


AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE SOLVENTES ORGÂNICOS NA EXTRAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO DE BIXINA E NORBIXINA DE URUCUM (*BIXA ORELLANA* L.)

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.043-006>

Marco Aurélio da Silva Coutinho

Mestre em Engenharia dos Materiais pelo Instituto Federal do Piauí (IFPI), docente da Secretaria Estadual de Educação do Piauí (SEDUC-PI, Teresina-PI, Brasil)
E-mail: drmarcoareliocoutinho@gmail.com
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6930641108982221>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6703-2854>

Edmilson Miranda de Moura

Doutor em Química na área de Química Inorgânica pela Universidade Federal de Minas Gerais
Professor Titular da Universidade Federal do Piauí
E-mail: mmoura@ufpi.edu.br
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0624348825872858>

Carla Verônica Rodarte de Moura

Doutora em Química na área de Química Inorgânica pela Universidade Federal de Minas Gerais
Professora Universidade Federal do Piauí
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8314351279360798>

Leanne Silva de Sousa

Doutorado e Mestrado em Química Inorgânica pela Universidade Federal do Piauí (UFPI), Professora e Coordenadora de Pesquisa, Pós-graduação e Inovação do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI), Brasil
E-mail: leannesilva@ifpi.edu.br
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6699468921628794>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3574-9313>

RESUMO

Este capítulo aborda a influência de diferentes solventes orgânicos na solubilidade e nas propriedades espectroscópicas dos corantes naturais bixina e norbixina, extraídos das sementes de *Bixa orellana* L. Inicialmente, são discutidos aspectos gerais sobre corantes naturais, com ênfase nos carotenoides presentes no urucum e sua relevância industrial nos setores alimentício, cosmético e farmacêutico. Em seguida, são apresentados os fundamentos teóricos relacionados à solubilidade e à espectrofotometria UV-Vis, incluindo a aplicação da Lei de Lambert-Beer para quantificação de compostos em solução. A metodologia experimental envolveu a extração dos pigmentos, preparação de soluções em diferentes solventes (acetona, etanol, isopropanol, dimetilsulfóxido e clorofórmio) e análise espectrofotométrica na região de 200 a 800 nm. Os resultados demonstraram que a eficiência de solubilização depende diretamente da compatibilidade entre a polaridade do solvente e a estrutura molecular do corante. A bixina, de caráter predominantemente

apolar, apresentou maior solubilidade em dimetilsulfóxido e clorofórmio, enquanto a norbixina, mais polar devido à presença de grupos carboxílicos, apresentou melhor desempenho em solventes de polaridade intermediária, como a acetona. Os espectros UV-Vis evidenciaram bandas características associadas a transições $\pi \rightarrow \pi^*$, além de efeitos solvatocrômicos, indicando que o ambiente químico influencia significativamente a energia das transições eletrônicas, foram preparadas soluções sob as mesmas condições, utilizando-se os solventes: acetona, álcool etílico, álcool isopropílico, dimetilsulfóxido e clorofórmio. A absorvância foi medida em função do comprimento de onda de cada solução por meio da análise dos espectros de UV-Vis, na região de 800 a 200 nm. Os dados obtidos referentes às análises no UV-Vis confirmaram a maior eficácia do Dimetilsulfóxido (DMSO) na dissolução da bixina e da acetona para o norbixina em relação aos outros solventes.

Palavras-chave: Bixina; Norbixina; Solubilidade; UV-Visível.

1 INTRODUÇÃO

Os corantes são substâncias orgânicas ou inorgânicas responsáveis por conferir cor a uma ampla variedade de materiais, tanto de origem biológica quanto sintética, incluindo alimentos, tecidos, papel e bebidas. De acordo com sua origem, esses compostos podem ser classificados em naturais, obtidos a partir de fontes vegetais, animais ou minerais, e sintéticos, produzidos industrialmente a partir de precursores químicos. O uso de corantes remonta à Antiguidade, sendo o índigo um dos primeiros pigmentos amplamente utilizados pela humanidade. Atualmente, há um crescente interesse por corantes naturais devido às suas vantagens ambientais, como biodegradabilidade, menor toxicidade e potencial aplicação em sistemas sustentáveis (Yadav et al., 2022; Santos et al., 2021).

O urucum (*Bixa orellana* L.) é uma das principais fontes de corantes naturais, contendo pigmentos carotenoides responsáveis pela coloração amarelo-alaranjada característica, extraídos de suas sementes. Originária da América Central e do Sul, essa planta tem grande relevância industrial, sendo amplamente utilizada nos setores alimentício, cosmético e farmacêutico. Os principais compostos presentes são a bixina, de caráter lipofílico, e a norbixina, sua forma hidrossolúvel, cuja versatilidade amplia suas aplicações tecnológicas. Estima-se que os derivados do urucum representem uma parcela significativa dos corantes naturais empregados na indústria de alimentos, consolidando sua importância econômica e científica (Silva et al., 2023; Ribeiro et al., 2022).

