

I NOVAÇÃO BIOTECNOLÓGICA E ADAPTAÇÃO AGRÍCOLA ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS: UMA ANÁLISE PATENTÁRIA

¹Vinicius Eduardo Ferrari

²Giovanna Aparecida de Sousa

³Cândido Ferreira da Silva Filho

⁴Samuel Carvalho De Benedicto

RESUMO

Propósito: analisar o papel da inovação biotecnológica na adaptação da agricultura às mudanças climáticas, com ênfase no desenvolvimento de cultivares tolerantes à seca.

Originalidade: contribui-se para a literatura ao integrar dados patentários e registros regulatórios, oferecendo uma abordagem inédita para avaliar o impacto tecnológico e a adoção comercial de soluções voltadas à tolerância à seca.

Métodos: metodologia baseada na análise de patentes extraídas da base *Derwent*. O impacto tecnológico foi mensurado por indicadores patentários, complementados por informações regulatórias sobre a aprovação comercial de sementes transgênicas.

Resultados: há uma aceleração dos pedidos de patentes após 2013, concentrada em sementes de milho e soja. Entretanto, a difusão comercial de cultivares tolerantes à seca permanece limitada quando comparada a outros *biotech traits* (tolerância a herbicidas e resistência a pragas) em função de obstáculos agrônômicos e econômicos, sobretudo penalidades de rendimento nas lavouras.

Conclusões: a adaptação da agricultura às mudanças climáticas depende da consolidação de novos sistemas agrícolas integrados, combinando sementes transgênicas, manejo de pragas e políticas públicas de apoio. O artigo contribui para compreender os limites e as possibilidades da biotecnologia agrícola frente ao desafio climático.

Palavras chaves: Sementes transgênicas. Estresse hídrico. Patentes agrícolas. Aprovação regulatória. Manejo de pragas.

¹Pontifícia Universidade Católica de Campinas - PUC, São Paulo, (Brasil). E-mail: vinicius.ferrari@puc-campinas.edu.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3997-6310>

²Pontifícia Universidade Católica de Campinas - PUC, São Paulo, (Brasil). E-mail: gigi.sousa23052004@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1830-0011>

³Pontifícia Universidade Católica de Campinas - PUC, São Paulo, (Brasil). E-mail: candidofilho@puc-campinas.edu.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8818-311X>

⁴ Pontifícia Universidade Católica de Campinas - PUC, São Paulo, (Brasil). E-mail: samuel.benedicto@puc-campinas.edu.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4591-6077>

B IOTECHNOLOGICAL INNOVATION AND AGRICULTURAL ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE: A PATENT-BASED ANALYSIS.

ABSTRACT

Purpose: we aim to analyze the role of biotechnological innovation in adapting agriculture to climate change, with emphasis on the development of drought-tolerant cultivars.

Originality: we contribute to literature by integrating patent data and regulatory records, offering a novel approach to assessing technological impact and the degree of commercial adoption of solutions associated with drought tolerance.

Methods: the study adopts a methodology based on the analysis of patents extracted from the Derwent database. Technological impact was measured using bibliometric indicators, complemented by regulatory information on the approval of transgenic seeds.

Results: patent filings accelerate after 2013, with a strong concentration in maize and soybean. Nevertheless, the commercial diffusion of drought-tolerant cultivars remains limited relative to other biotech traits (herbicide tolerance and pest resistance) due to agronomic and economic constraints, notably yield penalties in cropping systems.

Conclusions: the adaptation of agriculture to climate change depends on the consolidation of integrated agricultural systems that combine transgenic seeds, pest management strategies, and supportive public policies. We contribute to a better understanding of the limits and possibilities of biotechnology in addressing climate-related challenges.

Keywords: Transgenic seeds. Water stress. Agricultural patents. Regulatory approval. Pest management.

FUTURE STUDIES RESEARCH JOURNAL
Scientific Editor: Renata Giovanazzo Spers
Evaluation: Double Blind Review, pelo SEER/OJS
Received: 14/01/2026
Accepted: 20/05/2026

1. INTRODUÇÃO

O aquecimento global tem provocado quebras de safras em diferentes regiões do globo. A ocorrência de verões anormalmente quentes - ou, em outros casos, o extremo oposto, caracterizado por invernos excessivamente rigorosos - tem prejudicado de forma significativa a produção de alimentos. As plantas mostram-se, muitas vezes, incapazes de se adaptar a

situações de altas temperaturas, secas prolongadas, inundações e degelos precoces, entre outros eventos climáticos adversos (Ferrari et al., 2023; Oliveira et al., 2022).

