

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE BIOTECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA

VITÓRIA LOPES MOREIRA

**USO DE CARVÃO ATIVADO DE BABAÇU NA ADSORÇÃO DO CORANTE FAST
GREEN EM EFLUENTES SINTÉTICOS**

UBERLÂNDIA-MG

2025

VITÓRIA LOPES MOREIRA

**USO DE CARVÃO ATIVADO DE BABAÇU NA ADSORÇÃO DO CORANTE
FAST GREEN EM EFLUENTES SINTÉTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Biotecnologia da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Biotecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Edgar Silveira Campos

Co-orientador: Dr. Guilherme Nunes Moreira Costa

UBERLÂNDIA-MG

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

M838
2025
Moreira, Vitória Lopes, 2003-
USO DE CARVÃO ATIVADO DE BABAÇU NA ADSORÇÃO DO
CORANTE FAST GREEN EM EFLUENTES SINTÉTICOS [recurso
eletrônico] / Vitória Lopes Moreira. - 2025.

Orientador: Edgar Silveira Campos.

Coorientador: Guilherme Nunes Moreira Costa.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade
Federal de Uberlândia, Graduação em Biotecnologia.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Biotecnologia. I. Campos, Edgar Silveira, 1981-, (Orient.). II.
Costa, Guilherme Nunes Moreira, 1990-, (Coorient.). III.
Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Biotecnologia.
IV. Título.

CDU: 60

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

VITÓRIA LOPES MOREIRA

**USO DE CARVÃO ATIVADO DE BABAÇU NA ADSORÇÃO DO CORANTE
FAST GREEN EM EFLUENTES SINTÉTICOS**

Relatório final, apresentado a Universi-
dade _____, como parte das exigências
para a obtenção do título de Bacharel.

Uberlândia, ____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Edgar Silveira Campos
Afiliações

Prof. Dra. Helisângela de Almeida Silva
Afiliações

Dr. Paulo Vitor Alves Ribeiro
Afiliações

“Um cientista no seu laboratório não é apenas um técnico,
é também uma criança colocada à frente de fenômenos naturais
que impressionam como se fossem um conto de fadas.”

Marie Curie

AGRADECIMENTOS

Zig Zaller dizia que as pessoas costumam dizer que a motivação não dura sempre... bem, nem o efeito do banho, por isso recomenda-se diariamente.

Com essa frase que agradeço primeiramente a mim mesma por todo esforço e dedicação que obtive em todo o curso mesmo com todas as dificuldades que passei. Agradeço meus pais Joelma e Wantuil por nunca desistirem de mim e nunca me deixarem desistir de mim mesma e do curso, obrigada por fazerem festa com o pouco que eu ia adquirindo ao longo do curso. Agradeço muito a meu amigo Jefferson que trabalhava comigo e nunca me deixou ficar com a ideia de largar o curso na cabeça, sempre me ajudou e incentivou com meus artigos, conclusão de curso e estágio.

Obrigada meus padrinhos Ana Zélia e Luís por sempre incentivarem meus estudos e as coisas que me fazem feliz, o notebook que me deram antes da graduação foi um ponta pé incrível para todo meu desenvolvimento como biotecnologista. Obrigada minha irmã Isis por sempre se dispor a me ajudar a entrar na faculdade comprando livros e indicando canais de estudo, por se preocupar com meu rendimento e saúde mental.

Agradeço imensamente minha espiritualidade por ter iluminado meu caminho e me guiado até aqui, sem eles nada disso seria possível.

Obrigada ao meu co-orientador e técnico Guilherme por me auxiliar na prática das diversas experimentações que o projeto pedia, sem você nada teria dado certo, obrigada por sua paciência e amizade que criamos ao longo dessa fase, grata demais.

Obrigada Prof. Helisângela por ter sido tão acolhedora e me ensinado tudo que sei sobre a microbiologia, agradeço as diversas oportunidades de aprendizado, e cada palavra amiga e de carinho comigo, graças a você sei que a microbiologia sempre fará parte da minha vida assim como você.

Obrigada técnico Ricardo e Licia por me ensinarem mais sobre a microbiologia, me orientarem nas aulas e nos experimentos do laboratório, por sempre se colocarem disponíveis para me auxiliar e tirar dúvidas, por me ensinarem a como preparar cada meio de cultura, repicagem, estocagem, cultivo, e obrigada por toda paciência e carinho comigo.

Obrigada todos meus professores do IBTEC pelos ensinamentos, nunca esquecerei vocês.

E obrigada ao meu orientador Edgar pelo suporte, pela amizade, por todo ensinamento passado, por sua paciência comigo e por todos os cafezinhos que prometi tomarmos e não tomamos.

Obrigada as poucas amigas que fiz na universidade que auxiliaram o curso ficar mais leve, espero levar vocês para a vida. Obrigada IBTEC, ICBIM e família UFU, vocês têm um marco imenso na minha vida que jamais permitirei esquecer sequer um de vocês e todos os momentos proveitosos que passamos juntos.

Obrigado!

RESUMO

O aumento constante da poluição de rios e lagos por resíduos industriais contendo corantes sintéticos tem impulsionado a busca por soluções ecológicas e acessíveis para lidar com esses poluentes. Nesse contexto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a eficácia do carvão ativado produzido a partir da casca do coco babaçu (*Attalea speciosa*) na adsorção do corante Fast Green, um corante aniônico amplamente utilizado nas indústrias têxtil e alimentícia. O carvão ativado foi obtido por ativação física com CO_2 e caracterizado quanto à estrutura de poros, área superficial e grupos funcionais. Os ensaios de adsorção foram realizados em batelada, variando-se a concentração inicial do corante, o tempo de contato e a massa do adsorvente. Os dados obtidos foram analisados por meio de modelos cinéticos e isotérmicos, com ênfase nos modelos de Langmuir e Freundlich. Os resultados indicaram que o carvão ativado de babaçu apresentou elevada capacidade de adsorção, alcançando remoção de até 93,41% do corante Fast Green sob as melhores condições experimentais, correspondentes a pH ácido, tempo de contato prolongado e maior massa de adsorvente. A cinética de adsorção seguiu predominantemente o modelo de pseudo-segunda ordem, enquanto a isoterma de Langmuir apresentou o melhor ajuste aos dados, sugerindo adsorção em monocamada sobre superfície homogênea. A análise do pH demonstrou influência significativa na eficiência de remoção, com melhor desempenho em meio levemente ácido. Com base nos resultados, conclui-se que o carvão ativado de babaçu representa uma alternativa promissora, de baixo custo e ambientalmente sustentável para o tratamento de efluentes contendo corantes sintéticos, contribuindo para o aproveitamento de resíduos agroindustriais e para a redução dos impactos ambientais causados pela poluição hídrica.

Palavras-chave: Sustentabilidade, biossorvente, remediação ambiental, poluição hídrica, resíduo agroindustrial.

ABSTRACT

The constant increase in the pollution of rivers and lakes by industrial waste containing synthetic dyes has driven the search for eco-friendly and affordable solutions to address these pollutants. In this context, this research aimed to evaluate the efficiency of activated carbon produced from the shell of the babaçu coconut (*Attalea speciosa*) in the adsorption of the Fast Green dye, an anionic dye widely used in the textile and food industries. The activated carbon was obtained through physical activation with CO₂ and characterized in terms of pore structure, surface area, and functional groups. Batch adsorption experiments were carried out by varying the initial dye concentration, contact time, and adsorbent mass. The data obtained were analyzed using kinetic and isotherm models, with emphasis on the Langmuir and Freundlich models. The results indicated that babaçu-based activated carbon exhibited a high adsorption capacity, reaching up to 93.41% removal of the Fast Green dye under the best experimental conditions, corresponding to acidic pH, prolonged contact time, and greater adsorbent mass. The adsorption kinetics predominantly followed the pseudo-second-order model, while the Langmuir isotherm provided the best fit to the data, suggesting monolayer adsorption on a homogeneous surface. The pH analysis showed a significant influence on removal efficiency, with better performance under slightly acidic conditions. Based on these results, babassu activated carbon represents a promising, low-cost, and environmentally sustainable alternative for the treatment of effluents containing synthetic dyes, contributing to the reuse of agro-industrial residues and to the reduction of environmental impacts caused by water pollution.