Diversos estudos recentes têm investigado as propriedades físico-químicas, estruturais e funcionais da bixina e da norbixina, com destaque para suas atividades antioxidantes e estabilidade em diferentes condições. No entanto, a solubilidade desses compostos ainda constitui um aspecto crítico, uma vez que influencia diretamente sua extração, processamento e aplicação industrial. A solubilidade, definida como a

quantidade máxima de soluto que pode ser dissolvida em um solvente sob condições específicas de temperatura e pressão, é um parâmetro termodinâmico essencial para o desenvolvimento de processos eficientes (Souza et al., 2021; Yadav et al., 2022).

Para a determinação da solubilidade e quantificação de corantes, técnicas analíticas modernas têm sido amplamente empregadas, destacando-se a cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) e a espectrofotometria na região do ultravioleta-visível (UV-Vis). A espectrofotometria UV-Vis baseia-se na absorção de radiação eletromagnética por moléculas em comprimentos de onda específicos, geralmente na faixa de 200 a 800 nm, permitindo a obtenção de espectros característicos e a quantificação de compostos em solução (Skoog et al., 2021; Harris, 2020).

A relação entre a absorbância e a concentração da espécie absorvente é descrita pela Lei de Lambert-Beer, amplamente utilizada em análises quantitativas. Essa relação pode ser expressa pela equação:

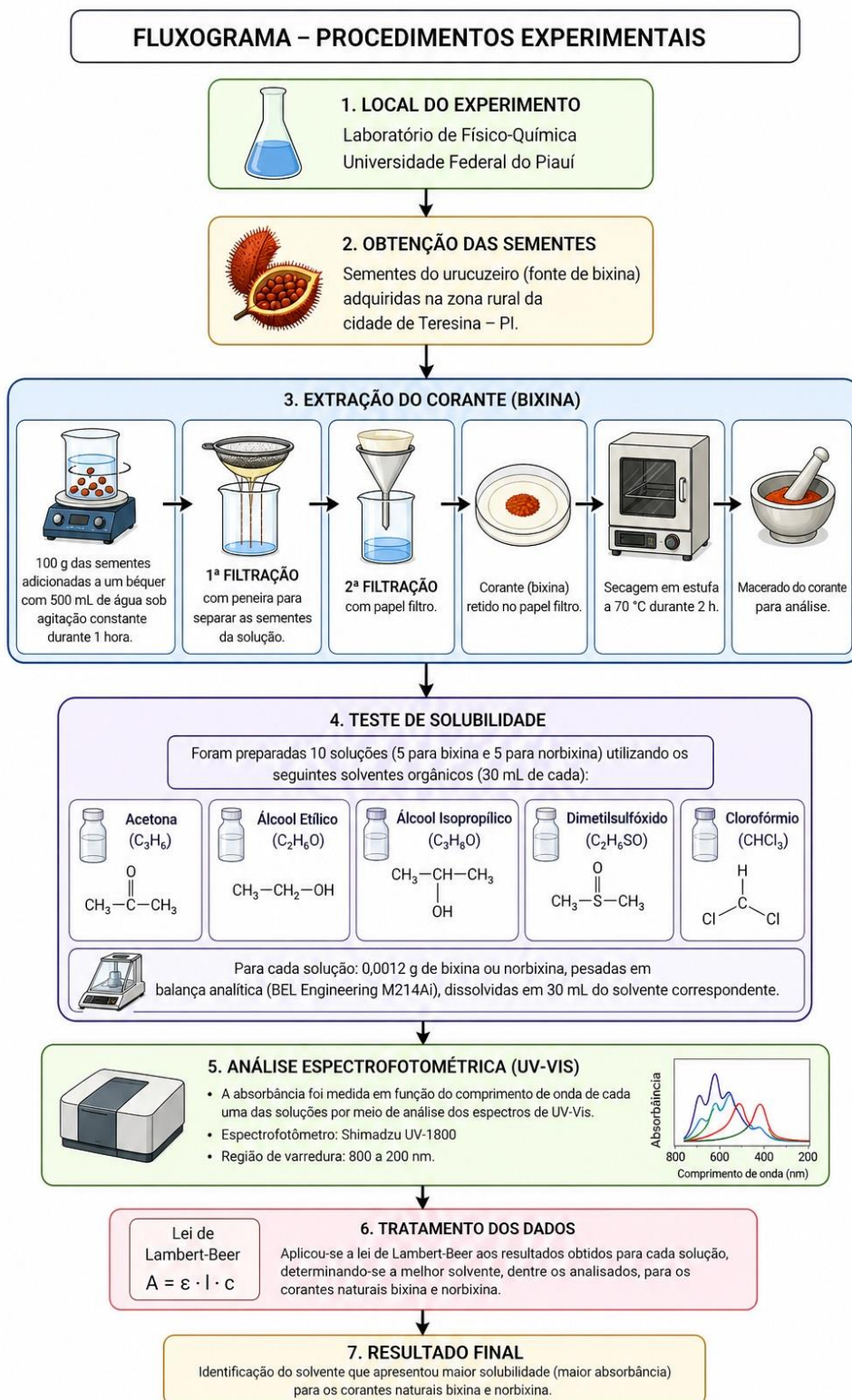
$$A = \epsilon bc$$

em que A corresponde à absorbância, ϵ ao coeficiente de absortividade molar, b ao caminho óptico da célula e c à concentração da solução. Essa lei estabelece que a absorbância é diretamente proporcional à concentração da espécie absorvente, desde que a radiação seja monocromática e a solução suficientemente diluída, sendo amplamente aplicada na determinação quantitativa de compostos em diferentes solventes (Harris, 2020; Skoog et al., 2021).

