



ALCALOIDES DO TROPANO NA CADEIA DE PRODUÇÃO DO MILHO: REGULAMENTAÇÃO E DESAFIOS ANALÍTICOS

A cadeia de produção do milho assume um papel central na alimentação humana e animal, sendo particularmente vulnerável à contaminação por toxinas naturais produzidas por plantas infestantes. Entre estas, os alcaloides do tropano representam um risco emergente para a segurança alimentar. Neste contexto, tornam-se essenciais abordagens integradas de monitorização, deteção e mitigação ao longo da cadeia produtiva.

Ana Rita Mateus¹, Ana Maria Campos^{1,3}, Daniela Araújo¹,
Joana Castro^{1,3}, Carlos Gonçalves¹, Sílvia Barros¹, Carina
Almeida^{1,2,3}, José Pinela¹, Ricardo Oliveira¹

¹ Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária



² LEPABE, ALICE, Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto



³ Centro de Engenharia Biológica, Universidade do Minho



Introdução

As mudanças globais, impulsionadas pelas alterações climáticas, globalização, agricultura intensiva, poluição ambiental e pressão demográfica, têm intensificado a emergência de novos desafios à segurança e à qualidade dos alimentos, com impactos diretos na sustentabilidade dos sistemas agroalimentares e, conseqüentemente, na saúde humana e animal^[1]. A cadeia de produção do milho, enquanto um dos principais pilares da alimentação humana e animal, revela-se especialmente crítica neste cenário.

Neste contexto, a ocorrência de toxinas naturais produzidas por plantas tem vindo a assumir particular relevância como fator de risco emergente. Entre estas, destacam-se os alcaloides do tropano (AT), um grupo de compostos tóxicos produzidos por plantas que figuram entre as mais antigas utilizadas pelo ser humano para fins medicinais, devido às suas propriedades terapêuticas quando administradas em doses controladas.

A atropina e a escopolamina são as toxinas mais relevantes desta classe, verificando-se um aumento significativo de episódios de intoxicação relacionados com o consumo de alimentos contaminados, em particular derivados de milho^[1]. Estas toxinas afetam o sistema nervoso periférico em humanos e animais, resultando na secura das mucosas das vias respiratórias superiores e gastrointestinais, dilatação das pupilas, retenção urinária e gástrica e alterações da frequência cardíaca. Em situações de exposição elevada, podem conduzir a quadros clínicos graves e, em casos extremos, à morte. As crianças e os idosos são especialmente vulneráveis^[2].

Os AT ocorrem predominantemente em espécies da família Solanaceae e, em particular, dos géneros *Datura*, *Atropa* e *Hyoscyamus*, nas quais podem atingir concentrações muito elevadas, tornando pequenas quantidades de material vegetal potencialmente perigosas. Atualmente, várias espécies destes géneros são consideradas infestantes e encontram-se amplamente distribuídas à escala global, tendo-se tornado invasivas tanto em climas temperados como tropicais^[1]. A sua crescente ocorrência em áreas agrícolas, particularmente em

culturas de milho, em Portugal e outras regiões da Europa, tem sido notória nos últimos anos, constituindo um risco relevante para a segurança e a integridade da cadeia de produção do milho.

Regulamentação e limites máximos permitidos

A preparação da regulamentação para consumo humano iniciou-se em 2013, quando a Autoridade Europeia para a Segurança dos Alimentos (EFSA) emitiu uma opinião onde identificou as crianças pequenas como as mais expostas aos efeitos dos AT, por consumirem uma proporção maior de alimentos à base de cereais por peso corporal. Por outro lado, também se vinha a registar na Europa casos de intoxicação de adultos através do consumo de chás e infusões contendo impurezas botânicas de espécies com AT. No seguimento, a Comissão Europeia (CE) publicou a Recomendação 2015/976 que aconselhava a intensificação da monitorização de AT em diversos cereais e produtos derivados (incluindo a farinha de milho), chás, infusões, suplementos alimentares, leguminosas e oleaginosas^[3]. No sentido de proteger a saúde de bebés e crianças pequenas, a Comissão Europeia publicou, em 2016, o Regulamento 2016/239, que impõe um limite máximo de 1,0 µg/kg de atropina e de escopolamina em alimentos à base de cereais para estas faixas etárias. Dado o crescente registo de casos de intoxicação por exposição a diferentes tipos de alimentos, tanto em Portugal como noutros países europeus, a CE alargou significativamente o controlo dos géneros alimentícios, incluindo 9 categorias no Regulamento (EU) 2023/915^[4].