Keywords: Sustainability, biosorbent, environmental remediation, water pollution, agro-industrial residue.

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Experimento 1 com variação de tempo, massa de carvão e concentração do corante.	18
Tabela 2 – Experimento 2 com variação de tempo, massa de carvão e concentração do corante.	19
Tabela 3 – Experimento 3 com variação de tempo, massa de carvão e concentração do corante.	19
Tabela 4 -- Experimento 4 com variação de tempo, massa de carvão e concentração do corante.	20
Tabela 5 -- Experimento 5 com variação de tempo, massa de carvão e concentração do corante.	21
Tabela 6 – Resultados do Experimento 1 com variação de tempo, massa de carvão e concentração do corante, leitura de absorbância, quantidade de corante absorvido (mg/L) e porcentagem de remoção (%).	22
Tabela 7 – Resultados do Experimento 2 com variação de tempo, massa de carvão e concentração do corante, leitura de absorbância, quantidade de corante absorvido (mg/L) e porcentagem de remoção (%).	25
Tabela 8 – Resultados do Experimento 3 com variação de tempo, massa de carvão e concentração do corante, leitura de absorbância, quantidade de corante absorvido (mg/L) e porcentagem de remoção (%).	27
Tabela 9 – Resultados do Experimento 4 com variação de tempo, massa de carvão e concentração do corante, leitura de absorbância, quantidade de corante absorvido (mg/L) e porcentagem de remoção (%).	30
Tabela 10 – Resultados do Experimento 5 com variação de tempo, massa de carvão e concentração do corante, leitura de absorbância, quantidade de corante absorvido (mg/L) e porcentagem de remoção (%).	33

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1: Primeira análise de ANOVA.....	23
Figura 2: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvância da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu.....	23
Figura 3: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvância da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu.....	24
Figura 4: Segunda análise de ANOVA	25
Figura 5: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvância da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu.....	26
Figura 6: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvância da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu.....	26
Figura 7: Terceira análise de ANOVA	28
Figura 8: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvância da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu.....	28
Figura 9: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvância da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu.....	29
Figura 10: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvância da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu.....	29
Figura 11: Quarta análise de ANOVA	31
Figura 12: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvância da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu.....	31
Figura 13: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvância da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu.....	32
Figura 14: Quinta análise de ANOVA	33
Figura 15: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvância da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu.....	34
Figura 16: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvância da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu.....	34

LISTAS DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

mg/L – Miligramas por litro

g/L – Gramas por litro

g – Grama

mL – Mililitro

cm – Centímetro

pH - Potencial hidrogeniônico

h – Hora

min – Minutos

LAPBBIO – Laboratório de Processos e Bioprocessos Biotecnológicos

RSM – Response Surface Methodology / Metodologia de Resposta de Superfície

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1. Objetivo Geral	16
2.2. Objetivos Específicos	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS	16
3.1. Corante	16
3.2. Obtenção do carvão ativado de Babaçu	16
3.3. Determinação da curva de calibração do corante.....	17
3.4. Estudos de adsorção com resposta de superfície.....	17
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
5. CONCLUSÃO	35
6. REFERÊNCIAS	36

1. INTRODUÇÃO

A poluição hídrica é um dos grandes desafios ambientais contemporâneos, especialmente quando envolve efluentes industriais que contêm corantes sintéticos. Esses corantes conferem coloração intensa à água, reduzindo a penetração de luz e alterando parâmetros físico-químicos essenciais (Rodrigues; Silva, 2022), como a demanda química de oxigênio, a demanda bioquímica de oxigênio e os sólidos dissolvidos, o que pode comprometer a qualidade do ambiente aquático. (Ardila-Leal et al., 2021)

Além disso, muitos desses corantes são recalcitrantes e apresentam toxicidade, podendo gerar produtos tóxicos ou cancerígenos durante sua degradação. (Kumar et al., 2025a)

Um exemplo recente da gravidade desses impactos ocorreu em maio de 2025, quando um caminhão que transportava cerca de 2 000 litros de corante azul tombou em Jundiaí (SP), e parte da carga se espalhou para o Córrego das Tulipas e para o Rio Jundiaí. O episódio tingiu a água de azul e afetou a fauna local: peixes morreram, aves e capivaras ficaram tingidas, e esforços de resgate e diluição foram mobilizados por órgãos ambientais. Esse incidente evidencia a vulnerabilidade dos cursos d'água urbanos frente ao transporte de químicos e reforça a urgência de tecnologias eficazes para tratamento de efluentes contendo corantes. (Gattolini, 2025)

O tratamento de efluentes com corantes apresenta vários desafios. Métodos convencionais como sedimentação, coagulação, oxidação química e tratamentos biológicos muitas vezes são insuficientes para remover completamente compostos sintéticos, (Kunz; Peralta-Zamora, 2002) especialmente em baixas concentrações ou quando os corantes são resistentes à biodegradação. Ademais, esses processos podem gerar subprodutos indesejados ou demandar elevados custos operacionais, energia e insumos químicos. (Kumar et al., 2025b)

Nesse cenário, a busca por soluções sustentáveis tem se intensificado. Uma alternativa promissora é o uso de adsorventes naturais ou de biomassa residual, que combinam eficiência de remoção com menor impacto ambiental. (Silva et al., 2020) O carvão ativado produzido a partir do babaçu (*Attalea speciosa*), por exemplo, tem se destacado devido à sua elevada porosidade e área superficial. O babaçu é uma planta

nativa brasileira, especialmente presente no norte e nordeste do país, cujo endocarpo (casca) é um resíduo abundante de origem agroindustrial. (Pires, 2021)

As propriedades físico-químicas do carvão ativado de babaçu o tornam adequado para adsorção, estudos indicam que ele apresenta microporos e mesoporos, e grupos funcionais em sua superfície (hidroxilas, cetonas etc.) que favorecem a interação com moléculas como corantes.(Cionek et al., 2014) Esse material tem sido aplicado com sucesso na remoção de alguns corantes (Pires, 2021) e outros compostos orgânicos emergentes (por exemplo, fármacos) via adsorção.(Carolina; Silva, 2024)

As técnicas de adsorção são muito utilizadas para remover certos tipos de poluentes da água, principalmente os que não se degradam facilmente ou têm moléculas muito pequenas. As características físicas e químicas do carvão ativado de Babaçu o tornam um material versátil, usado para fixar as moléculas dissolvidas na superfície do carvão, capacidade que vem principalmente da composição lignocelulósica de seus componentes e da presença de superfícies mesoporosas, a adsorção possibilita não só a remoção de compostos orgânicos recalcitrantes, mas também de inorgânicos, dependendo da superfície do adsorvente e de seus grupos funcionais. (Da Silva et al., 2019)

Dentre as diversas técnicas para eliminar corantes, a adsorção se destaca como um processo rápido, acessível e eficaz. Apresenta uma elevada capacidade de remoção e, em certas situações, pode ser revertida (Vieira et al., 2011a), dependendo do material usado como adsorvente. Isso possibilita recuperar o corante para ser reutilizado. (Vieira et al., 2011b)

A sustentabilidade desse processo é reforçada pela possibilidade de regeneração do adsorvente e pela valorização de resíduos agroindustriais que, de outra forma, poderiam ser descartados. A produção de carvão ativado de biomassa como o babaçu também se alinha com práticas de economia circular e de baixo impacto ambiental, a regeneração do carvão ativado ou seu descarte controlado ainda pode trazer benefícios ambientais, contribuindo para a recuperação de recursos hídricos contaminados e para a mitigação da poluição conforme já observado em estudos comparativos entre carvões ativados de diferentes biomassas.(Azevedo Machado et al., 2018)

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é investigar a eficiência do carvão ativado de babaçu na adsorção do corante Fast Green em meio aquoso.