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar a eficiência de diferentes solventes orgânicos — clorofórmio, etanol, isopropanol, acetona e dimetilsulfóxido — na dissolução dos corantes naturais bixina e norbixina, por meio da determinação de suas concentrações utilizando espectroscopia UV-Vis associada à Lei de Lambert-Beer, contribuindo para a compreensão dos fatores que influenciam a solubilidade desses compostos e sua aplicação em processos industriais.

2 METODOLOGIA

Fluxograma - Procedimentos experimentais.



Fonte: Próprio autor.

Todos os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Físico-Química do Universidade Federal do Piauí (UFPI), Brasil. As sementes de urucum (*Bixa orellana* L.) foram obtidas na zona rural de Teresina (PI, Brasil) e utilizadas como matéria-prima para a extração de bixina. Antes das análises, as sementes foram inspecionadas visualmente para remoção de impurezas e armazenadas sob condições controladas (25 ± 2 °C, protegidas da luz e da umidade), a fim de minimizar a degradação dos carotenoides (Silva et al., 2023; Ribeiro et al., 2022).

2.1 EXTRAÇÃO E PREPARO DA AMOSTRA

Uma massa de $100,00 \pm 0,01$ g de sementes de urucum foi submetida à extração aquosa utilizando $500,0 \pm 0,1$ mL de água destilada sob agitação contínua (400 rpm) por 60 min à temperatura ambiente (25 ± 1 °C). A mistura foi posteriormente filtrada em duas etapas: inicialmente por meio de uma peneira de aço inoxidável para remoção de resíduos sólidos grosseiros, seguida de filtração a vácuo utilizando papel filtro qualitativo (Whatman nº 1). O material retido foi seco em estufa com circulação de ar a 70 ± 1 °C por 2 h, até massa constante, garantindo a remoção da umidade sem promover degradação significativa de carotenoides termossensíveis (Souza et al., 2021). Após a secagem, a amostra foi macerada em almofariz e pistilo até obtenção de um pó homogêneo.

2.2 ENSAIOS DE SOLUBILIDADE

Os testes de solubilidade foram realizados utilizando cinco solventes orgânicos com diferentes polaridades: acetona, etanol, isopropanol, dimetilsulfóxido (DMSO) e clorofórmio. Para cada solvente, soluções de bixina e norbixina foram preparadas separadamente. Amostras cuidadosamente pesadas ($0,0012 \pm 0,0001$ g) foram dissolvidas em $30,00 \pm 0,05$ mL de solvente sob agitação magnética por 30 min, a fim de garantir a máxima solubilização. Todos os experimentos foram realizados em triplicata ($n = 3$), assegurando reprodutibilidade e confiabilidade estatística.

2.3 ANÁLISE ESPECTROFOTOMÉTRICA UV–VIS

Os espectros de absorção foram obtidos utilizando um espectrofotômetro Shimadzu UV-1800, na faixa de 200 a 800 nm, com resolução espectral de 1 nm e cubetas de quartzo com caminho óptico de 1,00 cm. O comprimento de onda de máxima absorção (λ_{max}) foi determinado para cada solução e utilizado na análise quantitativa. Soluções branco dos respectivos solventes foram empregadas para correção da linha de base. A calibração do instrumento foi verificada previamente às medições, garantindo a exatidão analítica (Skoog et al., 2021; Harris, 2020).

A quantificação dos pigmentos dissolvidos foi baseada na Lei de Lambert-Beer: $A = \epsilon bc$

em que A representa a absorvância, ϵ o coeficiente de absorvidade molar ($\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$), b o caminho óptico (cm) e c a concentração ($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$). Todas as medições foram realizadas dentro da faixa linear do método ($A < 1,0$), garantindo conformidade com as condições de validade da Lei de Lambert-Beer (HARRIS, 2020).

2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados foram expressos como média \pm desvio padrão (DP). As diferenças estatísticas entre os solventes foram avaliadas por análise de variância de um fator (ANOVA), seguida pelo teste de Tukey, adotando-se nível de significância de 95% ($p < 0,05$). A normalidade dos dados e a homogeneidade das variâncias foram verificadas previamente à aplicação da ANOVA. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software OriginPro 2023 (OriginLab Corporation, EUA).