Os atuais limites máximos de atropina e escopolamina em alimentos para bebés e crianças pequenas contendo milho ou seus derivados, ou a sua soma para os restantes alimentos, são indicados na Tabela 1.

Embora a determinação de concentrações de AT desta ordem exija a utilização de equipamentos analíticos modernos e altamente sofisticados, a CE demonstrou que os laboratórios europeus dispõem de competência analítica suficiente para dar cumprimento ao regulamento.

Tabela 1 – Limites máximos de atropina e escopolamina em alimentos contendo milho e/ou seus derivados

Produto	Atropina (µg/kg)	Escopolamina (µg/kg)
Alimentos infantis e alimentos processados à base de cereais para lactentes e crianças pequenas contendo milho ou os seus produtos derivados	1,0	1,0
Milho disponível ao consumidor final, seus produtos de moagem e milho para fazer pipocas		5,0
Milho não processado		15,0

Estudos de caso e evidências recentes

Durante vários anos, os episódios de contaminação por AT em géneros alimentícios permaneceram praticamente ausentes dos registos oficiais. A consulta ao Sistema de Alerta Rápido para Alimentos para Consumo Humano e Animal (RASFF, <https://webgate.ec.europa.eu/rasff-window/screen/search>) mostra que, entre 2010 e 2019, não existe qualquer notificação relacionada com estes compostos em milho ou nos seus derivados. É a partir de 2020 que começam a surgir notificações, tendo-se registado 18 surtos entre 2020 e 2025, com um aumento progressivo até 2023 e estabilização nos anos seguintes (Figura 1). Esta mudança pode refletir não apenas a emergência das plantas infestantes, mas também o reforço dos planos de monitorização, a definição mais clara de critérios regulamentares e a maior sensibilidade dos métodos analíticos atualmente utilizados.

As notificações resultaram maioritariamente de controlos oficiais ou de autocontrolo industrial,

conduzindo à retirada preventiva dos lotes antes da exposição generalizada. Ainda assim, 2023 ficou marcado, em Portugal, pelo surto associado ao consumo de broa de milho contaminada nas regiões de Leiria, Santarém, Coimbra e Aveiro, que afetou mais de duas centenas de pessoas com dezenas de hospitalizações^[5]. Na sequência deste episódio, a Direção-Geral de Alimentação e Veterinária (DGAV) publicou um manual de boas práticas para controlo de plantas infestantes tóxicas, dirigido a produtores, demonstrando que a prevenção e a capacitação do setor são caminhos a seguir^[2]. Desde então, foram notificados mais três casos associados a produtos derivados de milho, envolvendo diretamente Portugal, dois como país notificante (em 2025) e um como país de origem dos produtos (2024).

Os casos registados evidenciam que a segurança alimentar é um desafio transfronteiriço, uma vez que as notificações ocorrem sobretudo nos países importadores, enquanto a origem da contaminação

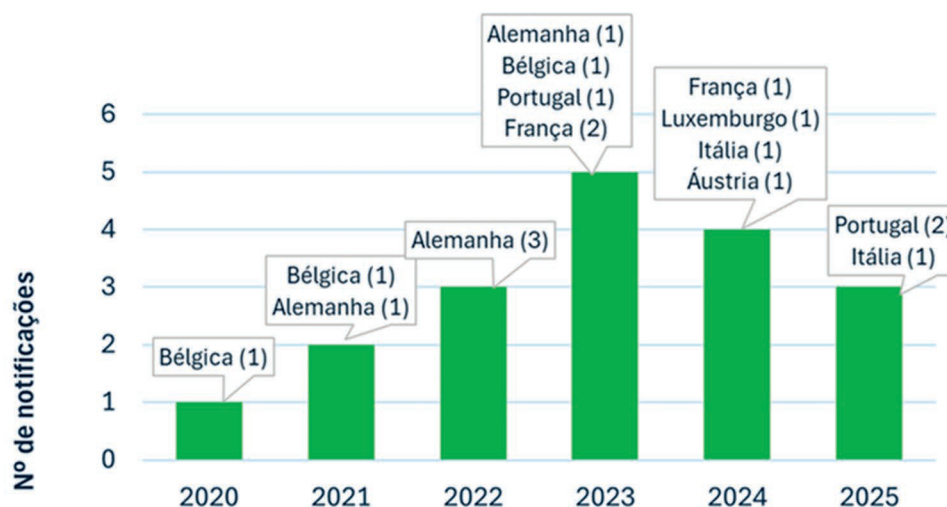


Figura 1 – Evolução do número de notificações de alcaloides de tropano em produtos à base de milho na União Europeia (2020–2025). Fonte RASFF Window (<https://webgate.ec.europa.eu/rasff-window/screen/search>).