2.2. Objetivos Específicos

Investigar as interações entre o corante Fast Green e o carvão ativado de babaçu, analisando como fatores como:

- pH;
- Temperatura;
- Tempo de contato;
- Concentração inicial dos corantes.

Caracterizar fisicamente e quimicamente o carvão ativado de babaçu, otimizando as condições de adsorção, a fim de identificar os parâmetros ideais para maximizar a remoção dos corantes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Corante

Foi selecionado o corante Fast Green disponibilizados pelo Laboratório de Processos e Bioprocessos Biotecnológicos (LAPBBIO – UFU).

3.2. Obtenção do carvão ativado de Babaçu

O carvão ativado utilizado na pesquisa foi doado por uma mestranda do laboratório após o término de sua pesquisa com o carvão (Ferreira, 2023).

O carvão doado para a pesquisa foi produzido de forma orgânica por produtores rurais residentes em Patos de Minas/MG que sobrevivem do comércio do óleo de babaçu e de produtos e subprodutos do material vegetal.

3.3. Determinação da curva de calibração do corante

A solução estoque do corante foi preparada a 1 g/L, utilizando 50 mL do corante. O pH inicial das soluções foi aferido, e, em seguida, ajustado utilizando ácidos ou bases conforme necessário, para observar como as alterações de pH influenciam na adsorção dos corantes juntamente com o carvão ativado de babaçu.

3.4. Estudos de adsorção com resposta de superfície

A metodologia aplicada neste trabalho baseou-se no planejamento experimental com uso da técnica de Superfície de Resposta (Response Surface Methodology - RSM), amplamente utilizada em estudos de otimização de processos. Essa abordagem permite avaliar a influência simultânea de múltiplos fatores (como tempo, quantidade de adsorvente e concentração do corante) sobre uma variável resposta (neste caso, a eficiência de remoção do corante Fast Green). Trabalhos anteriores como os de (Carolina; Silva, 2024) e (Cionek et al., 2014) demonstram a eficácia dessa metodologia em estudos de adsorção com diferentes tipos de resíduos e corantes sintéticos.

Foram conduzidos cinco conjuntos experimentais, cada um com 12 condições diferentes, totalizando 60 execuções. As variáveis independentes testadas foram o tempo de contato (minutos ou horas), a quantidade de carvão ativado de babaçu (g/L) e a concentração do corante Fast Green (mg/L). As Tabelas 1 a 5 apresentam as combinações dessas variáveis aplicadas em cada etapa.

Experi- mento 1	Tempo	Carvão	Corante
1	4h	0.50	7.5
2	4h	0.50	7.5
3	5h30	0.75	10

4	2h30	0.75	10
5	2h30	0.25	10
6	5h30	0.75	5
7	4h	0.50	7.5
8	5h30	0.25	5
9	2h30	0.25	5
10	2h30	0.75	5
11	5h30	0.25	10
12	4h	0.50	7.5

Tabela 1 – Experimento 1 com variação de tempo, massa de carvão e concentração do corante.

Este experimento inicial teve como objetivo avaliar o comportamento geral do sistema em condições variadas de tempo, concentração de corante e quantidade de adsorvente. A variação entre os ensaios permitiu uma análise preliminar do sistema de adsorção.

Experimento			
2	Tempo	Carvão	Corante
1	1h	0.80	4
2	3h	0.50	12
3	5h	0.80	4
4	1h	0.80	20
5	1h	0.20	4
6	3h	0.50	12
7	3h	0.50	12
8	3h	0.50	12
9	5h	0.20	20
10	5h	0.80	20
11	1h	0.20	20
12	5h	0.20	4

Tabela 2 – Experimento 2 com variação de tempo, massa de carvão e concentração do corante.

Na segunda etapa, buscou-se refinar os intervalos de tempo e concentração de corante, mantendo algumas repetições para análise estatística. O objetivo foi observar com mais precisão como o tempo de contato e a concentração influenciam na eficiência da adsorção.

Experi- mento 3	Tempo	Carvão	Corante
1	3h	2	5
2	7h	2	10
3	3h	6	10
4	7h	2	5
5	7h	6	10
6	5h	4	8
7	5h	4	8
8	5h	4	8
9	3h	2	10
10	3h	6	5
11	7h	6	5
12	5h	4	8

Tabela 3 – Experimento 3 com variação de tempo, massa de carvão e concentração do corante.

O terceiro experimento utilizou valores mais elevados de massa de carvão (2–6 g/L) e variabilidade no tempo, com foco em entender como o aumento da massa do adsorvente impacta a remoção do corante, mantendo a concentração do corante relativamente constante (5 a 10 mg/L). A presença de repetições buscou garantir a confiabilidade dos dados.

Experi- mento	4		
RSM	Tempo	Carvão	Corante
1	5h	11.6	10

2	2h	10	10
3	5h	0.35	10
4	8h	2	10
5	8h	10	10
6	2h	2	10
7	5h	6	10
8	45min	6	10
9	5h	6	10
10	9:14h	6	10
11	5h	11.6	10
12	2h	10	10

Tabela 4 -- Experimento 4 com variação de tempo, massa de carvão e concentração do corante.

Nesta etapa, iniciou-se a aplicação do planejamento experimental com RSM, mantendo a concentração do corante fixa (10 mg/L) e variando o tempo (de 45 minutos até 9h14) e a massa de carvão. O objetivo foi estudar com maior profundidade a interação entre tempo e quantidade de adsorvente, visando a construção de um modelo preditivo.

Experi- mento	5		
RSM	Tempo	Carvão	Corante
1	2h	6	10
2	2h	14	10
3	5h	10	10
4	8h	6	10
5	9:14h	10	10
6	45min	10	10
7	5h	4.35	10
8	5h	15.6	10
9	5h	10	10
10	8h	14	10

11	5h	10	10
12	5h	10	10

Tabela 5 -- Experimento 5 com variação de tempo, massa de carvão e concentração do corante.

Por fim, o quinto experimento seguiu com a aplicação da RSM, ajustando os intervalos de tempo e testando concentrações mais elevadas de carvão ativado (até 15,6 g/L). Essa etapa buscou refinar o modelo e determinar as melhores condições operacionais para a remoção máxima do corante.

Após os tempos definidos em cada experimento, foram retiradas amostras de 15 mL das soluções, centrifugadas e filtradas para posterior leitura da absorbância no espectrofotômetro, a fim de determinar a eficiência de adsorção. Os dados coletados serviram de base para análise estatística e construção de superfícies de resposta.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os testes de adsorção realizados com o corante Fast Green e o carvão ativado de babaçu resultaram em uma série de dados experimentais que permitiram avaliar o desempenho do sistema sob diferentes condições operacionais. Para isso, foram consideradas variáveis como tempo de contato, concentração de corante absorvido (em mg/L) e a porcentagem de remoção (%Y). Os resultados foram organizados em tabelas contendo as leituras de absorbância, a quantidade de corante removida e a eficiência percentual do processo.

Com base nesses dados, foram realizadas análises estatísticas por meio de ANOVA e representações gráficas em formato de mapa de calor, com o objetivo de identificar as melhores condições para a remoção do corante e compreender a influência de cada variável na eficiência do processo.

Experimento 1

Tempo	Carvão	Corante	Leitura 1	Absorvido	Y
4	0.50	7.5	399	8,721683	95,86%

4	0.50	7.5	615	8,804901	96,78%
5.5	0.75	10	369	8,763292	96,32%
2.5	0.75	10	341	8,6454	95,02%
2.5	0.25	10	246	8,506704	93,50%
5.5	0.75	5	383	8,853444	97,31%
4	0.50	7.5	430	8,451225	92,89%
5.5	0.25	5	291	8,721683	95,86%
2.5	0.25	5	864	8,742487	96,09%
2.5	0.75	5	196	8,680074	95,40%
5.5	0.25	10	105	8,361073	91,90%
4	0.50	7.5	359	8,47203	93,12%

Tabela 6 – Resultados do Experimento 1 com variação de tempo, massa de carvão e concentração do corante, leitura de absorbância, quantidade de corante absorvido (mg/L) e porcentagem de remoção (%).