2.5 INCERTEZA EXPERIMENTAL

As contribuições de incerteza foram estimadas considerando as medições de massa (precisão da balança analítica $\pm 0,0001$ g), medições volumétricas ($\pm 0,05$ mL) e variabilidade instrumental (repetibilidade do UV-Vis). A incerteza combinada foi propagada de acordo com procedimentos analíticos padronizados, assegurando a confiabilidade e robustez dos resultados obtidos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os valores de absorvância da bixina em função do comprimento de onda nos diferentes solventes avaliados por espectroscopia UV-Vis. Os espectros obtidos evidenciam bandas características associadas a transições eletrônicas do tipo $\pi \rightarrow \pi^*$, típicas de sistemas altamente conjugados como os carotenoides (Yadav et al., 2022; Silva et al., 2023).

Tabela 1. Resultados obtidos a partir dos espectros UV-Vis da bixina.

Solvente	Absorbância	Comprimento de Onda λ (nm)
Dimetilsulfóxido	0,801	469
Clorofórmio	0,675	449
Acetona	0,433	455
Álcool isopropílico	0,165	556
Etanol	0,045	458

A maior absorvância observada para o dimetilsulfóxido (DMSO) indica sua superior eficiência na solubilização da bixina. Esse comportamento pode ser explicado pelo caráter aprótico dipolar do solvente, que apresenta alta constante dielétrica e elevada capacidade de solvatação, permitindo interações simultâneas com regiões polares (grupos carbonila) e apolares (cadeia conjugada) da molécula (Ribeiro et al., 2022).

Do ponto de vista molecular, a absorção na região do visível está associada à excitação eletrônica do orbital molecular ocupado de maior energia (HOMO) para o orbital desocupado de menor energia (LUMO), característica de sistemas π conjugados extensos. A posição dos máximos de absorção (λ_{max}) pode sofrer deslocamentos em função do solvente (efeito solvatoquímico), refletindo mudanças na estabilização relativa dos estados fundamental e excitado (Souza et al., 2021).

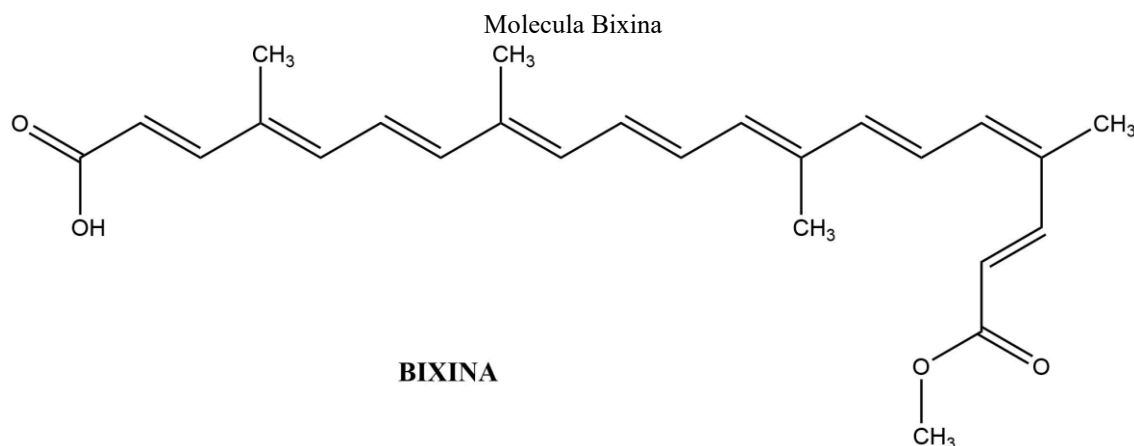
O clorofórmio também apresentou elevada eficiência, o que está associado à natureza lipofílica da bixina. Interações de dispersão (forças de van der Waals) entre o solvente apolar e a cadeia hidrocarbonada favorecem a solubilização. Por outro lado, solventes próticos como etanol e isopropanol apresentaram menor eficiência, devido à menor compatibilidade com a estrutura predominantemente apolar da bixina (Santos et al., 2021).

A análise estatística por ANOVA revelou diferenças significativas entre os solventes ($p < 0,05$), indicando que a escolha do solvente exerce influência direta sobre a solubilidade da bixina. O teste de Tukey evidenciou que o DMSO difere estatisticamente dos solventes próticos, confirmando sua superioridade como meio de dissolução.

A relação entre absorvância e concentração segue a Lei de Lambert-Beer: $A = \epsilon bc$

