

A descrição teórica da detecção eletroanalítica do ledol em méis, assistida pelo compósito do polímero condutor com o oxihidróxido de cobalto

Volodymyr V. Tkach^{1,2*}, Marta V. Kushnir¹, Nataliia M. Storoshchuk¹, Olga V. Luganska³, Vira V. Kopiika³, Nataliia V. Novosad³, Svitlana M. Lukanova¹, Yana G. Ivanushko⁴, Valentyna G. Ostapchuk⁴, Svitlana P. Melnychuk⁴, Petro I. Yagodynets¹, Sílvio C. de Oliveira⁵, José I. Ferrão de Paiva Martins², Maria João Monteiro⁶, Zholt O. Kormosh⁷, Tetiana V. Morozova⁸

¹ Universidade Nacional de Chernivtsi, 58012, Rua de Kotsyubyns'ky, 2, Chernivtsi, Ucrânia

² Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 4200-465, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, Porto, Portugal

³ Universidade Nacional de Zaporizhzhia, 69600, Rua de Zhukovsky, 66, Zaporizhzhya, Ucrânia

⁴ Universidade Estatal de Medicina de Bucovina, 58001, Praça Teatral, 9, Chernivtsi, Ucrânia

⁵ Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Av. Sen. Felinto. Müller, 1555, C/P. 549, 79074-460, Campo Grande, MS, Brazil

⁶ Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Quinta de Prados, 5001-801, Folhadela, Vila Real, Portugal

⁷ Universidade Nacional Leste-Europeia, 43000, Av. da Liberdade, 13, Luts'k, Ucrânia

⁸ Universidade Nacional de Transporte e Rodagem da Ucrânia, 02000, Rua de Omelianovych-Pavlenko, 1, Kyiv, Ucrânia

*Autor correspondente: nightwatcher2401@gmail.com

Recebido: 12 de maio de 2022

Revisado: 9 de janeiro de 2024

Aceto: 17 de janeiro de 2024

RESUMO

Introdução: Pela primeira vez se avalia teoricamente a possibilidade da detecção eletroanalítica anódica do ledol – principal toxina dos néctares e méis de algumas flores tóxicas – pelo eléctrodo, modificado pelo compósito do polímero condutor

com oxihidróxido de cobalto. **Metodologia:** A eletrooxidação do ledol dar-se-á pelo anel de ciclopropano, seguida pela oxidação do grupo alcoólico secundário em cetona. **Resultados e discussão:** A análise do modelo correspondente mediante a teoria de estabilidade linear e análise de bifurcações confirma que o oxihidróxido de cobalto em compósito com o polímero condutor pode servir de modificador de ânodo eficaz para a determinação do ledol em méis, néctares e outras fontes naturais. Como o ledol é pouco ionizado, o comportamento oscilatório causar-se-á apenas pelos efeitos da etapa eletroquímica na dupla camada elétrica (DCE). **Conclusões:** oxihidróxido de cobalto pode ser usado para a detecção de ledol para a verificação de segurança de méis.

Palavras-chave: mel, ledol, oxihidróxido de cobalto, polímero condutor, sensor eletroquímico, estado estacionário estável

SUMMARY

The theoretical description for ledol electroanalytical detection in honeys, assisted by conducting polymer/cobalt oxyhydroxide composite

Introduction: For the first time, the possibility of anodic electroanalytical detection of ledol – the main toxin in the nectars and honeys of some toxic flowers – by the electrode, modified by the conductive polymer composite with cobalt oxyhydroxide is evaluated. **Methodology:** The electrooxidation of ledol will be realized via cyclopropane ring, followed by the oxidation of the secondary alcoholic group to ketone. **Results and discussion:** Analysis of the corresponding model using linear stability theory and bifurcation analysis confirms that cobalt oxyhydroxide in composite with conductive polymer can serve as an effective anode modifier for determining ledol in honeys, nectars and other sources natural. As ledol is poorly ionized, the oscillatory behavior will only be caused by the effects of the electrochemical stage in the double electric layer (DEL). **Conclusions:** Cobalt oxyhydroxide can be used for detection of ledol for safety verification of honeys.