O primeiro teste (Tabela 6) teve como objetivo observar a influência individual e combinada de três fatores principais: tempo de contato (variando entre 2h30 e 5h30), quantidade de carvão (0,25 a 0,75 g) e concentração do corante (5 a 10 mg/L).

Mesmo com variações consideráveis entre os parâmetros, os resultados mostraram eficiências de remoção superiores a 90%, com destaque para a condição de 5h30, 0,75g de carvão e 5 mg/L de corante, que atingiu 97,31% de remoção. Os dados também mostraram boa reprodutibilidade, evidenciada pelas repetições com resultados semelhantes.

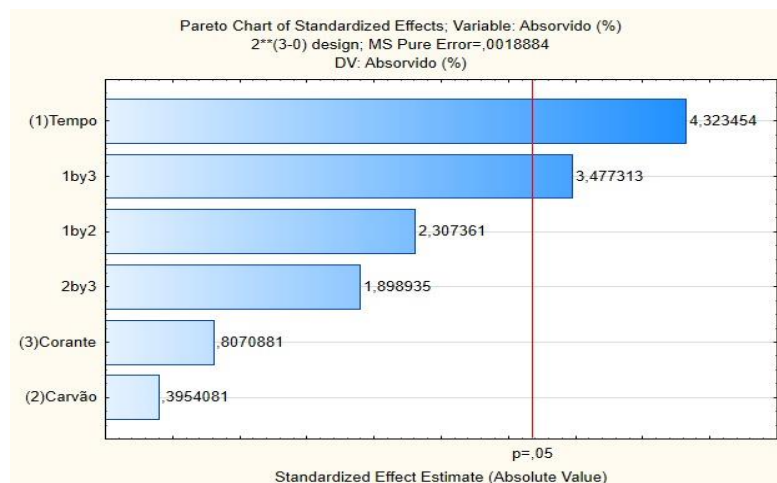


Figura 1: Primeira análise de ANOVA

fonte: autoria própria

A análise ANOVA (Figura 1) apontou que o tempo e a massa do adsorvente foram os fatores mais significativos no processo.

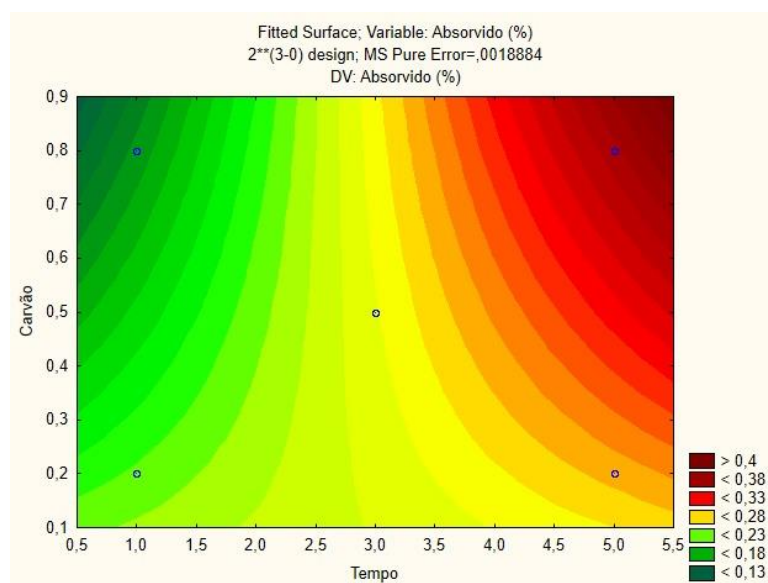


Figura 2: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvência da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu

fonte: autoria própria

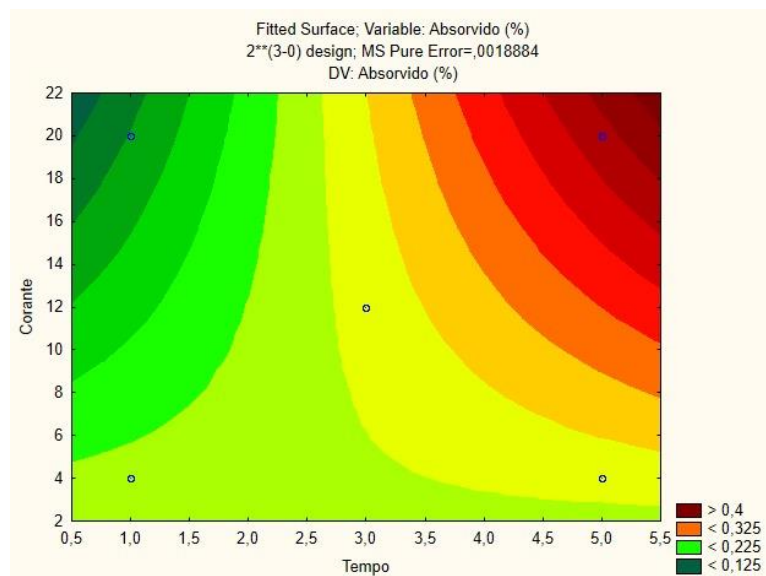


Figura 3: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvência da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu

fonte: autoria própria

Os gráficos de calor (Figuras 2 e 3) reforçam essa tendência, indicando uma correlação positiva entre o aumento do tempo e da massa de carvão com a eficiência da adsorção.

Experimento 2

Tempo	Carvão	Corante	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Absorvido	Y
1	0,8	4	0,460	0,460	0,458	0,923486	23,09%
3	0,5	12	1,430	1,431	1,433	2,182848	18,19%
5	0,8	4	0,457	0,435	0,437	1,036755	25,92%
1	0,8	20	2,500	2,500	2,500	2,771845	13,86%
1	0,2	4	0,452	0,422	0,420	1,117661	27,94%
3	0,5	12	1,247	1,272	1,270	3,350208	27,92%
3	0,5	12	1,415	1,403	1,405	2,346972	19,56%
3	0,5	12	1,406	1,380	1,381	2,476422	20,64%
5	0,2	20	2,045	1,992	1,999	6,156033	30,78%
5	0,8	20	1,393	1,423	1,403	10,35622	51,78%
1	0,2	20	2,301	2,301	2,301	4,151872	20,76%

5	0,2	4	0,435	0,409	0,409	1,212436	30,31%
---	-----	---	-------	-------	-------	----------	--------

Tabela 7 – Resultados do Experimento 2 com variação de tempo, massa de carvão e concentração do corante, leitura de absorbância, quantidade de corante absorvido (mg/L) e porcentagem de remoção (%).

O segundo experimento (Tabela 7) incluiu repetições sistemáticas com três leituras por ensaio, permitindo uma análise estatística mais desenvolvida. Neste teste, foi ampliada a faixa da concentração do corante (4 a 20 mg/L) e mantidos tempos entre 1 e 5 horas.

Observa-se que, em concentrações elevadas de corante (20 mg/L), a porcentagem de remoção caiu significativamente, mesmo com aumento da massa de adsorvente, o que sugere possível saturação dos sítios ativos. Por outro lado, em menores concentrações (4 mg/L), mesmo com menor quantidade de carvão, a eficiência de remoção se manteve em torno de 30%, indicando menor competição por sítios de adsorção.

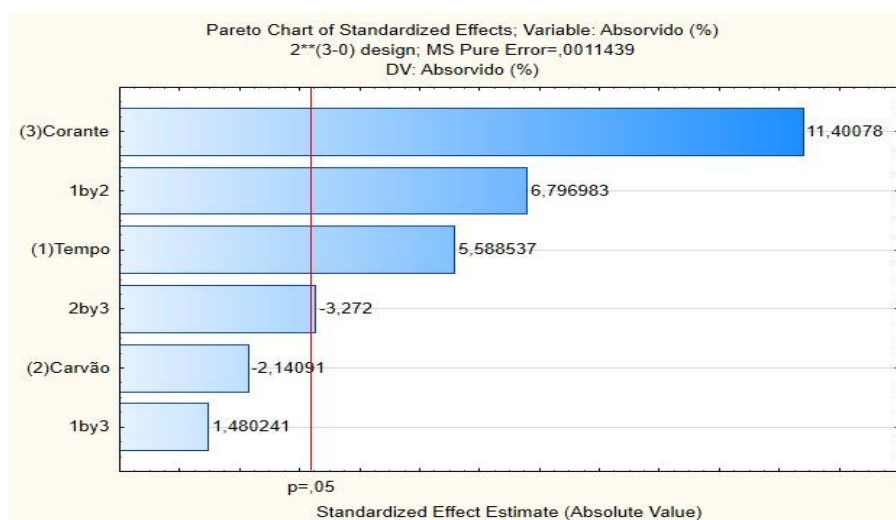


Figura 4: Segunda análise de ANOVA

fonte: autoria própria

A ANOVA (Figura 4) confirmou a influência significativa da concentração inicial do corante sobre a resposta.