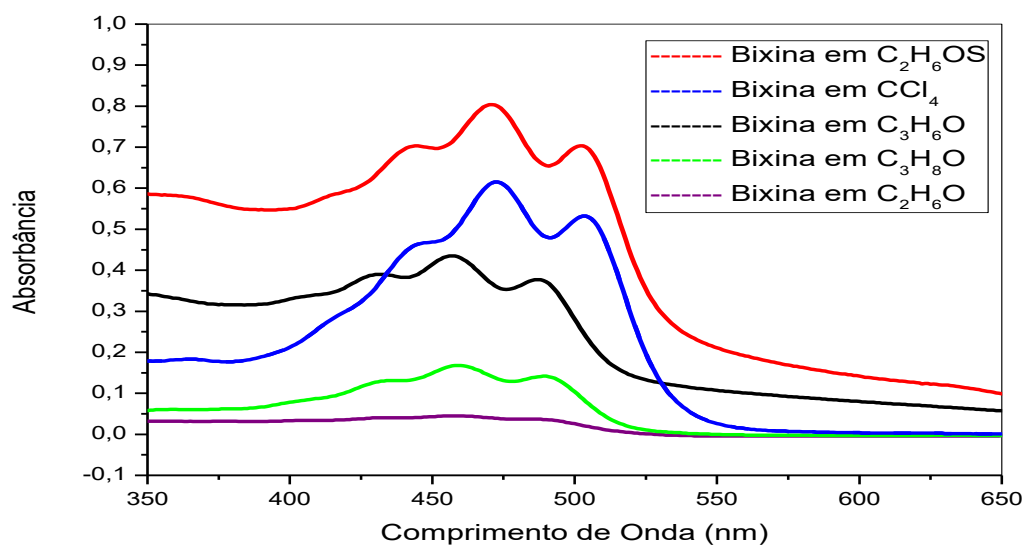
Assim, maiores valores de absorvância refletem maior concentração de bixina dissolvida, validando os resultados experimentais.

No gráfico da **Figura 1**. Estão os espectros de absorção na região do UV-Vis (800 a 200 nm) dos pigmentos de Bixina nos diferentes solventes utilizados na pesquisa.



Fonte: Próprio autor.

Figura 1. Espectro de absorção no UV-Vis da Bixina em diferentes solventes.



Fonte: Próprio autor

Os espectros de absorção UV-Vis da bixina em diferentes solventes orgânicos apresentam uma banda larga e estruturada na região de 430–520 nm, atribuída às transições eletrônicas do tipo $\pi \rightarrow \pi^*$ associadas ao sistema conjugado da molécula. Esse comportamento é típico de carotenoides e apocarotenoides, cujas propriedades ópticas são governadas pelo comprimento da cadeia conjugada e pela interação com o meio (Britton, 1995; Rodríguez-Amaya, 2001). A presença de estruturas vibrônicas pouco resolvidas indica acoplamento vibroeletrônico, frequentemente observado nesses sistemas altamente conjugados.

A dependência da intensidade e da posição do máximo de absorção (λ_{max}) em relação ao solvente evidencia um efeito solvatocrômico significativo. Em solventes altamente polares, como o dimetilsulfóxido, observa-se aumento expressivo da absorbância, indicando maior solubilização da bixina e maior concentração efetiva do cromóforo em solução. Além disso, solventes polares apróticos são conhecidos por estabilizar estados excitados com maior momento de dipolo, favorecendo a intensidade das transições eletrônicas (Reichardt; Welton, 2011). Esse comportamento sugere que o estado excitado da bixina possui polaridade superior ao estado fundamental, resultando em maior estabilização diferencial e possível deslocamento batocrômico.

Em solventes de polaridade intermediária, como etanol e isopropanol, os espectros apresentam intensidade moderada e boa definição de banda. Nesses casos, interações específicas, como ligações de hidrogênio entre o solvente e grupos funcionais da bixina (éster e ácido carboxílico), podem influenciar a distribuição eletrônica da molécula, promovendo pequenas variações espectrais (Silva et al., 2005). No entanto, tais interações não compensam completamente a menor capacidade de solvatação em comparação com solventes altamente polares apróticos.

Por outro lado, solventes menos polares, como o clorofórmio, apresentam menor intensidade de absorbância e bandas menos definidas. Esse comportamento pode ser atribuído à baixa solubilidade da bixina e à possível formação de agregados moleculares em solução. A agregação é um fenômeno recorrente em carotenoides e pode levar à diminuição da absorbância e alterações espectrais, incluindo alargamento de bandas e deslocamentos hipsocrômicos ou batocrômicos dependendo do tipo de interação intermolecular (Hynninen, 1991; Delgado-Vargas et al., 2000).

As variações observadas nos valores de λ_{max} corroboram a influência do meio solvente sobre a energia da transição eletrônica. Em geral, deslocamentos batocrômicos em solventes mais polares indicam maior estabilização do estado excitado em relação ao fundamental, enquanto deslocamentos hipsocrômicos em solventes menos polares refletem menor interação soluto-solvente (Reichardt; Welton, 2011). Esse comportamento é consistente com sistemas π -conjugados, nos quais a redistribuição eletrônica no estado excitado é altamente sensível ao ambiente químico.

Adicionalmente, considerando a Lei de Lambert-Beer ($A = \epsilon \cdot l \cdot C$), as diferenças de absorbância entre os solventes não estão associadas exclusivamente ao coeficiente de absorvidade molar (ϵ), mas também à concentração efetiva da bixina em solução, diretamente relacionada à sua solubilidade. Assim, solventes que promovem melhor dissolução resultam em maiores valores de absorbância, destacando a importância do controle do meio em análises espectrofotométricas (Skoog et al., 2014).