se situa a montante da cadeia produtiva. Torna-se, assim, fundamental reforçar os sistemas de alerta rápido, não apenas a nível europeu, mas numa perspetiva de rede global que permita uma resposta célere e coordenada. A gestão eficaz destes incidentes exige a ação concertada de decisores políticos, autoridades de segurança alimentar, agricultores, operadores do setor alimentar e consumidores, sendo a segurança alimentar uma responsabilidade partilhada^[6].

Origem e vias de contaminação

A contaminação por AT na cadeia de produção do milho resulta maioritariamente da mistura acidental de sementes ou fragmentos de plantas produtoras destes compostos com os grãos destinados ao consumo humano e animal. Entre as espécies responsáveis, *D. stramonium* destaca-se pela sua elevada ocorrência, capacidade de disseminação e persistência no ambiente agrícola^[2].

Estas plantas infestantes são introduzidas nos campos por diferentes vetores, incluindo sementes contaminadas, estrumes ou corretivos orgânicos com sementes viáveis, cursos de água e/ou a movimentação de maquinaria agrícola (Figura 2). Cada planta pode produzir entre 5000 e 30 000 sementes, cuja viabilidade pode atingir de 20 a 40 anos, favorecendo a formação de bancos de sementes e a reinfestação ao longo de sucessivos ciclos culturais^[1].

A entrada destes contaminantes na cadeia de produção do milho ocorre, principalmente no campo, através da colheita conjunta de sementes tóxicas ou fragmentos vegetais com os grãos, sendo potenciada pela separação incompleta de impurezas na colheita mecanizada. Na fase de processamento, a ineficácia dos sistemas de limpeza e triagem pode permitir a permanência de resíduos contaminantes no produto final, sendo este risco agravado por procedimentos insuficientes de controlo de qualidade. Nestas situações, torna-se difícil identificar e



Figura 2 – Fontes de contaminação e mitigação na cadeia de produção do milho. Sementes e fragmentos de plantas tóxicas introduzem toxinas na cadeia do milho, enquanto estratégias agrícolas como monitorização, remoção de infestantes, rotação de culturas e uso de sementes certificadas ajudam a reduzir o risco.

remover lotes de matéria-prima ou alimentos contaminados, aumentando o risco de exposição no final da cadeia alimentar^[1].

As práticas agrícolas e as condições ambientais influenciam decisivamente este processo, uma vez que estratégias ineficazes de controlo de infestantes e fatores como temperaturas moderadas a elevadas (20–30 °C), elevada luminosidade e solos remexidos promovem a germinação, que pode atingir 70–90%, aumentando a persistência destas espécies nas culturas de milho e o risco de contaminação da matéria-prima destinada à alimentação humana e animal^[1].

Estratégias de gestão e mitigação

A mitigação do risco de contaminação por AT na cadeia de produção do milho requer uma abordagem integrada, que combine práticas preventivas no campo, controlos rigorosos durante o armazenamento e o processamento, e a capacitação dos intervenientes da cadeia alimentar (Figura 2).

A prevenção deve começar no campo e centrar-se na redução da presença de plantas produtoras de AT, através da (i) monitorização sistemática das parcelas; (ii) remoção mecânica ou manual de plantas tóxicas antes da maturação das sementes; (iii) rotação de culturas que dificulte a perpetuação de espécies invasoras; e (iv) utilização de sementes certificadas, livres de contaminantes. O uso seletivo de herbicidas, ajustado às condições locais e às espécies infestantes, pode complementar estas estratégias; contudo, a sua eficácia é atualmente limitada pelas restrições regulamentares à aplicação de determinados compostos e pelo aumento da resistência de algumas destas plantas tóxicas aos herbicidas disponíveis, o que dificulta o seu controlo químico e reforça a necessidade de abordagens integradas^[7].

