Rincoforol, Liberação Prolongada, Planejamento fatorial 2^3 .

ABSTRACT

The coconut culture (*Cocos nucifera L.*) is highly developed in Brazil. However, this culture suffers from the attack of numerous pests, which cause irreparable damage to coconut trees. Among the main pests is the *Rhynchophorus palmarum* beetle, a transmitter of the *Bursaphelenchus cocophilus* nematode, responsible for the red-ring disease. This disease is considered one of the main causes of damage to fruit production and plant mortality. Currently, most insect control strategies in agricultural crops use pesticides. However, significant advances are associated with the use of semiochemicals, which relies on their release into the environment. Semiochemicals are substances that convey information during interactions between individuals. When these substances are specific for communication within the same species, they are called pheromones. The use of pheromones associated with food traps has proven to be quite efficient in capturing the pest insect. Due to environmental conditions, the volatilization kinetics of this substance may be impaired, resulting in excessive release rates, leading to high costs to the process, or too low, to the point of not being identified by insects. The pheromone used for capturing *R. palmarum* is called rincophorol and is available in plastic eppendorf containers. Studies aimed at reducing plastic consumption in pheromone handling are under development, where the application of the capture agent would be carried out in solid matrices, such as activated charcoal. In this context, this study aimed to evaluate the capacity of activated charcoal from the endocarp of oil palm as a solid matrix for incorporation and release of rincophorol. For this purpose, a complete 2^3 experimental design was elaborated to investigate the influence of temperature (30°C and 40°C), air velocity (1.0 m/s and 2.0 m/s), and charcoal particle size ($0.5 \text{ mm} < \emptyset < 0.6 \text{ mm}$ and $1.19 \text{ mm} < \emptyset < 2.80 \text{ mm}$), evaluating the effective diffusivity of rincophorol as the response variable. In the experiments conducted, 0.1 g of activated charcoal saturated with rincophorol was used, which were inserted into polyethylene sachets, approximately 6.0 cm in length and 4.0 cm in height, previously perforated. The assays were carried out in a hybrid dryer, so that the dispensers were allocated on an internal support, maintaining a fixed distance from each other to avoid interference in the release of the semiochemical from each device. To better understand the phenomenon under study, the adsorbent was subjected to nitrogen adsorption and desorption analysis to determine the types of micropores predominant in the material. Based on the results of the design, it was possible to verify the effects of the main variables and two interactions, all of which were significant, revealing that the diffusivity of rincophorol varies linearly with changes in temperature and particle size, and it presents a higher value when employing a lower inlet air velocity. A mass transfer behavior analysis was also performed through mathematical drying models of Lewis and Page. It was found that the best condition was the use of rincophorol at a temperature of 30°C, with an air velocity of 1.0 m/s and particle size between $0.5 \text{ mm} < \emptyset < 0.6 \text{ mm}$, a condition found in experiment number 1, which showed the lowest mass loss.

Keywords: Rincophorol, Extended Release, 2^3 Factorial Design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Dano causado pelo nematoide da broca do olho-do-coqueiro.....	14
Figura 2. Aparência externa da planta atacada.....	15
Figura 3. Sintoma interno, evidenciando a faixa avermelhada no estripe do coqueiro.....	16
Figura 4. Corte horizontal da planta infectada.....	16
Figura 5. Macho do <i>R. palmarum</i>	17
Figura 6. Ciclo de vida do besouro <i>R. palmarum</i>	18
Figura 7. Broca-do-olho-do-coqueiro, causador da doença anel vermelho.....	18
Figura 8. Adulto de <i>R palmarum</i> : a) presença de pelos no rosto do macho e b) ausência no da fêmea.....	19
Figura 9. Ilustração estrutural do rincoforol.....	20
Figura 10. Foto da armadilha tipo balde.....	21
Figura 11. a) Feromônio rincoforol e b) carvão ativado do endocarpo do coco de dendê.....	24
Figura 12. Fluxograma do experimento.....	26
Figura 13. Esquema do secador híbrido e de seu sistema de controle.....	27
Figura 14. Secador híbrido e de seu sistema de controle.....	27
Figura 15. Isotermas de adsorção e dessorção de N ₂ (g) pelo método de BET e distribuição do tamanho de poros, pelo método BJH, do adsorvente com: a e b) menor; c e d) maior granulometria.....	31
Figura 16. Diagrama de Pareto.....	32
Figura 17. Superfície de resposta: a) Granulometria (mm) versus Temperatura (°C), b) Velocidade (m/s) versus Temperatura (°C) e c) Granulometria (mm) versus Velocidade (m/s).	35
Figura 18. Variações da razão de perda de massa em função do tempo.....	37
Figura 19. Variações da razão de perda de massa em função do tempo analisando a temperatura numa velocidade de 1 m/s.....	38
Figura 20. Variações da razão de perda de massa em função do tempo analisando a temperatura numa velocidade de 2 m/s.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Equações utilizadas para descrever a perda de massa	23
Tabela 2. Planejamento fatorial completo 2^3	25
Tabela 3. Matriz do planejamento fatorial completo 2^3	25
Tabela 4. Características morfológicas do carvão ativado de endocarpo de coco de dendê. ...	31
Tabela 5. Condições das variáveis e seus níveis, e dos resultados obtidos a partir do planejamento fatorial 2^3	32
Tabela 6. Resultado do ajuste dos modelos de Lewis e Page aos dados experimentais.....	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	Geral.....	13
2.2	Específicos.....	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	Doença do Anel Vermelho.....	14
3.2	Inseto vetor <i>Rhyncophorus palmarum</i>	17
3.3	Rincoforol: semioquímico para o controle da doença do anel vermelho.....	19
3.4	Semioquímicos.....	Erro! Indicador não definido.
3.5	Liberação controlada de feromônios.....	21
3.6	Secagem híbrida.....	22
4	METODOLOGIA.....	24
4.1	Materiais	24
4.2	Caracterização do carvão ativado	24
4.3	Planejamento Fatorial Completo 2 ³	25
4.4	Experimentos de liberação	26
4.5	Análise dos dados cinéticos e transferência de massa	28
5	RESULTADOS	30
5.1	Adsorção/Dessorção de Nitrogênio.....	30
5.2	Planejamento Fatorial Completo 2 ³	31
5.3	Análise dos dados cinéticos e transferência de massa	35
6	CONCLUSÃO.....	40
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

A cultura do coco (*Cocos nucifera L.*) é bastante desenvolvida em diversos países do mundo, tais como Índia, Filipinas, México, Sri Lanka, Brasil, assim como outros lugares que apresentam um clima tropical e favoreçam o seu desenvolvimento. Atualmente, o Brasil se destaca como o quinto maior produtor de coco do mundo, contribuindo com 4,5 % da produção mundial em 2020 (BRAINER; XIMENES, 2020).

No entanto, essa cultura, assim como a cultura do dendezeiro e da cana-de-açúcar, sofre constante ameaça ao ataque de inúmeras pragas, dentre elas do inseto *Rhyncophorus palmarum*, também conhecido como broca-do-olho-do-coqueiro, que causa danos irreparáveis a produção (ARAÚJO JUNIOR, 2018). Esse besouro também é o principal vetor do nematoide *Bursaphelenchus cocophilus*, agente causador da doença do anel-vermelho, que provoca a morte das plantas (TIGLIA et al., 1998; DUARTE et al., 2003).

As plantas afetadas pelo anel vermelho passam por um processo de decomposição, liberando odores que atraem insetos transmissores. Esses insetos penetram na planta, perfurando os tecidos delicados da gema apical. Devido à atração de um número significativo de insetos, geralmente ocorre a formação de casais, que se acasalam e depositam ovos nos tecidos da planta. Como resultado, plantas saudáveis são contaminadas pela postura de ovos ou pelas fezes depositadas nas axilas foliares, iniciando assim um novo ciclo da doença/vetor (MAARA, 1995).

No controle de pragas agrícolas, a técnica mais utilizada ainda é a eliminação pelo uso de agrotóxicos, método eficiente que promove rápida eliminação da praga alvo. Entretanto, o uso de agrotóxicos é causador de diversos problemas, como contaminação de mananciais hídricos; problemas à saúde dos manipuladores; contaminação de alimentos e destruição de inimigos naturais de pragas, provocando, a longo prazo, danos irreparáveis ao ecossistema (GRIFFITH, 1987; MOURA et al., 1997).

Para o controle do *R. palmarum*, anteriormente eram empregadas armadilhas baseadas apenas na atração alimentar, com uma eficácia limitada de até sete dias. No entanto, técnicas mais avançadas foram desenvolvidas, e atualmente, o uso de feromônios tornou-se uma prática consolidada no Brasil. O rincoforol, um feromônio de agregação liberado pelo macho quando este encontra alimento, tem sido empregado com sucesso no monitoramento da praga. Quando combinado com atrativos alimentares, como roletes de cana-de-açúcar ou pedaços de tronco de

coqueiro e dendezeiro, demonstrou resultados positivos. No mercado, existem marcas de feromônios com uma durabilidade que varia entre 45 e 90 dias (RAMOS, 2012).

Tiglia et al. (1998) observaram que a adição do feromônio rinfoforol à cana-de-açúcar, utilizada em armadilhas tipo balde, resultou em um aumento significativo na captura de *R. palmarum* na fase adulta, quadruplicando o número de insetos capturados. Além disso, Chinchilla e Oehlschlager (2002) demonstraram que a captura em massa do inseto utilizando a armadilha tipo balde contribuiu significativamente para a redução da população de insetos em uma determinada área, resultando na diminuição da incidência da doença do anel vermelho em dendezeiros.

Atualmente, o rinfoforol é sintetizado e comercializado pela empresa Interacta Química Ltda, onde sua aplicação no campo é realizada através de microtubos plásticos do tipo eppendorf, apresentando um tempo de eficiência de até 90 dias. Contudo, busca-se alternativas ecologicamente sustentáveis para a liberação controlada deste feromônio.

O estudo do emprego de materiais microporosos para o suporte de liberação de feromônios está em constante desenvolvimento. Esses materiais, reconhecidos por sua alta área superficial e capacidade de adsorção, têm sido amplamente explorados para possibilitar uma liberação prolongada e controlada de feromônios. Essas matrizes facilitam a liberação do feromônio em concentrações adequadas para sua detecção pelo inseto, ao mesmo tempo em que oferecem proteção contra fatores como intempéries, oxigênio, umidade, luz ultravioleta, entre outros (VIANA, 2018).