Keywords: honey, ledol, cobalt oxyhydroxide, conductive polymer, electrochemical sensor, stable steady state

RESUMEN

La descripción teórica de la detección electroanalítica de ledol en mieles, asistida por el compuesto del polímero conductor con el oxihidróxido de cobalto

Introducción: Por primera vez, se evalúa la posibilidad de detección electroanalítica anódica de ledol - principal toxina de los néctares y mieles de algunas flores tóxicas - mediante el electrodo modificado por el compuesto de polímero conductor con oxihidróxido de cobalto. **Metodología:** La electrooxidación del ledol se dará a través del anillo de ciclopropano, seguida de la oxidación del grupo alcohólico secundario a cetona. **Resultados y discusión:** El análisis del modelo correspondiente utilizando la teoría de la estabilidad lineal y el análisis de bifurcación confirma que el oxihidróxido de cobalto en compuesto con polímero conductor puede servir como un modificador de ánodo eficaz para determinar el ledol en mieles, néctares y otras fuentes naturales. Como el ledol está mal ionizado, el comportamiento oscilatorio sólo será causado por los efectos de la etapa electroquímica en la doble capa eléctrica (DCE). **Conclusiones:** El oxihidróxido de cobalto se puede utilizar para la detección de ledol para la verificación de la seguridad de las mieles.

Palabras clave: miel, ledol, oxihidróxido de cobalto, polímero conductor, sensor electroquímico, estado estacionario estable

INTRODUÇÃO

Mel é um dos alimentos conhecidos pela humanidade desde a Idade de Pedra [1-4]. Sob o termo “mel” geralmente se entende um líquido viscoso e intensamente doce – produto do processamento enzimático dos néctares das flores pelas abelhas. O mel tem amplo uso na cosmética e medicina popular. Os compostos principais do mel são carboidratos e polifenóis. A depender das flores de origem, os méis são classificados em monoflorais e pluriflorais.

Na maioria dos casos, o mel é seguro. Apesar disto, algumas das flores, polinizadas pelas abelhas e usadas por elas para produzir mel – uma delas – rododendro, contêm compostos tóxicos para organismo humano. O principal componente tóxico deste tipo de mel é ledol (decahidro-1,1,4,7-tetrametil-(1aR,4R,4aS,7R,7aS,7bS)-1H-cicloprop[e]azulen-4-ol, Número CAS 577-27-5, Massa Molar 222,36 g/mol, Fórmula Empírica $C_{15}H_{26}O$, Fig. 1):

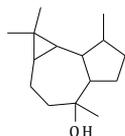


Fig. 1. Ledol

O consumo de mel, que contém médias a grandes quantidades de ledol leva à intoxicação [5-7], cujos sintomas são espasmos musculares, irritações do intestino, alucinações e até o delírio, razão por que este mel popularmente se chama “mel bêbado” (na Ucrânia) e “mel maluco” (em Portugal e no Brasil). A sua concentração superior a 15% faz o mel impróprio para consumo humano.

Ledol também é encontrado em alguns óleos naturais como o de pripioca [8], em que a sua concentração é de até 4%. Pelas razões supracitadas, o desenvolvimento de um método, capaz de detectar a sua concentração eficaz e rapidamente é realmente atual [9-12].

Por ora, nenhum método de determinação eletroanalítica de ledol tem sido desenvolvido. Entretanto, sendo um composto policíclico, que contém um anel de ciclopropano, o ledol é electroquimicamente ativo, sendo fácil de oxidar. Neste caso, um dos modificadores de eléctrodo para a detecção eletroanalítica do ledol pode ser o oxihidróxido de cobalto [13-15], material semiconductor, frequentemente usado nos aparelhos semicondutores como substituição para o dióxido de titânio, porém, ao contrário deste, é electroquimicamente ativo. Ele, sozinho ou em compósito com polímeros condutores [16-20], podia ter um desempenho eficiente como modificador de eléctrodo para a detecção da nereistoxina.

No entretanto, o seu uso poderia acarretar uma influência comportamental, nociva à estabilidade do sistema e à sua eficiência eletroanalítica [21-23]. Destarte, o uso prático deste sistema eletroanalítico não pode ser realizado sem uma descrição teórica prévia do comportamento do sistema, o que se faz neste trabalho.