De acordo com a Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO] (2023), o número de desastres ambientais quadruplicou em um curto espaço de tempo, passando de uma média de 100 eventos por ano na década de 1970 para aproximadamente 400 eventos anuais no século XXI. Esses eventos climáticos extremos resultaram em perdas estimadas em 3,8 trilhões de dólares nas últimas três décadas, o que corresponde a cerca de 5% da produção agropecuária mundial no período. Os países emergentes sofreram impactos ainda mais expressivos, com perdas que variaram entre 10% e 15% do produto interno bruto (PIB) agrícola anual, configurando-se como os mais afetados pelos desastres ambientais.

Um *survey* conduzido pela consultoria Kekst CNC (2023), com 800 agricultores de oito países - Alemanha, Austrália, Brasil, China, Estados Unidos, Índia, Quênia e Ucrânia - constatou que 70% dos entrevistados já vivenciaram episódios de altas temperaturas e/ou estiagens severas que comprometeram a produtividade e a lucratividade das lavouras. Ademais, ao serem questionados sobre as inovações consideradas mais relevantes para adaptar as plantações às mudanças climáticas no campo, 40% dos agricultores indicaram a intenção de utilizar organismos geneticamente modificados (OGM) tolerantes à seca, configurando essa a tecnologia mitigadora mais citada no levantamento.

O principal levantamento sobre a adoção de sementes tolerantes à seca foi realizado pelo United States Department of Agriculture (USDA), com base nos dados *do Agricultural Resource Management Survey* de 2016, relativos à cultura do milho nos Estados Unidos. Em termos de difusão, o milho tolerante à seca ocupava apenas 2% da área plantada no país em 2012. Em 2016, esse tipo de cultivar passou a representar 22% da área cultivada (aproximadamente 18,6 milhões de acres), indicando uma rápida expansão dessa tecnologia no período analisado (McFadden et al., 2019).

Diante das expectativas favoráveis quanto à utilização de OGM tolerantes à seca no desenvolvimento de sistemas agrícolas resilientes às mudanças climáticas, emerge uma importante questão de pesquisa: qual é o grau de maturidade dessa solução tecnológica no cenário atual? Apesar da literatura existente sobre os impactos dos eventos climáticos extremos na agricultura (FAO, 2023) e sobre as estratégias de mitigação no meio rural (McFadden et al., 2019), ainda são relativamente escassos os estudos que mapeiam inovações tecnológicas voltadas à ampliação da resiliência climática no campo a partir dos esforços de pesquisa,

desenvolvimento e proteção patentária realizados por diferentes atores das cadeias de insumos agrícolas.

Nesse sentido, este artigo busca preencher essa lacuna por meio da consecução de dois objetivos centrais: (i) identificar, com base na análise de dados patentários e no levantamento de registros regulatórios relativos à aprovação para uso comercial de sementes transgênicas, as tecnologias mais promissoras para o desenvolvimento de cultivares tolerantes à seca e de outros métodos voltados à ampliação da resiliência das lavouras frente a episódios de escassez hídrica; e (ii) discutir as condições de extensão dessas tecnologias para o Brasil.

Além de contribuir para a compreensão do estágio atual dessas biotecnologias agrícolas, o estudo possui implicações prospectivas relevantes, uma vez que permite identificar linhas de pesquisa emergentes e antecipar possíveis alternativas para a adaptação da agricultura em cenários futuros de intensificação das mudanças climáticas.

À luz destas contribuições, o artigo foi organizado da seguinte forma. A seção seguinte apresenta a revisão da literatura sobre inovações biotecnológicas voltadas à mitigação dos impactos climáticos no campo. A Seção 3 descreve a metodologia utilizada no artigo, ao passo que a Seção 4 apresenta os resultados obtidos. A Seção 5 discute tais resultados vis-à-vis a literatura especializada sobre os OGM e a Seção 6 conclui o artigo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Em um cenário marcado pelo avanço das mudanças climáticas, a manutenção dos níveis atuais de produção de alimentos torna-se progressivamente mais desafiadora. Diversos estudos sobre o tema indicam que, na ausência de inovações tecnológicas e organizacionais capazes de ampliar a resiliência dos sistemas produtivos, projeta-se um cenário de perdas crescentes na produção agrícola global, com implicações diretas para a segurança alimentar e a estabilidade dos mercados agrícolas (Challinor et al., 2014; Lobell et al., 2011).