Neste cenário, este trabalho teve como objetivo utilizar o carvão ativado do endocarpo do coco de dendê como matriz sólida para liberação controlada de rinfoforol, utilizando um sistema de secagem composto por um secador híbrido com radiação infravermelho e sistema de circulação de ar com os fatores associados a condições de campo. Para isso, um planejamento fatorial completo 2^3 foi aplicado para investigar a influência da temperatura da fonte de calor, velocidade do fluxo de ar e a granulometria do carvão, determinando as taxas de liberação no sistema carvão-rinfoforol e a difusividade efetiva como variável resposta. Dessa forma, foi possível avaliar se a matriz carbonácea utilizada atua como um sistema de armazenamento e liberação lenta de rinfoforol, propondo uma nova técnica inexistente no mercado, até o presente momento.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Promover a liberação controlada de rinoforol incorporado em carvão ativado, a partir do desenvolvimento de um dispositivo composto de sachê plástico contendo o adsorvente saturado com feromônio.

2.2 Específicos

- Aplicar o carvão ativado do endocarpo do coco de dendê como matriz sólida para liberação controlada do feromônio rinoforol;
- Caracterização do carvão ativo com análise de adsorção/dessorção de nitrogênio ($N_2(g)$);
- Aplicar um planejamento fatorial completo 2^3 a fim de investigar a influências das variáveis: temperatura da fonte IV, velocidade do ar e granulometria do carvão ativado, na liberação controlada de rinoforol, avaliando como resposta a difusividade efetiva do rinoforol;
- Ajustar os modelos cinéticos de Lewis e Page aos dados experimentais, a fim de verificar a qual deles melhor consegue representar o fenômeno estudado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Doença do Anel Vermelho

Dentre as doenças que afetam as culturas do coqueiro (*Cocos nucifera L.*) e do dendezeiro (*Elaeis guineensis*), pode-se citar a doença anel vermelho.

A doença do anel vermelho causada pela broca do olho-do-coqueiro, ocorre endemicamente desde o Rio de Janeiro até o Pará. Seus danos são mais severos nas plantações mais distantes do litoral. A doença causa o secamento das folhas inferiores, deixando os cachos sem suporte físico e nutricional e prejudicando o amadurecimento normal dos frutos, os quais muitas vezes caem ao solo ainda imaturos, Figura 1 (MOURA, 2018).

Figura 1. Dano causado pelo nematoide da broca do olho-do-coqueiro.



Fonte: EMBRAPA, 2021.

A ocorrência da doença é mais frequente em coqueiros de 5 a 15 anos, onde plantas muito jovens não são atacadas em condições naturais. Externamente, as folhas murcham tornando-se amarelo-ouro, começando na ponta dos folíolos e avançando em direção da ráquis, Figura 2. Geralmente essas folhas quebram, permanecendo somente uma parte central com folhas verdes (MAARA, 1995).

Figura 2. Aparência externa da planta atacada.



Fonte: EMBRAPA, 2021.

No interior da planta, o sintoma mais notável é uma faixa avermelhada com largura entre 2 e 4 cm no estipe do coqueiro, como ilustrado na Figura 3, que é característica típica da doença. No entanto, é importante observar que esse sintoma pode variar de acordo com a variedade da planta, sua idade e as condições do plantio (EMBRAPA, 2016).

Figura 3. Sintoma interno, evidenciando a faixa avermelhada no estripe do coqueiro.



Fonte: EMBRAPA, 2016.

A localização do anel vai depender do lugar de início da infecção, de maneira que, às vezes, é mais facilmente observável perto da base, enquanto em outras ocasiões é observado com mais nitidez perto da coroa. Num corte horizontal do tronco, observa-se um anel cor de tijolo ou vermelho-amarronzado, Figura 4 (AGROLINK, 2020).

Figura 4. Corte horizontal da planta infectada.



Fonte: AGROLINK, 2020.

Quando são observados os primeiros sintomas, as plantas devem ser cortadas e destruídas pelo fogo ou cortadas em pequenos pedaços e tratadas com inseticidas; o solo também deve ser tratado com cal para sua desinfecção e deixado livre de vegetação por um tempo não determinado (AGROLINK, 2020).

Nos estados da Bahia e do Pará, o anel-vermelho é reconhecido como a principal doença que afeta a cultura da palma de óleo. No Estado do Pará, a incidência dessa doença tem variado de acordo com os surtos do vetor do nematoide responsável, o *R. palmarum*. Entre os anos de 2012 e 2013, foi observada uma alta incidência de plantas apresentando sintomas de anel-vermelho (MAARA, 1995).

3.2 Inseto vetor *Rhyncophorus palmarum*

Dentre as pragas que afetam as culturas do coqueiro (*Cocos nucifera*), destaca-se o *Rhyncophorus palmarum*, também denominado de bicudo-das-palmáceas, broca-do-olho-do-coqueiro, elefante, aramandaiá e moleque, ilustrado na Figura 5 (RAMOS, 2012).

Figura 5. Macho do *R. palmarum*.

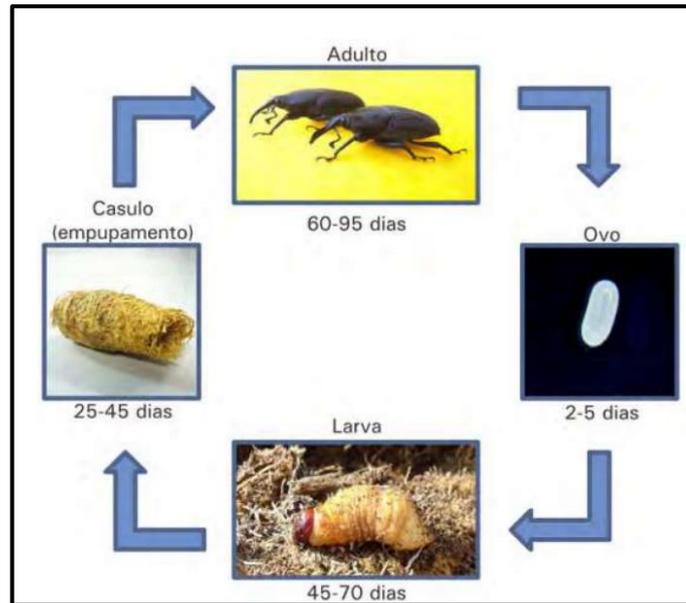


Fonte: NAVARRO *et al.*, 2002.

Esse parasita possui um corpo alongado, com comprimento variando de 775 μm a 1370 μm e diâmetro de 15,5 μm , sendo visível apenas sob uma lupa ou microscópio óptico (EMBRAPA, 2016).

O ciclo de vida desse parasita passa pelo estágio de ovo e quatro estágios juvenis, conforme a Figura 6. O terceiro estágio juvenil é o infectivo ao hospedeiro (BLAIR, 1965; TIHOHOD, 2000).

Figura 6. Ciclo de vida do besouro *R. palmarum*.



Fonte: EMBRAPA, 2016.

O ovo tem formato oblongo, cor branca, mede 2,5 mm de comprimento e 1,0 mm de largura. É colocado individualmente nos tecidos tenros na região apical da planta a uma profundidade de 1 a 2 mm (FERREIRA; QUEIROZ, 2021). Na fase inicial do *R. palmarum*, a larva não possui pernas, possui uma cor branco-creme, porém sua cabeça tem tom castanho-escuro e seu corpo pode chegar até a 75 mm de comprimento e 25 mm de largura. Nessa fase, ela se desenvolve no interior da planta, formando galerias nos tecidos tenros da região apical dela. Ao realizar seu desenvolvimento, tece um casulo com as fibras da palmeira, onde transforma-se em pupa e depois em adulto (RAMOS, 2012).

O inseto possui asas anteriores (élitros) curtas, deixando exposta a parte final do abdômen, e exibem oito estrias longitudinais, conforme ilustrado na Figura 7. Esta espécie possui hábitos gregários e é mais ativa durante o dia (EMBRAPA, 2021).

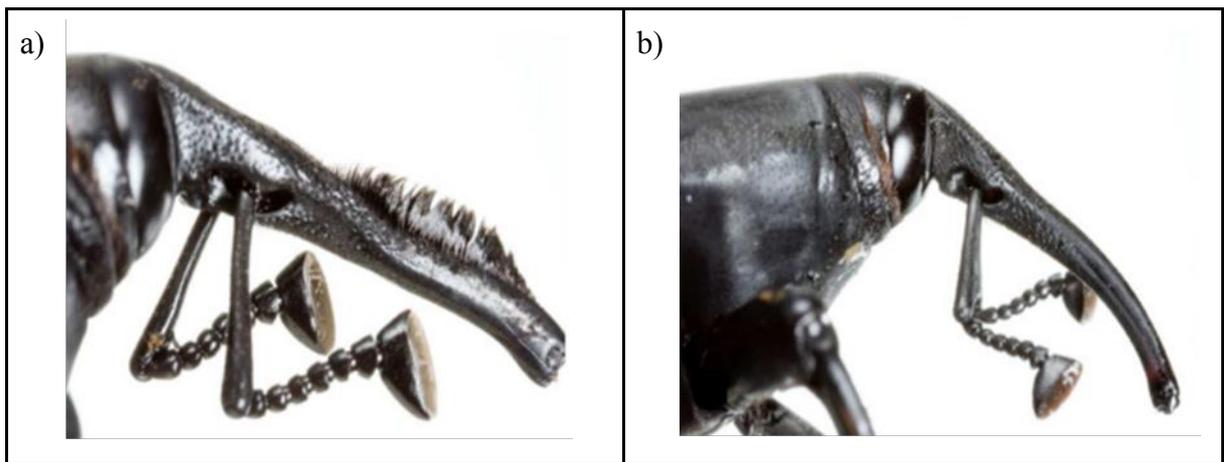
Figura 7. Broca-do-olho-do-coqueiro, causador da doença anel vermelho.



Fonte: Agência Embrapa de Informação Tecnológica – EMBRAPA

O adulto de *R. palmarum* apresenta um "bico" (rosto) forte e curvado, com cerca de 1,0 cm de comprimento. Essa espécie possui dimorfismo sexual com características marcantes no rosto; o do macho possui pelos rígidos em forma de escova na parte superior (Figura 8a) e o da fêmea é liso, fino e um pouco recurvado (Figura 8b).

Figura 8. Adulto de *R palmarum*: a) presença de pelos no rosto do macho e b) ausência no da fêmea.



Fonte: FERREIRA; QUEIROZ, 2021.