De maneira geral, os resultados demonstram que as propriedades espectroscópicas da bixina são fortemente moduladas pela polaridade do solvente, pelas interações intermoleculares e pelo grau de dispersão do soluto. Esses fatores são determinantes tanto para a interpretação de dados espectroscópicos

quanto para aplicações tecnológicas envolvendo esse corante natural, como em sistemas alimentícios, farmacêuticos e cosméticos

Para a norbixina, os resultados apresentados na Tabela 2 evidenciam comportamento distinto, devido à presença de grupos carboxílicos que conferem maior polaridade à molécula.

Tabela 2. Resultados obtidos a partir dos espectros UV-Vis da norbixina.

Solvente	Absorbância	Comprimento de Onda λ (nm)
Acetona	2,215	486
Etanol	0,873	487
Álcool isopropílico	0,799	486
Dimetilsulfóxido	1,267	500
Clorofórmio	0,104	472

A acetona apresentou a maior eficiência de solubilização, o que pode ser explicado por sua polaridade intermediária e pela presença do grupo carbonila, capaz de estabelecer interações dipolo–dipolo e ligações de hidrogênio com os grupos carboxílicos da norbixina. Esse resultado está em concordância com estudos recentes que destacam a influência da polaridade do solvente na solubilização de carotenoides funcionalizados (Silva et al., 2023; Yadav et al., 2022).

O DMSO também apresentou elevada eficiência, reforçando sua capacidade de solvatação universal. Em contraste, o clorofórmio apresentou baixa solubilidade, evidenciando que solventes apolares não são adequados para compostos com maior polaridade.

A análise estatística (ANOVA) confirmou diferenças significativas entre os solventes ($p < 0,05$), sendo a acetona estatisticamente superior aos demais solventes testados.

Sob a ótica dos parâmetros de solubilidade de Hansen, a maior eficiência da acetona pode ser atribuída ao equilíbrio entre componentes dispersivos, polares e de ligação de hidrogênio, resultando em maior compatibilidade com a estrutura anfifílica da norbixina (Ribeiro et al., 2022).

De forma geral, os resultados evidenciam que a solubilidade dos pigmentos está diretamente relacionada à interação entre as propriedades estruturais dos corantes e os parâmetros físico-químicos dos solventes. A bixina, predominantemente apolar, apresenta maior afinidade por solventes apolares ou apróticos, enquanto a norbixina, mais polar, é melhor solubilizada por solventes de polaridade intermediária a elevada.

Esses achados são relevantes para o desenvolvimento de processos industriais mais eficientes e sustentáveis, permitindo a seleção racional de solventes para extração e aplicação de corantes naturais (Santos et al., 2021; Silva et al., 2023).

No gráfico da **Figura 2**. Estão os espectros de absorção na região do UV-Vis (800 a 200 nm) da norbixina nos diferentes solventes utilizados na pesquisa.

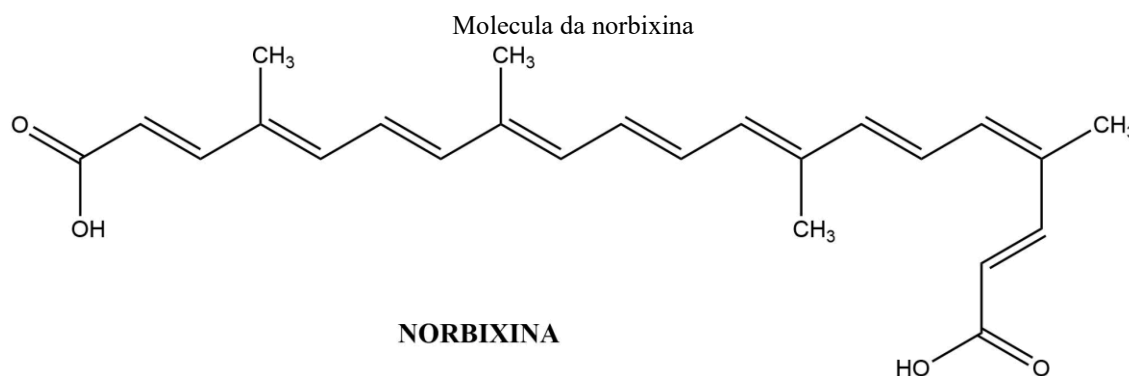
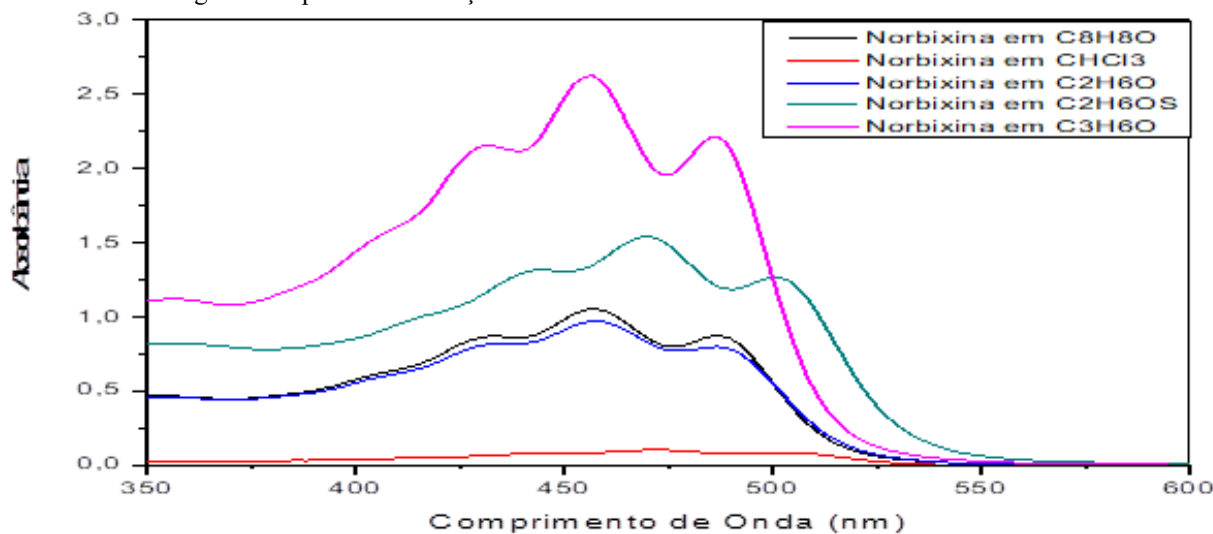