Estudos mais recentes reforçam esse diagnóstico, uma vez que Hultgren et al. (2025) indicam que, mesmo considerando as medidas de adaptação adotadas nas últimas décadas, perdas de rendimento em culturas alimentares essenciais devem persistir nos próximos anos. Esses resultados evidenciam a necessidade urgente de uma nova geração de inovações tecnológicas capazes de sustentar a produtividade agrícola em um cenário de intensificação dos eventos climáticos extremos.

O agravamento da crise climática no campo ocorreu *pari passu* à rápida expansão dos OGM. Em apenas duas décadas de cultivo, as lavouras transgênicas passaram a ocupar aproximadamente 20% das áreas agrícolas mundiais, caracterizando uma inovação agrícola disruptiva cuja difusão tecnológica e comercial foi intensa (International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications [ISAAA], 2016). Esse processo motivou debates relevantes sobre os impactos econômicos e socioambientais dos OGM. As opiniões mais favoráveis destacam os benefícios para a segurança alimentar mundial derivados dos ganhos de produtividade agrícola, da redução do uso de pesticidas e da melhoria das condições econômicas dos agricultores (Klümper & Qaim, 2014).

Brookes e Barfoot (2014) estimaram que, no período de 1996 a 2012, os OGM propiciaram ganhos econômicos equivalentes a 116,9 bilhões de dólares para os agricultores globais. Na América do Sul, esses ganhos têm sido ainda mais expressivos. Estudos sobre a utilização da soja Intacta™ no Brasil indicam que cada US\$ 1 investido gerou aproximadamente US\$ 3,88 em lucro adicional (Brookes & Barfoot, 2020). Além desses benefícios econômicos, os OGM têm demonstrado eficácia no controle de pragas em culturas como soja (Brookes & Barfoot, 2020), algodão (Qaim & de Janvry, 2005) e milho (Pellegrino et al., 2018).

Esses dados econômicos sustentam interpretações que associam a rápida difusão dos OGM a ganhos econômicos consistentes, embora outros autores adotem uma postura mais cautelosa quanto às contribuições dessa tecnologia para cenários futuros de segurança alimentar. Graff et al. (2009) argumentam que as estratégias comerciais das empresas líderes tendem a priorizar culturas agrícolas de maior apelo comercial, resultando na concentração da inovação em poucas commodities⁵. Dessa maneira, segundo esse estudo, a maioria das culturas agrícolas permaneceu relativamente excluída dos ganhos de produtividade derivados da transgenia.

Uma segunda crítica ao processo de difusão dos OGM ressalta que o ritmo de desenvolvimento de sementes resilientes a eventos climáticos extremos não tem acompanhado a intensidade das mudanças climáticas observadas (Seixas et al., 2022). Estudos recentes indicam que, quando considerados isoladamente, os OGM atualmente comercializados apresentam tolerância limitada a secas severas. Apesar de reconhecerem o crescimento da área

⁵ Em 2016, dos 185,1 milhões de hectares globalmente semeados com OGM, 178,2 milhões de hectares foram dedicados ao cultivo da soja, do milho, do algodão e da canola, evidenciando a forte concentração dessa tecnologia em um número reduzido de culturas agrícolas (ISAAA, 2016).

cultivada com cultivares tolerantes ao estresse hídrico, McFadden et al. (2019) ressaltam que tais tecnologias necessitam ser combinadas com práticas agrícolas complementares, como irrigação e rotação de culturas, para produzir resultados mais consistentes.

Segundo Edmeades (2013), alguns obstáculos morfológicos têm retardado o desenvolvimento de determinados tipos de OGM. Características agrônômicas complexas, como a tolerância à seca, diferem dos *biotech traits*⁶ mais simples que apresentam maior difusão comercial (e.g., tolerância a herbicidas e resistência a pragas) por envolverem redes gênicas amplas, altamente interdependentes e fortemente influenciadas pelo ambiente. A resposta das plantas ao estresse hídrico resulta da interação de múltiplos processos fisiológicos e bioquímicos, incluindo a arquitetura radicular, a eficiência no uso da água, a fotossíntese e o metabolismo do carbono, cuja expressão varia de forma significativa em função do tipo, da intensidade e da duração dos episódios de seca. Essa complexidade tecnológica contribui para explicar por que certas linhas de pesquisa agrícola evoluem de forma mais lenta do que outras, podendo ser eventualmente prejudicadas por *lock-ins* tecnológicos.