3.3 Rincoforol: semioquímico para o controle da doença do anel vermelho

Os insetos utilizam de várias ferramentas importantes para realizar suas comunicações, tais como: sinais visuais, acústicos, táteis e/ou substâncias químicas. O uso de substâncias químicas excretadas pelos membros da comunidade pode provocar diferentes comportamentos e consequente ação nos insetos. Assim, podem ocorrer respostas distintas, tanto para o inseto que emite quanto para o que recebe a informação. Estas substâncias de comunicação são denominadas semioquímicos, que por definição são substâncias químicas que fornecem informações relativas à uma interação entre dois indivíduos, e quando liberada por um determinado indivíduo, provoca uma mudança fisiológica e/ou comportamental no indivíduo receptor (GRIFFITH, 1987).

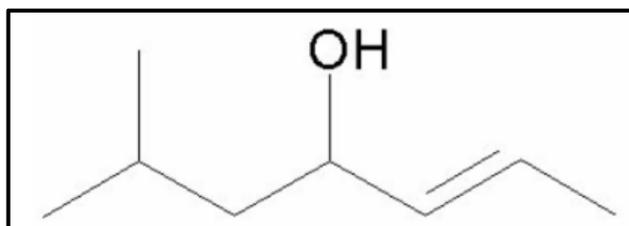
Os semioquímicos que transmitem informações durante a interação entre dois indivíduos são conhecidos como infoquímicos. Quando esses compostos são responsáveis pela comunicação intraespecífica, ou seja, quando tanto o emissor quanto o receptor do sinal químico são da mesma espécie, eles são chamados de feromônios. Por outro lado, quando esses compostos facilitam comportamentos entre indivíduos de espécies diferentes, em uma relação interespecífica, essas substâncias são classificadas como aleloquímicos (RAMOS, 2012).

Um dos exemplos de semioquímicos, mais precisamente um infoquímico, da classe de comunicação de mesma espécie, é o feromônio. Feromônios possuem uma característica química intrínseca, os quais são muito voláteis, ou seja, evaporam muito rápido a temperatura ambiente (MARTINS, 2013). Uma das atividades que pode ser realizada com o uso de feromônios é o controle do nível populacional de insetos, através da comunicação sexual, sem interferir em outros organismos, onde esta atividade está diretamente ligada ao uso de feromônios sexuais, com o intuito de atrair os indivíduos da mesma espécie (NAVARRO *et al.*, 2002).

Com relação ao emprego de semioquímicos sintéticos para o controle de pragas no Brasil, que houve resultados positivos, pode ser citado o uso do rincoforol. Este é o feromônio de agregação da broca-do-olho do coqueiro, *R. palmarum* (NAVARRO *et al.*, 2002), inseto transmissor da doença do Anel Vermelho.

Ao encontrar alimento, o *R. palmarum* libera um feromônio de agregação, tornando possível o encontro de vários indivíduos para se alimentar e reproduzir no mesmo local. Essa substância liberada é conhecida como rincoforol (6-metil-2-E-hepten-4-ol), álcool de cadeia alifática, insaturada e ramificada, sendo sua forma estrutural representada na Figura 9 (VIANA, 2018).

Figura 9. Ilustração estrutural do rincoforol.



Fonte VIANA, 2018.

Esse feromônio sintético tem sido empregado como atrativo em armadilhas, Figura 10, para capturar o inseto *R. palmarum*, onde, após a captura o parasita é eliminado. Esta técnica, conhecida como "atrai-e-mata", possibilita a redução da população deste inseto a níveis aceitáveis, resultando na diminuição dos danos causados à produção agrícola nas culturas afetadas por esta praga. No entanto, as técnicas que utilizam iscas baseadas em feromônio são influenciadas por condições ambientais, como temperatura e velocidade do ar, e frequentemente não mantêm concentrações constantes e adequadas durante o período em que os insetos adultos estão presentes (VIANA, 2018).

Figura 10. Foto da armadilha tipo balde



Fonte: Agência Embrapa de Informação Tecnológica – EMBRAPA.

3.4 Liberação controlada de feromônios

Para utilização dos feromônios como controle da população de pragas na agricultura, ele precisa ser liberado no ambiente em concentrações adequadas. Tal concentração deve ser o suficiente para ser detectada pelo inseto-praga, mas não excessiva, de forma que torne sua aplicação economicamente elevada. Além disso, sua eficiência não deve ser influenciada, ou mesmo minimizada, por condições ambientais (VIANA, 2018).

Matrizes sólidas que consigam realizar a liberação controlada de feromônios são estudadas como suporte, com o foco no prolongamento da atuação de captura de pragas no campo, fazendo com que os materiais porosos, que possuem um alto nível de adsorção sejam cada vez mais procurados. Com isso, o carvão ativado aparece como uma alternativa a essa busca, pois devido a sua elevada área superficial interna, e, conseqüentemente, sua alta porosidade, é possível realizar a adsorção do rincoforol, além de promover sua proteção contra degradação por intempéries, oxigênio, umidade, luz ultravioleta entre outras (DURAL; PAPAGEORGIOU; KATSAROS, 2011).

Meneses *et al* (2021) avaliaram a capacidade adsortiva do carvão ativado do endocarpo do coco de dendê na incorporação do rincoforol para liberação controlada do feromônio em campo. Foi realizada uma análise de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) a fim de identificar grupos funcionais presentes na estrutura do carvão. Verificou-se que a estrutura do carvão apresenta grupos orgânicos que permitem uma maior interação entre o adsorvente e o adsorvato, de acordo com o critério de solubilidade. Assim, o

rincoforol pôde permanecer por mais tempo adsorvido ao carvão ativado, prolongando sua liberação.

3.5 Secagem híbrida

A secagem é um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, no qual o calor é transferido para o produto e a água é transportada, basicamente, por convecção. Na secagem convectiva, a resistência à transferência do calor e da massa está na camada limite, e a sua magnitude é dependente da velocidade do ar, ou, de modo geral, do número de Reynolds. A resistência à transferência de calor e massa nos materiais que estão sendo secos é grande e fortemente afetada pela cinética de evaporação da água (NOWAK e LEWICKI, 2004).

A técnica de secagem combinada é buscada para acelerar a transferência de calor e massa, levando a um menor tempo de processamento e menor consumo de energia em comparação com o método de secagem com convecção de ar quente. Esta técnica envolve a aplicação contínua da luz infravermelha juntamente com ar quente forçado durante todo o processo de secagem. A aplicação dessa luz combinada ao aquecimento de ar quente é considerada mais eficiente em relação à radiação ou ao aquecimento de ar quente sozinho, pois dá o efeito sinérgico e permite obter altas taxas de transferência de massa (HEBBAR; VISHWANATHAN; RAMESH, 2004).

Um fato muito importante a ser analisado na secagem com infravermelho é a temperatura da fonte de calor, pois altas temperaturas proporcionam uma secagem mais rápida, no entanto, podem modificar significativamente a superfície do produto, acarretando danos ao elemento. Desse modo, as vantagens técnicas e econômicas desse procedimento devem ser controladas, visando à qualidade final do produto (SANTOS, 2013).

3.5.1 Modelos cinéticos de secagem

Segundo Meneses *et al* (2021), quando se trata do estudo da adsorção de feromônios em carvão, a perda de massa apresenta-se como análise essencial, pois é com esse estudo que se pode averiguar a possibilidade de uso da matriz sólida como um possível liberador ou não (MARQUES, 2008). Dessa forma, as equações de decaimento de massa de Lewis e Page são apresentadas conforme a Tabela 1. Elas são fundamentais para entender tal funcionamento, com intuito de avaliar se o suporte em estudo será benéfico a liberação do rincoforol.

Tabela 1. Equações utilizadas para descrever a perda de massa

Denominação do modelo	Modelo	Equação
Lewis	$Xr = \exp(-k \cdot t)$	(01)
Page	$Xr = \exp(-k \cdot t^n)$	(02)

Fonte: Autora, 2024.

O parâmetro k , denominado constante de secagem, está relacionado com a taxa de transferência de massa, de modo que quanto maior forem os seus valores, mais rápida é a secagem (MARQUES, 2008).

Em que Xr é a razão de perda de massa (adimensional); t é o tempo; k é a constante de cinética de transferência de massa; e n é o coeficiente de ajuste do modelo de Page, para a Equação 02 (BATISTA, 2021). A razão de perda de massa (Xr), grandeza adimensional, durante a dessecagem pode ser determinada por meio da Equação 03, abordada na seção 4.5.

A procura por uma liberação controlada de rincoforol, leva a busca pelas variáveis que mais irão interferir neste processo, porém a utilização de métodos, como o planejamento fatorial de experimentos pode ser aplicado em diversos tipos de estudos com este enfoque, pois este método tem como objetivo a investigação de variáveis que mais possam interferir no processo estudado (MELO, 2015).

4 METODOLOGIA

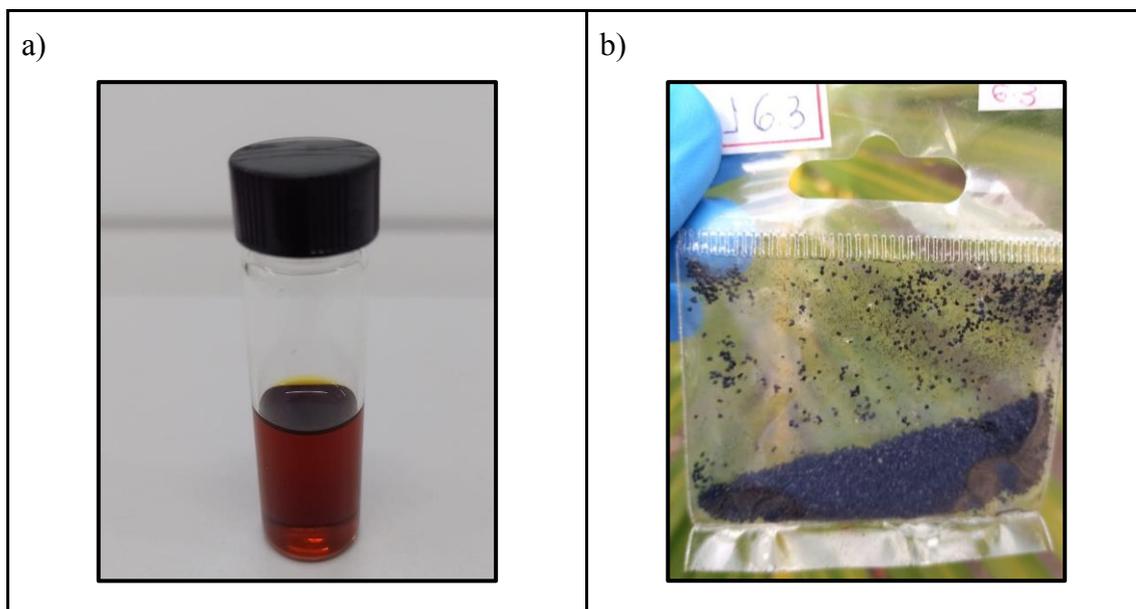
4.1 Materiais

O feromônio de agregação rincoforol, $[C_8H_{16}O]$, peso molecular de $128,21 \text{ g mol}^{-1}$, utilizado no estudo foi produzido pela empresa Interacta Química, localizada em Maceió/AL. Para sua conservação, o feromônio foi mantido sob refrigeração até o início do preparo das amostras.

