

Imunossensores eletroquímicos para detecção de micotoxinas em alimentos: Uma revisão integrativa

Electrochemical immunosensors for detecting mycotoxins in food: An integrative review

Inmunosensores electroquímicos para la detección de micotoxinas en alimentos: Una revisión integrativa

Recebido: 05/09/2025 | Revisado: 22/09/2025 | Aceitado: 23/09/2025 | Publicado: 26/09/2025

Beatriz Santiago Guerra

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6547-0906>

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

E-mail: guerrabsantiago@gmail.com

César Augusto Souza de Andrade

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3271-2817>

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

E-mail: cstrandade@gmail.com

Maria Danielly Lima de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8572-4846>

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

E-mail: m_danielly@yahoo.com.br

Resumo

As micotoxinas são metabólitos tóxicos produzidos durante o processo de esporulação fúngica, estas podem se desenvolver nos alimentos em geral durante a sua produção, colheita, transformação, armazenamento e transporte. Estas causam sérios problemas à saúde humana e de animais, além de efeitos na economia, pois estima-se que 25% das culturas alimentares mundiais estejam contaminadas com algum tipo de micotoxina. Diante disto, os imunossensores têm se destacado na determinação promissora, frente aos métodos atuais, podendo ser aplicados nas mais diversas formas de diagnóstico, por apresentarem baixos limites de detecção, simplicidade operacional, alta sensibilidade, baixo custo e portabilidade em campo. Desta forma o presente trabalho apresenta uma revisão integrativa, transversal e retrospectivo com caráter restritivo na seleção de amostras de imunossensores para detecção de micotoxinas alimentares visando o seu diferencial para um diagnóstico rápido e elevada acurácia. Nesta busca de literatura especializada foram selecionados doze artigos, onde foram combinados diferentes descritores aplicados em buscas booleanas, realizados nos anos de 2019 à 2024. Estes estudos abordaram diferentes constituintes dos imunossensores, principalmente a sua associação aos nanomateriais, de maneira a amplificar o sinal, aumentando a área superficial; aos quais foram avaliados também principalmente os biorreceptores e o limite de detecção. As pesquisas voltadas ao desenvolvimento de sistemas biossensores tornam-se uma ótima alternativa de auxílio diagnóstico rápido e prático, podendo estes serem aplicados de forma segura e apresentando baixo custo.

Palavras-chave: Imunossensores, Detecção, Micotoxinas.

Abstract

Mycotoxins are toxic metabolites produced during fungal sporulation. These metabolites can develop in foods during production, harvesting, processing, storage, and transportation. These metabolites cause serious health problems for humans and animals, as well as economic impacts, as an estimated 25% of the world's food crops are contaminated with some type of mycotoxin. Therefore, immunosensors have emerged as promising methods for determining mycotoxins, compared with current methods. They can be applied in a wide range of diagnostic applications due to their low detection limits, operational simplicity, high sensitivity, low cost, and field portability. Therefore, this work presents an integrative, cross-sectional, and retrospective review with a restrictive approach to selecting immunosensor samples for food mycotoxin detection, aiming to differentiate them for rapid diagnosis and high accuracy. This specialized literature search selected twelve articles, combining different descriptors applied in Boolean searches, conducted between 2019 and 2024. These studies addressed various components of immunosensors, particularly their association with nanomaterials to amplify the signal and increase the surface area. The bioreceptors and detection limits were also evaluated. Research focused on the development of biosensor systems

represents an excellent alternative for rapid and practical diagnostic support, as they can be applied safely and at low cost.

Keywords: Immunosensors, Detection, Mycotoxins.

Resumen

Las micotoxinas son metabolitos tóxicos producidos durante el proceso de esporulación fúngica, que pueden desarrollarse en los alimentos en general durante su producción, cosecha, transformación, almacenamiento y transporte. Estas causan graves problemas a la salud humana y animal, además de tener efectos en la economía, ya que se estima que el 25% de los cultivos alimentarios mundiales están contaminados con algún tipo de micotoxina. Ante esto, los inmunosensores se han destacado por su prometedora determinación en comparación con los métodos actuales, pudiendo aplicarse en diversas formas de diagnóstico, ya que presentan límites de detección bajos, simplicidad operativa, alta sensibilidad, bajo costo y portabilidad en el campo. De esta forma, el presente trabajo presenta una revisión integrativa, transversal y retrospectiva con carácter restrictivo en la selección de muestras de inmunosensores para la detección de micotoxinas alimentarias, buscando su diferencial para un diagnóstico rápido y de elevada precisión. En esta búsqueda de literatura especializada se seleccionaron doce artículos, donde se combinaron diferentes descriptores aplicados en búsquedas booleanas, realizadas en los años de 2019 a 2024. Estos estudios abordaron diferentes constituyentes de los inmunosensores, principalmente su asociación con los nanomateriales, de manera a amplificar la señal, aumentando el área superficial; los cuales también fueron evaluados principalmente los bioreceptores y el límite de detección. Las investigaciones dirigidas al desarrollo de sistemas biosensores se convierten en una excelente alternativa de ayuda diagnóstica rápida y práctica, pudiendo ser aplicados de forma segura y presentando bajo costo.

Palabras clave: Inmunosensores, Detección, Micotoxinas.