Assim, neste trabalho, pela primeira vez, faz-se uma análise comportamental do sistema eletroanalítico da detecção electroquímica do ledol sobre o oxihidróxido de cobalto, estabilizado pelo polímero condutor. A análise comportamental do sistema eletroanalítico faz-se mediante o desenvolvimento e a análise do modelo correspondente. Com isto também se faz a comparação do comportamento do sistema eletroanalítico com o dos semelhantes [24-28].

O SISTEMA E O SEU MODELO

O grupo alcoólico ternário do ledol não sofre oxidação, por razões estéricas. Entretanto, sendo um composto carbocíclico com ciclos condensados de sete, cinco e três átomos de carbono, o ledol é fácil de oxidar. “O elo mais fraco” da molécula é o fragmento de ciclopropano, que, por tensão angular, sofre rutura, rendendo um triol com dois grupos alcoólicos ternários e um secundário. Este, em seguida, sofre a sua própria oxidação, rendendo uma hidroxiketona (Fig. 2).

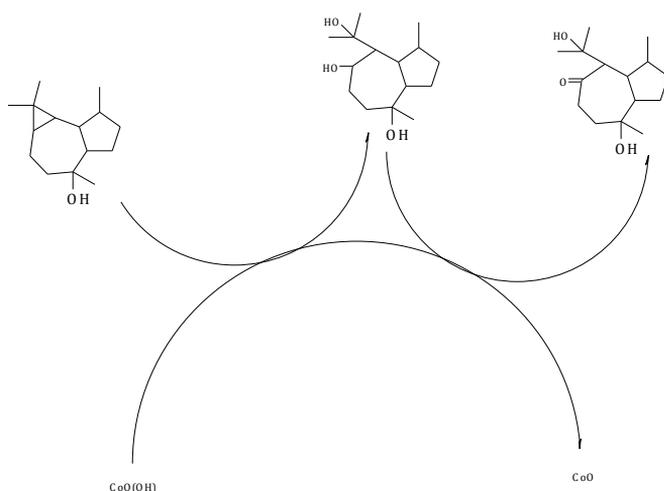


Fig. 2. Esquema de eletrooxidação de ledol, assistida pelo oxihidróxido de cobalto

O oxihidróxido de cobalto, por sua vez, regenerar-se-á na etapa eletroquímica, conforme (1):



Havendo vista o supracitado, descrevemos o comportamento do sistema eletroanalítico por um conjunto de equações diferenciais de balanço de três variáveis:

l – a concentração de ledol na camada pré-superficial;

l^* – a concentração do produto da oxidação de ledol na primeira etapa;

c – o grau de recobrimento da matriz polimérica pelo óxido de cobalto (II).

Para simplificar a modelagem, supomos que o reator esteja sob agitação intensa (destarte, podemos menosprezar o fluxo de convecção), que o eletrólito de suporte esteja em excesso (destarte, podemos menosprezar o fluxo de migração). Outrossim, supomos que o perfil concentracional das substâncias na camada pré-superficial seja lineal, e a sua espessura, constante, igual a δ .

É possível mostrar que o comportamento do sistema pode ser descrito pelo conjunto de três equações diferenciais (2):

$$\left\{ \frac{dl}{dt} = \frac{2}{\delta} \left(\frac{\Delta}{\delta} (l_0 - l) - r_{21} \right) \frac{dl^*}{dt} = \frac{2}{\delta} (r_{21} - r_{22}) \frac{dc}{dt} = \frac{1}{C} (r_{21} + r_{22} - r_1) \right. \quad (2)$$

Sendo Δ o coeficiente de difusão, l_0 é a concentração da do ledol no interior da solução, C é a concentração superficial máxima do óxido de cobalto (II) e os parâmetros r são as velocidades das reações correspondentes, que se podem calcular como:

$$r_{21} = k_{21} l (1 - c)^2 \quad (3)$$

$$r_{22} = k_{22} l * (1 - c)^2 \quad (4)$$

$$r_1 = k_1 c \exp \exp \left(\frac{F \varphi_0}{RT} \right) \quad (5)$$

Em que os parâmetros k são constantes de velocidades das respectivas reações, F é o número de Faraday, φ_0 é o salto do potencial, relativo ao potencial da carga zero, R é a constante universal de gases e T é temperatura absoluta do vaso.