O carvão ativado do endocarpo do coco de dendê foi obtido comercialmente pela empresa @Pelegrini Carbon Comércio e Serviços Ltda. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Separação e Otimização de Processos (LASSOP), localizado na Universidade Federal de Alagoas (UFAL), em Maceió/AL.

Ambos os componentes estão apresentados na Figura 11, feromônio rincoforol e carvão ativado, respectivamente.

Figura 11. a) Feromônio rincoforol e b) carvão ativado do endocarpo do coco de dendê



Fonte: Autora, 2023.

4.2 Caracterização do carvão ativado

Como a porosidade do adsorvente é a característica mais importante para determinação da liberação do feromônio, então foi realizada uma caracterização do material pela técnica de

adsorção de N₂ pelo método Brunauer-Emmett-Teller (BET) e o método de Barrett-Joyner-Halenda (BJH), obtendo as isotermas de adsorção e dessorção de nitrogênio

Previamente ao teste, a amostra foi sujeita a um pré-tratamento, sendo aquecida por 12 horas a 100 °C, com o intuito de eliminar quaisquer contaminantes que poderiam estar fisicamente adsorvidos nos poros. Após este período, a amostra foi pesada e analisada a 77 K, utilizando o equipamento Quantachrome modelo NOVA 2200e.

4.3 Planejamento Fatorial Completo 2³

Para a avaliação das variáveis significativas do processo de liberação controlada do feromônio rincoforol, foi aplicado um planejamento fatorial completo 2³, realizado em duplicata. As variáveis investigadas foram: temperatura da luz infravermelha (IV), velocidade do ar e a granulometria do carvão ativado, conforme especificado na Tabela 2, avaliadas em dois níveis, tendo como variável resposta a difusividade. A distribuição dos fatores investigados e seus níveis estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 2. Planejamento fatorial completo 2³

Fatores	Nível inferior (-1)	Nível superior (+1)
Temperatura da fonte IV	30 °C	40 °C
Velocidade do ar	1,0 m/s	2,0 m/s
Granulometria do carvão	0,5 mm < Ø < 0,6 mm	1,19 mm < Ø < 2,8 mm

Fonte: Autora, 2024.

Tabela 3. Matriz do planejamento fatorial completo 2³

Nº exp.	Temperatura da fonte IV (°C)	Velocidade do ar (m/s)	Granulometria do C.A. (mm)
1	(-1) 30	(-1) 1,0	(-1) 0,5 < Ø < 0,6
2	(+1) 40	(-1) 1,0	(-1) 0,5 < Ø < 0,6
3	(-1) 30	(+1) 2,0	(-1) 0,5 < Ø < 0,6
4	(+1) 40	(+1) 2,0	(-1) 0,5 < Ø < 0,6
5	(-1) 30	(-1) 1,0	(+1) 1,19 < Ø < 2,8
6	(+1) 40	(-1) 1,0	(+1) 1,19 < Ø < 2,8
7	(-1) 30	(+1) 2,0	(+1) 1,19 < Ø < 2,8
8	(+1) 40	(+1) 2,0	(+1) 1,19 < Ø < 2,8

Fonte: Autora, 2024.

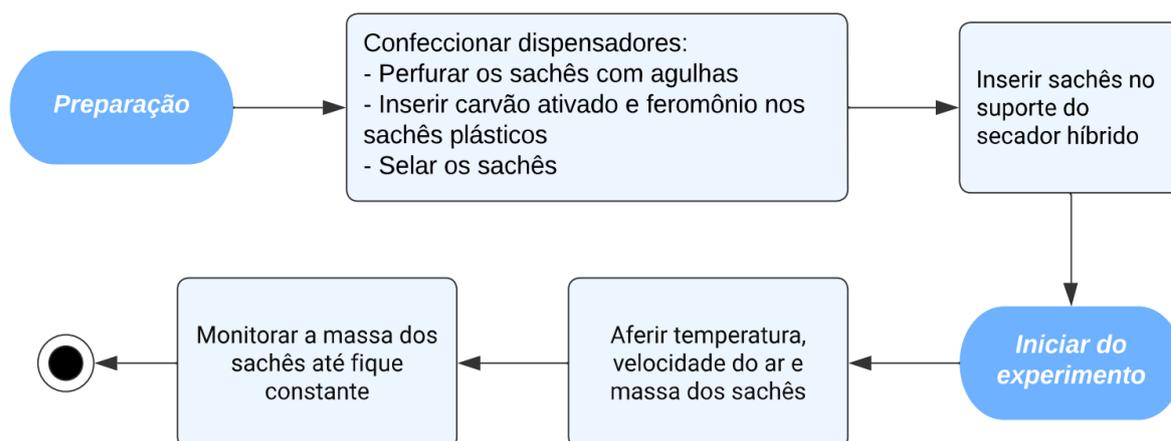
O propósito do planejamento foi estabelecer o impacto dos fatores mencionados na liberação do rincoforol puro adsorvido no carvão ativado do endocarpo do coco de dendê, submetido a ensaios de transferência de massa realizados em um secador híbrido.

4.4 Experimentos de liberação

Para os experimentos de liberação em secagem híbrida, foram confeccionados dispensadores mediante a saturação do carvão ativado pelo feromônio, inserindo o conteúdo em sachês plásticos, os quais correspondem a sacos transparentes com aba adesivada e com furo para suporte, sendo previamente perfurados por um conjunto de 15 agulhas, com 1,0 mm de espessura.

Para cada ensaio, foram preparadas amostras em duplicata para determinação do desvio-padrão experimental. Após a inserção do rincoforol sorvido na matriz sólida, os sachês foram selados. A massa dos sachês foi aferida, com o auxílio de uma balança analítica, e em seguida os sachês foram inseridos em um suporte com hastes metálicas no interior do secador híbrido, dispendo-os a uma distância fixa uns dos outros. Após início do experimento, foi aferida a temperatura com o auxílio de um pirômetro a laser e a velocidade do ar, num intervalo de 30 minutos, até que a massa permanecesse constante. A Figura 12 apresenta o fluxograma de montagem dos dispensadores.

Figura 12. Fluxograma do experimento

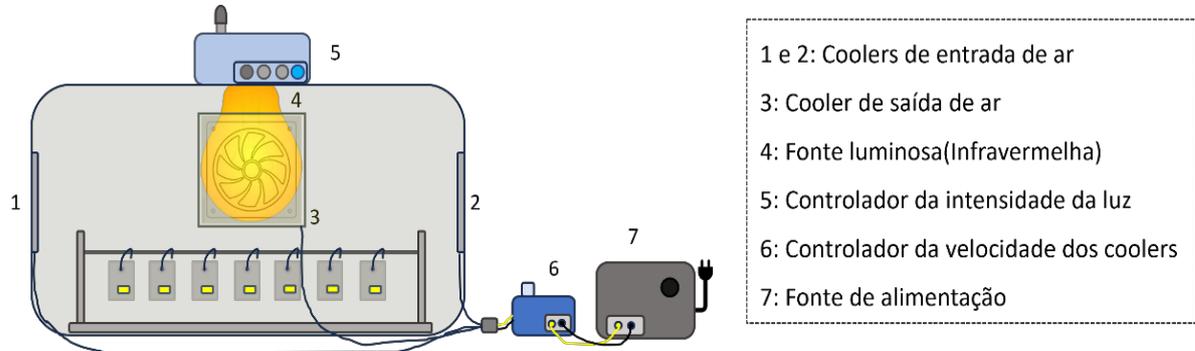


Fonte: Autora, 2023.

O secador híbrido empregado no estudo foi composto por uma fonte luminosa de radiação infravermelha (IV) e um sistema de circulação de ar composto por dois coolers de entrada e um cooler de saída, conforme representado no esquema na Figura 13. O estudo foi

conduzido nesse secador a fim de verificar a interferência dos fatores relevantes do planejamento estruturado. A figura 14 apresenta a imagem real do secador.

Figura 13. Esquema do secador híbrido e de seu sistema de controle



Fonte: Autora, 2024.

Figura 14. Secador híbrido e de seu sistema de controle



Fonte: Autora, 2024.

4.5 Análise dos dados cinéticos e transferência de massa

A partir dos resultados experimentais, foi determinada a razão de umidade (XR), grandeza adimensional calculada a partir da Equação 03, ao final do processo quando a massa do sistema se torna invariável.

$$XR = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (03)$$

Onde X_t é o teor de massa em base seca num instante de tempo t , X_0 o teor de massa em base seca inicial e X_e o teor de massa em base seca no equilíbrio (BASTISTA, 2021). A partir dos dados obtidos, foi avaliado decaimento de massa em função do tempo (XR versus tempo), assim como foi determinada a taxa de liberação por unidade de massa (dX/dt) por meio de diferenciação numérica das curvas experimentais de decaimento de razão de umidade.

A transferência de massa no processo de liberação do rincoforol em matriz sólida foi analisada em termos de difusividade efetiva, utilizando o modelo difusivo derivado a partir da 2ª Lei de Fick para a desorção do produto. Para a solução analítica do modelo difusivo, foram assumidas as seguintes hipóteses: forma geométrica esférica; volume invariável; processo isotérmico com difusividade mássica independente da umidade; distribuição uniforme do feromônio no material, admitindo condições de equilíbrio na interface gás-sólido (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992). Dessa forma, o equacionamento pode ser expresso pela Equação 04.

$$XR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-\frac{n^2 \pi^2 D_{ef} t}{R} \right] \quad (04)$$

onde:

R: raio equivalente do produto (m);

D_{ef} : coeficiente de difusão efetivo, m^2s^{-1} ;

n: número de termos da série; e

t: tempo, s

A Equação 04 foi aplicada aos dados experimentais e XR em função do tempo foi estimado por regressão não linear, empregando o método dos mínimos quadrados a partir da utilização do software *Statistica 7.0*. O critério estatístico adotado para avaliar a qualidade do ajuste foi o coeficiente de determinação (R^2).

