

**Universidade de Lisboa
Faculdade de Farmácia**



Alimentos Geneticamente Modificados na Promoção da Saúde

Daniela Cristina Pereira do Vale

Dissertação orientada pela Professora Doutora Maria Henriques
Lourenço Ribeiro

Mestrado Qualidade Alimentar e Saúde

2025

**Universidade de Lisboa
Faculdade de Farmácia**



Alimentos Geneticamente Modificados na Promoção da Saúde

Daniela Cristina Pereira do Vale

Dissertação orientada pela Professora Doutora Maria Henriques
Lourenço Ribeiro

Mestrado Qualidade Alimentar e Saúde

2025

Agradecimentos

Chegando ao fim desta longa etapa umas das mais felizes e desafiantes de toda a minha vida, não poderia deixar de agradecer a todos aqueles que sempre tiveram do meu lado neste percurso, aqueles que me deram as palavras mais sábias nos momentos adequados, a todos aqueles que foram a força e motivação que precisava e principalmente aqueles que foram o colo e o abraço que me reconfortaram nos piores momentos.

Em primeiro quero agradecer ao meu pai José Vale por todo o apoio que me deu a todos os níveis para que pudesse concretizar o curso, à minha mãe Francisca Vale por ter sido um grande apoio tanto nos bons momentos como nos maus, à minha irmã Sara Vale que foi o meu braço direito e a confiança que me faltava muitas vezes e aos meus sobrinhos Luz Rolim e Miguel Rolim por mostrarem que as complicações da vida podem ser muito mais simples como pintamos.

Também quero agradecer a todos os professores que fizeram parte do meu percurso escolar até este momento porque sem eles não seria a aluna que sou hoje e, quero agradecer principalmente à minha orientadora Maria Henriques Lourenço Ribeiro por todo o apoio e orientação demonstrada.

Também agradeço aos meus colegas de turma por estes 2 anos juntos no Mestrado de Qualidade Alimentar e Saúde por terem sido uns colegas imprescindíveis. Por fim, mas, não menos importante obrigada aos meus amigos e ao meu namorado por serem o meu maior suporte, porto de abrigo e por me darem sempre a força necessária.

Declaração

Declaro ter desenvolvido e elaborado o presente trabalho em consonância com o Código de Conduta e de Boas Práticas da Universidade de Lisboa. Mais concretamente, afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de fraude académica, que aqui declaro conhecer, e que a presente monografia atende à exigida referência de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, assumindo na íntegra as responsabilidades da autoria.

Resumo

Ao longo do tempo, tem havido avanços na biotecnologia, e os alimentos geneticamente modificados, foram uma das principais inovações na agricultura e na nutrição, permitindo a introdução de características desejáveis, como a resistência a pragas, melhorias a nível nutricional e aumento da vida útil do alimento.

Esta dissertação aborda o papel dos AGMs na promoção da saúde humana, destacando o seu potencial na biofortificação de alimentos, na prevenção de doenças relacionadas a carências nutricionais e redução do uso de agroquímicos.

São analisadas as principais técnicas de produção de AGMs, incluindo a transformação via *Agrobacterium tumefaciens*, a biobalística, a eletroporação, e novas técnicas, bem como o panorama legislativo europeu e português.

Os resultados evidenciam que os AGMs oferecem benefícios significativos, como o arroz dourado enriquecido com vitamina A, a mandioca biofortificada com ferro e zinco e a soja com perfil lipídico otimizado, que podem reduzir deficiências nutricionais em populações vulneráveis. Adicionalmente, a utilização de culturas resistentes a pragas diminui a aplicação de pesticidas, beneficiando a saúde pública.

Existem desafios e algumas controvérsias, incluindo principalmente preocupações sobre os potenciais riscos para a saúde humana, impactos ambientais e aceitação pública. Assim as perspectivas futuras incluem a integração de AGMs como alimentos funcionais e auxiliares da terapêutica, contribuindo para a nutrição personalizada e a segurança alimentar global, desde que acompanhados por uma regulamentação rigorosa e uma comunicação científica transparente.

Palavras-Chave: AGM; Saúde; Segurança Alimentar; Inovação; Biofortificação

Abstract

Over time, there have been advances in biotechnology, and genetically modified foods have been one of the main innovations in agriculture and nutrition, allowing the introduction of desirable traits such as pest resistance, nutritional improvements, and increased shelf life.

This dissertation addresses the role of GMOs in promoting human health, highlighting their potential for food biofortification, preventing diseases related to nutritional deficiencies, and reducing the use of agrochemicals.

The main GMO production techniques are analyzed, including transformation via *Agrobacterium tumefaciens*, biolistics, electroporation, and new techniques, as well as the European and Portuguese legislative landscape.

The results show that GMOs offer significant benefits, such as golden rice enriched with vitamin A, cassava biofortified with iron and zinc, and soybeans with an optimized lipid profile, which can reduce nutritional deficiencies in vulnerable populations. Additionally, the use of pest-resistant crops reduces pesticide use, benefiting public health.

There are challenges and some controversies, including concerns about potential risks to human health, environmental impacts, and public acceptance. Therefore, future prospects include the integration of GMOs as functional foods and therapeutic aids, contributing to personalized nutrition and global food security, provided they are accompanied by strict regulation and transparent scientific communication.

Keywords: GMO; Health; Food Safety; Innovation; Biofortification

Índice

1. Introdução	10
1.1 Objetivos	12
2. Metodologia	13
3. Alimentos Geneticamente Modificados.....	15
3.1 Classificação dos AGMs por Geração	15
3.2 Produção	16
3.3 Técnicas Utilizadas na Produção de Alimentos Geneticamente Modificados.....	17
3.3.1. Transformação por <i>Agrobacterium tumefaciens</i>	17
3.3.2. Bombardeamento de Partículas (Biobalística).....	19
3.3.3. Eletroporação	20
3.4 Plantação	22
3.5 Detecção, Quantificação e Identificação	24
3.5.1 Métodos de Detecção por análise de DNA.....	24
3.5.1.1 PCR Qualitativo	25
3.5.1.2 PCR em tempo real	25
3.5.2 Métodos de Detecção na análise de proteínas	26
3.5.2.1 ELISA	26
3.5.2.2 Dispositivos com tiras de fluxo lateral	27
3.5.2.3 Cromatografia Líquida.....	28
3.6 Legislação	28
3.7 Rotulagem.....	30
3.8 Benefícios dos Alimentos Geneticamente Modificados na Promoção da Saúde ..	30
3.9 Riscos e Controvérsias Associadas aos AGMs.....	32
3.10 Estudos de Caso e Exemplos de Aplicação dos AGMs na Saúde Pública	33
3.10.1. Arroz Dourado e Deficiência de Vitamina A	33
3.10.2. Mandioca Enriquecida com Ferro e Zinco.....	34
3.10.3. Batata com Menos Acrilamida	35
3.10.4. Bananas Enriquecidas	36
3.11 Futuro dos Alimentos Geneticamente Modificados	37
3.11.1 Tendências futuras da biotecnologia alimentar	37
3.11.2 Barreiras e desafios	38
Conclusão.....	40
Referências Bibliográficas	41

Índice de figuras

Figura 1- Fases de Produção de um alimento geneticamente modificado	17
Figura 2 Etapas Transformação <i>Agrobacterium Tumefaciens</i>	19
Figura 3 Etapas Bombardeamento de Partículas	20
Figura 4 Processo da Eletroporação	21
Figura 5: Área de Cultivo de milho entre 2005 e 2012.....	22
Figura 6 Países com cultivo de AGM	23
Figura 7 Distribuição global das culturas geneticamente modificadas em 2024.....	23

Índice de tabela

Tabela 1:Áreas e Zonas de cultivo em Portugal (Direção-Geral de Alimentação e Veterinária	24
---	----

Lista de Abreviaturas

- AGM – Alimento Geneticamente Modificado
- AGMs - Alimentos Geneticamente Modificados
- ADN - Ácido Desoxirribonucleico
- OGM- Organismo Geneticamente Modificado
- OGMs- Organismos Geneticamente Modificados
- Bt – *Bacillus thuringiensis*
- T-DNA – *Transfer DNA* (DNA de transferência)
- PCR – *Polymerase Chain Reaction* (Reação em Cadeia da Polimerase)
- ELISA – *Enzyme Linked Immunosorbent Assay*
- EFSA – *European Food Safety Authority* (Autoridade Europeia para a Segurança Alimentar)
- FDA – *Food and Drug Administration*
- CE – Comissão Europeia
- DGAV – Direção-Geral de Alimentação e Veterinária
- DRAP – Direção Regional de Agricultura e Pescas
- EU – União Europeia
- EC – *European Commission* (Comissão Europeia)
- GR1 – *Golden Rice 1*
- GR2 – *Golden Rice 2*
- IRT1 – *Iron-Regulated Transporter 1*
- FER1 – Ferritina 1
- VIT1 – *Vacuolar Iron Transporter 1*
- ISAAA – *International Service for the Acquisition of Agri-biotech Application*

1. Introdução

Com os avanços na biotecnologia houve inovações significativas tanto para a agricultura como para a produção de alimentos, sendo os alimentos geneticamente modificados uma das grandes conquistas deste progresso. Com estes avanços revolucionou-se o setor agroalimentar, introduzindo-se uma nova geração de alimentos conhecidos como alimentos geneticamente modificados (AGMs). Estes alimentos são produzidos, principalmente, através da manipulação direta do ADN de organismos, com o intuito de conferir características desejáveis, entre outras, resistência a pragas, melhoria na qualidade nutricional ou prolongamento da vida útil (Costa & Almeida, 2020). Entre as várias vantagens associadas aos AGMs, destaca-se o seu potencial para contribuir significativamente para a promoção da saúde humana, especialmente em contextos de carência nutricional crónica.

Os alimentos geneticamente modificados são definidos pela Organização Mundial de Saúde como alimentos que derivam de organismos cujo material genético foi alterado de forma não natural, como por exemplo, introdução de um gene de um organismo da mesma espécie ou de espécie diferente (Organização Mundial da Saúde, 2020).

No ponto 2 do artigo 2º da Diretiva 201/18/CE do Parlamento Europeu, define-se um alimento geneticamente modificado da seguinte forma: “(...), qualquer organismo, com exceção do ser humano, cujo material genético tenha sido modificado de uma forma que não ocorre naturalmente por meio de cruzamentos e/ou de recombinação natural” (Diretiva 201/18/CE, 2018).