1. Introdução

As micotoxinas são caracterizadas como compostos que são resultado do metabolismo secundário de desenvolvimento e reprodução fúngica, sua produção torna-se favorecida por condições de estresse ambiental, umidade elevada e temperatura, e estas são altamente nocivas ao homem, destes os principais gêneros fúngicos produtores de micotoxinas são: *Aspergillus*, *o Penicillium* e *o Fusarium*. Uma importância maior deve ser dada ao gênero fúngico *Aspergillus spp.*, que são caracterizados por serem fungos filamentosos e saprófitos e exibem uma grande capacidade de colonização e contaminação (Dhakal, Sbar., 2021). Estas micotoxinas são capazes de causar efeitos agudos e crônicos em animais e seres humanos, com um grande potencial de deterioração de funções hepáticas e renais, desregulação do sistema endócrino e processos de teratogênese, mutagênese e características imunossupressoras, tendo em vista todos os fatores, existe um grupo de micotoxinas que apresentam um grande interesse; as aflatoxinas, desoxinivalenol, fumonisinas, zearalenona, patulina, ocratoxina A e a citrina, e a importância se dá devido à grande ocorrência em alimentos e a facilidade de colonização (Kumar *et.al.*, 2020).

Com base nisto, as micotoxicoses são caracterizadas pela exposição humana ou animal das micotoxinas seja por inalação ou contato direto com a pele que consequentemente provocam o envenenamento, o que nos remete a uma preocupação

especial, devido ao fato de que na década de 1990 houve casos confirmados de micotoxicoses em países como: Espanha, Índia, Turquia, China, Alemanha e no Oriente Médio, o que ocasionou em milhões de dólares em assentamento para fungos, e as principais fontes de contaminação associadas as micotoxicoses são: grãos de cereais, plantas e oleaginosas, nos seus processos de colheita, transporte e armazenamento (Awuchi *et.al.*, 2022).

O FDA (Food and Drug Administration), as trata como contaminantes consistente de alimentos, podendo esta exposição causar: náuseas, vômitos, dor abdominal, convulsões, nos quadros mais graves quadros de: imunotoxicidade, teratogenicidade e hepatotoxicidade, considerando-as assim a mesma como principais causadoras do câncer de hepático e gastrointestinal (Dhakal, Sbar., 2021) caracterizando-as como grande ameaça para países tropicais e subtropicais, contudo, diante das mudanças climáticas estima-se que esta torne-se uma ameaça emergente global. Diante do exposto foram desenvolvidas estratégias de biocontrole e de diagnóstico e detecção destas micotoxinas nos alimentos (Caceres *et.al.*, 2020).

O reconhecimento específico é o ponto chave dos biossensores, atrelado a esta, a

tecnologia de rápida detecção, sendo produtos simples, baratos e de fácil operacionalização, otimamente empregado como método de triagem de detecção de micotoxinas. Estes combinam um elemento biológico, com um componente eletrônico para produção de sinal mensurável, este detecta, registra e envia informações sobre as diferentes alterações químicas em sua superfície, ou seja, existem vários tipos de biossensores, e essa classificação se baseia em seu transdutor e analito-alvo (Li *et.al.*, 2021), assim podem ser biossensores enzimáticos, imunossensores, aptâmeros ou classificados quanto a transdução; eletroquímicos (posteriormente agrupados como potenciométricos, amperométricos, de impedância e condutimétricos), eletrônicos, térmicos, ópticos e biossensores de massa ou gravimétricos. Outra classificação inclui combinações específicas de biorreceptores-analitos (Naresh, Lee; 2021). Os biossensores eletroquímicos baseiam-se nas propriedades eletroquímicas do analito e do transdutor, geralmente são associados a nanomaterias configurando assim um sistema sensível, seletivo e de grande capacidade de detecção, neste a reação eletroquímica analito- biorreceptor acontece na superfície do transdutor (Maduraiveera *et.al.*, 2018), e partir de sua superfície transdutora podem ser divididos em: potenciométrico, amperométrico, impedimétrico, condumétrico e voltamétrico, e para avaliação do desempenho destes sistemas análises pontos que são cruciais, sendo estes: estabilidade do sistema, analisada a partir do monitoramento contínuo, ou seja, estando associada a desequilíbrios que possam acontecer de fora ou dentro do sistema biossensor, e os principais fatores que podem alterar são, a afinidade do sistema com o biorreceptor, a sua degradação (Naresh, Lee; 2021).

Os anticorpos são ótimos elementos de biorreconhecimento associado a afinidade, desta forma os imunossensores baseiam-se na interação entre antígeno- anticorpo que configura um complexo estável, apresentando resultados com alta reprodutibilidade, devido ao fato de que as análises podem serem feitas diretamente em contato com o analito- alvo, este exibe um sinal elétrico com a formação do complexo e as diferentes modificações (Lim, Ahmed *et.al.*, 2019).

Em sistemas imunossensores são avaliados a sensibilidade e especificidade: a sensibilidade lida com a quantidade mínima de analito a ser detectada com um número mínimo de etapas e em baixíssimas concentrações, havendo a investigação de analito nos ensaios; e a especificidade é uma das principais qualidades do sistema e sempre é levada em consideração na escolha de um biossensor e/ou biorreceptor, ou seja, a capacidade de detecção de uma molécula de analito alvo específico em uma amostra que contém inúmeros contaminantes (Dincer *et.al.*, 2019).

Para auxiliar e trazer melhores características para os biossensores, utiliza-se da nanotecnologia, que exibe a capacidade de manipulação em nível atômico e molecular, além do mais a utilização de nanomaterias que atrela a estes mudanças físicas, ópticas, elétricas, químicas e biológicas, e as suas vantagens são: a realização de medição de partículas em diferentes áreas e capacidade de concentração em baixíssimas quantidades sendo estas nocivas, monitorar e avaliar os fenômenos químicos e físicos e realizar detecção bioquímica de organelas de são de interesse médico para diagnóstico (Khan., 2020).