Para o estudo cinético foi realizada a modelagem matemática da liberação de rincoforol a partir de ajustes de dois modelos cinéticos de secagem difundidos na literatura, denominados de Lewis (Equação 01) e Page (Equação 02), apresentados na Tabela 1, também com o auxílio do software *Statistica 7.0*. Tais modelos foram utilizados devido a simples aplicação, por possibilitar a avaliação de parâmetros com significado físico e correlacionarem com avaliação fenomenológica (MARQUES, 2008). Com isso, é possível determinar a razão de perda de massa (XR), o tempo (t), em minutos, a constante cinética de transferência de massa (k) e o coeficiente de ajuste do modelo de Page (n).

5 RESULTADOS

Nesta seção, serão apresentados os resultados da análise de adsorção/dessorção de nitrogênio realizada no carvão ativado de endocarpo de coco de dendê, bem como os resultados obtidos por meio do planejamento fatorial completo 2^3 . Além disso, será discutido o ajuste dos modelos de Lewis e Page aos dados experimentais. As avaliações realizadas fornecem informações sobre a influência das variáveis de temperatura, velocidade do ar e granulometria na liberação do rincoforol em matriz sólida.

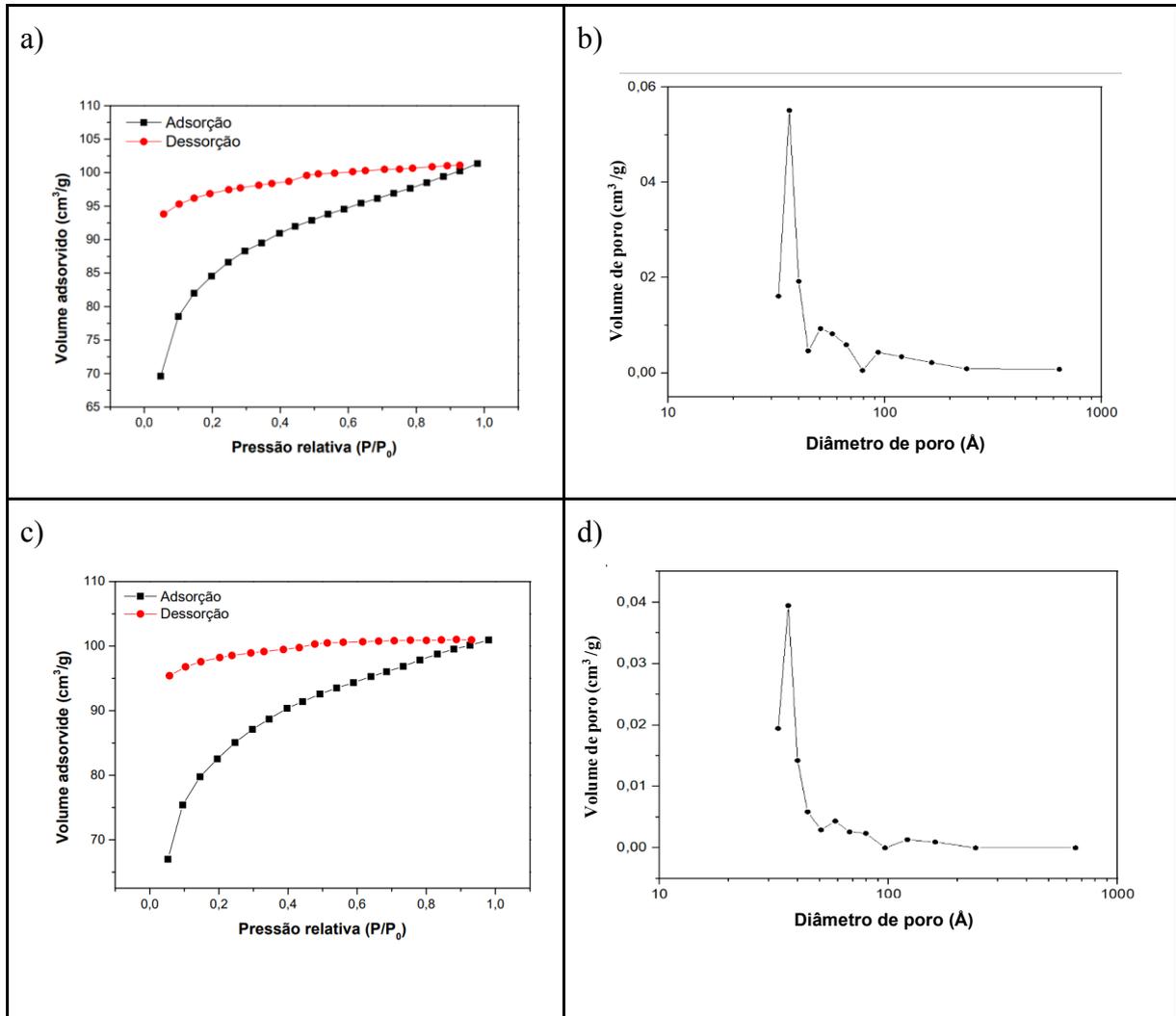
5.1 Adsorção/Dessorção de Nitrogênio

As isotermas de adsorção e dessorção de nitrogênio foram tratadas matematicamente pelos métodos BET e BJH, para ter acesso às informações de porosidade, área superficial e de diâmetro e volume médio dos poros, respectivamente. As Figuras 15a e 15c mostram as isotermas de adsorção e dessorção de nitrogênio para o adsorvente na menor e maior granulometria, de $0,5 \text{ mm} < \emptyset < 0,6 \text{ mm}$ e $1,19 \text{ mm} < \emptyset < 2,8 \text{ mm}$, respectivamente; enquanto as distribuições dos tamanhos de poros estão apresentadas nas Figuras 15b e 15d, respectivamente.

De acordo com o perfil apresentado pelas isotermas, estas são classificadas como tipo IV, conforme a classificação da IUPAC. As isotermas do tipo IV são típicas de sólidos mesoporosos onde a quantidade adsorvida tende para um valor máximo finito, correspondendo ao enchimento completo dos capilares. Elas apresentam histerese, pois a curva de dessorção não coincide com a de adsorção, ocorrendo paralela à curva, indicando que na mesma pressão relativa, o sólido dessorve uma quantidade de gás menor do que adsorveu. O formato do poro interfere diretamente neste fenômeno, pois por ter a abertura mais estreita do que seu corpo, leva à condensação capilar do gás sonda que liquefeito se adere às paredes dos poros e dessorve menos (PASSOS, 2007).

Com o intuito de adsorver o rincoforol na superfície do carvão, quanto maior o diâmetro de poros mais satisfatório tende a ser o resultado, pois garante que uma grande quantidade do feromônio fique incorporado nos espaços cristalinos da superfície porosa. O resultado obtido pelo método BJH apresentou diâmetros de poros de 36,230 e 36,501(Å), Tabela 4, para as granulometrias de $0,5 \text{ mm} < \emptyset < 0,6 \text{ mm}$ e $1,19 \text{ mm} < \emptyset < 2,8 \text{ mm}$, respectivamente, indicando a presença de porosidade suficiente para adsorção do feromônio e, conseqüentemente, um controle na liberação deste para o meio ambiente.

Figura 15. Isotermas de adsorção e dessorção de $N_2(g)$ pelo método de BET e distribuição do tamanho de poros, pelo método BJH, do adsorvente com: **a e b)** menor; **c e d)** maior granulometria



Fonte: Autora, 2024.

Tabela 4. Características morfológicas do carvão ativado de endocarpo de coco de dendê.

Granulometria (mm)	Área superficial (m ² /g)	Volume de poro (cm ³ /g)	Diâmetro de poro (Å)
0,5 mm < Ø < 0,6 mm	271,227	0,008	36,230
1,19 mm < Ø < 2,8 mm	267,888	0,004	36,501

Fonte: Autora, 2024.

5.2 Planejamento Fatorial Completo 2³

A partir do planejamento experimental completo 2³, realizado para o estudo, foi possível avaliar a influência das variáveis investigadas no processo de liberação do rincoforol adsorvido em carvão ativado do endocarpo do coco de dendê. A Tabela 5, apresenta todos os fatores de

entrada de análise (temperatura, velocidade do ar, granulometria do carvão), a quantidade de experimentos e os valores obtidos da variável resposta. Os experimentos foram feitos de forma estocástica a fim de minimizar os erros sistemáticos; e em duplicata, totalizando 16 experimentos.

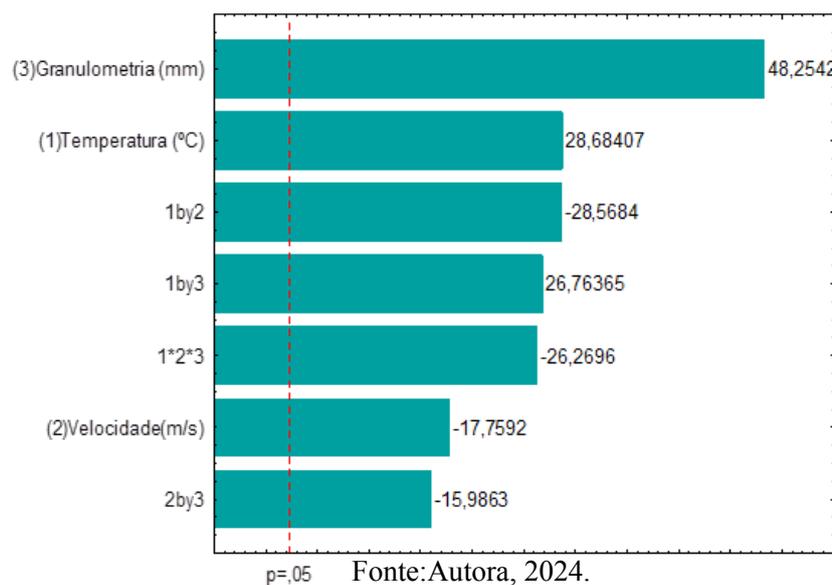
Tabela 5. Condições das variáveis e seus níveis, e dos resultados obtidos a partir do planejamento fatorial 2^3

Nº exp.	Temperatura (°C)	Velocidade do ar (m/s)	Granulometria do carvão (mm)	Deff (m ² /min)
1	30	1,0	0,5 < Ø < 0,6	2,89.10 ⁻¹⁰
2	40	1,0	0,5 < Ø < 0,6	1,36.10 ⁻⁰⁹
3	30	2,0	0,5 < Ø < 0,6	5,84.10 ⁻¹⁰
4	40	2,0	0,5 < Ø < 0,6	3,08.10 ⁻¹⁰
5	30	1,0	1,19 < Ø < 2,80	4,18.10 ⁻⁰⁹
6	40	1,0	1,19 < Ø < 2,80	3,66.10 ⁻⁰⁸
7	30	2,0	1,19 < Ø < 2,80	1,02.10 ⁻⁰⁸
8	40	2,0	1,19 < Ø < 2,80	1,06.10 ⁻⁰⁸

Fonte: Autora, 2024.