Este tipo de alimento é modificado através de técnicas da chamada “Biotecnologia moderna” ou “Engenharia genética”. Este tipo de tecnologia permite que os genes individuais selecionados sejam transferidos de um organismo para o outro, seja da mesma espécie ou de outra, permitindo identificar, selecionar e modificar sequências de DNA para determinada característica genética de um organismo dador, transferindo para um organismo recetor de forma a expressar a característica desejada (Organização Mundial da Saúde, 2020).

Devido a serem originados de novas técnicas de produção, a introdução destes alimentos tem sido alvo de intensos debates científicos, económicos e sociais. Enquanto críticos levantam preocupações sobre segurança alimentar, impactos ambientais e efeitos a longo prazo na saúde humana, defensores destacam os benefícios nutricionais,

a capacidade de mitigar deficiências nutricionais em populações vulneráveis, e a redução do uso de pesticidas.

Estes géneros alimentícios só são comercializados após passarem por avaliações de segurança conduzidas por autoridades internacionais e nacionais. As avaliações seguem os princípios básicos, incluindo a avaliação de risco ambiental e a saúde humana, com base em documentos do Códex (Organização Mundial da Saúde, 2020).

Estudar os alimentos geneticamente modificados e os seus impactos na saúde é essencial para compreender tanto os benefícios quanto os riscos associados ao seu consumo. Através da biotecnologia tem sido possível desenvolver culturas mais resistentes, menos dependentes de agroquímicos, com maior valor nutricional, o que pode contribuir para uma maior segurança alimentar e promoção de saúde.

No campo da promoção da saúde, os AGMs apresentam um grande potencial. A biofortificação de alimentos, como o arroz dourado enriquecido com vitamina A e culturas resistentes a pragas e doenças, podem contribuir para a redução de deficiências nutricionais e doenças relacionadas à alimentação. Além disso, a modificação genética possibilita o desenvolvimento de alimentos hipoalergénicos e de produtos mais acessíveis para comunidades com dificuldades de acesso a alimentos nutritivos.

Mesmo com benefícios a nível da segurança alimentar e promoção da saúde, existe um outro lado, em que os críticos levantam preocupações em relação aos possíveis efeitos adversos à saúde, como reações alérgicas, resistência a antibióticos e eventuais impactos que não são atualmente conhecidos.

1.1 Objetivos

Diante deste cenário, a relevância desta dissertação vai ao encontro do objetivo de demonstrar a necessidade de avaliar, com base em evidências científicas, os impactos dos AGMs na saúde pública.

Para atingir este objetivo geral os seguintes objetivos específicos foram definidos:

1. Avaliação dos efeitos dos AGMs na saúde pública, identificando riscos, benefícios.
2. Analisar de que forma a evidência científica existente pode fundamentar políticas regulatórias relacionadas ao uso de AGMs.
3. Identificar recomendações que possam apoiar estratégias de saúde pública, regulação e comunicação no tema dos AGMs.

Nesta perspectiva o estudo visa também contribuir para informar políticas regulatórias e estratégias de comunicação científica, promovendo um debate mais equilibrado e baseado em dados concretos.

2. Metodologia

O presente trabalho pretendeu dar resposta a algumas questões relacionadas com o impacto dos AGM na promoção da saúde e prevenção da doença nas populações. Assim o projeto encontra-se delineado em várias fases, identificadas a seguir.

Fase 1 – Avaliação do estado da arte dos AGM através da pesquisa em bases de dados como o Pubmed, Google Scholar, livros da especialidade, entidades regulamentares, nomeadamente *Food and Drug Administration (FDA)*, *European Food Safety Agency (EFSA)*, Comissão Europeia (CE), entre outras. As palavras utilizadas na pesquisa de estudos foram: Alimentos Geneticamente modificados; Promoção na saúde; Inovação; População menos nutritiva.; *Food Safety*; AGM; OGM; Alteração Genética.

Os critérios de inclusão utilizados na seleção de estudos foram: Estudos publicados nos últimos anos; Estudos em alimentos geneticamente modificados mais comercializados e consumidos; Publicações em inglês; Revisões e relatórios de organizações internacionais.

Os critérios de exclusão foram: Artigos sem base científica; Artigos publicados há alguns anos; Estudos que não fornecem dados claros sobre a produção, segurança e impacto ambiental.

Foram vistos 50 estudos e selecionados 4 estudos.

Fase 2 – O trabalho nesta fase pretendeu dar resposta à seguinte questão: Como vão evoluir os AGM, em termos de produção, de segurança e de impacto no ambiente?

Para responder a esta pergunta, procedeu-se a uma análise integrada da literatura científica atual, incluindo estudos, revisões e relatórios. Em termos da produção dos OGM, procurou-se identificar tendências tecnológicas, como uso de técnicas, que aumentam a produtividade das culturas e resistência a pragas. Em relação a segurança alimentar, foram analisados dados de avaliação de risco, ensaios toxicológicos, com o objetivo de compreender como estes tipos de organismos podem evoluir e oferecer maior segurança e aceitação.

No que toca ao impacto ambiental, examinou-se evidências sobre biodiversidade, uso de pesticidas.

Toda a abordagem permitiu uma resposta fundamentada e baseada em dados científicos e tendências observadas, contribuindo para uma visão crítica e realista em relação ao futuro dos AGM.

Fase 3 – Esta fase incluiu a avaliação de casos de estudo, em que foram utilizados AGM na perspectiva da promoção da saúde, por exemplo avaliação de características nutricionais destes alimentos. Os casos de estudo foram pesquisados em bases de dados como Pubmed; Google Scholar; Scopus, Web of Science.

Fase 4 – Nesta etapa do projeto incluiu-se a pesquisa de casos de estudo e de ensaios clínicos, em que foram utilizados AGM na perspectiva de prevenção de doenças, como exemplo a utilização em vacinas. Os casos de estudo foram pesquisados em bases de dados científicas (Pubmed; Web of Science; Google Scholar; Scielo) e a pesquisa teve uma duração de seis meses.

Fase 5 – Elaboração de propostas de forma a promover a saúde e prevenir a doença com base no vértice Alimentos Geneticamente Modificados: Produção, Eficácia, Segurança. E comparação com as guidelines publicadas para estes alimentos.

Fase 6 – Escrita da dissertação.

3. Alimentos Geneticamente Modificados

Atualmente existem diferentes tipos de alimentos, como os naturais, que são obtidos diretamente da natureza e não sofrem qualquer tipo de processamento, como por exemplo: legumes e vegetais, em natureza (Pfizer, 2020).

Os alimentos processados são aqueles que sofreram alguma alteração através de processos como aquecimento, congelamento ou corte. Os ultraprocessados são alimentos já fabricados e preparados, como no caso das batatas fritas e bolos industriais

(Pfizer, 2019). Os alimentos geneticamente modificados são definidos pelo Artigo 2º da Directiva Europeia 2001/18/EC, como “qualquer organismo, com exceção do ser humano, cujo material genético tenha sido modificado de uma forma que não ocorre naturalmente por meio de cruzamentos e/ou recombinação natural, ou seja, através de técnicas de engenharia genética” (EC, 2001).

3.1 Classificação

Os AGMs podem ser classificados em diferentes gerações:

Primeira geração: Os alimentos geneticamente modificados de primeira geração têm como foco a produtividade e resistência, incluem as plantas geneticamente modificadas com características agronômicas resistentes a herbicidas, a pragas e a vírus. Formam o primeiro grupo de plantas modificadas (exemplo: milho Bt resistente a insetos) (Rocha & Marin, 2011).

Segunda geração: O ênfase da modificação genética é na qualidade nutricional e funcional dos alimentos, como o arroz dourado ou a soja com perfil lipídico melhorado (Rocha & Marin, 2011).

Terceira geração: Estas culturas foram produzidas com o objetivo de fins medicinais incluindo a produção de agentes farmacêuticos, biocombustíveis e outros produtos de utilidade industrial (Rocha & Marin, 2011).

3.2 Produção

A engenharia genética permite a transferência de genes de um organismo para outro (da mesma espécie ou de espécie diferente), permitindo identificar, selecionar e modificar sequências de DNA com uma determinada característica genética do organismo dador, transferindo a sequência para o organismo recetor, para que expresse essa característica. Como resultado, um organismo geneticamente modificado (OGM) conterà características modificadas ou adicionais, codificadas pelos genes introduzidos ou alterados (Barros, 2017). Quando o material genético é originário de uma espécie diferente, o organismo resultante designa-se também transgénico (Johns & Eyzaguirre, 2007).

Para a produção de um organismo geneticamente modificado, é necessário seguir diferentes fases, nomeadamente (Figura 1):

Identificação do gene: Identifica-se o gene que apresenta a característica pretendida

Prova de conceito: Há uma otimização genética onde o gene que foi identificado é alterado no produto final;

Desenvolvimento inicial e avançado: O alimento geneticamente modificado é submetido a diferentes testes com o objetivo de averiguar se cumpre as normas necessárias para a sua produção;

Pré-lançamento: O dossier de avaliação de risco é desenvolvido e entregue às autoridades responsáveis e inicia-se a produção (Barros, 2017). O processo inclui várias fases e testes principais. Tem que haver uma **caracterização molecular** e genética do organismo (Método utilizado; Ausência de sequências não desejadas; Expressão do gene introduzido) (Comissão Europeia, 2013).

Deve-se realizar uma caracterização comparativa entre o AGM e organismos convencionais (Comissão Europeia, 2013).

Uma avaliação toxicológica e de alergias também deve ser realizada, através de estudos de toxicidade e de toxicidade subcrónica de 90 dias e de alergias através de testes *in vitro* e *in vivo* se for necessário (Comissão Europeia, 2013).

Por fim, deve-se fazer avaliação nutricional e de impacto ambiental se for aplicável (se o cultivo for destinado a interações com outras espécies) (Comissão Europeia, 2013).