Durante o armazenamento e a transformação, é fundamental implementar procedimentos de triagem e limpeza dos grãos, inspeção contínua e análises laboratoriais periódicas, especialmente em lotes provenientes de áreas de risco. A aplicação de sistemas HACCP (*Hazard Analysis and Critical Control Points*) permite identificar pontos críticos de controlo, garantindo a rastreabilidade e a eficácia das medidas corretivas^[1].

A formação e sensibilização de agricultores, técnicos e operadores da indústria constituem também elementos-chave para o sucesso destas estratégias, promovendo o reconhecimento de plantas tóxicas, a adoção de boas práticas agrícolas e o cumprimento dos requisitos regulamentares^[2].

Desafios analíticos na determinação de alcaloides do tropano

Embora as estratégias agrícolas sejam essenciais para reduzir a contaminação no campo, nem sempre conseguem eliminar completamente o risco de entrada destas toxinas na cadeia de produção do milho. Assim, os métodos analíticos tornam-se a etapa seguinte de prevenção, permitindo detetar contaminantes na matéria-prima e nos alimentos antes da sua chegada ao consumidor.

A determinação de AT em géneros alimentícios, incluindo no milho, exige três etapas fundamentais: amostragem, extração e deteção. Dada a sua ocorrência em baixas concentrações e a distribuição heterogénea nos lotes, a representatividade da amostra é determinante para a fiabilidade dos resultados. A presença pontual de sementes de plantas produtoras de AT pode originar “pontos quentes” de contaminação, tornando indispensável o cumprimento dos planos oficiais de amostragem definidos pela legislação europeia^[8].

Por outro lado, o milho é uma matriz complexa, rica em amido, proteínas e lípidos, que podem interferir na análise. Os AT, por serem compostos polares e mais solúveis em meio ligeiramente ácido, são geralmente extraídos com solventes como metanol ou acetonitrilo acidificados. Técnicas como extração sólido-líquido (SLE) e QuEChERS (acrónimo para método rápido, fácil, barato, eficaz, robusto e seguro) permitem a recuperação eficaz dos analitos e a redução dos efeitos de matriz, aumentando a sensibilidade e robustez dos métodos^[9].

Para confirmação e quantificação, cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas em *tandem* (LC-MS/MS), sobretudo com detetores triplo quadrupolo, é considerada o método de referência. Estas metodologias analíticas, embora apresentem elevada seletividade e sensibilidade, permitindo a

deteção de AT ao nível de $\mu\text{g}/\text{kg}$ e o cumprimento dos requisitos regulamentares europeus^[3], requerem equipamentos altamente especializados e dispendiosos, tornando a pesquisa de AT limitada a laboratórios capacitados. Seria, assim, desejável dispor de métodos

de pesquisa simples, sensíveis, rápidos e económicos que permitam uma despistagem de AT no campo. Além disso, os AT regulamentados são os que representam maior risco para a saúde pública, no entanto existem mais de 60 AT conhecidos na *D. stra-*