A partir da análise do planejamento experimental, foi obtido o diagrama de Pareto, visto na Figura 16, pelo software *Statistica 7.0*, a fim de verificar as correlações entre as variáveis e determinar as mais significativas no estudo em questão.

Figura 16. Diagrama de Pareto



Neste diagrama, os efeitos à direita da linha vermelha tracejada ($p = 0,05$) são considerados significantes para o nível de confiança estudado, considerando-se um critério de 95% de confiança e um erro associado de apenas 5%. Avaliando de um modo geral é notório que todas as variáveis possuem relevância para a análise de liberação do feromônio, já que todos os feitos ultrapassam linha vermelha tracejada.

Além disso, é evidenciado que a granulometria e a temperatura influenciam de modo a intensificar a difusividade do rincoforol quando há mudança do nível inferior para o superior, devido ao valor positivo do diagrama. Isto ocorre quando é induzido um aumento da temperatura que ocasiona na intensificação da incidência de luminosidade por meio da lâmpada infravermelha (IV) e, conseqüentemente, maior o grau de agitação das moléculas as quais se dispersam para procurar sua estabilidade; já para a granulometria é em decorrência da área superficial do carvão, a quantidade de poros e sítios ativados, pois quando há aumento da quantidade desses fatores, mais adsorvida será a substância no carvão de modo a retê-la por maior intervalo de tempo, como constatado na Tabela 4.

Ao verificar os dados expostos em conjunto de pares consecutivos (1 e 2, 5 e 6, 7 e 8), onde há variação apenas da temperatura, é notável o acréscimo da liberação do feromônio estudado, com isso, sendo a eficiência de liberação em ensaios com nível inferior de velocidade mais bem explicada pela adsorção na superfície do carvão e, após, desta para o ambiente, superando a barreira física imposta que é o sachê. Com exceção do par 3 e 4, onde foi obtida uma redução, isso se dá pelo uso de carvão ativado de menor granulometria em ambos os experimentos. Esse tipo de carvão possui mais poros e sítios ativos disponíveis para reter o feromônio, levando a uma liberação mais gradual.

E, ademais, como já pressuposto, a temperatura é uma das variáveis de maior influência como apresentado na Figura 16, visto que o aumento de energia é diretamente proporcional ao grau de agitação das moléculas do sorvato, induzindo-as para passagem do estado físico da matéria de líquido para gasoso.

Quanto à granulometria, verifica-se que a difusividade aumenta ao se empregar carvão em maior diâmetro, $1,19 < \emptyset < 2,8$, quando comparado ao menor granulometria. Por apresentar menor número de poros e sítios ativos disponíveis para reterem o feromônio, este se difundiu no ar fácil e mais rapidamente, comparado ao feromônio sorvido em carvão ativado com menor granulometria. Essas diferenças entre os adsorventes podem ser constatadas na Tabela 4. Esse resultado pode ser verificado ao comparar os experimentos numerados de 1 a 4, os quais foram diferenciados ao realizá-los nas mesmas condições, alterando somente a granulometria, do carvão em 1 e 5; 2 e 6; 3 e 7; 4 e 8.

Outro fator que mostrou influência foi a velocidade, entretanto, somente quando há transição do nível superior (2 m/s) para o inferior (1 m/s), ou seja, a liberação do feromônio é intensificada quando há redução da velocidade.

Ademais, ao analisar a Tabela 5 é possível avaliar que os experimentos 1 e 3 nas mesmas condições de temperatura (30 °C) e granulometria ($0,5 < \emptyset < 0,6$), variando apenas a velocidade do nível inferior para o superior foi obtido um acréscimo de 102,08 % na difusividade efetiva. O mesmo ocorreu para os experimentos 5 e 7, com variação somente da velocidade, mantendo a temperatura inferior e a granulometria ($1,19 < \emptyset < 2,80$), houve uma redução de 77,35% do valor da variável resposta, o que já era esperado como explicado no parágrafo anterior.

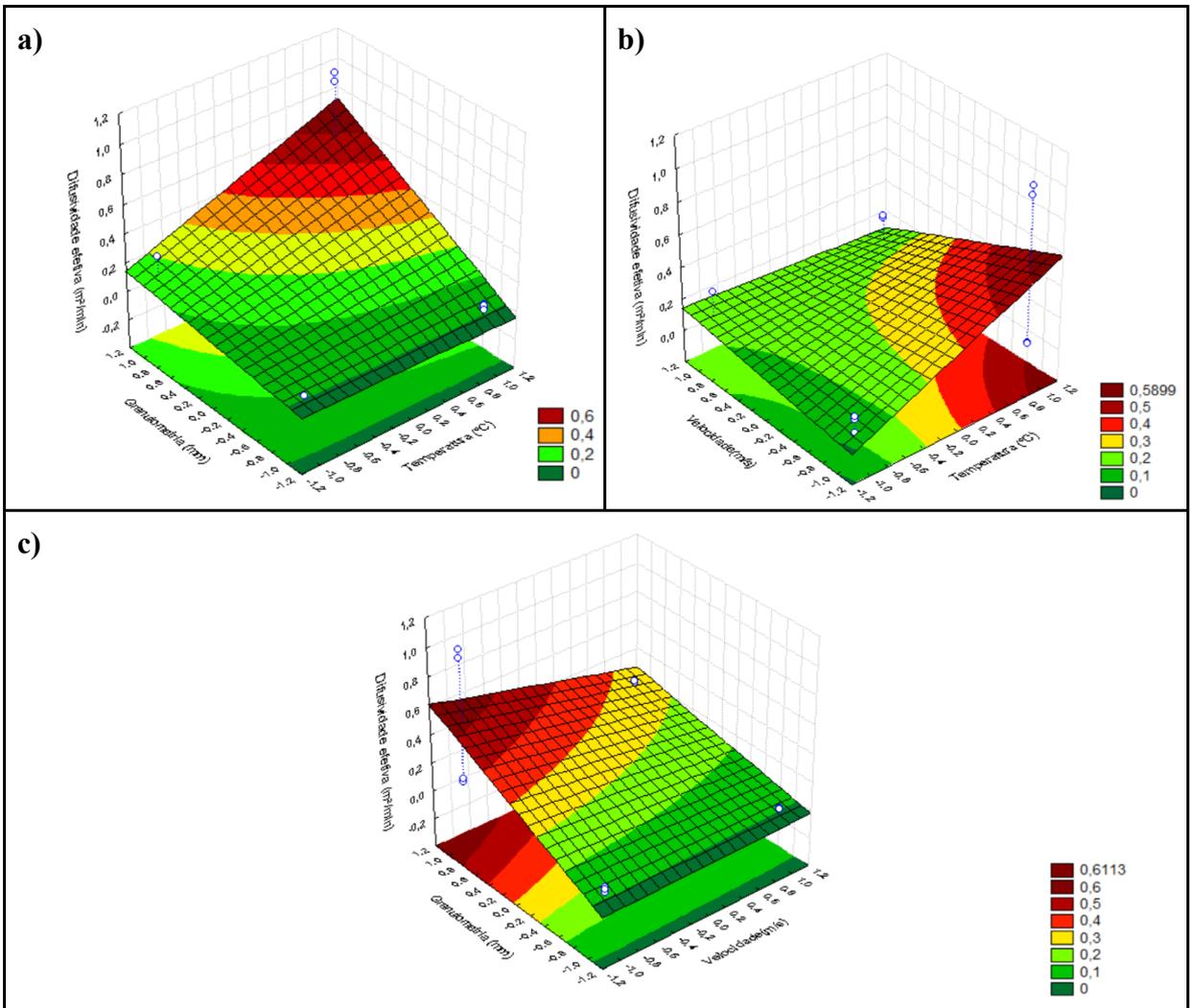
Todavia, para os experimentos 2 e 4 e 6 e 8, realizados em condições de 40 °C e granulometria em $0,5 < \emptyset < 0,6$ para os dois primeiros experimentos e $1,19 < \emptyset < 2,80$ para os dois últimos citados, variando apenas a velocidade, ocorreu uma redução da variável resposta, conforme diagrama de Pareto.

Uma fundamentação para isto é que no início da liberação (do interior para a superfície do carvão) é acompanhado por um fluxo de ar menor, que ocorre de maneira gradual e controlada. Isso sugere que a diferença de pressão, causada pelo aumento da velocidade do ar de entrada, pode acelerar a liberação do rincoforol através dos orifícios do sachê. No entanto, essa diferença de pressão não afeta a dessorção do feromônio retido nos sítios ativos do carvão. Portanto, a conclusão é que o sistema é influenciado principalmente pelo transporte intrapartícula, já que a difusão mássica apresenta uma resistência maior ao fenômeno em geral.

Outro modo de demonstrar a interação entre os fatores é com uso do gráfico de superfície de resposta, como exposto na Figura 17, o qual pode-se observar as interações entre: granulometria e temperatura (Figura 17a), velocidade e temperatura (Figura 17b) e granulometria e velocidade (Figura 17c).

É possível perceber que a taxa de propagação do rincoforol tem maior influência com temperatura e granulometria do que com a velocidade, alcançando maiores valores na transição do nível inferior ((-1) para o superior ((+1)). E assim, é confirmado que há um acréscimo na resposta (difusividade efetiva) quando tais fatores se encontram no nível superior.

Figura 17. Superfície de resposta: **a)** Granulometria (mm) versus Temperatura (°C), **b)** Velocidade (m/s) versus Temperatura (°C) e **c)** Granulometria (mm) versus Velocidade (m/s).



Fonte: Autora, 2024.

A análise estatística realizada resultou em um erro experimental de 0,00026 e em um coeficiente de determinação (R^2) de 0,99866.

5.3 Análise dos dados cinéticos e transferência de massa

O ajuste dos modelos de Lewis e Page aos dados cinéticos permitiu a estimativa dos parâmetros k e n , com base na correlação entre a razão de perda de massa e o tempo total de cada experimento. A escolha do modelo foi determinada pelos maiores valores do coeficiente de determinação (R^2), estando os resultados da análise de regressão detalhados na Tabela 6.