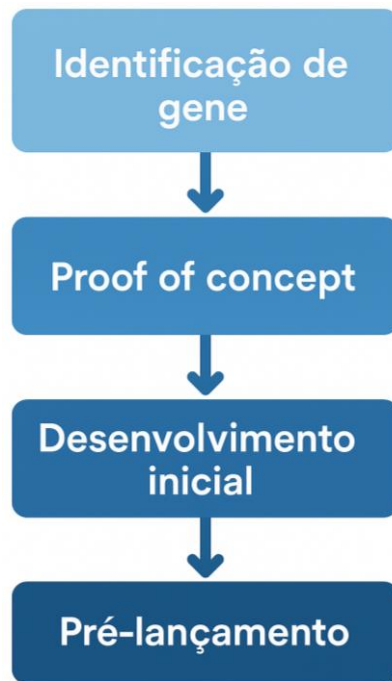


Figura 1- Fases de Produção de um alimento geneticamente modificado (Barros,2017)

3.3 Técnicas Utilizadas na Produção de Alimentos Geneticamente Modificados

Para obter os Alimentos Geneticamente Modificados tem que se introduzir ou alterar sequências genéticas nos genomas das plantas, através de diversas estratégias. As técnicas indicadas a seguir variam em precisão, complexidade técnica e aplicabilidade às diferentes espécies vegetais.

3.3.1. Transformação por *Agrobacterium tumefaciens*

A transformação genética via *Agrobacterium tumefaciens* explora a capacidade natural desta bactéria fitopatogénica de transferir uma porção específica do seu plasmídeo Ti (plasmídeo indutor de tumor) — designadamente o DNA de transferência (T-DNA) — para o genoma nuclear da célula vegetal hospedeira. A engenharia genética substitui os genes oncogénicos do T-DNA por genes de interesse agronómico ou nutricional, mantendo intactos os elementos cis-regulatórios essenciais para a inserção estável.

As principais etapas incluem (Figura 2):

- **Clonagem** do gene de interesse no vetor binário contendo os limites do T-DNA: Nesta primeira etapa, insere-se o gene que se deseja introduzir na planta (por exemplo, um gene que confere resistência a pragas) num pequeno fragmento de DNA circular, chamado vetor binário. Este vetor contém regiões chamadas limites do T-DNA, que são reconhecidas pela *Agrobacterium* e permitem que o gene seja transferido para a planta.
- **Conjugação:** mistura-se a *Agrobacterium* com outra bactéria que já contém o vetor, permitindo a transferência natural do plasmídeo.
- **Eletroporação:** aplica-se uma descarga elétrica que “abre poros” temporários na membrana da *Agrobacterium*, permitindo que o vetor entre.
- Co-cultivo com explantes vegetais sob condições otimizadas de indução de virulência: Os **explantes vegetais** são colocados em contacto direto com a *Agrobacterium* durante um período chamado **co-cultivo**. Durante esse tempo, a bactéria ativa genes de virulência e **transfere o gene desejado para as células da planta**, inserindo-o no DNA da planta.
- Seleção e regeneração das células transformadas em meio seletivo com antibióticos ou herbicidas: Esta etapa acontece após o co-cultivo, os explantes são transferidos para um **meio de cultura com antibióticos ou herbicidas**. Este meio mata as células que **não receberam** o gene (e, por isso, não têm resistência), e **permite crescer apenas as células que foram geneticamente modificadas**. A partir dessas células selecionadas, com estímulos hormonais no meio, **regenera-se a planta completa** com o gene novo.

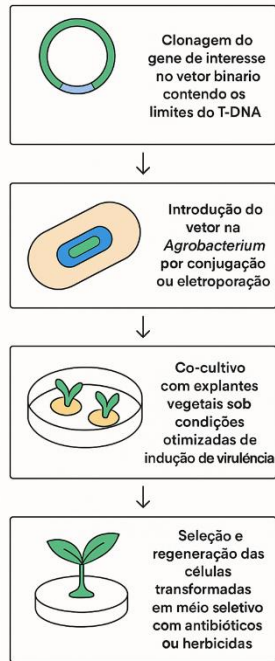


Figura 2 Etapas Transformação *Agrobacterium Tumefaciens* (Andrade, 2003)

3.3.2. Bombardeamento de Partículas (Biobalística)

A Biobalística é uma técnica de bombardeamento de partículas, em que consiste na propulsão de micropartículas inertes revestidas com DNA recombinante sobre células vegetais, utilizando um dispositivo chamado de “gene gun”. A energia cinética das partículas vai permitir a penetração física na parede celular, promovendo a incorporação e potencial integração do transgene no genoma nuclear.

As principais **etapas** da biobalísticas incluem (Figura 3) (Andrade, 2003):

- **Preparação das partículas:** Nesta primeira etapa as partículas metálicas de ouro ou tungstênio são revestidas com o DNA de interesse usando protocolos de forma a garantir a aderência do material genético (Andrade, 2003).
- **Preparação do material biológico:** As células são preparadas em condições estéreis de forma a receber as partículas geneticamente carregadas, e ocorre em placas de cultura ou em membranas específicas (Andrade, 2003).
- **Bombardeamento:** Acelera-se a alta velocidade as partículas revestidas com o gene gun para penetrar nas células alvo, permitindo que ocorra a transferência do material genético para o citoplasma (Andrade, 2003).

- **Incorporação do DNA:** O DNA pode integrar-se no genoma da célula hospedeira de forma estável, resultando em uma modificação genética estável (Andrade, 2003).
- **Recuperação e seleção:** As células transformadas são cultivadas num meio seletivo, onde as células que incorporam o gene marcado resistem e sobrevivem (Lee et al., 2020).
- **Regeneração da planta:** As células geneticamente modificadas são induzidas a regenerar plantas completas por meio da cultura de tecidos, completando o processo de obtenção de plantas transgênicas (Andrade, 2003).

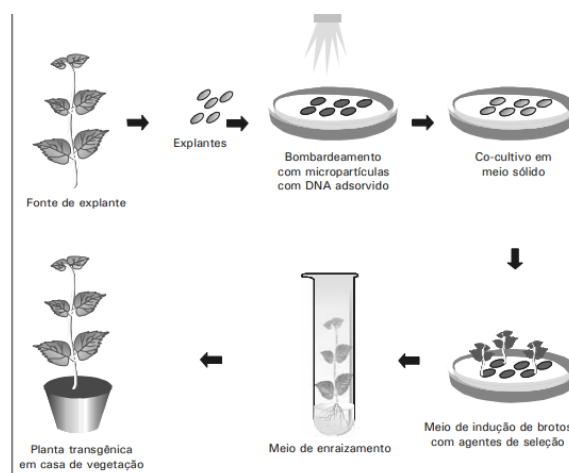


Figura 3 Etapas Bombardeamento de Partículas (Andrade, 2003)

3.3.3. Eletroporação

A eletroporação é um método que consiste no emprego de pulsos elétricos curtos de alta voltagem que vão alterar temporariamente a estrutura da membrana plasmática, induzindo a formação de poros ao longo da sua superfície. Sendo possível aumentar a permeabilidade da membrana, possibilitando a entrada do gene exógeno.

A carga a que a membrana é submetida, resulta em forças eletrostáticas que levam à compressão e a formação de poros nessa membrana.

As principais **Etapas** da eletroporação incluem (Figura 4) (Andrade, 2003):

Preparação das células-alvo: As células vegetais, bacterianas ou de leveduras são cultivadas até a fase ideal de crescimento e lavadas com soluções isotônicas (por

exemplo, tampões contendo glicerol ou sorbitol) para remover íons que poderiam causar arco elétrico ou morte celular durante o pulso (Andrade, 2003).

Mistura do DNA com as células: O DNA exógeno, como plasmídeos ou fragmentos lineares, é misturado à suspensão de células eletrocompetentes em condições estéreis, normalmente em cuvetes específicas para eletroporação (Andrade, 2003).

Aplicação do pulso elétrico: Um pulso elétrico de alta voltagem (geralmente entre 300 e 2000 V/cm, dependendo do tipo celular) é aplicado com um eletroporador. Esse pulso cria poros temporários na membrana, permitindo a entrada do DNA no citoplasma e, em alguns casos, no núcleo (Andrade, 2003).

Recuperação celular: Após a aplicação do pulso, as células são incubadas por um período de recuperação em meio líquido rico, permitindo que a membrana se repare e que ocorra a expressão inicial do DNA inserido (Andrade, 2003).

Seleção dos transformantes: As células recuperadas são cultivadas em meio seletivo contendo antibióticos, herbicidas ou marcadores visuais, garantindo que apenas as que incorporaram o DNA sobrevivam e se multipliquem (Gupta & Tyagi, 2023).

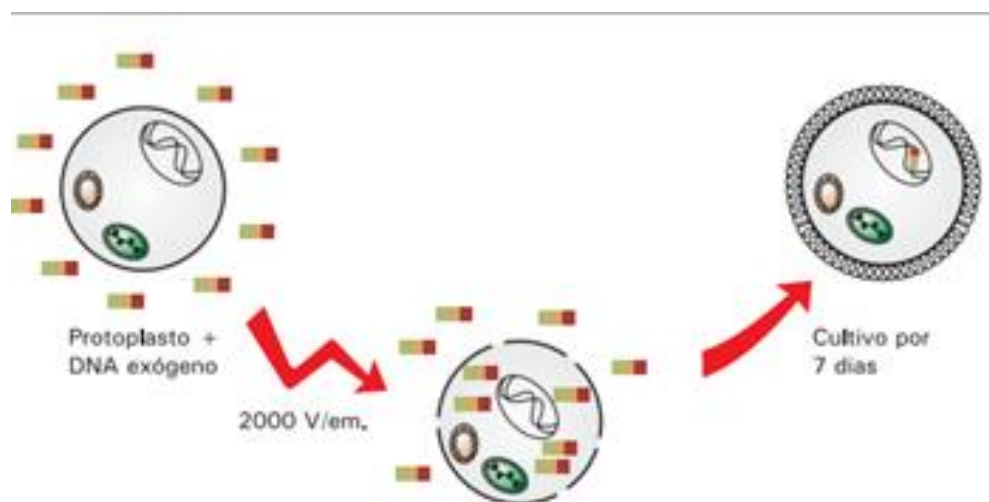


Figura 4 Processo da Eletroporação (Andrade, 2003)

3.4 Plantação

Ao longo dos anos assiste-se a uma utilização crescente de OGMs.

Em Portugal, a única variedade GM cultivada é o milho MON 810, cuja área de cultura em 2010 totalizou 4869 hectares, a que corresponde um decréscimo de 4,4% em relação a 2009 (Apitz, 2012). Em 2012, os dados do Relatório de Acompanhamento da Direção Geral de Alimentação e Veterinária (DGAV) indicam que a área de milho GM aumentou 20% em relação ao ano de 2011. A evolução das áreas de cultivo pode-se observar no gráfico da figura 5.