Deste modo, este trabalho trata-se de uma análise integrativa onde estruturou-se em quatro principais pilares: (1) identificação do tema, (2) organização metodológica das bases de dados, (3) critérios de exclusão e inclusão de documentos e (4) organização das amostras, tendo como pergunta norteadora: “Como os dos diferentes tipos de imunossensores atua na detecção precoce de micotoxinoses? ” Contudo, visando a utilização de analito alvo para detecção precoce e uma possível utilização da população através dos serviços de saúde, sendo o fundamento da pesquisa metodológica; assim o presente trabalho denota uma revisão integrativa, do tipo transversal e retrospectiva com caráter restritivo na seleção de amostras de imunossensores para detecção de micotoxinas alimentares visando o seu diferencial para um diagnóstico rápido e de elevada acurácia.

2. Metodologia

2.1 Organização Metodológica das Bases de Dados

A partir da pergunta norteadora, visando a facilidade de definição dos descritores, utilizou-se de termos específicos e padronizados pelo DeCS (Descritores em Ciência da Saúde), onde os periódicos foram analisados em modo avançado, cruzados com o auxílio do operador booleano AND, sendo: “BIOSENSORS” AND “DETECTION AND “MYCOTOXIN” AND “DETECTION”, sendo estas buscas realizadas entre os meses de Dezembro à Abril de 2025, com estudos publicados no período entre 2019 e 2024, por avaliadores independentes National Center for Biotechnology Information (PUBMED), SCIENCE DIRECT e MDPI.

Como critérios de inclusão utilizados: Etapa 1 – Leitura do título, resumo e palavras chaves; Etapa 2- Leitura e da introdução e conclusão dos trabalhos previamente selecionados; Etapa 3 – Leitura completa dos estudos já selecionados na etapa 2.

Foram utilizados também de estudos cuja temática estivesse relacionada à utilização de biossensores na detecção de micotoxinas em formato de artigo e disponível para download, no idioma inglês. Em adição a isto, foram incluídos os que desenvolveram e analisaram qualitativamente e quantitativamente a resposta mensurada entre o material biológico e o nanodispositivo, tendo como ponto crucial o maior nível de atualização frente aos materiais usados, tipos de respostas e relevância científica publicados 6 nos últimos anos.

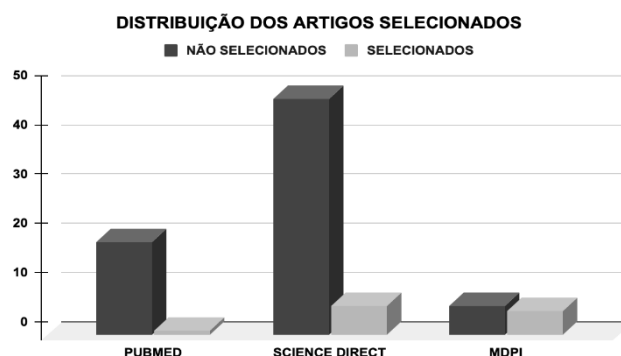
Descartou-se artigos de biossensores como: de ressonância plasmônica, ópticos, térmicos, piezoelétricos e magnéticos, em adição foram extinguidos também os estudos que tinham por definição outros fins diagnósticos, incompletos, metodologias não especificadas, artigos de opinião, metodologias não especificadas, carta ao editor, revisão de literatura e casos clínicos. Pelas as coletas de dados estes foram catalogados através de elementos gráficos estruturados pela análise de dados no software Microsoft Excel® versão 2025 e convertidos em figuras, e para melhor compreensão da amostragem, os artigos foram estruturados em forma de tabela com: ordem, título, ano, autores, base de dados e principais achados.

3. Resultados

Neste estudo foram encontrados 73 artigos e selecionados 12 (16,4%).

Os artigos foram das bases de dados PubMed, Science Direct e MDPI para análise e discussão. No gráfico a seguir (Gráfico 1) mostra a forma de delineamento referente à seleção dos artigos, conforme o descrito: 19 artigos da PubMed sendo 1 selecionado, 48 da Science Direct sendo 6 selecionados e 6 da MDPI sendo 5 artigos selecionados:

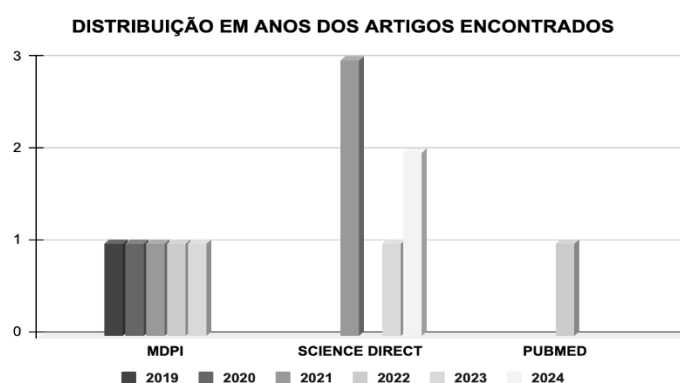
Gráfico 1 - Distribuição dos artigos encontrados de acordo com as bases de dados.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Estes artigos selecionados foram encontrados e selecionados, identificados assim por números de 1 a 12, para melhor entendimento; quanto às análises retrospectivas, estes artigos selecionados foram organizados conforme Gráfico 2, respectivamente: foram selecionados 12 artigos, 1 na PubMed correspondendo ao ano de 2022, 6 na Science Direct correspondendo aos anos de 2021, 2023 e 2024; e 5 na MDPI nos anos de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023.