Tabela 6. Resultado do ajuste dos modelos de Lewis e Page aos dados experimentais

N° exp.	Modelo cinético	k	n	R ²
1	Lewis	0,0116	-	0,9115
	Page	0,0902	0,5698	0,9952
2	Lewis	0,0446	-	0,9663
	Page	0,4633	0,3607	0,9981
3	Lewis	0,0224	-	0,8476
	Page	0,2793	0,3901	0,9915
4	Lewis	0,0106	-	0,9894
	Page	0,0231	0,8367	0,9969
5	Lewis	0,0086	-	0,8618
	Page	0,0828	0,5544	0,9866
6	Lewis	0,0569	-	0,9739
	Page	0,6752	0,3016	0,9981
7	Lewis	0,0181	-	0,9130
	Page	0,1369	0,5363	0,9894
8	Lewis	0,0169	-	0,9919
	Page	0,0332	0,8461	0,9970

Fonte: Autora, 2024.

Dentro do critério estabelecido para a análise, é possível observar que o modelo de Page descreve de maneira mais precisa a dissipação do feromônio rincoforol no meio, em comparação com o modelo de Lewis, mediante os valores apresentados pelo coeficiente de determinação, que se aproxima da unidade (1), indicando alta confiabilidade.

Entre as diferentes condições investigadas, observou-se que o ensaio 8 apresentou o coeficiente de determinação mais alto para o modelo de Lewis, e um dos mais altos para o de Page.

O parâmetro n reflete a magnitude da resistência interna associada à diminuição da massa do material examinado. Ele implica um efeito moderador do tempo e retifica possíveis imprecisões decorrentes da falta de consideração da resistência interna na transferência de massa tendo um comportamento semelhante ao valor do parâmetro k (GUEDES; FARIA, 2000).

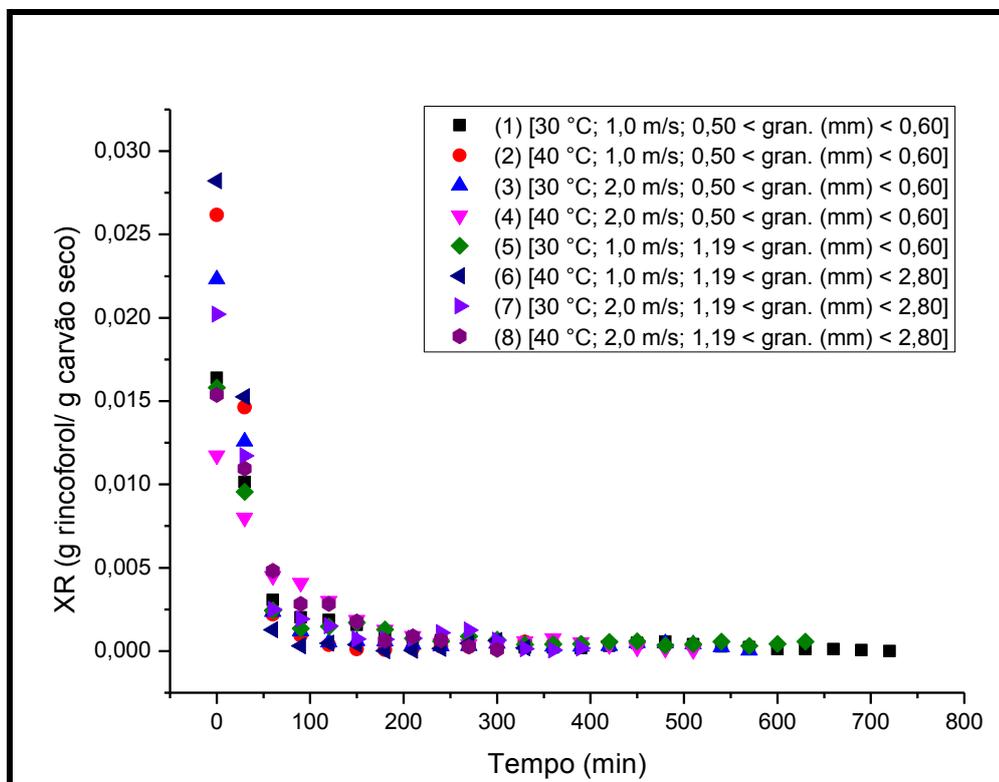
O parâmetro ajustável k representa a constante cinética de secagem, refletindo a taxa de transferência de massa e indicando a velocidade de perda de massa. Um valor maior para k

indica uma liberação mais rápida da variável resposta (MARQUES, 2008). Através do planejamento fatorial realizado, confirmou que a temperatura exerce uma influência direta na velocidade de liberação do rincoforol, conforme indicado pelo estudo cinético.

Ao analisar o ajuste do modelo de Page, observou-se que os experimentos realizados a 40 °C (Ensaio 2 e 6) apresentaram constantes cinéticas maiores do que aqueles realizados a 30°C (Ensaio 1 e 5). No entanto, os ensaios 3 e 7 (30 °C), em comparação com os ensaios 4 e 8 (40 °C), revelaram um aumento acentuado na velocidade de liberação. Isso pode ser atribuído a possíveis erros experimentais, variação na corrente de alimentação da luz IV e retenção de umidade pelo carvão.

A Figura 18 ilustra os perfis de liberação de cada ensaio, destacando as taxas mais significativas nos experimentos 2 e 6, que atingiram rapidamente o equilíbrio a 40 °C. Os ensaios 1 e 5 mostram estabilização mais lenta devido às condições experimentais empregadas, sugerindo que a difusão do rincoforol nessas circunstâncias é favorável para aplicação em ambientes semelhantes, visando à captura do inseto-vetor.

Figura 18. Variações da razão de perda de massa em função do tempo

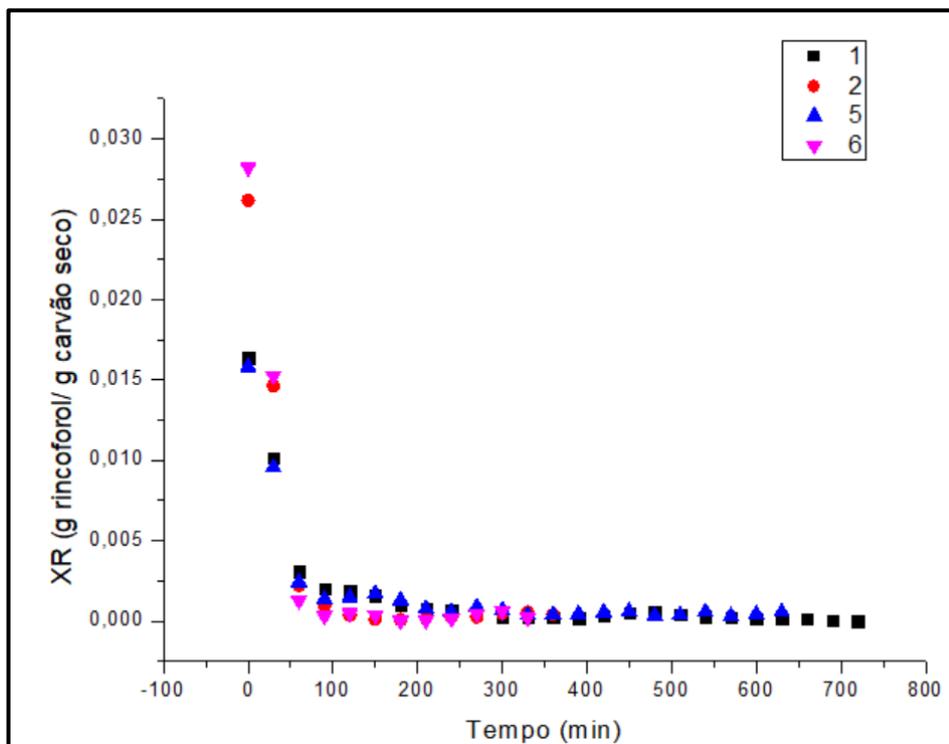


Fonte: Autora, 2024.

Ao considerar a influência da granulometria, verifica-se que nos pares de experimentos 1 e 5 e 3 e 7, onde o único diferencial é o diâmetro do carvão, a taxa de liberação aumentou expressivamente em todos os ensaios. Esse aumento é atribuído à maior granulometria do carvão ativado derivado do endocarpo do coco de dendê, conforme indicado pelo ajuste do modelo de Page. Isso reforça o papel significativo da granulometria no processo, como detalhado na análise estatística discutida anteriormente.

A Figura 19 ilustra os perfis de liberação dos pares (1 e 5) e (2 e 6) que possuem a mesma velocidade de $1\text{ m}^2/\text{s}$, granulometria semelhante, e que estão variando em temperatura de 30 para 40°C , demonstrando o decaimento de massa. Os ensaios 1 e 5 mostram estabilização mais lenta devido às condições experimentais empregadas, sugerindo que a difusão do rincoforol nessas circunstâncias é eficaz na captura do inseto-vetor em ambientes com temperatura em torno de 30°C .

Figura 19. Variações da razão de perda de massa em função do tempo analisando a temperatura numa velocidade de 1 m/s



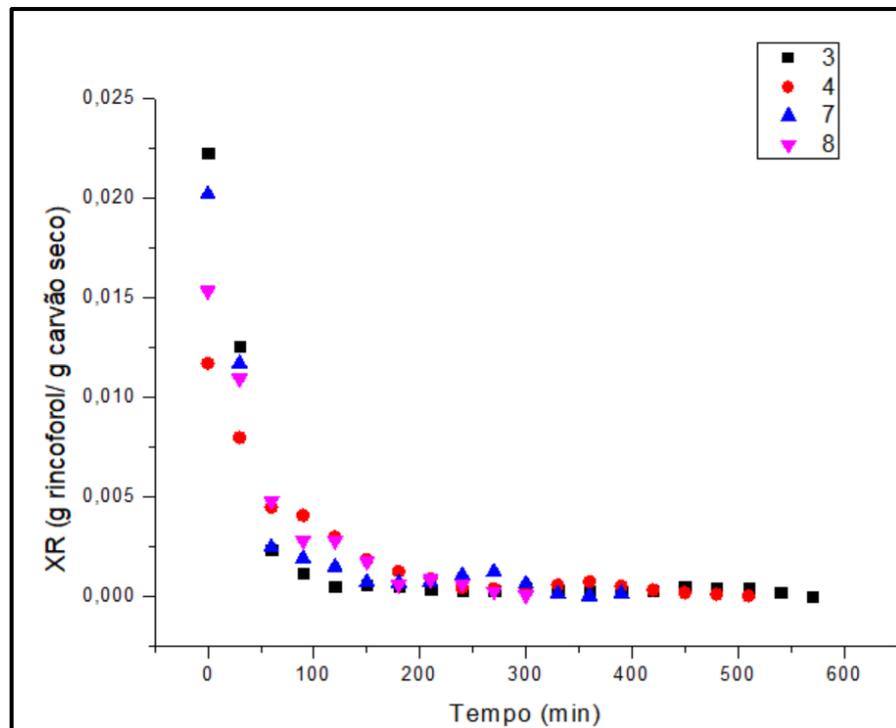
Fonte: Autora, 2024.