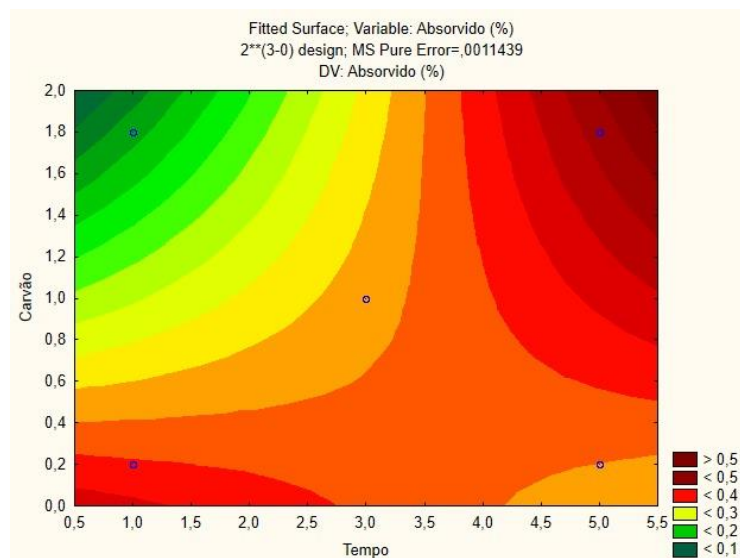


Figura 5: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvência da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu

fonte: autoria própria

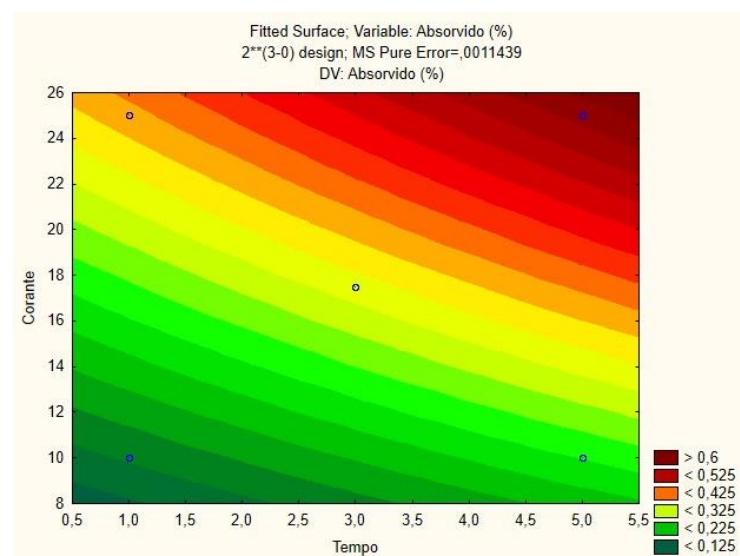


Figura 6: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvência da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu

fonte: autoria própria

Os gráficos de calor (Figuras 5 e 6) evidenciam visualmente as regiões de maior eficiência.

Experimento 3

Tempo	Car- vão	Co- rante	Lei- tura 1	Leitura 2	Lei- tura 3	Absor- vido	Y
3	2	5	399	411	389	2,753572	103,41%
7	2	10	615	625	597	4,208394	101,71%
3	6	10	369	383	395	2,609331	102,63%
7	2	5	341	333	321	2,280697	104,09%
7	6	10	246	236	226	1,591957	104,20%
5	4	8	383	396	377	2,641944	103,07%
5	4	8	430	435	419	2,938605	102,78%
5	4	8	291	295	279	1,967505	104,06%
3	2	10	864	895	882	6,07165	101,26%
3	6	5	196	186	174	1,263087	107,37%
7	6	5	105	96	89	0,646495	115,14%
5	4	8	359	359	342	2,419449	103,33%

Tabela 8 – Resultados do Experimento 3 com variação de tempo, massa de carvão e concentração do corante, leitura de absorbância, quantidade de corante absorvido (mg/L) e porcentagem de remoção (%).

Com base nos dados anteriores, o terceiro experimento (Tabela 8) testou massas maiores de carvão ativado (até 6 g) em concentrações fixas de corante (5 e 10 mg/L). Os resultados mostraram índices de remoção superiores a 100% em alguns casos, indicando a necessidade de calibragem mais precisa das leituras de absorbância ou presença de interferências óticas.

Mesmo assim, os dados indicam claramente que aumentar a massa do adsorvente promove um incremento direto na eficiência da remoção, provavelmente devido ao aumento da área superficial e dos sítios disponíveis.

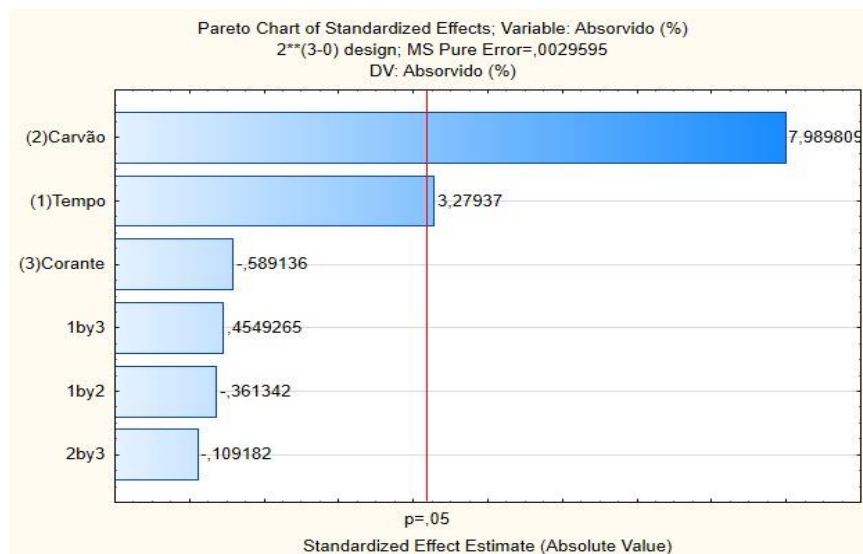


Figura 7: Terceira análise de ANOVA

fonte: autoria própria

A ANOVA (Figura 7) reforça essa conclusão ao indicar que a variação da massa do adsorvente foi estatisticamente significativa no processo de remoção do corante.