Gráfico 2 – Distribuição dos artigos encontrados e selecionados de acordo com a base dados Medline, PubMed, Sciende Direct e Scopus e os respectivos anos.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Os artigos selecionados mostraram os achados acerca da interação dos biossensores e suas diferentes utilizações (Quadro 1). Todos os estudos foram selecionados com base na relevância de seus resultados, aos quais avaliou-se seus componentes, e sua potencial aplicação para detecção de Aflatoxina.

Quadro 1 – Artigos selecionados com base no título, ano de publicação, base de dados, autores e principais aplicações.

Classificação	Título	Ano de Publicação	Base bibliográfica	Autores	Principais achados
1	Development of Flexible Dispense-Printed Electrochemical Immunosensor for Aflatoxin M1 Detection in Milk.	2019	MDPI	Abera <i>et.al.</i>	Foi desenvolvido em substrato PET, e testado em amostras de AFM1 em tampão e leite, este apresentou-se com O LOD de 0,02 µg/L e 0,0259 µg/L, com uma faixa de detecção de 0,01 a 1 µg/L.
2	Label-Free Amperometric Immunosensor Based on Versatile Carbon Nanofibers Network Coupled with Au Nanoparticles for Aflatoxin B1 Detection.	2020	MDPI	Huang <i>et.al.</i>	Apresentou im imunossensor amperométrico baseado em uma rede de nanofibras de carbono derivadas da biomassa da celulose que promove o aumento da difusão eletrolítica acoplado a nanopartículas de ouro para detecção de AFB1 em farinha de trigo, apresentando uma ampla faixa dinâmica de 0,05 a 25 ng mL ⁻¹ com um baixo LOD de 0,027 ng mL ⁻¹ .
3	Copper Oxide	2021	MDPI	Xuan <i>et.al.</i>	Para detecção foi acoplado a um sistema

	Nanoparticle-Based Immunosensor for Zearalenone Analysis by Combining Automated Sample Pre-Processing and High-Throughput Terminal Detection.				imunossensor baseado nanopartículas de óxido de cobre um tripeptídeo fluorescente para detecção de zearalenona em amostras de trigo e milho, e este exibiu o LOD E LOQ para amostras de milho de 0,51(ng/mL) e 1,70(ng/mL) respectivamente para as amostras de trigo 0,61 (ng/mL) e 2.02 (ng/mL).
4	Development of an immuno-electrochemical glass carbon electrode sensor based on graphene oxide/gold nanocomposite and antibody for the detection of patulin.	2021	Science Direct	Song; Wang; Kim.	Neste o sensor foi desenvolvido com eletrodo de carbono vítreo revestido com nanocompósito de óxido de grafeno e ouro utilizando de anti- patulina- BSA para detecção de patulina em amostras em tampão, demonstrou o LOD de 5 µg/L.
5	Electrochemical and morphological layer-by-layer characterization of electrode interfaces during a label-free impedimetric immunosensor build-up: The case of ochratoxin A	2021	Science Direct	Cancelliere <i>et.al</i>	Este sistema sensor impedimétrico baseou-se modificação do eletrodo de ouro convencional com ácido 4-mercaptobenzóico em amostras em tampão demonstrando valores de LOD e LOQ de 0,19 e 0,40 ng/mL, respectivamente, faixa linear foi de 0,37–2,86 ng/mL e a sensibilidade de 1,01 kΩ mL/ng.
6	Sensitive Electrochemical Immunosensor for Detection of Mycotoxins Aflatoxin B1 Using Disposable screen-Printed Carbon Electrode	2021	Science Direct	Liu <i>et.al</i> .	Para esta construção utilizou-se de anticorpos monoclonais de AFB1 em eletrodos de carbono para análise em amostras de milho o qual demonstrou o intervalo linear e o limite de detecção de 10 a 120 ng.mL ⁻¹ e 0,007 ng.mL ⁻¹ ,
7	Rapid Detection of Deoxynivalenol in Dry Pasta Using a Label-Free Immunosensor.	2022	MDPI	Malvano <i>et.al</i> .	Foi desenvolvido um imunossensor baseado em poliamidoamina e cisteamina para detecção de Desoxinivalenol em macarrão, apresentando boa sensibilidade com o LOD igual a 50ppb.
8	Smartphone-based magneto-immunosensor on carbon black modified screen-printed electrodes for point-of-need detection of aflatoxin B1 in cereals.	2022	PubMed	Jafari <i>et.al</i> .	Este é um magneto imunossensor, ou seja, utilizado de eletrodos modificados com carbono para detecção de AFB1 em amostras de extrato de milho, apresentando um baixo limite de detecção de 24 pg/mL.
9	Mach-Zehnder Interferometric Immunosensor for Detection of Aflatoxin M1 in Milk, Chocolate	2023	MDPI	Angelopoulou <i>et.al</i> .	Neste sistema sensor foi desenvolvido um imunossensor optoeletrônico à base de silício e interferômetros de guia de onda de nitreto de silício Mach-Zehnder (MZIs) integrados e um espectrofotômetro externo