De forma similar, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**0 ilustra os perfis de liberação dos pares (3 e 7) e (4 e 8) que possuem a mesma velocidade de 2 m/s , granulometria

semelhante, e que estão variando em temperatura de 30 a 40°C, demonstrando o alto decaimento de massa.

Os ensaios 3 e 4 demonstraram uma estabilização mais lenta devido às condições experimentais empregadas. Isso pode ser explicado pelo fato de que, em ambos os experimentos, foi utilizado o carvão ativado com menor granulometria, apresentando um maior número de poros e sítios ativos disponíveis para reter o feromônio, prolongando o tempo de liberação.

Figura 20. Variações da razão de perda de massa em função do tempo analisando a temperatura numa velocidade de 2 m/s



Fonte: Autora, 2024.

Com base nas informações apresentadas, pode-se inferir que para prolongar a retenção do rincoforol na matriz de carvão, é imperativo estabelecer condições de temperatura a 30°C, velocidade do ar de 1 m/s e a utilização do carvão ativado do endocarpo do coco de dendê com granulometria entre $0,5 \text{ mm} < \text{Ø} < 0,6 \text{ mm}$.

Dessa forma, assegurará que o sistema desenvolvido demonstre um desempenho eficaz na captura do vetor da doença do anel vermelho, mitigando assim potenciais prejuízos econômicos e protegendo o cultivo de coqueiros e outras espécies vulneráveis à doença.

6 CONCLUSÃO

Diante dos estudos realizados sobre a liberação controlada do feromônio rincoforol em matrizes sólidas, conclui-se que o carvão ativado do endocarpo do coco de dendê apresenta alto potencial para atuar como matrizes sólidas para liberação controlada do feromônio rincoforol, considerando seu elevado potencial para a adsorção do feromônio devido á elevada área superficial que apresenta.

Ao término do planejamento experimental deste estudo, constatou-se que a taxa de propagação do rincoforol tem maior influência com temperatura e granulometria do que com a velocidade, alcançando maiores valores na transição do nível inferior ((-)1) para o superior ((+)1). E assim, é confirmado que há um acréscimo na difusividade efetiva quando tais fatores se encontram no nível superior.

O ajuste dos modelos matemáticos de Lewis e Page aos dados experimentais, demonstrou que o modelo de Page foi o que apresentou o melhor ajuste aos dados obtidos neste estudo. Condições com a temperatura a 30°C, velocidade do ar de 1 m/s e a granulometria entre $0,5 \text{ mm} < \emptyset < 0,6 \text{ mm}$ demonstraram uma liberação mais prolongada do feromônio.

Portanto, os resultados ressaltam a necessidade de uma cuidadosa consideração das variáveis relacionadas à formulação de dispensadores constituídos por matrizes sólidas para a liberação de feromônios, com o objetivo de otimizar o processo e maximizar a eficácia do produto.

REFERÊNCIAS

- AGROLINK. **Anel Vermelho**. Disponível em: < https://www.agrolink.com.br/problemas/anel-vermelho_2990.html >. Acesso em: 10 de dezembro de 2023.
- BATISTA, A. I. S. **Aplicação de um secador convectivo assistido por aquecimento infravermelho para a secagem de sementes de maracujá-amarelo (*Passiflora edulis* Sims f. *flavicarpa* Deg.)**. 2021. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Sergipe. Aracaju, SE, 2021.
- BLAIR, G. The use of immature nuts of *Cocos nucifera* for studies on *Rhadinaphelenchus cocophilus*. **Nematologica**, v.11, p. 590-592, 1965
- BRAINER, M. S. C. P.; XIMENES, L. F. Produção de coco – soerguimento das áreas tradicionais do Nordeste. **Caderno Setorial Etene**, a. 5, n. 127, 2020.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. (1992). Drying and Storage of Grains and Oilseeds. **Westport: The AVI Publishing Company**, 450 p.
- CHINCHILLA, C. M.; OEHLSCHLAGER, A. C. Capture of *Rhynchophorus palmarum* in traps baited with the male-produced aggregation pheromone. **ASD Oil Palm Papers**, v. 5, p. 1-8, 2002.
- DUARTE, A. G.; LIMA, I. S.; NAVARRO, D. M. A. F.; SANT'ANA, A. E. G. Captura de *Rhynchophorus palmarum* L. (coleoptera: curculionidae) em armadilhas iscadas com o feromônio de agregação e compostos voláteis de frutos do abacaxi. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 25, p. 81-84, 2003.
- DURAL, M. U.; CAVAS, L.; PAPAGEORGIOU, S. K.; KATSAROS. F. K. Methylene blue adsorption on activated carbon prepared from *Posidonia oceanica* (L.) dead leaves: Kinetics and equilibrium studies. **Chemical Engineering Journal**, v. 168, p. 77-85, 2011.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Anel-vermelho da Palma de Óleo**. 2016. Disponível em: < http://www.abrapalma.org/pt/wp-content/uploads/2016/12/Anel_Vermelho_Embrapa.pdf >. Acesso em: 15 out. 2023.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Broca-do-olho-do-coqueiro**. Aracaju, SE. 2021. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/coco/producao/pragas/pragas-principais/brocas/broca-do-olho-do-coqueiro> >. Acesso em: 15 out. 2023.
- FERREIRA, J. M. S; QUEIROZ, D. L. *Rhynchophorus palmarum*. **Novo manual de pragas florestais brasileiras**, p 656- 668, 2021.
- GRIFFITH, R. Red Ring Disease of Coconut Palm. **Plant Disease**, v. 72, n. 2, p. 193-196, 1987.
- GUEDES, A. M. M.; FARIA, L. J. G. Determinação da constante de secagem de urucum (*Bixa orellana* L.) em secador convectivo de leito fixo. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 2, p. 73-86, 2000.

HEBBAR, H. U.; VISHWANATHAN, K. H; RAMESH, M. N. 2004. Development of combined infrared and hot air dryer hot air dryer for vegetables. **J. Food Eng.** 65, 557–563.

MARQUES, L. G. **Liofilização de frutas tropicais**. 2008. Tese (Doutorado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

MARTINS, C. B. C. **Semioquímicos envolvidos nas interações intra e interespecíficas de *Oryzophagus oryzae* (Lima, 1936) (Coleoptera: Curculionidae) e *Thaumastocoris peregrinus* Carpintero & Dellapé, 2006 (Heteroptera: Thaumastocoridae)**. Tese (Doutorado em Ciências), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2013.

MELO, D. Q. **Uso de resíduos lignocelulósicos ativado como adsorventes na remoção de íons metálicos tóxicos: estudos de batelada e coluna utilizando planejamento experimental**. 2015. Tese (Doutorado em Química), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2015.

MENESES, A. T.; SANTOS, M. A.; MELO, L. L. A.; BRANDÃO, R. J.; SOLETTI, J. I.; GOULART, H. F. Estudo de liberação do rincoforol adsorvido em carvão ativado do endocarpo do coco de dendê. **Diversitas Journal**, v. 6, n. 2, p. 2421-2436, 2021.

MAARA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA DO ABASTECIMENTO E DA REFORMA AGRÁRIA. **Anel Vermelho do Coqueiro: aspectos gerais e medidas de controle**. Aracaju, SE. 1995. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/358499/1/anelo0001.pdf>>. Acesso em: 20 de out. de 2023.

MOURA, J. I. L.; BENTO, J. M. S.; SOUZA, J.; VILELA, E. F. Captura de *Rhynchophorus palmarum* (L.) pelo Uso de Feromônio de Agregação Associado a Árvore-Armadilha e Inseticida. **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, v. 26, n. 1, p. 69-73, 1997.

MOURA, J. I. L. **Pragas e doenças do coqueiro, identifique-as e elimine-as**. 2018. Disponível em: <<https://www.cpt.com.br/artigos/pragas-e-doencas-do-coqueiro-identifique-as-e-elimine-as>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2024.

NAVARRO, D. M. A. F.; MURTA, M. M.; DUARTE, A. G.; LIMA, I. S.; NASCIMENTO, R. R.; SANT'ANA, A. E. G. Aspectos práticos relacionados ao uso do rincoforol, o feromônio de agregação da broca-do-olho-do-coqueiro *Rhynchophorus palmarum* L. (Cuineenses: curculionidae) no controle de pragas do coqueiro. Análise de sua eficiência em campo. **Química Nova**, v. 25, n. 1, p. 32-36, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000100007>.

NOWAK, D.; LEWICKI, P. P. Infrared drying of apple slices. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 5 (3), p. 353-360, 2004.

PASSOS, C. G. **Síntese, caracterização e propriedades adsorventes de sílica organofuncionalizada com o grupo 10-amino-4-azadecil**. 2007. 82 f. Dissertação (Mestrado em engenharia química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2007.

RAMOS, I. G. **Zeólitas como dispositivo de liberação prolongada de rincoforol**. 2012. Tese (Doutorado em Química Analítica), Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2012.

SANTOS, D. C.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; OLIVEIRA, E. N. A. Cinética de secagem de farinha de grãos residuais de urucum. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 223–231, 2013

VIANA, A. C. **Matrizes para liberação controlada do feromônio de agregação Rincoforol**. Tese (Doutorado em Biotecnologia) – Instituto Multidisciplinar em Saúde, Universidade Federal da Bahia. Salvador, p. 133, 2018.

TIGLIA, E. A.; VILELA, E. F.; MOURA, J. I. L.; ANJOS, N. Eficiência de armadilhas com feromônio de agregação e cana-de-açúcar na captura de *Rhynchophorus palmarum* (L.). **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, v. 27, p. 183, 1998.

TIHOHOD, D. Nematologia Agrícola Aplicada. 2. Ed. **Jaboticabal**: FAPESP, 2000. p. 471.