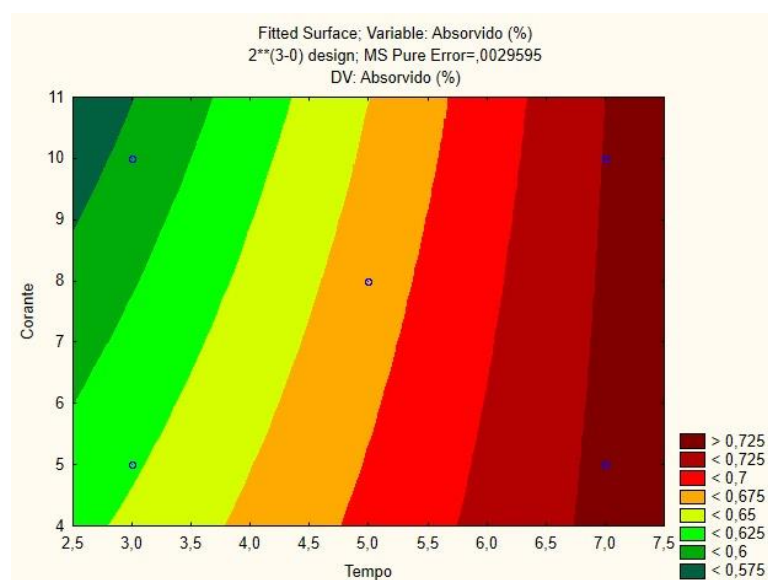


Figura 8: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvância da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu

fonte: autoria própria

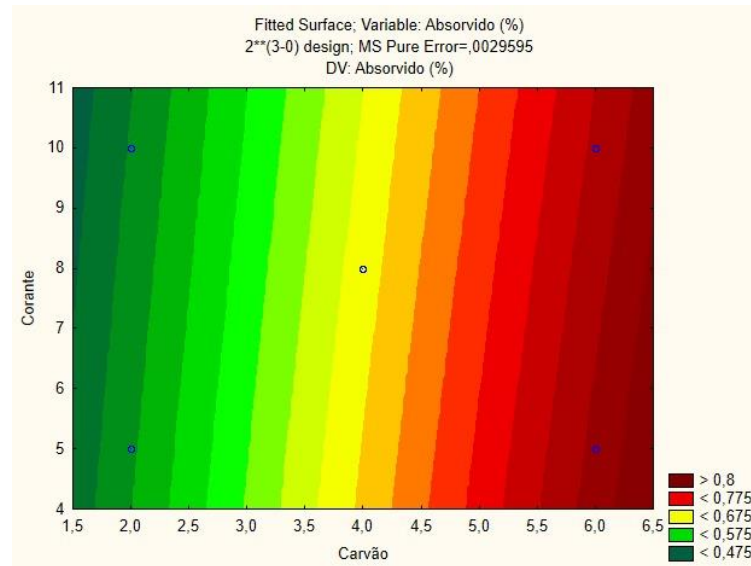


Figura 9: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvência da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu

fonte: autoria própria

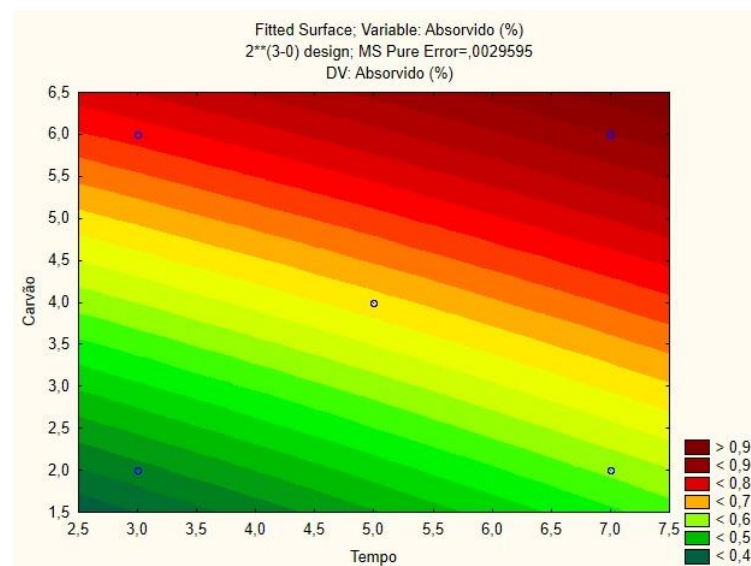


Figura 10: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvência da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu

fonte: autoria própria

Os gráficos de calor (Figuras 8, 9 e 10) permitem visualizar com nitidez as regiões de maior eficiência, bem como os limites de saturação do carvão ativado. Isso demonstra que, embora o aumento da massa de adsorvente favoreça a adsorção, há

um ponto a partir do qual o ganho de eficiência se estabiliza, indicando uma possível otimização do uso do material.

Experimento 4 RSM

Tempo	Car- vão	Co- rante	Lei- tura 1	Lei- tura 2	Lei- tura 3	Absor- vido	Y
5,000	11,657	10	188	208	232	7,755432	85,24%
2,000	10,000	10	429	380	408	6,393897	70,28%
5,000	0,343	10	1027	1003	975	2,260749	24,85%
8,000	2,000	10	585	605	557	5,168747	56,81%
8,000	10,000	10	214	259	236	7,568192	83,18%
2,000	2,000	10	999	971	936	2,489598	27,36%
5,000	6,000	10	351	324	306	6,939436	76,27%
0,757	6,000	10	714	699	666	4,401294	48,38%
5,000	6,000	10	344	328	378	6,779935	74,52%
9,243	6,000	10	219	260	238	7,549699	82,98%

Tabela 9 – Resultados do Experimento 4 com variação de tempo, massa de carvão e concentração do corante, leitura de absorbância, quantidade de corante absorvido (mg/L) e porcentagem de remoção (%).

O quarto experimento (Tabela 9) foi o primeiro a empregar a metodologia de superfície de resposta, com a concentração de corante fixada em 10 mg/L para facilitar a modelagem estatística. Variou-se amplamente a massa de carvão (0,3 a 11,6 g) e o tempo de contato (até 9h14), possibilitando uma análise de interação entre as variáveis.

Os melhores resultados foram obtidos com massas intermediárias a altas e tempos superiores a 5 horas, com destaque para a condição de 5h e 11,6g, que alcançou 85,24% de remoção. Em contrapartida, o uso de massas muito baixas resultou em eficiências significativamente menores.

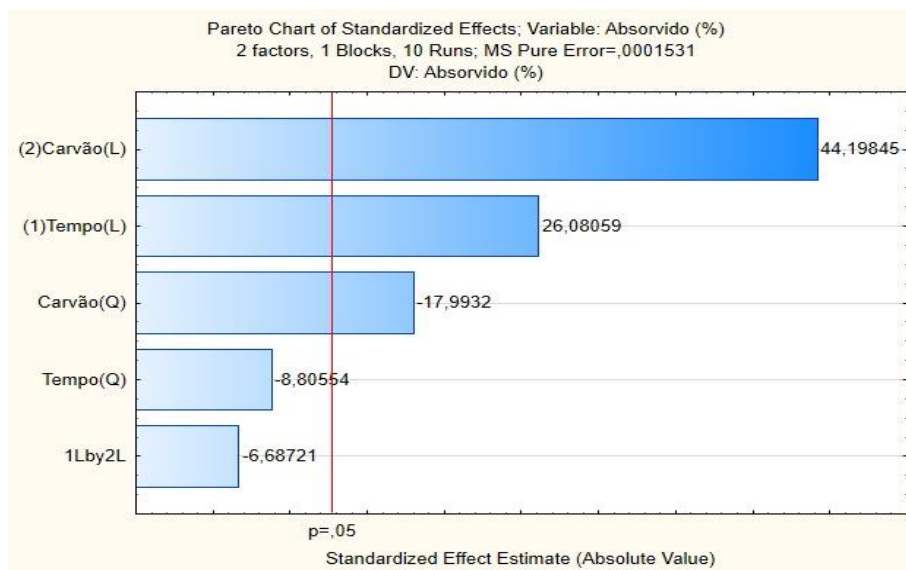


Figura 11: Quarta análise de ANOVA

fonte: autoria própria

A ANOVA (Figura 11) identificou interações significativas entre tempo e massa de carvão.