	Milk, and Yogurt.				para coleta de espectros de transmissão, para detecção de AFM1 em leite, leite com chocolate e iogurte; LODs para estes sistemas foram: leite e leite com chocolate foram de 0,005 ng/mL, e o do iogurte foi de 0,01 ng/mL.
10	Development, optimization and validation of an electrochemical immunosensor for determination of total aflatoxins in pistachio	2023	Science Direct	Pérez-Fernández <i>et.al.</i>	Este sistema sensor baseia-se na construção em eletrodo de carbono impresso em tela, utilizando anticorpos monoclonais para detecção de AFB1, B2, G1 e G2 em amostras orgânicas de pistache, apresentou uma faixa linear de $0,01^{-2} \mu\text{g L}^{-1}$. e LOD de $0,017 \mu\text{g L}^{-1}$ e $0,066 \mu\text{g kg}^{-1}$
11	Plasmonic immunosensors based on spoon-shaped waveguides for fast and on-site ultra-low detection of ochratoxin A in coffee samples.	2023	Science Direct	De Andrade e Silva <i>et.al.</i>	Foi realizada a detecção de ocratoxina A em amostras de café, este imunossensor óptico era baseado em guias de ondas plasmônicas cobertas com ouro e cisteamina apresentou a faixa linear de detecção de 210^{-4} ppb a 510^{-3} ppb e o LOD de 0.2 ppt.
12	A field-portable electrochemical immunosensor based on a multifunctional Ag₂O/g-C₃N₄@MA-DBB covalent organic framework receptor interface for single-step detection of aflatoxin M1 in raw milk samples.	2023	Science Direct	Naz <i>et.al.</i>	Neste sistema foi desenvolvido um imunossensor baseado em nanocompósito híbrido de óxido de prata e nitreto de carbono grafítizado funcionalizado com butano, para detecção de AFM1 em amostras de leite, apresentando boa sensibilidade e especificidade com a faixa linear de $0,03-1000 \text{ fg mL}^{-1}$, com um limite de detecção de $0,01 \text{ fg mL}^{-1}$ (LOD).

Fonte: Elaborado pelos Autores.

4. Discussão

As micotoxinas apresentam-se como produtos metabólicos oriundos de fungos, que tem por características invasão a produtos agrícolas, a contaminação por micotoxinas acontece através do consumo de alimentos e rações contaminadas. As principais envolvidas neste processo de contaminação são: aflatoxinas, desoxinivalenol, patulina, zearalenona e ocratoxina estas incluem citotoxicidade a nível hepático, renal, intestinal e imunológica e outras (Awuchi, C. G. et al. 2022).

Diante do exposto Haque e colaboradores; avaliaram os métodos mais utilizados para detecção de micotoxinas, sendo eles: Cromatografia, ELISA, imunoensaio de fluxo lateral, imunoensaio de polarização de fluorescência e os biossensores, que segundo os mesmos, comparando aos métodos citados, estes exibem ótimas vantagens: rápida detecção, portabilidade, capacidade de detecção em tempo real, alto rendimento e baixo custo; e quando associado a nanotecnologia com o emprego de nanomateriais acoplados a este sistema é possível uma detecção ainda mais sensível, rápida e barata; de forma a estabelecer uma melhor segurança alimentar (Haque, A. et al. 2020).

A Aflatoxina B1 é a mais incidente nos quadros de contaminação por micotoxinas, tornando-se assim uma grande ameaça à saúde humana por ser a mais tóxica e é considerada um cancerígeno do grupo I pela agência internacional de Pesquisa sobre o Câncer, tendo limites regulatórios de $5 \mu\text{g kg}^{-1}$ e para regulação europeia o limite máximo em alimentos

permitidos é de $2 \mu\text{g kg}^{-1}$, de forma a evitar sua superexposição, tendo (European Commission, E. et al. 2006; Yu, Y. et al. 2020).

Dessa forma, há uma grande importância da utilização de métodos de detecção desta micotoxina, de maneira a evitar agravos à saúde humana, no estudo de Pérez-Fernández, B. et al. (2023); foi desenvolvido um sistema imunossensor de alta sensibilidade para detecção de “traços” de aflatoxinas (AFs) em pistache, tendo a construção baseada em imunensaio competitivo em eletrodo de carbono impresso em tela utilizando anticorpos monoclonais, os testes foram realizados em amostra de pistache nas concentrações de 0,25; 0,50; 1; 2 e $4 \mu\text{g kg}^{-1}$ de diferentes tipos de AFs (AFB1, AFG1, AFB2 e AFG2), apresentando uma faixa linear de $0,01 \mu\text{g/L}^{-1}$, com a reprodutibilidade de 2%, tendo o limite de detecção de $0,066 \mu\text{g/kg}^{-1}$; a seletividade deste também foi analisada utilizando a concentração de $2 \mu\text{g}^{-1}$ de Zearalenona e Ocratoxina A, e não houve mudança no sinal analítico, assim seus parâmetros foram comparados a método de ELISA demonstrando ótimos parâmetros de determinação como, bom desempenho analítico, reprodutibilidade e sensibilidade (Pérez-Fernández, B. et al. 2023).

Através do uso de nanopartículas de ouro, Huang, Y. et al. (2020), desenvolveu um imunossensor amperométrico baseado em nanofibras de carbono acopladas a nanopartículas de ouro e anticorpo monoclonal para determinação de AFB1 em trigo; as amostras testadas foram diluídas em solução PBS nas concentrações 2, 25 e $200 \mu\text{g kg}^{-1}$, sendo seus padrões de detecção caracterizados pela voltametria de pulso diferencial e voltametria cíclica, a sua sensibilidade e especificidade também foram avaliadas, foi submetendo o sistema a outras micotoxinas (Ocratoxina, Zearalenona e deoxinivalenol) que também são passíveis de contaminação no trigo, e o resultado indicou que o imunossensor desenvolvido é adequado para detecção específica e sensível de AFB1, apresentando o limite de detecção de $0,027 \text{ ng. mL}^{-1}$ (Huang, Y. et al. 2020).