Em complemento aos fatores tecnológicos anteriormente discutidos, Ferrari et al. (2021) apontam que fatores de ordem econômica também têm contribuído para retardar o desenvolvimento de cultivares tolerantes à seca. Segundo os autores, a tendência dos agricultores de priorizarem cultivares com maior retorno econômico imediato - isto é, as sementes que oferecem proteção contra defensivos químicos e pragas - acabou, em certa medida, desestimulando o avanço de outras linhas de pesquisa relacionadas às sementes transgênicas. Essas evidências reforçam os argumentos de Dosi (1982), segundo os quais a interação entre fatores tecnológicos e econômicos direciona as trajetórias tecnológicas no âmbito de um paradigma tecnológico.

Um estudo prospectivo discutiu um conjunto de biotecnologias que poderão dar origem a novos paradigmas tecnológicos na indústria de sementes e alterar significativamente o processo de desenvolvimento de novos cultivares tolerantes à seca. Nesse contexto, Seixas et al. (2022) destacam o potencial significativo dos métodos de edição gênica em plantas baseados na ferramenta biotecnológica *CRISPR-Cas9* para superar alguns gargalos tecnológicos das técnicas de transgenia e obter sementes mais eficientes no uso da água. Essas técnicas indicam a possibilidade de transições tecnológicas capazes de redefinir o padrão atual de adaptação

⁶ *Biotech trait* refere-se a uma característica agrônômica específica conferida à planta por meio da inserção de genes exógenos (oriundos de outras espécies) através de técnicas de engenharia genética (Ferrari et al., 2021).

agrícola às mudanças climáticas, em que a introdução de novos cultivares resistentes à seca ainda se mostra dependente de práticas de irrigação suplementares.

Em suma, essas discussões sobre transições tecnológicas reforçam a importância de monitorar continuamente a fronteira do conhecimento tecnológico por meio dos esforços de P&D e patenteamento, o que justifica a base metodológica adotada neste estudo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Natureza e tipologia da pesquisa.

Em consonância com as classificações propostas por Chizzotti (2018) e Gil (2019), esta pesquisa caracteriza-se como aplicada, com objetivos exploratórios e delineamento descritivo. Trata-se de um estudo bibliométrico-documental com abordagem patenteométrica, baseado na análise de documentos de propriedade intelectual e registros regulatórios relacionados à aprovação para cultivo, consumo humano e ração animal de cultivares agrícolas tolerantes à seca.

O trabalho adota um método misto, com predominância quantitativa e dimensão analítica-documental. A dimensão quantitativa da pesquisa abrange a utilização de indicadores extraídos de bases patentárias. Em termos práticos, o trabalho computou indicadores bibliométricos e tecnológicos - tais como as citações posteriores e a extensão geográfica das famílias de patentes - que têm sido amplamente empregados em estudos de inovação que visam identificar padrões temporais de desenvolvimento tecnológico. Paralelamente, a dimensão documental e interpretativa envolve a análise do conteúdo tecnológico descrito nas patentes e sua articulação com registros regulatórios relativos à aprovação comercial de OGM. Esses dados quantitativos e documentais são interpretados e discutidos à luz da literatura preexistente sobre as inovações biotecnológicas desenvolvidas no âmbito da indústria de sementes.

Essa abordagem mista bibliométrica-documental-patenteométrica apresenta natureza prospectiva, uma vez que a identificação de padrões de patenteamento ao longo do tempo permite inferir tendências tecnológicas emergentes e/ou possíveis ramificações futuras em trajetórias tecnológicas já consolidadas (Verspagen, 2007; Fontana et al., 2009).

3.2 Base de dados e justificativa da escolha

A plataforma utilizada para a construção do banco de patentes deste estudo foi o *Derwent Innovations Index (DII)*. A escolha dessa base se justifica em decorrência da sua ampla cobertura internacional, da classificação tecnológica detalhada dos registros, da padronização

das informações de titularidade e da consolidação de documentos em famílias de patentes, o que evita a duplicidade dos registros patentários. Essas características permitem uma análise mais consistente das atividades de patenteamento.