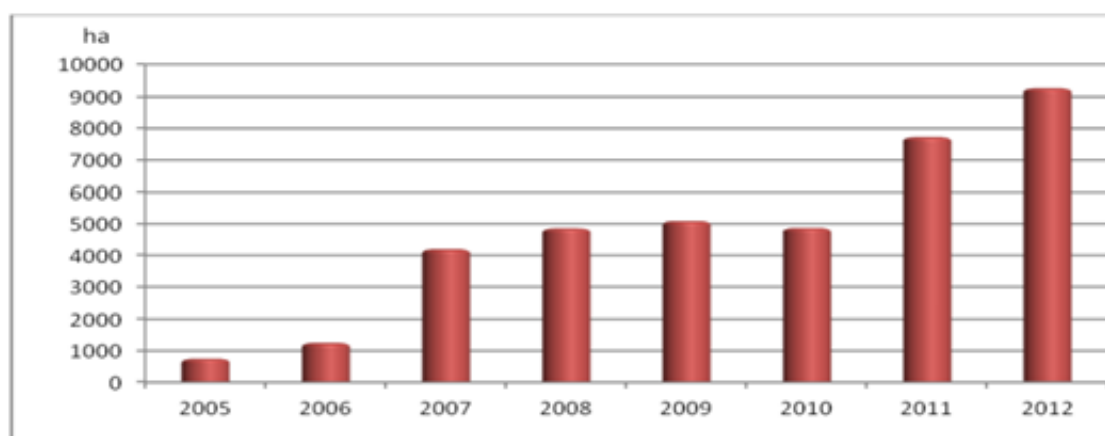
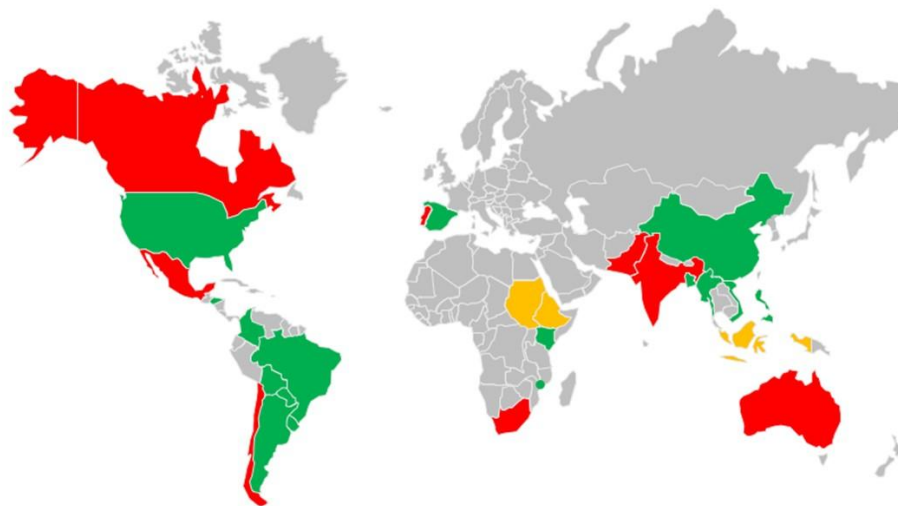


Figura 5: Área de Cultivo de milho entre 2005 e 2012

No ano de 2024, a área global cultivada atingiu os 209.8 milhões de hectares, registando um aumento de 1.9% face a 2023.

O crescimento foi impulsionado pela América do Sul (+3,5%), seguida pela América do Norte (+1,1%) e Europa (+37,2%). A taxa de crescimento na Europa embora que seja significativa, o crescimento em volume foi de apenas 179.000 hectares. O crescimento nessas regiões foi mais do que suficiente para compensar áreas menores na Ásia (-1,8%) e no resto do mundo (-0,4%).

No ano de 2024, os EUA tiveram uma área com 75.4 milhões de hectares (+1.3 %), o Brasil uma área de 1.4%, respondendo a 67.9 milhões de hectares.



*Green = Growth, Yellow = Static, Red = Decline

209.8 million Hectares (+1.9%)

Figura 6 Países com cultivo de AGM (AgbioInvestor, 2024)

As culturas que mais se destacaram fora a soja (50%), milho (32.5%), algodão (11%) e por fim a colza como se pode observar na Figura 7. Outras culturas GM, como alfafa, beterraba, cana-de-açúcar, trigo e beringela, ocuparam parcelas residuais (AgbioInvestor, 2024).

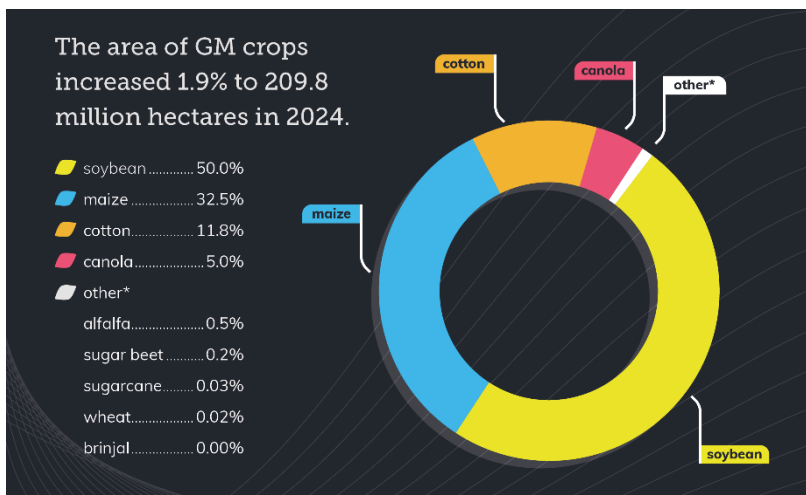


Figura 7 Distribuição global das culturas geneticamente modificadas em 2024 (AgbioInvestor, 2024)

Estes dados demonstram a consolidação das culturas GM tradicionais, mas também a abertura para a introdução de novas culturas geneticamente modificadas, que poderão diversificar a produção agrícola e contribuir para uma maior sustentabilidade e segurança alimentar global.

No nosso país o único AGM cultivado é o milho MON 810, e no ano 2022 teve uma área de 2 287.36 hectares (Voz do Campo, 2023). Contudo, em 2024 esta área reduziu para 905.78 hectares, e a maior parte está localizada na região centro (Tabela 1). Apesar desta redução, o milho geneticamente modificado continua a desempenhar um papel relevante na agricultura portuguesa, particularmente pela sua resistência a pragas e pela contribuição para a redução do uso de inseticidas (DGAV, 2024a).

Tabela 1: . Áreas e Zonas de cultivo em Portugal (Direção-Geral de Alimentação e Veterinária [DGAV], 2024a)

Região	Área total (ha)	Área controlada (ha)	Taxa de Controlo
Norte	54,9	30,5	56%
Centro	564,9	292,5	52%
Lisboa e Vale do Tejo	24,5	0,0	0%
Alentejo	261,5	0,0	0%
Total	905,8	529,21	36%

3.5 Deteção, Quantificação e Identificação

A deteção e quantificação de AGM baseiam-se na observação das diferenças entre a planta tradicional e a planta geneticamente modificada. Há dois tipos de abordagem atualmente, os que visam o material genético modificado e os que visam o produto resultante da modificação genética (Pansiot,2011).

As técnicas mais utilizadas com base na análise de proteínas incluem imunoenaios, a espectrometria de massa e cromatografia (Pansiot,2011).

3.5.1 Métodos de Deteção por análise de DNA

Ao contrário da proteína, o ADN é extremamente resistente a altas temperaturas e, por estar presente na maioria dos tecidos, torna-se a macromolécula eleita na deteção de OGM. Para detetar o ADN usa-se a técnica de reação em cadeia da polimerase (PCR)

(Natonek wt al, 2013). A técnica do PCR permite que haja uma ampliação rápida e seletiva de segmentos específicos do ADN marcados pela modificação genética (Natonek wt al, 2013).

A análise por PCR ocorre através de quatro etapas: a **Recolha de amostra**; a **Extração e Purificação de ADN**, a **Amplificação dos ácidos nucleicos** e a **Deteção** (Natonek wt al, 2013).

3.5.1.1 PCR Qualitativo

Neste tipo de PCR usa-se para aferir a presença de material geneticamente modificado, usando oligonucleotídeos específicos (primers) para amplificação da sequência alvo. Permite a amplificação de diversas cópias de ADN Alvo em poucas horas. Esta amplificação baseia-se no processo de replicação de ADN, com a ajuda da ADN polimerase, pois esta sintetiza de 5' para 3'.

Este PCR ocorre através de uma desnaturação onde se dá a separação da cadeia dupla do ADN em duas cadeias simples através do aumento da temperatura (95 °C). A temperatura diminui na fase seguinte para os 55 °C a 65 °C e os primers ligam-se a cadeia complementar.

A temperatura volta a aumentar e ocorre a extensão dos primers

O PCR qualitativo permite a deteção de material geneticamente modificado, mas não permite a sua quantificação e para isso é necessário realizar o PCR em tempo real

3.5.1.2 PCR em tempo real

O PCR em tempo real permite não só a deteção como também a quantificação (Arya et al, 2005).

O sinal de fluorescência vai ser visualizado num ecrã de um computador, e este sinal é proporcional à quantidade de produto de PCR gerado em cada ciclo (Arya et al, 2005).

O sistema PCR em tempo real, utiliza um termociclador que tem a capacidade de detetar a fluorescência em função do número de ciclos. No final obtém-se um gráfico de emissão de fluorescência em função do número de ciclos (Arya et al, 2005).

O gráfico está dividido em três fases: Lag que corresponde ao sinal de fundo; Exponencial: aumento do declive da curva; Estacionária – o declive é aproximadamente zero (European Commission, Joint Research Centre, 2020).

A quantificação ocorre na fase exponencial que é quando a quantidade de ADN amplificado atinge um ponto acima ao sinal de ruído (European Commission, Joint Research Centre, 2020).

A quantificação pode ser aferida de duas formas diferentes:

-Método Cq comparativo: faz-se a comparação entre a quantidade da sequência alvo do OGM com a sequência do gene de referência (European Commission, Joint Research Centre, 2020).

-Método curva padrão: utiliza-se duas curvas de padrão com diferentes quantidades de ADN. Uma curva com um sistema de quantificação para uma sequência específica de organismo geneticamente modificado e outra curva para quantificação de gene de referência. Para cada uma das amostras, a quantidade do alvo específico e de referência é calculada por interpolação com a respetiva curva-padrão (European Commission, Joint Research Centre, 2020).