Os imunossensores são amplamente utilizados na detecção de AFB1 em alimentos, no estudo de Liu, P. (2021), foi desenvolvido imunossensor eletroquímico utilizando eletrodo de carbono impresso descartável e anticorpo monoclonal em amostras de pó de milho suspensas em PBS nas concentrações de 0; 0,5; 10; 15; 20 ng mL^{-1} sendo caracterizadas através das técnicas de voltametria de pulso diferencial e voltametria de cíclica, apresentado o limite de detecção $0,007 \text{ ng mL}^{-1}$ e com a faixa linear de detecção 10 a 120 ng.mL^{-1} , considerando assim este sistema confiável e sensível para determinação de AFB1 em amostras reais (Liu, P. 2021).

Outro estudo que demonstra o emprego dos imunossensores na detecção de AFB1, é o de Jafari, S. et al. (2022); do qual foi desenvolvido um magneto- imunossensor em eletrodo de carbono vítreo baseado em nanopartículas de carbono mesoporo funcionalizadas com anticorpo para detecção de AFB1 em cereais através de aplicativo de smartphone (AflaESense), a caracterização do sistema aconteceu pelas técnicas de voltametria cíclica e espectroscopia de impedância eletroquímica. Para estes testes foram utilizados em AFB1 em solução tampão e em amostras de milho no qual, do qual apresentou o LOD de 13 e 24 pg/mL e os desvios padrão médio 3,7 e 4,0%, respectivamente. O aplicativo AlfaESense atuou com um potenciostato miniaturizado conectado ao smartphone no qual foram feitas análises em de alimentos contaminados e naturais, e este exibiu resultados em formato; assim este imunossensor permite a realização de triagem alimentar em campo, diminuindo custos de testes confirmatórios (Jafari, S. et al. 2022).

Em alguns estudos pode-se observar que alimentos de origem láctea também apresentavam uma grande quantidade de micotoxinas especificamente a AFM1, o que resulta em sérios efeitos econômicos e na saúde humana quando ingerido Naz, I. et al. (2024).e esta é um produto originado do processo de hidroxilação da AFB1 a tornando termoestável, e sua quantidade não consegue ser reduzida durante o processamento alimentar, que quando ingerido torna-se um cancerígeno do grupo II do

qual afeta diretamente o fígado, e a exposição a longo prazo pode causar cirrose e carcinoma hepatocelular (Angelopoulou, M. et al. (2023), por isso há a necessidade de discutir sistema sensores que realizam determinação deste tipo de metabólito.

No estudo de Abera, B. D. et al. (2019); e neste estudo foi realizado a detecção de AFM1 em amostras de leite, através de um sistema sensor flexível PET funcionalizado com nanotubos de carbono de parede única e anticorpo monoclonal; os primeiros testes foram realizados em amostras em solução PBS e partiram de 0- 1µg/L e o outro foi realizado em amostras reais de leite desnatado e desengordurado utilizando das mesmas concentrações (0- 1µg/L). A caracterização aconteceu pelas técnicas de voltametria cíclica e microscopia de força atômica, assim obtendo-se como limite de detecção de 0,02 µg/L para amostras em solução PBS e 0,0259 µg/L para amostras reais, com a faixa detecção de 0,01 a 1 µg/L para as amostras de tampão e leite, respectivamente; havendo uma comparação dos limites exigidos por lei este sensor se torna adequado para detecção em pontos com os quais aconteça o manuseio de leite (Abera, B. D. et al. 2019).

Ainda sobre a detecção de AFM1 em alimentos lácteos (Angelopoulou, M. et al. 2023); desenvolveram um sistema imunossensor para pesquisa de AFM1 no leite, leite com chocolate e iogurte; sendo elaborado um chip óptico baseado em matriz de interferômetros chamados de Mach-Zehnder (MZIs) integrados a um chip de silício, anticorpo policlonal, BSA e fontes de luz baseada em imunoensaio competitivo; para a detecção dos analitos foram utilizadas as diluições de 0,04; 0,4; 1,2 ng/mL, picadas com AFM1. O estudo relatou que o limite de detecção alcançado foi de: 0,01 ng/mL para as amostras de leite e leite com chocolate e de 0,005 ng/mL para o iogurte, a precisão do ensaio também foi medida a partir R% , obtendo-se os valores de 86,7 a 115%. Assim, devido a capacidade de multiplexação deste sistema, foi possível concluir que este pode ser reutilizável, apresentando um tempo rápido de análise e ótimas características analíticas (Angelopoulou, M. et al. 2023).

Naz, I. et al. (2024), desenvolveram outro sistema imunossensor eletroquímico baseado nanocompósito híbrido eletroativo de óxido de prata/ nitreto de carbono grafetizado com caboxila funcionalizado melamina di-bromo butano e anticorpo monoclonal. Para análises preliminares foram utilizadas amostras com concentrações conhecidas de AFM1: 0,03; 16; 90; 200; 328; 505; 650; 820 e 1000 fg mL⁻¹. E para a caracterização deste sistema foi utilizado a microscopia eletrônica de varredura de emissão de campo (FE-SEM), voltametria cíclica e espectroscopia de impedância eletroquímica, e após a análise destas amostras o sistema apresentou o LOD de 0,01 fg mL⁻¹ e com uma faixa linear de 0,03-1000 fg mL, desvio padrão relativo e percentual de 1,8% e 1,9%; como também a especificidade foi avaliada quando o sistema foi exposto a concentrações de Ocratoxina, Aflatoxina B1 e Zearalenona, através da técnica de DPV foi concluído que este sistema apresenta uma resposta seletiva. Após estes testes, o sensor foi exposto a 25 amostras diferentes de leite cru e este detectou a presença de AFM1 em 18 delas, demonstrando assim que exibe aplicabilidade real e precisa, barata e específica para detecção em amostras de leite (Naz, I. et al. 2024).