As ferramentas analíticas do *Derwent* também permitem a classificação dos documentos patentários em diferentes classes tecnológicas e a identificação dos respectivos titulares. Ademais, a plataforma disponibilizou informações referentes à abrangência geográfica das famílias de patentes e ao número de citações posteriores recebidas por cada família, dados que possibilitaram a construção dos dois indicadores de impacto tecnológico apresentados na Seção 3.4. Em suma, o *Derwent* integra informações bibliométricas e tecnológicas que permitem a realização de estudos de monitoramento tecnológico em nível setorial. Nesse sentido, a adoção dessa base permitiu a construção de um banco de dados replicável sobre tecnologias agrícolas relacionadas à tolerância à seca.

3.3 Delineamento da busca patentária e tratamento dos dados

O Portal de Periódicos da CAPES (<https://www-periodicos-capes-gov-br.ez128.periodicos.capes.gov.br/index.php>) foi utilizado para acessar a base de dados do *Derwent Innovations Index (DII)*. Nessa plataforma foi realizada uma busca por documentos patentários que: (i) contivessem em seu corpo textual os termos léxicos “*drought tolerant*” ou “*drought tolerance*” ou “*hydric stress*”; (ii) estivessem classificados na área de conhecimento “*Agriculture*”, conforme a categorização do *Derwent*; e (iii) tivessem sido depositados no período compreendido entre 2001 e 2024.

A query de busca é transcrita a seguir:

TS=(“*drought tolerant*” OR “*drought tolerance*” OR “*hydric stress*”) AND *Agriculture (Subject Areas)* AND *Timespan: 2001-01-01 to 2024-12-31 (Index Date)*

O tratamento dos dados procurou contornar dois pontos críticos inerentes a análise de patentes que foram amplamente discutidos por Griliches (1998): (i) a existência de patentes duplicadas que reivindicam a mesma tecnologia em países diferentes; e (ii) a assimetria de importância tecnológica entre os documentos patentários.

A busca retornou 2.102 famílias de patentes. O fato de o *Derwent* organizar os resultados de busca por número prioritário⁷ (família de patentes) consiste em um critério de exclusão

⁷ As famílias de patentes são compostas por documentos de propriedade intelectual que compartilham o mesmo número prioritário. Quando uma empresa realiza um primeiro pedido de patente, gera-se automaticamente um número prioritário, que concede ao depositante o direito exclusivo, por um período de até um ano, de requerer a proteção da tecnologia em outros países por meio de pedidos de extensão. Cada novo documento revalidado em

natural que possibilita a identificação e eliminação de documentos equivalentes depositados em múltiplos países, diminuindo a necessidade de critérios adicionais de controle da duplicidade dos registros patentários. Por essa razão, a base integral de famílias de patentes foi utilizada neste estudo. Todavia, procedimentos metodológicos adicionais foram empregados para controlar os problemas de assimetria tecnológica entre as patentes.

3.4 Indicadores de impacto tecnológico das patentes.

De acordo com Trajtenberg (1990), apenas uma pequena fração dos documentos patentários apresenta relevância econômica significativa, sendo responsável pelos principais desenvolvimentos tecnológicos observados em determinado setor. Em contrapartida, a imensa maioria das patentes possui impacto tecnológico reduzido, não se consubstanciando em aplicações comerciais. Ainda segundo o autor, a presença dessas assimetrias tende a problematizar o emprego da contagem simples de patentes como uma medida dos resultados das atividades de patenteamento.

Os procedimentos metodológicos apresentados a seguir visam justamente lidar com a natureza assimétrica das patentes retornadas pela busca. Dois indicadores patentários clássicos foram utilizados para identificar os documentos patentários com maior relevância tecnológica para o desenvolvimento de cultivares tolerantes à seca e de outras soluções voltadas ao aumento da resiliência das lavouras ao clima: (i) citações posteriores e (ii) abrangência da família de patentes. As premissas subjacentes a esses indicadores encontram respaldo consolidado na literatura especializada em análise de patentes.