Como o ledol é um composto muito pouco ionizado, é possível menosprezar o impacto das formas iônicas. Assim, a estrutura da DCE não sofrerá impactos fortes nas etapas químicas e o sistema eletroanalítico far-se-á ainda mais estável, conforme descrito embaixo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para investigar o comportamento do sistema com a detecção eletroanalítica do ledol, assistida pelo composto oxihidróxido de cobalto-polímero condutor, analisamos o conjunto de equações diferenciais (2) mediante a teoria de estabilidade linear. Os elementos estacionários da matriz Jacobiana para este sistema podem ser descritos como:

$$(a_{11} \ a_{12} \ a_{13} \ a_{21} \ a_{22} \ a_{23} \ a_{31} \ a_{32} \ a_{33}) \quad (6)$$

Sendo:

$$a_{11} = \frac{2}{\delta} \left(-\frac{\Delta}{\delta} - k_{21}(1-c)^2 \right) \quad (7)$$

$$a_{12} = 0 \quad (8)$$

$$a_{13} = \frac{2}{\delta} (2k_{21}l(1-c)) \quad (9)$$

$$a_{21} = \frac{2}{\delta} (k_{21}(1-c)^2) \quad (10)$$

$$a_{22} = \frac{2}{\delta} (-k_{22}(1-c)^2) \quad (11)$$

$$a_{23} = \frac{2}{\delta} (2k_{22}l * (1-c) - 2k_{21}l(1-c)) \quad (12)$$

$$a_{31} = \frac{1}{c} (k_{21}(1-c)^2) \quad (13)$$

$$a_{32} = \frac{1}{c} (k_{21}(1-c)^2) \quad (14)$$

$$a_{33} = \frac{1}{c} \left(-2k_{22}l * (1-c) - 2k_{21}l(1-c) - k_1 \exp \exp \left(\frac{F\phi_0}{RT} \right) + v \right) \quad (15)$$

Observando os elementos da diagonal principal da matriz Jacobiana (7), (11) e (15), podemos concluir que o comportamento oscilatório neste sistema é pode ser realizado, mas a sua satisfação pode ser realizada pelo único fator.

Para que o comportamento oscilatório seja realizado, é necessário haver elementos positivos na diagonal principal. Estes elementos são responsáveis pela positiva conexão de retorno. Neste sistema, o único elemento capaz de ser positivo é $jk_1 \exp \exp (F\phi_0)/RT > 0$ se $j > 0$. Ele descreve o fator dos impactos na DCE da etapa eletroquímica, típico para todos os sistemas semelhantes [24-28].

Assim como em [24-28], a manifestação do comportamento oscilatório (frequência, amplitude e tipo de oscilações), será dependente da composição do eletrólito de suporte, usado para o processo eletroanalítico. De qualquer maneira, esta manifestação dar-se-á nos valores de parâmetros afastados do limite de detecção, como será exposto abaixo.

A *estabilidade do estado estacionário*, por sua vez, tem uma ampla zona topológica de parâmetros, correspondente à sua realização. Como o analito e os compostos intermediários da eletrooxidação não são compostos iônicos, a zona da satisfação do critério de estabilidade será mais larga.

Para investigar a estabilidade, aplicamos ao conjunto de equações diferenciais (2) o critério Routh-Hurwitz e, para facilitar a análise do determinante, introduzimos as novas variáveis e reescrevemo-lo conforme (16):

$$\frac{4}{\delta^2 C} | -\kappa - \varepsilon \quad 0 \quad P \quad \varepsilon \quad - \Lambda \quad T - P \quad \varepsilon \quad \Lambda \quad - T - P - \Omega | \quad (16),$$