A detecção de outros tipos micotoxinas também é grande importância para a segurança alimentar, pois estão associadas a mudanças os processos homeostáticos corporais como: na síntese de proteínas e em processos de apoptose celular e estresse abiótico, ocasionando em sérias doenças gastrointestinais de efeitos agudos. A determinação destas utilizando métodos sensíveis e específicos como os imunossensores torna-se também de grande importância para a segurança alimentar (Malvano, F. et al. 2022; Song, X., Wang, D. & Kim, M. 2021).

Cancelliere, R. et al. (2021) em seu experimento propuseram um imunossensor eletroquímico para detecção de ocratoxina A, esta foi relatada como um agente causador de doenças hepáticas, renais, imunológicas e cancerígenas. Neste estudo os autores, utilizaram do eletrodo de ouro impresso em tela modificado com ácido 4-mercaptobenzóico, e anticorpo monoclonal para detecção de OCRA, as técnicas de caracterização utilizada foram as de voltametria cíclica e espectroscopia de impedância eletroquímica utilizando concentrações de 0,1; 0,5; 1,5; 2,5, 5, 10 ng/mL em solução PBS, exibindo o limite de

detecção de limite de detecção de 0,19 ng/mL e o de quantificação de 0,40 ng/mL; caracterizando baixo limite de detecção, seletividade e sensibilidade, considerada com um sensor promissor para diagnóstico alimentar (Cancelliere, R. et al. 2021).

De acordo com, De Andrade Silva, T. et al. (2024), desenvolveu um imunossensor óptico baseado em ressonância plasmônica de superfície e poliestireno para detecção de OCRA em amostras de café, este sistema exibiu uma faixa linear de 210–4 ppb a 510–3 ppb e limite de detecção de 0,2ppt, demonstrando as seletividade e sensibilidade na detecção, para análises que sejam realizadas no local dos analitos alvos e sem sistemas de interrupção ou interferência (De Andrade Silva, T. et al. (2024).

Através do uso de nanopartículas de óxido de cobre Xuan, Z. et al. (2021); sugeriram um imunossensor de pré tratamento capaz de determinar outro tipo de micotoxina, a Zearalenona (ZEN), que são amplamente encontradas em produtos agrícolas como; soja, cevada, trigo e outros. Este sistema baseia-se em reação imune competitiva de tripeptídeo fluorescente e anticorpos como sonda de captura para determinação em amostras de trigo e milho; demonstrado-se na faixa linear de detecção de 16,0 –1600,0 µg/kg e um alto rendimento de recuperação de 99,2 a 104,9% e com o limite de detecção e de quantificação de 0,51 (ng/mL) e 1,70 (ng/mL) respectivamente, evidenciando precisão, alto rendimento de recuperação e ampla faixa linear, podendo ser aplicado a outras micotoxinas (Xuan, Z. et al. 2021).

Song, X., Wang, D. & Kim, M. (2021), desenvolveram uma plataforma biossensora para detecção rápida da patulina, estes utilizaram de eletrodo de carbono vítreo que são amplamente empregados em sistema sensores devido a sua capacidade de detecção sensível e rápida e nanocompósito de óxido de grafeno, ouro e anticorpo monoclonal para complexação junto a patulina. A patulina para o teste foi testada em solução tampão PBS na concentração 10; 100; 300; 500; 1000 pg/mL, apresentando boa linearidade com o valor de ($R^2 = 0,9771$) e com o limite de detecção 5 µg/L; exibindo assim reconhecimento específico e alta corrente eletroquímicas associadas aos nanomateriais (Song, X., Wang, D. & Kim, M. 2021).

Malvano, F. et al. (2022) criaram um imunossensor impedimétrico utilizando de filme de poliamidoamina (PAMAM) que exibe inúmeras vantagens eletroquímicas e de ligação, imobilizado em eletrodo de ouro modificado com cisteamina e anticorpo monoclonal para pesquisa de Desoxinivalenol em massa de macarrão seca nas concentrações de 50 ppb, 250 ppb, 750 ppb, 1500 ppb, 3000 ppb, 6000 ppb; após análise pode-se determinar quantitativamente e com precisão e reprodutibilidade dos quais apresentou a faixa de linearidade de 98,75–102,60%, RSD de 3,80% e o limite de detecção de 50 ppb, sendo que o limite de indicação imposto pelos órgãos de regulamentação é de 740ppb.

5. Conclusões

Para esta pesquisa foi realizado uma revisão integrativa, transversal e retrospectiva a partir da seleção dos artigos, explorando as mais variadas bases de dados para assim fornecer objetivo a esta pesquisa, de forma a compreender as principais modificações e os possíveis impactos que os imunossensores podem proporcionar na determinação de micotoxinas em alimentos, os estudos associados descreveram o uso de imunossensores associados a diferentes tipos de materiais para detecção de micotoxinas em alimentos, isto se deve a sua maior sensibilidade e seletividade aprimorada com uso dos nanomateriais que desempenham funções multifuncionais oferecendo propriedades excepcionais pelo seu pequeno tamanho, relação superfície- volume, baixo custo e as interações interfaciais. As técnicas eletroquímicas utilizadas também se fizeram presente em todos os estudos como estratégia segura de validação dos dados, tanto de amostras reais quanto em solução tamponada. Os baixos limites de detecção e quantificação foram utilizados pelos autores como critérios que corrobora, as aplicações vantajosas destes, caracterizando baixo custo independente da técnica utilizada, uma análise rápida e segura; é perceptível que estes sistemas encontram-se grande desenvolvimento e aperfeiçoamento, quanto aos tipos de materiais utilizados, a captação

do sinal e os limites de detecção; sendo estas de extrema importância para contribuir em diagnóstico precoce e melhorar a sobrevida.