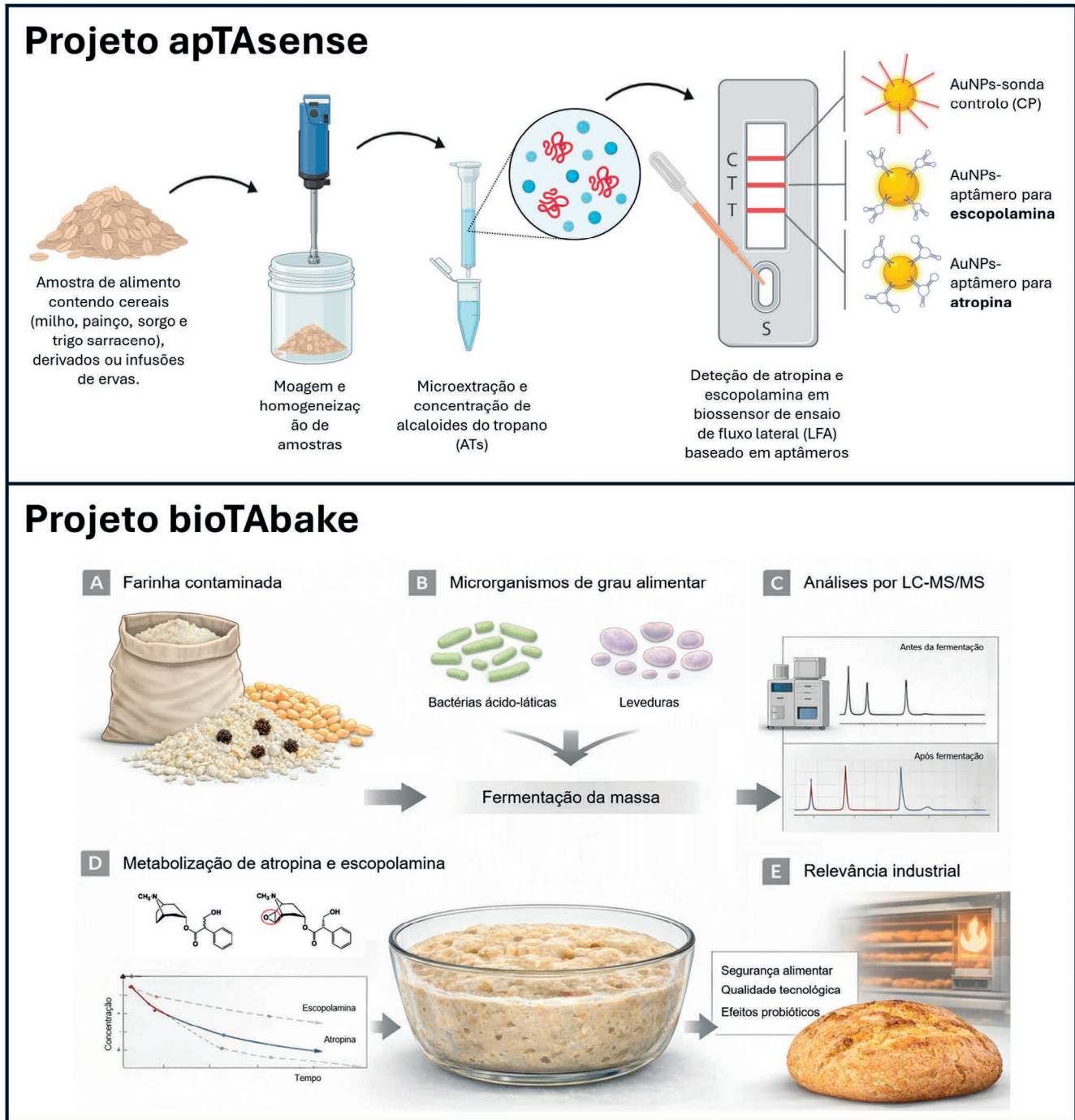


Figura 3 – Resumo das soluções inovadoras para controlo de alcaloides do tropano (AT). Projetos do INIAV abordam a deteção rápida em campo com aptâmeros (projeto ApTAsense) e a mitigação durante a fermentação com microrganismos de grau alimentar (projeto bioTABake).

monium, a maior parte dos quais não é pesquisada em rotina^[10]. É assim necessário ter em conta a diversidade e toxicidade de outros compostos desta classe no futuro da segurança alimentar da cadeia de produção do milho.

Avanços biotecnológicos e soluções emergentes

Face ao impacto crescente dos AT na cadeia de produção do milho e às limitações das abordagens convencionais de controlo, torna-se necessário desenvolver estratégias inovadoras que permitam a sua deteção precoce e mitigação a jusante da cadeia produtiva. Neste âmbito, projetos recentes desenvolvidos no INIAV exploram soluções biotecnológicas baseadas, por um lado, na deteção rápida em campo e, por outro, na redução destes contaminantes durante o processamento alimentar (Figura 3).

O projeto ApTAsense (<https://doi.org/10.54499/2024.13912.PEX>) propõe o desenvolvimento de uma estratégia inovadora para a deteção de AT, baseada na utilização de aptâmeros, pequenos ácidos nucleicos de ADN de cadeia simples, selecionados por SELEX, com elevada afinidade e especificidade para atropina e escopolamina. Após caracterização biofísica e funcional, os aptâmeros mais promissores serão integrados no biossensor de fluxo lateral, cujo desempenho será validado em amostras reais de alimentos e comparado com métodos de referência, com o objetivo de disponibilizar uma ferramenta prática para a triagem precoce de matéria-prima e/ou alimentos contaminados.