A quantificação do material genético modificado é calculada com a razão entre a quantidade de ADN alvo e a de ADN do gene de referência (European Commission, Joint Research Centre, 2020).

3.5.2 Métodos de Detecção na análise de proteínas

Os métodos de reconhecimento de proteínas baseiam-se em imunoensaios e análise por HPLC, estes permitem a deteção e quantificação através da interação específica entre os anticorpos e o antígeno (European Commission, Joint Research Centre, 2020).

Os imunoensaios são ótimos para detetar proteínas em géneros alimentícios crus, no entanto, é importante ter em conta que a alteração genética induzida nem sempre conduz a produção de novas proteínas e nem sempre os níveis de expressão proteica são suficientes para existir uma deteção fiável (European Commission, Joint Research Centre, 2020).

3.5.2.1 ELISA

Na técnica ELISA (*Enzyme Linked Immuno Sorbent Assay*) a nova proteína expressa por um OGM é detetada por o desenvolvimento de cor que ocorre quando se dá a formação do complexo anticorpo-antígeno (European Commission, Joint Research Centre, 2020); (Malik et al, 2018).

Este teste pode ser feito de duas formas em placa de micropoços ou em formato de tubo revestido. O mais utilizado é o direto do tipo *sandwich*, em que a placa de micropocos está revestida com um anticorpo monoclonal específico à superfície e ao adicionar amostra que contém antígeno, ocorre a ligação do complexo anticorpo-antígeno (European Commission, Joint Research Centre, 2020); (Malik et al, 2018).

Os antígenos que não se ligaram são eliminados com a solução de lavagem. É adicionado um anticorpo policlonal marcado com uma enzima, formando o complexo anticorpo-antígeno-anticorpo acoplado com uma enzima. Quando este complexo entra em contacto com o substrato da enzima acoplada, ocorre alteração da cor e esta é medida através da espectrofotometria (European Commission, Joint Research Centre, 2020); (Malik et al, 2018).

Algumas das limitações deste tipo de método são: Possibilidade de resultados falso-positivos ou falso-negativos: Pode ocorrer resultados de falsos positivos ou negativos o que leva a interpretações erradas e de seguida a um tratamento inadequado (Pereira Filho,2023)

Outra das limitações é que é necessário equipamentos especializados e treinamento adequado para que a sua utilização seja correta (Pereira Filho, 2023)

3.5.2.2 Dispositivos com tiras de fluxo lateral

Este tipo de teste consiste numa tira de nitrocelulose estão imobilizados dois anticorpos específicos para a proteína nova expressa e acoplados a um reagente de cor (European Commission, Joint Research Centre, 2020).

Esta tira apresenta duas linhas de anticorpos, uma de controlo e uma de teste. Caso a amostra que está a ser analisada contenha o analítico de interesse, há uma formação do complexo anticorpo-antígeno e aparece uma banda corada na linha de teste assim como na linha de controlo (European Commission, Joint Research Centre, 2020).

Caso o resultado seja negativo, apenas a banda de controlo aparece corada (European Commission, Joint Research Centre, 2020).

As limitações deste tipo de teste é que não é adequado para alimentos processados.

3.5.2.3 Cromatografia Líquida de alta eficiência

Ao longo dos anos, o uso da cromatografia líquida de alta eficiência tem sido junto com espectrometria de massa, sendo um método alternativo de quantificação de proteínas (Chaimbault, 2014); (Dass, 2007).

A junção destes dois tipos de métodos tende a combinar as capacidades de separação física da cromatografia com a capacidade de identificação de massa da espectrometria (Chaimbault, 2014); (Dass, 2007).

Embora seja um método eficiente e com capacidade de detetar proteína necessita de instrumentos caros e analistas com conhecimento. A preparação da amostra pode ser limitada porque o analítico deve estar na forma gasosa e efetivamente ionizado antes da análise por espectrometria de massa.

3.6 Legislação

- **Europeia**

Um dos quadros legislativos mais exigentes em relação à matéria de avaliação de riscos é o europeu. Este quadro segue uma abordagem altamente preventiva instituída pelo Protocolo de Cartagena (Plan and Van den Eede, 2010). Sendo composto por um conjunto extenso de normas e diretivas, que tem como vista dois objetivos:

- Proteger a saúde e o ambiente; por isso a comercialização de um OGM ou alimento derivado de um OGM implica um processo de avaliação detalhado e regulamentado pela EU dos riscos para a saúde e o ambiente;

-Assegurar a livre circulação de produtos geneticamente modificados, seguros e saudáveis, na União Europeia (Plan and Van den Eede, 2010).

O Regulamento (CE) n.º 1829/2003 estabelece normas relativas aos alimentos e alimentos para animais geneticamente modificados, definindo os requisitos para a autorização, avaliação de segurança, rotulagem e monitorização dos AGM colocados no mercado da União Europeia. A Autoridade Europeia para a Segurança Alimentar (EFSA) desempenha um papel crucial na avaliação científica dos riscos associados a estes produtos (Parlamento Europeu e Conselho, 2003a; EFSA, 2025).

No Regulamento (CE) n.º 1830/2003 trata-se da rastreabilidade e rotulagem dos organismos geneticamente modificados e dos produtos alimentares e para animais derivados de OGM, garantindo que os consumidores sejam informados sobre a presença de OGM nos produtos que adquirem (Parlamento Europeu e Conselho, 2003b).

- **Portuguesa**

É a DGAV que realiza a avaliação para a inscrição no catálogo de variedades admitidas à certificação de semente e a sua autorização para a comercialização.

Através do Decreto-Lei nº160/2005 garante-se que existe sincronia com as culturas designadas convencionais, através de medidas como:

- O agricultor, antes de iniciar o cultivo, deve participar em ações de formação específicas; deve notificar o cultivo diretamente à DRAP (Direção Regional de Agricultura e Pescas);
- Antes da sementeira; comunicar, por escrito, aos agricultores vizinhos da sua intenção de cultivar variedades GM;
- Deve cumprir as normas técnicas destinadas a minimizar a presença acidental de organismos GM nos campos; cumprir as normas de rastreabilidade e de rotulagem aplicadas aos produtos que são constituídos ou que contêm OGM;
- Facultar o acesso às explorações agrícolas e prestar apoio às entidades oficiais para a realização das ações de controlo e de acompanhamento (DGAV).

O Decreto-Lei n.º 72/2003 transpõe para a ordem jurídica interna a Diretiva 2001/18/CE, regulamentando a libertação deliberada no ambiente de organismos geneticamente modificados e a colocação no mercado de produtos que os contenham ou sejam constituídos por OGM. Estabelece procedimentos para avaliação de riscos ambientais, consulta pública e monitorização pós-comercialização (Diário da República, 2003).

Por fim, o Decreto-Lei n.º 42/2017 regula a produção, controlo, certificação e comercialização de sementes de espécies agrícolas e hortícolas, incluindo aquelas derivadas de organismos geneticamente modificados, garantindo qualidade e rastreabilidade (Diário da República, 2017).

Hoje em dia em Portugal, apenas estão definidas normas técnicas específicas para a cultura do milho. Foi elaborado, ainda, um "Manual de Boas Práticas de Coexistência para a Cultura do Milho" no âmbito do projeto AGRO n.º 85314 (Voz de campo b).

3.7 Rotulagem

No nosso país, a rotulagem dos AGM segue a legislação da União Europeia, nomeadamente o **Regulamento (CE) n.º 1829/2003** (Parlamento Europeu & Conselho da União Europeia, 2003a) e o **Regulamento (CE) n.º 1830/2003** (Parlamento Europeu & Conselho da União Europeia, 2003b). Estes diplomas são complementados pelo **Regulamento (UE) n.º 1169/2011** (Parlamento Europeu & Conselho da União Europeia, 2011) e pelo **Decreto-Lei n.º 26/2016** (Diário da República, 2016).

A rotulagem é sempre obrigatória desde que o alimento contenha ou seja produzido a partir deste tipo de organismos, mesmo que não haja presença de ADN ou proteína modificada detetável no produto final (DGAV, 2024b).

Nos produtos com lista de ingredientes, a menção deve aparecer logo após o ingrediente, por exemplo: “milho (geneticamente modificado)” ou “produzido a partir de soja geneticamente modificada” (DGAV, 2024b). Nos produtos sem lista de ingredientes, deve constar de forma visível “geneticamente modificado” ou “produzido a partir de [organismo] geneticamente modificado” (DGAV, 2024b).

Toda a informação que é dirigida ao consumidor deve estar em língua portuguesa. Para géneros alimentícios não pré-embalados, incluindo aqueles vendidos em estabelecimentos de restauração ou coletividades, aplicam-se as disposições do Decreto-Lei n.º 26/2016 sobre a forma de apresentação da informação obrigatória (Diário da República, 2016).

3.8 Benefícios dos Alimentos Geneticamente Modificados na Promoção da Saúde

A introdução dos alimentos geneticamente modificados no sistema alimentar global veio abrir novas possibilidades e soluções para a promoção da saúde, principalmente no combate a deficiências nutricionais e na prevenção de doenças crónicas.

Os principais benefícios dos AGM são:

- **Biofortificação e Combate à Deficiência de Micronutrientes**

A biofortificação genética de alimentos consiste na modificação do perfil nutricional das culturas para aumentar o teor de vitaminas e minerais essenciais. Um dos exemplos mais emblemáticos é o arroz dourado, desenvolvido para conter elevados níveis de provitamina A (beta-caroteno). Esta inovação visa combater a cegueira infantil e a mortalidade associada à deficiência de vitamina A, especialmente em países do Sudeste Asiático e África Subsariana (Potrykus, 2001).

Outro exemplo relevante é o milho geneticamente modificado com maior concentração de ácido fólico e ferro, elementos essenciais para o desenvolvimento cognitivo e prevenção de anemias. Estudos demonstram que a inclusão desses alimentos biofortificados na dieta de populações vulneráveis tem efeitos positivos mensuráveis na melhoria do estado nutricional (Saltzman et al., 2013).

- **Redução de Compostos Nocivos à Saúde**

Estes tipos de alimentos podem ser elaborados para conter menores níveis de substâncias potencialmente prejudiciais. Alguns dos exemplos é certas variedades de batata que foram geneticamente modificadas com menores concentrações de acrilamida (Parzefall, 2008). Tal característica representa um benefício direto à saúde pública ao reduzir a exposição a agentes carcinogênicos.