Agradecimentos

Ao laboratório de Biodispositivos Nanoestruturados (BioNano) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Capes.

Referências

- Abdolmaleki, K. et al. (2021). The mycotoxins in edible oils: An overview of prevalence, concentration, toxicity, detection and decontamination techniques. *Trends in Food Science & Technology*. 115, 500-11.
- Abera, B. D. et al. (2019). Development of flexible dispense-printed electrochemical immunosensor for aflatoxin M1 detection in milk. *Sensors*. 19(18), 3912.
- Angelopoulou, M. et al. (2023). Mach-Zehnder Interferometric Immunosensor for Detection of Aflatoxin M1 in Milk, Chocolate Milk, and Yogurt. *Biosensors*. 13(6), 592.
- Awuchi, C. G. et al. (2022). Mycotoxins' toxicological mechanisms involving humans, livestock and their associated health concerns: A review. *Toxins*. 14(3), 167.
- CACERES, Isaura et al. Aflatoxin biosynthesis and genetic regulation: A review. *Toxins*, v. 12, n. 3, p. 150, 2020.
- Cancelliere, R. et al. (2021). Electrochemical and morphological layer-by-layer characterization of electrode interfaces during a label-free impedimetric immunosensor build-up: The case of ochratoxin A. *Applied Surface Science*. 567, 150791.
- De Andrade Silva, T. et al. (2024). Plasmonic immunosensors based on spoon-shaped waveguides for fast and on-site ultra-low detection of ochratoxin A in coffee samples. *Talanta*. 271, 125648.
- Dhakal, A. & Sbar, E. (2022). Aflatoxin Toxicity. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing.
- Dincer, C. et al. (2019). Disposable sensors in diagnostics, food, and environmental monitoring. *Advanced Materials*. 31(30), 1806739.
- European Commission, E. et al. (2006). Commission Regulation (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. *Off. J. Eur. Union*. 364, 5-24.
- Filik, H. & Avan, A. A. (2019). Nanostructures for nonlabeled and labeled electrochemical immunosensors: Simultaneous electrochemical detection of cancer markers: A review. *Talanta*. 205, 120153.
- Haque, A. et al. (2020). Mycotoxin contamination and control strategy in human, domestic animal and poultry: A review. *Microbial pathogenesis*. 142, 104095.
- Huang, Y. et al. (2020). Label-Free Amperometric Immunosensor Based on Versatile Carbon Nanofibers Network Coupled with Au Nanoparticles for Aflatoxin B1 Detection. *Biosensors*. 11(1), 5.
- Jafari, S. et al. (2022). Smartphone-based magneto-immunosensor on carbon black modified screen-printed electrodes for point-of-need detection of aflatoxin B1 in cereals. *Analytica Chimica Acta*. 1221, 340118.
- Kumar, P. et al. (2020). Ochratoxins in food and feed: Occurrence and its impact on human health and management strategies. *Toxicon*. 187, 151-62.
- Li, R et al. (2021). Recent advances in immunoassays and biosensors for mycotoxins detection in feedstuffs and foods. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 12(1), 1-19.
- Liu, P. (2021). Sensitive Electrochemical Immunosensor for Detection of Mycotoxins Aflatoxin B1 Using Disposable screen- Printed Carbon Electrode. *International Journal of Electrochemical Science*, p. 21033.
- Maduraiveeran, G., Sasidharan, M. & Ganesan, V. (2018). Electrochemical sensor and biosensor platforms based on advanced nanomaterials for biological and biomedical applications. *Biosensors and Bioelectronics*. 103, 113-29.
- Malvano, F. et al. (2022). Rapid Detection of Deoxynivalenol in Dry Pasta Using a Label-Free Immunosensor. *Biosensors*. 12(4), 240.
- Naresh, V. & Lee, N. (2021). A review on biosensors and recent development of nanostructured materials-enabled biosensors. *Sensors*. 21(4), 1109.
- Naz, I. et al. (2024). A field-portable electrochemical immunosensor based on a multifunctional Ag₂O/g-C₃N₄@MA-DBB covalent organic framework receptor interface for single-step detection of aflatoxin M1 in raw milk samples. *Nanoscale Advances*. 6(18), 4693–703.
- Pereira, A. S., et al. (2018). Metodologia da pesquisa científica. [e-book]. Ed. UAB/NTE/UFSM.

Pérez-Fernández, B. et al. (2023). Development, optimization and validation of an electrochemical immunosensor for determination of total aflatoxins in pistachio. *Food Control*. 152, 109859.

Khan,, Kaushik,A., Solanki, P. R., Ansari, A. A., Pandey, M. K. & Malhotra, B. D. (2020). Zinc oxide nanoparticles-chitosan composite film for cholesterol biosensor, *Anal. Chim. Acta*. 616 (2008), 207–13.

Snider, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*. 104, 333-9. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>.

Sohrabi, H et al. (2022). Recent advances in the highly sensitive determination of zearalenone residues in water and environmental resources with electrochemical biosensors. *Environmental Research*. 204, 112082.

Song, X., Wang, D. & Kim, M. (2021). Development of an immuno-electrochemical glass carbon electrode sensor based on graphene oxide/gold nanocomposite and antibody for the detection of patulin. *Food Chemistry*. 342, 128257.

Xuan, Z. et al. (2021). Copper Oxide Nanoparticle-Based Immunosensor for Zearalenone Analysis by Combining Automated Sample Pre-Processing and High-Throughput Terminal Detection. *Sensors*. 21(19), 6538.

Yu, Y. et al. (2020). Detoxification of aflatoxin B1 in corn by chlorine dioxide gas. *Food Chemistry*. 328, 127121.