O projeto bioTABake (<https://doi.org/10.54499/2024.14752.PEX>) propõe uma abordagem biotecnológica baseada na utilização de microrganismos de grau alimentar, nomeadamente bactérias ácido-lácticas e leveduras, capazes de metabolizar atropina e escopolamina durante a fermentação na panificação. A sua eficácia será testada em sistemas experimentais progressivamente mais complexos, visando a validação em condições próximas da realidade industrial. Esta abordagem poderá permitir a redução dos teores de AT em farinhas contaminadas utilizadas na produção de broa de milho, sendo particularmente relevante dada a elevada estabili-

dade térmica destes compostos. Pretende-se que seja uma solução industrialmente viável e que contribua para a produção de produtos de panificação mais seguros e com potencial valor probiótico.

Em conjunto, estas abordagens demonstram o potencial da biotecnologia para fornecer soluções complementares e inovadoras, capazes de reforçar a deteção precoce e a mitigação dos AT na cadeia do milho, contribuindo para uma gestão mais eficaz do risco e para o aumento da segurança alimentar.

Conclusões e perspetivas futuras

A emergência dos AT na cadeia de produção do milho coloca desafios relevantes a nível regulatório e analítico. Nos últimos anos, a União Europeia reforçou o enquadramento legislativo através da harmonização de limites máximos para atropina e escopolamina e da ampliação da monitorização a novas matrizes alimentares, representando um avanço na proteção do consumidor. Contudo, persistem dificuldades relacionadas com a persistência das plantas tóxicas em ambientes agrícolas, a distribuição heterogénea em matrizes e a necessidade de métodos analíticos sensíveis, robustos e custo-efetivos. Neste enquadramento, a investigação futura deverá centrar-se no desenvolvimento de ferramentas de deteção inovadoras, portáteis e de baixo custo, capazes de complementar os métodos laboratoriais de referência, bem como em estratégias de mitigação ao longo da cadeia alimentar, incluindo abordagens biotecnológicas baseadas em microrganismos seguros e processos fermentativos controlados. Será igualmente crucial aprofundar o conhecimento sobre a ecologia das plantas produtoras de AT, os efeitos das alterações climáticas na sua disseminação e a eficácia de práticas agrícolas integradas, de modo a reforçar a prevenção na origem e uma gestão sustentável do risco na cadeia de produção do milho. ☹

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT, I.P.), no âmbito do projeto ApTAsense (DOI: <https://doi.org/10.54499/2024.13912.PEX>) e do projeto bioTABake (DOI: <https://doi.org/10.54499/2024.14752.PEX>).

Bibliografia

- [1] FAO e WHO (2020). *Guidance document on physical Datura stramonium seed contamination*. Rome. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb2105en>.
- [2] DGAV (2024). *Manual de Boas Práticas: Controlo de Plantas Infestantes Tóxicas: Caso particular da Datura stramonium L.* (disponível em www.dgav.pt).
- [3] Comissão Europeia (2015). *Recomendação (UE) 2015/976 da Comissão* (disponível em <https://eur-lex.europa.eu/eli/reco/2015/976/oj/eng>).
- [4] Comissão Europeia (2023). *Regulamento (UE) 2023/915 da Comissão* (disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:02023R0915-20251008>).
- [5] DGS e ASAE (2023). *Recomendação de Não Consumo de Broa de Milho em regiões específicas do país*.
- [6] HLPE (2020). *Food security and nutrition: building a global narrative towards 2030*. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security. Rome (disponível em www.fao.org/cfs/cfs-hlpe).
- [7] ASAE (2025). *Alcaloides do Tropano em Farinhas e Pães de Milho: Riscos Detetados e Boas Práticas de Mitigação* (disponível em <https://www.asae.gov.pt/newsletter2/asaenews-n-133-agosto-2025/alcaloides-do-tropano-em-farinhas-e-paes-de-milho-riscos-detetados-e-boas-praticas-de-mitigacao.aspx>).
- [8] Comissão Europeia (2023). *Regulamento de Execução (UE) 2023/2783 da Comissão* (disponível em https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2023/2783/oj/eng).
- [9] Parente, I.; Soares Mateus, A.R.; Cruz Barros, S.; Pena, A.; Sanches Silva, A. 2025. *Tropane alkaloids in food. In: Chemical contaminants in foods. Understanding and managing risks*, 573–603.
- [10] Gonçalves, C. et al. (2020). *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, 1–32.

PUB

Tel: 214 660 773 ◯ www.aquagri.com ◯ info@aquagri.com

aquagri

Com a cabeça no ar, mas com os pés
bem assentes na *terra*