- **Alimentos com Propriedades Funcionais**

Atualmente há um crescente interesse em criar alimentos com funções adjuvantes da terapêutica. No caso da soja geneticamente modificada pode ter perfil lipídicos mais enriquecidos em ácidos gordos ômega-3, sendo conhecido por o seu efeitos anti-inflamatório. Outros exemplos incluem tomates enriquecidos com antocianinas e arroz com elevados níveis de lisina, aminoácido essencial que muitas vezes está em níveis deficitários em dietas baseadas em cereais (Wang et al., 2013).

- **Benefícios Indiretos para a Saúde Pública**

A utilização de culturas geneticamente modificadas resistentes a pragas e doenças pode resultar numa redução significativa do uso de pesticidas e herbicidas químicos. Esta redução traduz-se em menor exposição de agricultores e consumidores a resíduos

tóxicos, promovendo um ambiente agrícola mais saudável e sustentável (Brookes & Barfoot, 2018).

3.9 Riscos e Controvérsias Associadas aos AGMs

Apesar de este tipo de alimentos apresentar benefícios, existem ainda preocupações e debates em relação à sua segurança e impacto ambiental. Estas controvérsias observam-se tanto em comunidade científica como também e público em geral, influenciando as políticas de regulamentação, rotulagem e aceitação social.

- **Segurança Alimentar e Saúde Humana**

Uma das principais críticas dirigidas aos AGMs prende-se com possíveis efeitos adversos na saúde humana. Embora numerosos estudos científicos indiquem que os AGMs atualmente comercializados são seguros para consumo humano, existe apreensão relativamente a riscos de alergias, toxicidade não intencional e efeitos a longo prazo ainda desconhecidos (Domingo, 2016).

Antes que um alimento geneticamente modificado possa ser comercializado no mercado europeu ou nacional, o requerente deve apresentar um dossier completo de avaliação de risco de acordo com o Regulamento (EU) nº503/2013. O dossier deve ser analisado pela EFSA, que emite um parecer científico.

- **Impacto Ambiental**

Os impactos ecológicos dos AGMs são outra fonte de controvérsia. Os OGMs podem afetar ecossistemas naturais, incluindo a possibilidade de transferência de genes para espécies selvagens e o desenvolvimento de pragas resistentes ou chamadas “superervas” (Camara, 2024).

Além disso, pragas podem desenvolver resistência às toxinas produzidas por culturas Bt (ex: milho Bt), exigindo o uso de pesticidas ainda mais agressivos (Camara, 2024).

- **Perceção Pública e Aceitação**

A aceitação dos AGMs pela parte do público pode variar de acordo com as regiões. Na União Europeia, por exemplo, a desconfiança é maior do que em países como os Estados Unidos ou o Brasil, onde os AGMs são amplamente cultivados e consumidos. Esta disparidade deve-se não só a fatores culturais e históricos, mas também ao papel

da comunicação científica, dos media e das campanhas de sensibilização (Gaskell et al., 2010).

3.10 Estudos de Caso e Exemplos de Aplicação dos AGMs na Saúde Pública

A aplicação prática dos alimentos geneticamente modificados (AGMs) na promoção da saúde tem-se verificado em diferentes partes do mundo, com especial incidência em regiões afetadas por deficiências nutricionais crónicas. Nesta secção, apresentam-se alguns dos casos mais emblemáticos que ilustram o potencial dos AGMs como ferramenta de saúde pública.

3.10.1. Arroz Dourado e Deficiência de Vitamina A

O arroz dourado (*Golden Rice*) é talvez o caso mais paradigmático do uso de engenharia genética para melhorar o perfil nutricional de um alimento básico. Desenvolvido para conter beta-caroteno (precursor da vitamina A) no endosperma do arroz, este alimento foi concebido para combater a deficiência de vitamina A em populações da Ásia e África, onde o arroz branco é a principal fonte calórica (Tang et al., 2012).

Estudos realizados nas Filipinas, Bangladesh e Índia demonstraram que o arroz dourado pode fornecer até 50% da dose diária recomendada de vitamina A a crianças pequenas, reduzindo drasticamente o risco de cegueira infantil e mortalidade associada a infeções (Paine et al., 2005).

O arroz dourado (*Golden Rice*) foi concebido para fornecer β -caroteno — um precursor da vitamina A — a populações vulneráveis cuja dieta assenta, predominantemente, no consumo de arroz (Paine et al., 2005).

A versão inicial desta variedade, conhecida como **GR1**, apesar de representar um marco tecnológico, apresentava níveis relativamente baixos de provitamina A, o que limitava a sua eficácia no combate à hipovitaminose A (Paine et al., 2005).

Com o intuito de melhorar substancialmente o conteúdo nutricional do arroz dourado, decidiu-se desenvolver uma segunda geração da cultura, denominada **GR2**. Para tal, substituíram o gene da fitoeno sintase originalmente extraído do narciso (*Narcissus pseudonarcissus*) por uma variante mais eficiente proveniente do milho (Paine et al., 2005).

Esta substituição visava potenciar a via metabólica de biossíntese dos carotenoides. A transformação genética foi realizada através da técnica de *Agrobacterium tumefaciens*, em plantas de arroz (*Oryza sativa*), com expressão dirigida ao endosperma, garantindo a acumulação dos compostos desejados na porção comestível do grão (Paine et al., 2005).

Os resultados obtidos demonstraram um aumento notável na concentração de β -caroteno nos grãos: enquanto a versão **GR1** alcançava apenas cerca de 1,6 μg por grama de arroz seco, a versão **GR2** atingia até 37 $\mu\text{g/g}$. Esta melhoria representa um avanço significativo, visto que permite que uma porção diária típica de arroz contribua de forma relevante para as necessidades diárias de vitamina A, especialmente em crianças e mulheres em idade fértil (Paine et al., 2005).

O estudo de Paine constitui um exemplo paradigmático do potencial da engenharia genética na promoção da saúde pública, ao possibilitar intervenções nutricionais eficazes através da modificação de alimentos de base. A eficácia da substituição génica, aliada à otimização da expressão nos tecidos-alvo, demonstrou ser determinante para o sucesso da biofortificação, estabelecendo um precedente para futuras aplicações em outras culturas de elevada importância alimentar (Paine et al., 2005).

3.10.2. Mandioca Enriquecida com Ferro e Zinco

A mandioca é um alimento essencial em muitas regiões tropicais, mas possui baixo valor nutricional. Com recurso à biotecnologia, investigadores desenvolveram variedades de mandioca com maior teor de ferro e zinco, micronutrientes cruciais no combate à anemia e ao atraso de crescimento em crianças (Sayre et al., 2011).

Estas novas variedades estão a ser testadas na Nigéria e no Quênia, com resultados promissores na melhoria dos indicadores de saúde infantil. A iniciativa é parte de um esforço maior para utilizar a biotecnologia de forma equitativa e acessível nas regiões mais carenciadas (Sayre et al., 2011).

Investigadores conduziram um estudo pioneiro visando o enriquecimento da mandioca com ferro e zinco. A equipa recorreu à inserção de genes relacionados com o transporte e armazenamento de ferro, nomeadamente IRT1 (transporte de ferro), FER1 (ferritina de armazenamento) e VIT1 (transporte vacuolar), oriundos de plantas como *Arabidopsis thaliana*. Estas construções genéticas foram introduzidas em plantas de

mandioca por via da transformação mediada por *Agrobacterium tumefaciens* (Sayre et al., 2011).

As variedades geneticamente modificadas foram cultivadas em condições de campo e, posteriormente, analisadas quanto ao teor de micronutrientes nas raízes de armazenamento (Sayre et al., 2011).

Os resultados revelaram um aumento expressivo na concentração de ferro (até +90 µg/g) e zinco (até +100 µg/g) nas raízes, em comparação com os cerca de 10 µg/g encontrados nas variedades convencionais. Estes valores representam uma melhoria nutricional significativa, correspondendo a uma fração substancial das necessidades diárias recomendadas, particularmente para crianças e mulheres em idade fértil (Sayre et al., 2011).

Importa ainda salientar que os teores de ferro e zinco permaneceram estáveis após o processamento culinário típico (ex. cozedura), assegurando assim a biodisponibilidade dos nutrientes na dieta real das populações-alvo (Sayre et al., 2011).

Além disso, as linhas enriquecidas apresentaram características agronômicas semelhantes às plantas não modificadas, não comprometendo o rendimento nem a viabilidade da sua produção agrícola (Sayre et al., 2011).

Este estudo ilustra o potencial da engenharia genética na biofortificação de culturas básicas, como a mandioca, com benefícios diretos para a saúde pública em regiões onde o acesso a alimentos diversificados e suplementos nutricionais é limitado (Sayre et al., 2011).

A estabilidade pós-processamento e o impacto potencial na redução da deficiência de micronutrientes reforçam o valor estratégico desta abordagem (Sayre et al., 2011).

3.10.3. Batata com Menos Acrilamida

Investigadores norte-americanos desenvolveram batatas geneticamente modificadas com menor produção de acrilamida quando fritas (Mottram et al., 2002).

Esta substância, classificada como potencialmente cancerígena, forma-se naturalmente durante a fritura de alimentos ricos em amido (Mottram et al., 2002). A partir deste conhecimento, investigadores têm desenvolvido estratégias para reduzir a presença de acrilamida nos alimentos.

O estudo evidenciou que a formação da acrilamida é um fenómeno inerente ao aquecimento dos ingredientes, não resultando de contaminação externa (Mottram et al., 2002).

Esta descoberta motivou o desenvolvimento de estratégias para reduzir a sua presença, como a utilização de asparaginase para degradar a asparagina antes da cozedura, o controlo das condições térmicas e o melhoramento genético das matérias-primas para diminuir os precursores da acrilamida (Mottram et al., 2002).

Os autores utilizaram sistemas-modelo compostos por amido, aminoácidos (principalmente asparagina) e açúcares redutores. Estes ingredientes foram submetidos a aquecimento controlado, replicando condições típicas de cozedura (temperaturas superiores a 120 °C) (Mottram et al., 2002).

Para analisar a formação de acrilamida, foram aplicadas técnicas analíticas, como cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas, que permitiram identificar e quantificar este composto (Mottram et al., 2002).