O que, conforme as propriedades do determinante, pode ser reescrito como (17)

$$\Lambda(2P\kappa - \Omega P - \Omega\varepsilon) > 0 \quad (17)$$

Abrindo os parênteses e aplicando a condição $\text{Det } J < 0$, saliente do critério, obtemos o requisito de estabilidade do estado estacionário expresso como (17):

$$\Lambda(2P\kappa - \Omega P - \Omega\varepsilon) = 0 \quad (18),$$

que se satisfaz de forma garantida, sendo positivo o valor do parâmetro Ω , o que acontece na esmagadora maioria dos casos, definindo um processo eletroanalítico eficiente cineticamente controlado. A zona topológica da satisfação do requisito (18) far-se-á mais larga que nos sistemas com formações e transformações de compostos iônicos, característicos para analitos sensíveis à concentração dos prótons ou hidroxilas.

Não havendo reações laterais, capazes de comprometer a estabilidade do analito e (ou) modificador do ânodo, a estabilidade do estado estacionário far-se-á correspondente à linearidade da dependência entre o parâmetro eletroquímico (no caso, corrente) e a concentração da toxina, o que é relacionado com o melhor desempenho do sensor, até que seja alcançado o limite de detecção.

Este limite é descrito pela *instabilidade monotônica*, descrevendo a margem entre os estados estacionários estáveis e instáveis. A sua realização é condicionada ao requisito de $\text{Det } J=0$, ou

$$\Lambda(2P\kappa - \Omega P - \Omega E) = 0 \quad (19),$$

Que é satisfeito, caso se satisfaça pelo menos um dos seguintes requisitos:

$$\Lambda = 0 \quad (20)$$

e(ou):

$$2P\kappa = \Omega(P + E) \quad (21)$$

Neste ponto, para o sistema podem coexistir vários estados instáveis, dos quais o sistema escolhe um. Este se destrói facilmente, ao se mudarem as condições e, geralmente, não se regenera, se as condições iniciais forem restauradas (o sistema passa para um estado instável diferente).

A detecção catódica do ledol também é possível, mas requer a presença de redutores mais fortes como modificadores de cátodo. A redução do ledol far-se-á pelo grupo alcoólico ternário e pelo grupo do ciclopropano com a abertura do anel e formação de um hidrocarboneto. Este caso será descrito num dos nossos próximos trabalhos.

CONCLUSÕES

A análise teórica do processo eletroanalítico da detecção do ledol, assistida pelo composto $\text{CoO}(\text{OH})$ – polímero condutor, deixou concluir que:

- se trata de um processo eletroanalítico eficiente, em que o composto de cobalto funciona como substância ativa, e o polímero desempenha o papel de mediador;
- o processo eletroanalítico é controlado tanto pela cinética do processo, como pela difusão do analito;
- a realização do comportamento oscilatório é possível, mas é causado apenas pelo fator das influências da etapa eletroquímica nas propriedades eletrofísicas da DCE.

NOTA DE AGRADECIMENTO

Volodymyr V. Tkach agradece à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro o seu apoio nos tempos difíceis para a Ucrânia e a sua ciência.

CONFLITOS DE INTERESSE

Os autores não têm conflitos de interesse a declarar.

REFERÊNCIAS

1. M.J. Walker, S. Cowen, K. Gray, P. Hancock, D.T. Burns, Honey authenticity: the opacity of analytical reports—part 2, forensic evaluative reporting as a potential solution, *NPJ Science of Food*, **6**, 12 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1038/s41538-022-00127-5>
2. E.J. de Jongh, S.L. Harper, S.S. Yamamoto, C.J. Wright, C.W. Wilkinson, S. Ghosh, S.J.G. Otto, One Health, One Hive: A scoping review of honey bees, climate change, pollutants, and antimicrobial resistance, *PLoS One*, **17**(2), e0242393 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242393>
3. A. Afshari, M. Ram, S. Mohamadi, Quality evaluation of Iranian honey collected from Khorasan Province, Iran, *International Journal of Food Science*, **2022**, 3827742 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1155/2022/3827742>
4. A. Nunes, C. Schmitz, T. Gerber, D. Nunes-Araújo, S. Moura, M. Maraschin, Typification and adulteration analysis of Brazilian honeys: a systematic review—from 2010 to 2020, *Research, Society and Development*, **11**(2), e47611226026 (2022). Doi: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i2.26026>
5. S. Ullah, S.U. Khan, T.A. Saleh, S. Fahad, Mad honey: uses, intoxicating/poisoning effects, diagnosis, and treatment, *RSC Advances*, **8**(33), 18635-18646 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1039/C8RA01924J>
6. E. Dilber, M. Kalyoncu, N. Yariş, A. Ökten, A case of mad honey poisoning presenting with convulsion: intoxication instead of alternative therapy, *Turkish Journal of Medical Sciences*, **32**(4), 361-362 (2002). URL: <https://journals.tubitak.gov.tr/cgi/viewcontent.cgi?article=4439&context=medical>