No âmbito da análise patentária, o uso de indicadores bibliométricos baseados em citações tem sido amplamente empregado para inferir o impacto tecnológico das invenções protegidas. O uso de citações patentárias como *proxy* de impacto tecnológico foi originalmente proposto por Trajtenberg (1990) e posteriormente consolidado por Hall et al. (2001), que demonstram estatisticamente que patentes que recebem um número mais elevado de citações posteriores tendem a estar associadas a invenções de maior impacto tecnológico e maior potencial econômico.

outro escritório nacional herda o número prioritário da patente original, sendo incorporado à mesma família como uma patente de extensão. Ademais, documentos concedidos em momentos distintos por um mesmo escritório que reivindicam variações de uma mesma invenção também podem ser agrupados dentro de uma mesma família de patentes.

De forma complementar, Harhoff et al. (2003) evidenciam que empresas tendem a buscar uma proteção internacional mais ampla para patentes consideradas tecnologicamente mais robustas, estendendo seus direitos a um maior número de países. Segundo esses autores, a abrangência geográfica da proteção patentária reflete as expectativas dos detentores quanto ao valor econômico e à capacidade de geração de receitas associadas às suas invenções. No contexto específico deste estudo, a abrangência geográfica de uma invenção corresponde à amplitude de sua família de patentes, isto é, ao número de patentes de extensão depositadas em países diferentes do país do primeiro pedido da patente original que deu origem ao número prioritário (ver nota de rodapé 3).

3.5 Limitações metodológicas dos indicadores patentários e da plataforma de busca.

As ferramentas analíticas do *Derwent Innovations Index* (DII) contribuíram para contornar problemas metodológicos relacionados à duplicidade de registros e à assimetria de importância tecnológica entre as patentes. Todavia, a plataforma também apresenta algumas limitações, tais como a ausência de informações organizadas sobre titularidade geográfica - o que dificulta a construção de mapas globais detalhados de proprietários - e a indisponibilidade de dados sobre eventos legais relevantes, como pagamento de taxas de manutenção, litígios e transferências de propriedade intelectual.

Outra limitação reside no fato de que as classificações tecnológicas disponíveis na plataforma *Derwent* se baseiam em sistemas padronizados, como a *International Patent Classification* (IPC), os quais, embora amplamente utilizados, podem não captar integralmente novas linhas de pesquisa emergentes. Além disso, outras bases de dados, às vezes, apresentam sistemas de classificação tecnológica adicionais. O European Patent Office (EPO), por exemplo, utiliza o sistema *Cooperative Patent Classification* (CPC), que oferece maior detalhamento técnico em relação à IPC.

A leitura da Seção 3.4 evidencia uma limitação inerente aos dados patentários, relacionada à dificuldade de obtenção de indicadores diretos de impacto econômico e de adoção comercial das tecnologias patenteadas. Grande parte dessas limitações decorre do caráter sigiloso das informações relativas a receitas de *royalties* e contratos de licenciamento, que raramente são divulgadas de forma transparente pelos titulares dos direitos de propriedade intelectual. Uma dificuldade adicional reside no fato de que dados sobre litígios patentários encontram-se frequentemente associados a tribunais ou instâncias judiciais de acesso restrito ao pesquisador.

Soma-se a isso a existência de defasagens temporais entre o depósito e a aprovação das patentes e sua eventual difusão comercial, o que pode limitar a interpretação imediata do impacto tecnológico das invenções protegidas. Esses aspectos reforçam a necessidade de complementar a análise patentária com fontes adicionais de informação sobre adoção tecnológica.

3.6 A integração dos dados patentários com bases de registros regulatórios.

O *GM Approval Database* (<https://www.isaaa.org/gmaprovaldatabase/>) constitui uma base de dados pública e amplamente utilizada que reúne informações sobre a aprovação regulatória de OGM em nível internacional. O banco contempla registros de sementes transgênicas aprovadas para fins de comercialização, plantio, consumo humano e alimentação animal. As informações disponibilizadas são compiladas a partir de documentos oficiais de decisão emitidos por autoridades regulatórias nacionais de biossegurança, abrangendo a maior parte dos OGM aprovados globalmente (International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications [ISAAA], 2026).