3.10.4. Bananas Enriquecidas

A deficiência de ferro é uma das principais carências nutricionais a nível mundial, especialmente em países onde a banana é um alimento básico (Paul et al., 2017).

Para combater esta deficiência, investigadores desenvolveram bananas geneticamente modificadas para aumentar o teor e a biodisponibilidade do ferro (Paul et al., 2017).

Neste estudo, foi utilizada a transformação genética da banana (*Musa acuminata*) por meio do método *Agrobacterium tumefaciens* para introdução do gene codificador da ferritina de soja (*Glycine max*), uma proteína de armazenamento de ferro altamente eficiente (Paul et al., 2017).

As plantas transformadas foram regeneradas in vitro e posteriormente cultivadas em estufa para maturação dos frutos (Paul et al., 2017).

Para a quantificação do ferro, a polpa dos frutos foi colhida, seca e analisada por espectrometria de absorção atómica (AAS).

Paralelamente, foi avaliada a expressão do gene da ferritina por PCR quantitativo (qPCR) para confirmar a incorporação e expressão estável do transgene (Paul et al., 2017).

Além disso, para avaliar a biodisponibilidade do ferro acumulado, foram realizados ensaios *in vitro* de digestão simulada, utilizando modelos celulares para estimar a absorção intestinal do mineral (Paul et al., 2017).

Os frutos das plantas transgênicas apresentaram um aumento significativo no teor de ferro, alcançando em média 5,2 mg de ferro por 100 g de polpa fresca, em comparação com 1,6 mg/100 g nas plantas não modificadas, representando mais que o triplo do teor inicial (Paul et al., 2017).

A expressão do gene da ferritina foi confirmada por qPCR, apresentando níveis elevados em comparação com o controle (Paul et al., 2017).

Os ensaios *in vitro* indicaram que o ferro acumulado é biodisponível, sugerindo que o consumo destes frutos pode contribuir efetivamente para a redução da anemia (Paul et al., 2017).

3.11 Futuro dos Alimentos Geneticamente Modificados

Embora os alimentos geneticamente modificados (AGMs) tenham sido inicialmente concebidos para fins agronômicos, a sua potencialidade na promoção da saúde humana tem despertado crescente interesse na comunidade científica.

No entanto, a sua aplicação está a expandir-se para o campo da saúde pública. A biofortificação de culturas, por exemplo, tem-se mostrado eficaz no combate à deficiência de micronutrientes, especialmente em países em desenvolvimento (Saltzman et al., 2013).

3.11.1 Tendências futuras da biotecnologia alimentar

- **Alimentos funcionais dirigidos**

A próxima geração de AGMs poderá atuar como **alimentos funcionais dirigidos**, ou seja, alimentos com propriedades terapêuticas específicas. Por exemplo, tomates com elevada concentração de antioxidantes, ou cereais enriquecidos com compostos anti-inflamatórios, têm o potencial de atuar na prevenção de doenças cardiovasculares e neurodegenerativas (Giovannucci et al., 2010).

Um exemplo notável é a banana geneticamente modificada para produzir antígenos da hepatite B, permitindo que, quando consumida, induza uma resposta imunológica eficaz e funcione como vacina oral (Maji et al., 2016).

- **Agricultura molecular (*molecular farming*)**

A chamada agricultura molecular utiliza plantas como biofábricas para a produção de medicamentos, como vacinas, anticorpos monoclonais ou hormonas terapêuticas. Esta tecnologia oferece uma alternativa mais barata, segura e escalável à produção farmacêutica convencional (Stoger et al., 2014). Um exemplo é a produção de anticorpos neutralizantes para o vírus Ébola em tabaco geneticamente modificado (Qiu et al., 2014).

3.11.2 Barreiras e desafios

Apesar das oportunidades, o futuro dos AGMs na saúde enfrenta desafios regulatórios, éticos e sociais. A percepção pública dos OGMs é marcada por desconfiança e polarização, mesmo perante evidências científicas robustas sobre a sua segurança (Frewer et al., 2013).

A União Europeia adota uma abordagem altamente precautória, o que tem limitado a investigação e comercialização de OGMs com benefícios para a saúde (Purnhagen & Wesseler, 2020).

Existem ainda preocupações ambientais e biológicas, como a transferência de genes para outras espécies, ou a instabilidade genética a longo prazo (Nap et al., 2003).

- **Tendência de Consumo Futuro de Alimentos Geneticamente Modificados**

A tendência global aponta para um aumento progressivo no consumo de alimentos geneticamente modificados nas próximas décadas, impulsionado por fatores científicos, tecnológicos, económicos e sociais.

No entanto, o ritmo desse crescimento varia de acordo com a região geográfica, a legislação e a percepção pública.

- **Aumento da produção e comercialização global**

Dados do *International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications* (ISAAA) indicam que a área global cultivada com culturas geneticamente modificadas ultrapassou os 200 milhões de hectares em 2022, com os Estados Unidos, Brasil, Argentina, Canadá e Índia entre os maiores produtores (ISAAA, 2023). Esta expansão

tem como consequência direta a maior disponibilidade e incorporação de OGMs nas cadeias alimentares.

- **Alinhamento com os objetivos de saúde pública e nutrição**

Os AGMs têm sido promovidos como ferramentas eficazes na redução da deficiência de micronutrientes em países em desenvolvimento. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), a biofortificação genética é uma das estratégias-chave para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em particular o erradicar a fome e a má nutrição (ECD & FAO, 2021).

- **Barreiras sociais e regionais ao crescimento do consumo**

Apesar das tendências positivas, persistem barreiras culturais e legais ao consumo de AGMs, especialmente na União Europeia. Estudos mostram que, mesmo quando cientificamente comprovados como seguros, muitos consumidores europeus mantêm reservas quanto à sua aceitação, frequentemente associadas a desconfiança na indústria alimentar e na política (Frewer et al., 2013; Eurobarometer, 2021).

A UE ainda segue uma abordagem cautelosa e restritiva quanto à aprovação e rotulagem de OGMs. Isso poderá desacelerar a adoção por parte do público europeu, ainda que o uso de OGMs em rações animais e ingredientes processados seja generalizado.

- **Projeção global de aumento de consumo**

Com base nos atuais padrões de produção, comércio e inovação, organismos internacionais estimam que o papel dos AGMs será cada vez mais relevante no sistema alimentar global até 2050, contribuindo para a resiliência alimentar e para a nutrição personalizada (ECD & FAO, 2021).

Conclusão

Os alimentos geneticamente modificados (AGMs) representam uma das mais relevantes inovações no setor agroalimentar, com potencial significativo para contribuir para a promoção da saúde e a segurança alimentar global. Ao longo desta dissertação, verificou-se que a engenharia genética permite não só aumentar a produtividade agrícola e a resistência a fatores bióticos e abióticos, mas também enriquecer o valor nutricional de alimentos básicos, através da biofortificação e do desenvolvimento de alimentos funcionais.

Alimentos como o arroz dourado, mandioca enriquecida com ferro e zinco ilustram o impacto positivo que os AGM podem ter na prevenção de deficiências nutricionais, sobretudo em populações vulneráveis.

Contudo, a aceitação social e a confiança pública permanecem como desafios centrais. As preocupações quanto a potenciais riscos à saúde, como reações alergias e efeitos a longo prazo persistem.

A análise realizada evidencia que, embora os estudos disponíveis indiquem segurança para os AGMs atualmente comercializados, a necessidade de monitorização contínua, transparência científica e regulamentação rigorosa é indispensável.

O futuro dos AGMs aponta para a sua crescente integração em estratégias de saúde pública, com especial enfoque em alimentos funcionais e terapêuticos, e na utilização de novas técnicas de edição genética, para que este potencial seja plenamente alcançado, é essencial investir em comunicação científica clara, políticas regulatórias equilibradas e investigação independente que garanta tanto a eficácia como a segurança destes alimentos.

Em suma, os AGMs não devem ser vistos como uma solução isolada, mas como uma ferramenta complementar na luta contra a fome, a desnutrição e as doenças crónicas, integrando-se em sistemas alimentares mais sustentáveis, diversificados e equitativos.

Referências Bibliográficas

- AgbioInvestor. (2024). GM crops in 2024: Global planting data and trends. GM Monitor.
- Andrade, S. R. M. de. (2003). Transformação de plantas (Documentos, 102). Embrapa Cerrados.
- Apitz, S. (2012). Os organismos geneticamente modificados e saúde pública: uma visão integrada [Tese de mestrado, Faculdade de Medicina da Universidade de Lisboa].
- Arya, M., Shergill, I. S., Williamson, M., Gommersall, L., Arya, N., & Patel, H. R. (2005). Basic principles of real-time quantitative PCR. *Expert Review of Molecular Diagnostics*, 5(2), 209–219.
- Barros, J. P. (2017). Alimentos Geneticamente Modificados e Alimentos Biológicos: Estudo Empírico Sobre a Percepção Dos Consumidores (Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Economia e Gestão do Ambiente pela Faculdade de Economia do Porto)
- Brookes, G., & Barfoot, P. (2018). GM crops: Global socio-economic and environmental impacts 1996-2016. PG Economics Ltd.
- Camara, E. Transgênicos (OGMs) – O que são e quais os impactos? 123Ecos.
- AgbioInvestor. (2024). GM crops in 2024: Global planting data and trends. GM Monitor.
- Centrada em SI. (2020). Alimentos processados e ultraprocessados: Qual a diferença?
- Chaimbault, P. The Modern Art of Identification of Natural Substances in Whole Plants. In *Recent Advances in Redox Active Plant and Microbial Products: From Basic Chemistry to Widespread Applications in Medicine and Agriculture*; Jacob, C., Kirsch, G., Slusarenko, A., Winyard, P. G., Burkholz, T., Eds.; Springer: Netherlands, 2014; pp 31– 94.
- CIBPT. (2019). Recursos: Alimentos GM são a salvação.
- Comissão Europeia. (2013). Regulamento de execução (UE) nº 503/2013 da Comissão, de 3 de abril de 2013, relativo aos pedidos de autorização de géneros alimentícios e alimentos para animais geneticamente modificados, em conformidade com o

Regulamento (CE) n.º 1829/2003 do Parlamento Europeu e do Conselho, e que altera os Regulamentos (CE) n.º 641/2004 e (CE) n.º 1981/2006.

Costa, A., & Almeida, J. (2020). *Biotechnology e sustentabilidade na produção alimentar*. Lisboa: Editora Ciências da Saúde

Dass. Hyphenated Separation Techniques. In *Fundamentals of Contemporary Mass Spectrometry*; 2007; pp 151– 194.