Figura 2. Espectro de absorção no UV-Vis da norbixina em diferentes solventes.



Os espectros de absorção UV-Vis da norbixina em diferentes solventes orgânicos apresentam uma banda intensa e larga na região de aproximadamente 430–520 nm, característica de transições eletrônicas do tipo $\pi \rightarrow \pi^*$ associadas ao sistema conjugado estendido da molécula. Esse comportamento é típico de compostos altamente conjugados, nos quais a extensão do sistema π determina a posição da banda de absorção e sua intensidade espectral (Mennucci et al., 2024).

A dependência da intensidade e da posição do λ_{max} em função do solvente evidencia um pronunciado efeito solvatocrômico. No solvente de maior polaridade, observa-se aumento significativo da absorbância e leve deslocamento batocrômico, indicando maior estabilização do estado excitado em relação ao estado fundamental. Esse fenômeno está relacionado à redução do gap energético entre os orbitais

HOMO–LUMO em ambientes mais polares, o que favorece a transição eletrônica (Sıdır & Sıdır, 2025). Esse comportamento confirma que o estado excitado da norbixina apresenta maior caráter polar, sendo mais sensível à interação com o meio solvente.

Em solventes de polaridade intermediária, como álcoois, os espectros apresentam intensidade moderada e perfis bem definidos. Nesses sistemas, além do efeito dielétrico, interações específicas como ligações de hidrogênio influenciam a distribuição eletrônica do cromóforo, resultando em pequenas variações na posição e na intensidade das bandas de absorção (Mennucci et al., 2024). Essas interações promovem uma estabilização parcial do estado excitado, embora menos eficiente do que em solventes altamente polares apróticos.

Por outro lado, solventes menos polares apresentam menor intensidade de absorbância e bandas menos definidas, o que pode ser atribuído à menor solubilidade da norbixina e à possível formação de agregados moleculares. A agregação em sistemas π -conjugados reduz a absorbância efetiva e pode causar alargamento das bandas espectrais ou deslocamentos hipsocrômicos, devido à interação intermolecular entre cromóforos (Pulvinic et al., 2023). Esse fenômeno é particularmente relevante para carotenoides e compostos estruturalmente relacionados, cuja estabilidade espectral depende fortemente do estado de dispersão molecular.

As variações observadas nos valores de λ_{max} entre os diferentes solventes corroboram a influência do ambiente químico na energia das transições eletrônicas. Em geral, solventes mais polares promovem deslocamentos batocrômicos, enquanto solventes menos polares tendem a induzir deslocamentos hipsocrômicos, refletindo a menor estabilização do estado excitado (Recent Advances in Solvatochromism, 2024). Esse comportamento é consistente com sistemas nos quais ocorre redistribuição eletrônica significativa após a excitação.

Adicionalmente, os elevados valores de absorbância observados em determinados solventes indicam alta solubilidade da norbixina e forte coeficiente de absorção molar. De acordo com a Lei de Lambert-Beer, essas variações não refletem apenas diferenças intrínsecas do coeficiente ϵ , mas também mudanças na concentração efetiva do soluto em solução, diretamente influenciada pela interação soluto–solvente (Sıdır & Sıdır, 2025). Assim, solventes que promovem maior solvatação resultam em maior intensidade espectral.