7. H. Ozhan, R. Akdemir, M. Yazici, H. Gündüz, S. Duran, C. Uyan, Cardiac emergencies caused by honey ingestion: a single centre experience, *Emergency Medicine Journal*, **21**(6), 742-744 (2004). Doi: <https://doi.org/10.1136/emj.2003.009324>
8. D.P. Aykas, Determination of possible adulteration and quality assessment in commercial honey, *Foods*, **12**(3), 523 (2023). Doi: <https://doi.org/10.3390/foods12030523>
9. A. Jesionek, L. Poblocka-Olech, B. Zabiegala, A. Bucinski, M. Krauze-Baranowska, M. Luczkiewicz, Validated HPTLC method for determination of ledol and alloaromadendrene in the essential oil fractions of *Rhododendron tomentosum* plants and *in vitro* cultures and bioautography for their activity screening, *Journal of Chromatography B*, **1086**, 63-72 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2018.04.006>
10. A.S. Tsagkaris, G.A. Koulis, G.P. Danezis, I. Martakos, M. Dasenaki, C.A. Georgiou, N.S. Thomaidis, Honey authenticity: Analytical techniques, state of the art and challenges, *RSC Advances*, **11**(19), 11273-11294 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1039/D1RA00069A>
11. R. Brodschneider, Honey bee genetic improvement, *Bee World*, **100**(1), 1 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1080/0005772X.2023.2178766>
12. S.I. Abdelwahab, A.B. Abdul, M.M. Elhassan, S. Mohan, M.Y. Ibrahim, A.A. Mariod, N.A. AlHaj, R. Abdullah, GC/MS determination of bioactive components and antibacterial properties of *Goniothalamus umbrosus* extracts, *African Journal of Biotechnology*, **8**(14), 3336-3340 (2009). Doi: <https://doi.org/10.5897/AJB09.356>
13. A. Stadnik, E.M. Caldas, A. Galli, F.J. Anaissi, Eletrodo modificado com [CoO(OH)] coloidal aplicado na detecção de ácido oxálico, *Orbital: The Electronic Journal of Chemistry*, **7**(2), 122-128 (2015). Doi: <http://dx.doi.org/10.17807/orbital.v7i2.572>
14. J.S. Bonini, F.Q. Mariani, E.G. de Castro, A. Galli, R. Marangoni, F.J. Anaissi, Partículas de CoO(OH) dispersas em pasta de carbono aplicado na eletrooxidação de compostos fenólicos, *Orbital: The Electronic Journal of Chemistry*, **7**(4), 318-326 (2015). Doi: <http://dx.doi.org/10.17807/orbital.v7i4.780>