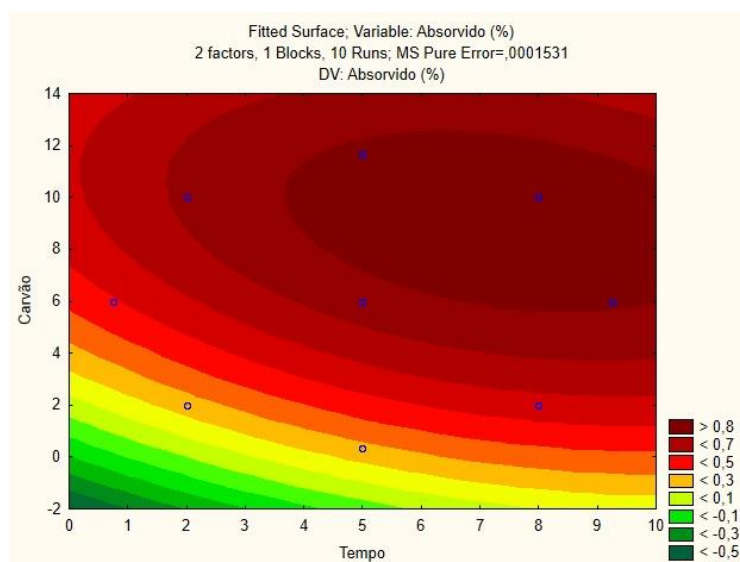


Figura 12: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvância da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu

fonte: autoria própria

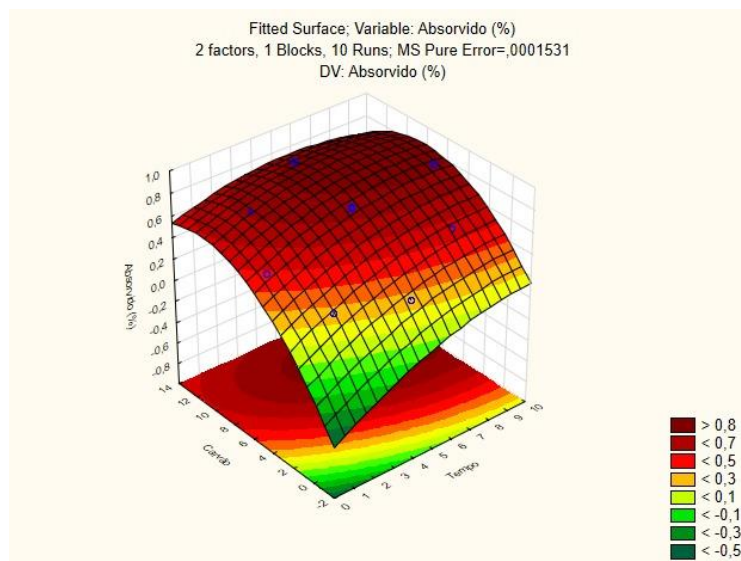


Figura 13: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvância da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu

fonte: autoria própria

Os gráficos de calor (Figuras 12 e 13) permitiram mapear visualmente as regiões de máxima eficiência, servindo de base para a formulação do modelo preditivo.

Experimento 5 RSM

Tempo	Carvão	Corante	Lei-tura 1	Lei-tura 2	Lei-tura 3	Absorvido	Y
2,000	6,000	10	671	708	727	5,56172	53,89%
2,000	14,000	10	313	334	356	8,111419	78,59%
5,000	10,000	10	337	389	369	7,898752	76,53%
8,000	6,000	10	215	233	255	8,804901	85,31%
9,243	10,000	10	240	257	218	8,777161	85,04%
0,757	10,000	10	527	552	576	6,604253	63,99%
5,000	4,343	10	630	674	701	5,795192	56,15%
5,000	15,657	10	209	234	258	8,809524	85,35%
5,000	10,000	10	430	409	385	7,600555	73,64%
8,000	14,000	10	123	138	162	9,45215	91,58%
5,000	10,000	10	413	396	373	7,697642	74,58%
5,000	10,000	10	345	310	333	8,146093	78,93%

Tabela 10 – Resultados do Experimento 5 com variação de tempo, massa de carvão e concentração do corante, leitura de absorbância, quantidade de corante absorvido (mg/L) e porcentagem de remoção (%).

Na etapa final (Tabela 10), os experimentos foram otimizados com base nos dados anteriores. Novas combinações de tempo (até 9h14) e adsorvente (até 15,6g) foram testadas, sempre mantendo 10 mg/L de corante.

Os melhores desempenhos foram observados com 8h e 14g de carvão (91,58% de remoção), seguido de perto por outras combinações que também superaram os 85%. Estes resultados confirmam que a zona ótima de operação se encontra entre 5 e 8 horas, com massas superiores a 10g de carvão ativado de babaçu.

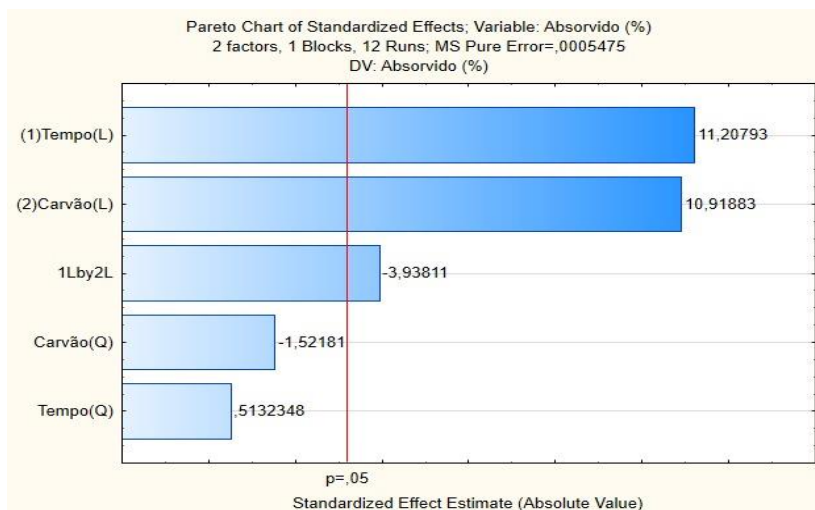


Figura 14: Quinta análise de ANOVA

fonte: autoria própria

Na ANOVA (Figura 14) os resultados indicaram a interação entre essas duas variáveis (tempo de contato e massa do carvão) se mostrou estatisticamente relevante, o que reforça a importância da otimização conjunta dos parâmetros e confirma a adequação do modelo proposto para representar o sistema de adsorção.

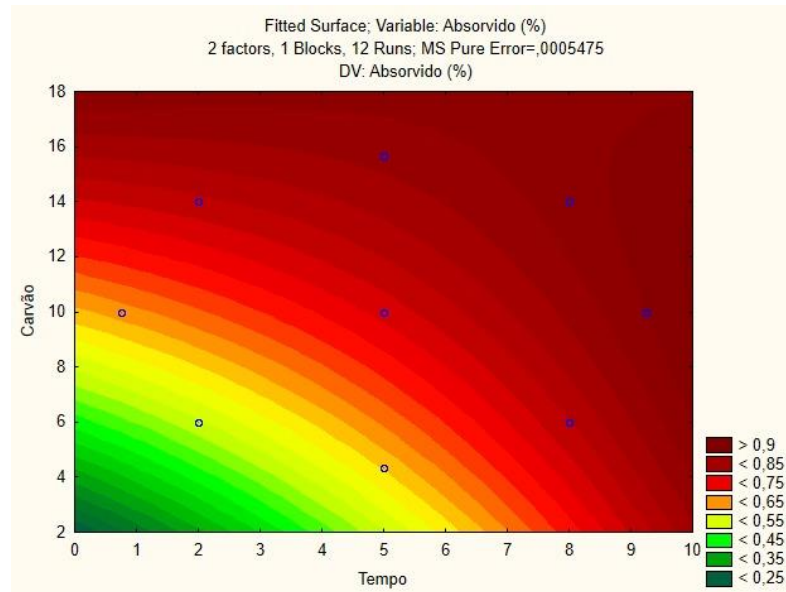


Figura 15: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvência da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu

fonte: autoria própria

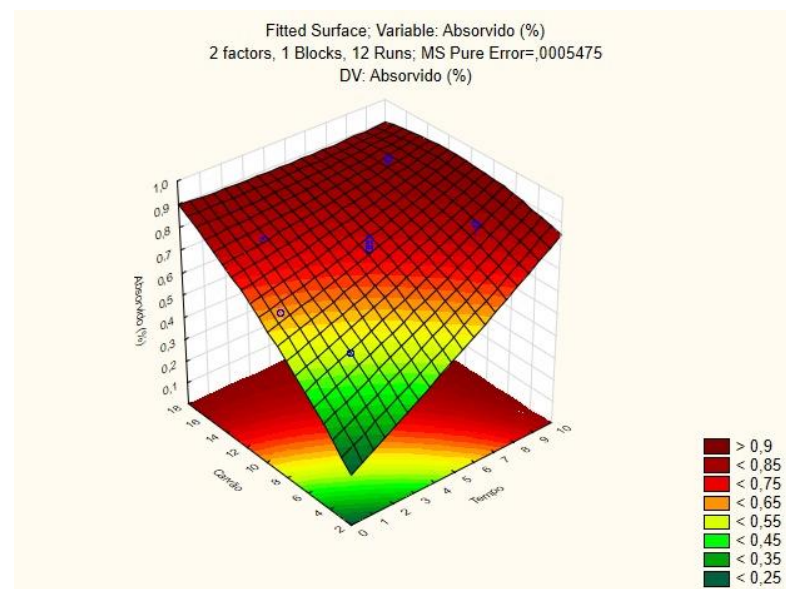


Figura 16: Gráficos de calor demonstrando variação de adsorvência da adsorção do corante pelo carvão de Babaçu

fonte: autoria própria

Os gráficos de calor das Figuras 15 e 16 podemos identificar as faixas ideais de operação, destacando, por exemplo, que tempos entre 5h e 8h, associados a massas superiores a 10 g de carvão, promovem as melhores remoções.

Os resultados obtidos confirmam a alta eficiência do carvão ativado de babaçu na remoção do corante Fast Green, especialmente em condições de tempo prolongado, pH ácido e maiores quantidades de adsorvente.

A avaliação dos parâmetros operacionais como pH, tempo de contato e concentração do adsorvente revelou comportamentos compatíveis com os mecanismos de adsorção já documentados na literatura científica de (Carolina; Silva, 2024; e Ciolek et al., 2014).

Dentre esses parâmetros, o pH se mostrou particularmente influente pois os melhores índices de remoção ocorreram em meio ácido. Esse desempenho pode ser atribuído à protonação dos grupos funcionais presentes na superfície do carvão ativado, o que favorece interações eletrostáticas com as moléculas aniônicas do corante. Tal comportamento é amplamente relatado em estudos anteriores, que também apontam maior eficiência de adsorção de corantes aniônicos em pH mais baixo.

A análise cinética da adsorção revelou que grande parte do corante foi removida logo nas primeiras horas de contato, indicando uma alta disponibilidade de sítios ativos no início do processo. Essa característica é vantajosa para aplicações em que o tempo de tratamento precisa ser reduzido, contribuindo para a agilidade e eficácia do sistema.

Observou-se também que o aumento da massa de adsorvente elevou a taxa de remoção do corante, graças à maior área superficial disponível para o processo de adsorção. No entanto, em concentrações mais altas do corante, a eficiência de remoção diminuiu, possivelmente devido à saturação dos sítios ativos do material.

5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos neste estudo, é possível concluir que o carvão ativado de babaçu se mostrou eficaz na remoção do corante Fast Green de efluentes

sintéticos, configurando-se como uma alternativa sustentável, de baixo custo e com grande potencial para aplicação no tratamento de efluentes industriais.

Fatores como o pH da solução, o tempo de contato e a quantidade de adsorvente utilizado influenciaram diretamente na eficiência do processo. Os melhores desempenhos foram alcançados em condições de pH ácido e com maiores dosagens de carvão ativado. A análise cinética demonstrou que a maior parte do corante foi removida nas primeiras horas de contato, o que representa uma vantagem importante para a aplicação prática do material em sistemas de tratamento que demandam respostas rápidas.

Além de contribuir para a redução da poluição hídrica, o uso do carvão ativado de babaçu valoriza um resíduo agroindustrial abundante, fortalecendo o desenvolvimento de tecnologias mais limpas e economicamente acessíveis. Trata-se, portanto, de uma solução alinhada aos princípios da sustentabilidade e da economia circular.

Para pesquisas futuras, recomenda-se aprofundar a investigação sobre a regeneração do adsorvente, sua aplicação em sistemas de fluxo contínuo e sua eficiência na remoção de outros tipos de contaminantes, com o objetivo de ampliar as possibilidades de uso desse material em processos de saneamento e remediação ambiental.

6. REFERÊNCIAS

ARDILA-LEAL, Leidy D. *et al.* **A brief history of colour, the environmental impact of synthetic dyes and removal by using laccases.** *Molecules* MDPI AG, , 2 jun. 2021.

AZEVEDO MACHADO, André *et al.* **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE CARVÕES ATIVADOS PULVERIZADOS DE DISTINTAS BIOMASSAS PARA A REMOÇÃO DO CORANTE VERDE BRILHANTE COMPARATIVE STUDY OF POWERDED ACTIVATED CARBON FROM DIFFERENT BIOMASSES FOR THE REMOVAL OF BRIGHT GREEN DYE.** [S.l.: S.n.].

CAROLINA, Karina; SILVA, D. A. **UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL**

COORDENAÇÃO DO CURSO DE TECNOLOGIA EM PROCESSOS QUÍMICOS.
[S.l.: S.n.].

CIONEK, C. A. *et al.* **AVALIAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO DE BABAÇU PARA A ADSORÇÃO SELETIVA DE CORANTE REATIVO BF-5G.** [S.l.: S.n.].

DA SILVA, Josany Saibrosa *et al.* Byproducts of babassu (*Orbignya* sp) as new adsorptive materials: A review. **Revista Materia**, v. 24, n. 3, 2019.

FERREIRA, Lais Caixeta. **AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA TORTA DE *Attalea speciosa* (BABAÇU) COMO BIOSORVENTE NA REMOÇÃO DE COBRE E ZINCO PRESENTES EM ÁGUA RESIDUÁRIA PROVENIENTE DA ATIVIDADE DE SUINO-CULTURA.** [S.l.: S.n.].

GATTOLINI, Ariadne. **Opinião JORNAL DE JUnDiÁÍ REGiOnAL.** Jundiai: [S.n.].

KUMAR, Manoj *et al.* **Environmental risks of textile dyes and photocatalytic materials for sustainable treatment: current status and future directions.** **Discover Environment** Springer Nature, , 1 dez. 2025a.

KUMAR, Mukesh *et al.* Environmental Impacts and Strategies for Bioremediation of Dye-Containing Wastewater. **Bioengineering**, v. 12, n. 10, p. 1043, 28 set. 2025b.

KUNZ, Airton; PERALTA-ZAMORA, Patricio. **NOVAS TENDÊNCIAS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS** **Quim. Nova.** [S.l.: S.n.].

PIRES, Aloma Ferreira. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL ALOMA RIBEIRO PIRES OBTENÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DO EPICARPO DO COCO DE BABAÇU PARA ADSORÇÃO DE POLUENTES EM MEIO AQUOSO.** [S.l.: S.n.].

RODRIGUES, Daiane; SILVA, D. A. **INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO SERTÃO PERNAMBUCANO-CAMPUS OURICURI CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA A CONTAMINAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS ATRAVÉS DA INDÚSTRIA TÊXTIL E TÉCNICAS PARA O TRATAMENTO.** [S.l.: S.n.].

SILVA, Jailson dos Santos *et al.* **PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO DA CASCA DO BABAÇU E SUA EFICIÊNCIA NO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA O**

CONSUMO HUMANO. *In*: **Engenharia Florestal: Desafios, Limites e Potencialidade**. [S.l.]: Editora Científica Digital, 2020. p. 654–685.

VIEIRA, Adriana P. *et al.* Removal of textile dyes from aqueous solution by babassu coconut epicarp (*Orbignya speciosa*). **Chemical Engineering Journal**, v. 173, n. 2, p. 334–340, set. 2011a.

VIEIRA, Adriana P. *et al.* Removal of textile dyes from aqueous solution by babassu coconut epicarp (*Orbignya speciosa*). **Chemical Engineering Journal**, v. 173, n. 2, p. 334–340, set. 2011b.