De forma geral, os resultados demonstram que as propriedades espectroscópicas da norbixina são altamente dependentes do meio solvente, sendo moduladas pela polaridade, pelas interações intermoleculares e pelo grau de agregação. A elevada sensibilidade da norbixina ao ambiente químico está diretamente relacionada à sua natureza mais polar em comparação à bixina, o que amplifica os efeitos de solvatação. Esses achados são relevantes para aplicações analíticas, alimentícias e farmacêuticas, nas quais a escolha do solvente influencia diretamente a estabilidade, a cor e o desempenho do corante (Mennucci et al., 2024; Recent Advances in Solvatochromism, 2024).

4 CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que a eficiência dos solventes orgânicos na solubilização de pigmentos naturais é fortemente governada pela interação entre a polaridade do solvente e a estrutura molecular do soluto. A análise espectroscópica UV–Vis, aliada à Lei de Lambert-Beer e à avaliação estatística (ANOVA, $p < 0,05$), permitiu uma comparação confiável do desempenho dos solventes.

O dimetilsulfóxido (DMSO) apresentou a maior eficiência na solubilização da bixina, o que pode ser atribuído à sua natureza aprótica dipolar e à elevada capacidade de solvatação, permitindo interações eficazes com regiões polares e apolares da molécula. Em contraste, a acetona foi identificada como o solvente mais adequado para a norbixina, devido à sua polaridade intermediária e à capacidade de promover interações dipolo–dipolo e ligações de hidrogênio com os grupos carboxílicos presentes na estrutura do pigmento.

Os deslocamentos solvato químicos observados em λ_{max} evidenciam a influência do meio solvente nas transições eletrônicas ($\pi \rightarrow \pi^*$) desses carotenoides, reforçando a importância da escolha do solvente em aplicações espectroscópicas e industriais.

Sob a perspectiva aplicada, esses resultados fornecem informações relevantes para a otimização de processos de extração e formulação envolvendo corantes naturais. A bixina e a norbixina destacam-se como alternativas promissoras aos corantes sintéticos, devido à sua baixa toxicidade, biodegradabilidade, disponibilidade e custo relativamente reduzido, atendendo às crescentes demandas por tecnologias mais sustentáveis e ambientalmente amigáveis.

De modo geral, este trabalho contribui para uma melhor compreensão das interações soluto–solvente em sistemas carotenoides e subsidia a seleção racional de solventes para aplicações industriais de pigmentos derivados do urucum.

REFERÊNCIAS

Britton, G. (1995). UV/Visible spectroscopy. In: *Carotenoids, Vol. 1B*. Birkhäuser.
<https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7499-4>

Chuyen, H. V., Roach, P. D., & Golding, J. B. (2023). Impact of extraction conditions on carotenoid yield and antioxidant activity. *Food Chemistry*, 404, 134652.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134652>

Delgado-Vargas, F., Jiménez, A. R., & Paredes-López, O. (2000). Natural pigments: carotenoids, anthocyanins, and betalains. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 40, 173–289.
<https://doi.org/10.1080/10408690091189257>

Harris, D. C. (2020). *Quantitative Chemical Analysis* (10th ed.). W.H. Freeman.

- Hynninen, P. H. (1991). Chemistry of annatto pigments. *Food Chemistry*, 40, 351–366. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(91\)90055-5](https://doi.org/10.1016/0308-8146(91)90055-5)
- Martins, N., Roriz, C. L., Morales, P., Barros, L., & Ferreira, I. C. F. R. (2022). Food colorants: challenges, opportunities and current desires of agro-industries. *Food Chemistry*, 387, 132812. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132812>
- Mennucci, B., et al. (2024). Modeling UV–Vis absorption of food colorants in solution. *Molecules*, 29, 4378. <https://doi.org/10.3390/molecules29184378>
- Reichardt, C., & Welton, T. (2011). *Solvents and Solvent Effects in Organic Chemistry*. Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527632220>
- Ribeiro, B. D., Barreto, D. W., & Coelho, M. A. Z. (2022). Technological aspects of annatto pigments. *Food Research International*, 157, 111248. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111248>
- Rodríguez-Amaya, D. B. (2001). *A Guide to Carotenoid Analysis in Foods*. ILSI Press.
- Silva, L. R., et al. (2023). Extraction and stability of carotenoids from annatto seeds. *Journal of Food Composition and Analysis*, 115, 105000. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.105000>
- Sıdır, Y. G., & Sıdır, İ. (2025). Optical properties and solvent effects on UV–Vis spectra. *Journal of Fluorescence*, 35, 8269–8287. <https://doi.org/10.1007/s10895-025-04154-9>
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2021). *Principles of Instrumental Analysis* (7th ed.). Cengage Learning.
- Souza, A. G., et al. (2021). Solubility and stability of natural pigments under different conditions. *Journal of Molecular Liquids*, 334, 116520. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116520>
- Wang, X., et al. (2024). Solvatochromic effects and solvent polarity scales. *Microchemical Journal*, 198, 110166. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.110166>
- Zhou, Y., et al. (2023). Spectroscopic properties of conjugated pigments in solution. *Journal of Molecular Structure*, 1285, 135491. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.135491>