DGAV. (2024a, 21 Setembro). *Relatório de Acompanhamento de 2024*. Governo de Portugal.

DGAV. (2024b, 20 de agosto). *OGM – Rotulagem*. Governo de Portugal.

Diário da República (2023 10 de Abril), Decreto-Lei n.º 72/2003, de 10 de abril. Diário da República n.º 85/2003, Série I-A, 2355–2372.

Diário da República, (2017,6 de Abril) Decreto-Lei n.º 42/2017, de 6 de abril. Diário da República n.º 69/2017, Série I, 1735–1785.

Diário da República. (2016, 9 de junho). Decreto-Lei n.º 26/2016. Estabelece as regras para a disponibilização da informação obrigatória sobre os géneros alimentícios não pré-embalados. Diário da República n.º 111/2016, Série I, 1931–1936.

Dias, (2014). *Alimentos geneticamente modificados* [Monografia de Mestrado Integrado, Faculdade de Farmácia da Universidade de Coimbra]. Universidade de Coimbra.

Direção-Geral de Alimentação e Veterinária - OGM - Enquadramento Legal

Direção-Geral de Alimentação e Veterinária. (2024). *Relatório de acompanhamento de coexistência entre culturas geneticamente modificadas e outros modos de produção agrícola*. Agroportal.

Diretiva 201/18/CE do Parlamento Europeu. (2018). Artigo 2º. Definição de alimentos geneticamente modificados.

Domingo, J. L. (2016). Possíveis efeitos adversos dos alimentos geneticamente modificados na saúde humana: Uma revisão crítica. *Food and Chemical Toxicology*, 93, 131-140.

EC. (2001). *Directiva 2001/18/EC do Parlamento Europeu e do Conselho*.

ECD & FAO. (2021). OECD-FAO Agricultural Outlook 2021–2030. OECD Publishing.

EFSA – European Food Safety Authority. (2025).

Estadão Agro. (2020). Transgênicos: Vantagens e riscos desses alimentos.

Eurobarometer. (2021). Special Eurobarometer 518: Europeans and the future of food. European Commission.

Formularium. (2020). Alimentos orgânicos e seus benefícios para a saúde.

Frewer, L. J., van der Lans, I. A., Fischer, A. R. H., Reinders, M. J., Menozzi, D., Zhang, X., & Zimmermann, K. L. (2013). Public perceptions of agri-food applications of genetic modification – A systematic review and meta-analysis. *Trends in Food Science & Technology*, 30(2), 142-152.

Gaskell, G., Stares, S., & Allum, N. (2010). Public acceptance of agricultural biotechnology in Europe and the United States. European Commission, Directorate-General for Research.

Giovannucci, E., Liu, Y., Rimm, E. B., Hollis, B. W., & Willett, W. C. (2010). Prospective study of predictors of vitamin D status and cancer incidence and mortality in men. *Journal of the National Cancer Institute*, 98(7), 451–459.

Gupta, R., & Tyagi, H. (2023). Recent developments in electroporation-based gene transfer and selection in plant biotechnology. *Biotechnology Advances*, 62, 108092.

Gupta, R., & Tyagi, H. (2023). Recent developments in electroporation-based gene transfer and selection in plant biotechnology. *Biotechnology Advances*, 62, 108092.

Holst-Jensen, A. (2018). Detection of genetically modified organisms. In D. L. Wise & G. E. Wnek (Eds.), *Genetic engineering – Principles and methods* (pp. 117–140). IntechOpen.

ISAAA. (2023). Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops in 2022. ISAAA Brief No. 58.

Johns, T., & Eyzaguirre, P. B. (2007). Biofortificação, biodiversidade e dieta: uma busca por aplicações complementares contra a pobreza e a desnutrição. *Política Alimentar*, Volume 32.

- Kagkli, D. M., Maretta, M., Querci, M., Gatto, F., Foti, N., & Mazzara, M. (2020). The analysis of food samples for the presence of genetically modified organisms: User manual (Publicação n° KJ-NA-30145-EN-N).
- Kaput, J., & Rodriguez, R. L. (2004). Nutritional genomics: the next frontier in the postgenomic era. *Physiological Genomics*, 16(2), 166–177.
- Lee, H. J., Park, S. Y., & Kim, J. H. (2020). Selection strategies for transformed plant cells following biolistic transformation. *Frontiers in Plant Science*, 11, 561634. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.561634>
- Maji, A., Sachin, M., Mohanasrinivasan, V., & Subathra Devi, C. (2016). Banana as edible vaccine against hepatitis-B: A theoretical model. *ImmunoPharmacology and Immunotoxicology*, 38(1), 1–5.
- Mottram, D. S., Wedzicha, B. L., & Dodson, A. T. (2002). Acrylamide is formed in the Maillard reaction. *Nature*, 419, 448-449
- Nap, J. P., Metz, P. L. J., Escaler, M., & Conner, A. J. (2003). The release of genetically modified crops into the environment: Part I. Overview of current status and regulations. (1), 1–18.
- Natonek-Wiśniewska, M., Michalski, A., Gralak, K., & Sienkiewicz, J. (2013). The species identification of bovine, porcine, ovine and chicken components in processed meat products using PCR. *Meat Science*, 95(3), 568–573.
- Organização Mundial da Saúde. (2020). Geneticamente modificados - Perguntas e respostas.
- Paine, J. A., Shipton, C. A., Chaggar, S., Howells, R. M., Kennedy, M. J., Vernon, G., ... & Drake, R. (2005). Improving the nutritional value of Golden Rice through increased pro-vitamin A content. *Nature Biotechnology*, 23(4), 482–487.
- Pansiot, J., Chaouachi, M., Cavellini, L., Romaniuk, M., Ayadi, M., Bertheau, Y., & Laval, V. (2011). Development of two screening duplex PCR assays for genetically modified organism quantification using multiplex real-time PCR master mixes. *European Food Research and Technology*, 232(3), 327-334.
- Parlamento Europeu & Conselho da União Europeia. (2003a, 22 de setembro). Regulamento (CE) n.º 1829/2003 relativo a géneros alimentícios e alimentos para animais geneticamente modificados. *Jornal Oficial da União Europeia*, L 268, 1–23.

Parlamento Europeu & Conselho da União Europeia. (2003b, 22 de setembro). Regulamento (CE) n.º 1830/2003 relativo à rastreabilidade e rotulagem de organismos geneticamente modificados e à rastreabilidade de géneros alimentícios e de alimentos para animais produzidos a partir de organismos geneticamente modificados. Jornal Oficial da União Europeia, L 268, 24–28.

Parlamento Europeu & Conselho da União Europeia. (2011, 25 de outubro). Regulamento (UE) n.º 1169/2011 relativo à prestação de informação aos consumidores sobre os géneros alimentícios. Jornal Oficial da União Europeia, L 304, 18–63.

Parlamento Europeu e Conselho. (2003a). Regulamento (CE) n.º 1829/2003.

Parlamento Europeu e Conselho. (2003b). Regulamento (CE) n.º 1830/2003.

Parzefall, W. (2008). Risk assessment of genetically modified food: Conceptual

Paul, J.-Y., Becker, D. K., Dickman, M. B., Harding, R. M., Khanna, H. K., & Dale, J. (2017). Iron-fortified genetically modified bananas provide elevated iron levels and improved iron bioavailability. *Plant Biotechnology Journal*, 15(4), 520–532.

Paul, J.-Y., Karthikeyan, A. S., & Karp, P. D. (2018). Genetic engineering of banana for enhanced iron bioavailability. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1230. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01230>

Pereira Filho, A. A. (2023). ELISA: definição, variações e protocolos práticos (1ª ed.) Editora Amplla

Pfizer (2019, 24 de julho). Entenda a diferença entre alimentos naturais e industrializados.

Pfizer. (2020). Entenda a diferença entre alimentos naturais e industrializados. *Plant Biotechnology Journal*, 15(4), 520–532.

Plan D, Van der Eede G (2010) EU Legislation on GMO - An Overview, Luxembourg: Publications Office of the European Union

Plan, D., & Van den Eede, G. (2010). The EU legislation on GMOs: An overview (EUR 24279 EN). Publications Office of the European Union. p. 9.

Potrykus, I. (2001). Arroz dourado: Biofortificação genética e a luta contra a cegueira infantil. *Plant Physiology*, 125(3), 1157-1161.

Purnhagen, K. P., & Wesseler, J. (2020). EU regulation of new plant breeding technologies and their possible economic implications for the EU and beyond. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 42(4), 712–731.

Qiu, X., Wong, G., Audet, J., Bello, A., Fernando, L., Alimonti, J. B., ... & Kobinger, G. P. (2014). Reversion of advanced Ebola virus disease in nonhuman primates with ZMapp. *Nature*, 514(7520), 47–53.

Queirós, C.S. (2023). Implementação e Validação da Técnica de PCR em tempo real na identificação de organismo geneticamente modificados em alimentos.

Rocha, D. R., & Marin, V. A. (2011). Transgênicos – plantas produtoras de fármacos (PPF). *Ciência & Saúde Coletiva*, 16(7), 3339-3347

Saltzman, A., Birol, E., & Bouis, H. (2013). A biofortificação como estratégia para combater a deficiência de micronutrientes: O caso do milho fortificado. *Food Policy*, 40, 52-59.

Sayre, R. T., Beeching, J. R., Cahoon, E. B., Egesi, C., Fauquet, C., Fellman, J., ... & Zhang, P. (2011). The BioCassava Plus Program: Biofortification of Cassava for Sub-Saharan Africa. *Annual Review of Plant Biology*, 62, 251–272.

Stoger, E., Ma, J. K. C., Fischer, R., & Christou, P. (2014). Sowing the seeds of success: pharmaceutical proteins from plants. *Current Opinion in Biotechnology*, 25, 88–94.

Tang, G., Qin, J., Dolnikowski, G. G., Russell, R. M., & Grusak, M. A. (2012). Golden Rice is an effective source of vitamin A. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 96(3), 658–664.

Voz do Campo. (2023). Em Portugal a área de milho geneticamente modificado totalizou 2 287,36 hectares em 2022. Yadav, R., Ranjan, A., & Prasad, M. (2020). Efficient transformation of plant cells using electroporation: Optimization and recent advances. *Plant Cell Reports*, 39(11), 1477–1490.