15. S. Tursynbolat, Y. Bakytkarim, J. Huang, L. Wang, Highly sensitive simultaneous electrochemical determination of myricetin and rutin via solid phase extraction on a ternary Pt@r-GO@MWCNTs nanocomposite, *Journal of Pharmaceutical Analysis*, **9**(5), 358-366 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2019.03.009>
16. S. Sadki, P. Schottland, N. Brodie, G. Saboraud, The mechanisms of pyrrole electropolymerization, *Chemical Society Reviews*, **29**(5), 283-293 (2000). Doi: <https://doi.org/10.1039/A807124A>
17. F. Ađın, Electrochemical determination of amoxicillin on a poly (acridine orange) modified glassy carbon electrode, *Analytical Letters*, **49**(9), 1366-1378 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1080/00032719.2015.1101602>
18. T.D. Martins, M.L. Pacheco, R.E. Boto, P. Almeida, J.P.S. Farinha, L.V. Reis, Synthesis, characterization and protein-association of dicyanomethylene squaraine dyes, *Dyes and Pigments*, **147**, 120-129 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2017.07.070>
19. S. Sreejith, P. Carol, P. Chithra, A. Ajayaghosh, Squaraine dyes. A mine of molecular materials, *Journal of Materials Chemistry*, **18**(3), 264-274 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1039/B707734C>
20. D. Lynch, Pyrrolyl-squaraines--Fifty golden years, *Metals*, **5**(3), 1349-1370 (2015). Doi: <https://doi.org/10.3390/met5031349>
21. M.S. Ba-Shammakh, *Electropolymerization of Pyrrole on Mild Steel for Corrosion Protection*, Tese de mestrado, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dharan, Saudi Arabia, 2002.
22. I. Das, N.R. Agrawal, S.A. Ansari, S.K. Gupta, Pattern formation and oscillatory electropolymerization of thiophene, *Indian Journal of Chemistry*, **47A**(12), 1798-1803 (2008). URL: [https://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/2565/1/IJCA%2047A\(12\)%201798-1803.pdf](https://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/2565/1/IJCA%2047A(12)%201798-1803.pdf)
23. K. Aoki, I. Mukoyama, J. Chen, Competition between polymerization and dissolution of poly(3-methylthiophene) films, *Russian Journal of Electrochemistry*, **40**(3), 280-285 (2004). Doi: <https://doi.org/10.1023/B:RUEL.0000019665.59805.4c>

24. I. Das, N. Goel, N.R. Agrawal, S.K. Gupta, Growth patterns of dendrimers and electric potential oscillations during electropolymerization of pyrrole using mono- and mixed surfactants, *Journal of Physical Chemistry*, **114**(40), 12888-12896 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1021/jp105183q>
25. M. Bazzaoui, E.A. Bazzaoui, L. Martins, J.I. Martins, Electropolymerization of pyrrole on zinc-lead-silver alloys' electrodes in neutral and acid organic media, *Synthetic Metals*, **130**(1), 73-83 (2002). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(02\)00101-7](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(02)00101-7)
26. I. Das, N. Goel, S.K. Gupta, N.R. Agrawal, Electropolymerization of pyrrole: Dendrimers, nano-sized patterns and oscillations in potential in presence of aromatic and aliphatic surfactants, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **670**, 1-10 (2012). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2012.01.023>
27. V.V. Tkach, M.V. Kushnir, S.C.d. Oliveira, I.M. Shevchenko, V.M. Odyntsova, V.M. Omelyanchik, *et al.*, Theoretical description for anti-COVID-19 drug molnupiravir electrochemical determination over the poly(1,2,4-triazole)-co-squaraine dye composite with Cobalt (III) oxyhydroxide, *Biointerface Research in Applied Chemistry*, **13**(1), 74 (2023). Doi: <https://doi.org/10.33263/BRIAC131.074>
28. V.V. Tkach, M.M. Kucher, N. Slyvka, L. Vovk, M. Sokolenko, The modeling for anti-Covid-19 drug molnupiravir electrochemical sensing on C₃N₄, *Biointerface Research in Applied Chemistry*, **13**(5), 446 (2023). Doi: <https://doi.org/10.33263/BRIAC135.446>

COMO CITAR ESTE ARTIGO

V.V. Tkach, M.V. Kushnir, N.M. Storoshchuk, O.V. Luganska, V.V. Koptiika, N.V. Novosad, S.M. Lukanova, Y.G. Ivanushko, V.G. Ostapchuk, S.P. Melnychuk, P.I. Yagodynets', S.C. de Oliveira, J.I.F.d. Paiva-Martins, M.J. Monteiro, Z.O. Kormosh, T.V. Morozova, A descrição teórica da detecção eletroanalítica do ledol em méis, assistida pelo compósito do polímero condutor com o oxihidróxido de cobalto, *Rev. Colomb. Cienc. Quim. Farm.*, **53**(1), 101-113 (2024). <https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v52n3.112979>