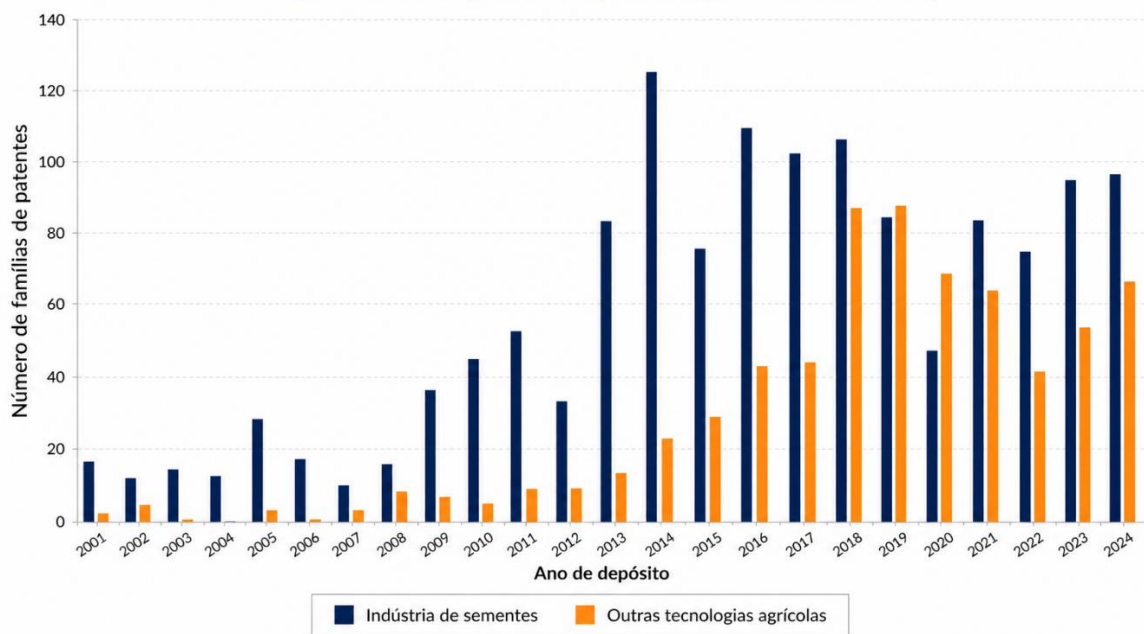
Com o intuito de compensar a ausência de indicadores diretos de aplicação comercial nos dados patentários, os registros de aprovação regulatória compilados pelo *GM Approval Database* foram utilizados como fonte complementar de informação e como *proxy* da adoção comercial das tecnologias patenteadas identificadas neste estudo. A integração dessas duas bases (patentária e regulatória) resultou em uma abordagem metodológica mista, em que indicadores tecnológicos foram articulados com evidências de aprovação regulatória para avaliar a difusão de biotecnologias agrícolas.

4 RESULTADOS

A busca patentária abrangeu o período de 2001 a 2024, identificando um total de 2.102 famílias de patentes. Os documentos foram analisados segundo a taxonomia da *International Patent Classification (IPC)*, elaborada pela World Intellectual Property Organization [WIPO] (2023), o que possibilitou a classificação das patentes de acordo com o segmento econômico de seus titulares. Aproximadamente dois terços dos documentos identificados - correspondentes a 1.402 famílias de patentes (Figura 1) - foram gerados no âmbito da indústria de sementes, tendo recebido as classificações IPC C12N 15/82 (métodos para obtenção de OGM) e/ou A01H 5/10 (sementes de angiospermas).

Os demais 701 documentos identificados estão associados a outros segmentos da indústria de insumos agrícolas. As reivindicações dessas patentes abrangeram diversas linhas de pesquisa pertencentes à classe tecnológica A01 (Agricultura), com destaque para as subclasses A01P 3/00 (fungicidas), A01B 79/02 (métodos de manejo do solo combinados com atividades de plantio), A01C 21/00 (métodos de fertilização) e A01G 13/00 (proteção de plantas por meio do uso de estufas). Adicionalmente, as classes tecnológicas C05F e C05G, que englobam fertilizantes químicos, também registraram um número elevado de pedidos de patentes no período analisado.

Figura 1 – Evolução anual dos depósitos de patentes (base de 2.102 famílias de patentes, período 2001–2024).



Fonte: *Derwent Innovations Index*.

A Figura 1 apresenta a evolução anual dos depósitos patentários associados aos dois tipos de invenções identificadas por meio das classes tecnológicas da *International Patent Classification*. Durante a década de 2000, os pedidos de patentes relacionados a sementes transgênicas tolerantes à seca mantiveram-se em níveis relativamente baixos, registrando uma média de 22 depósitos anuais. Observa-se um aumento relevante no número de depósitos a partir de 2013, quando foram realizados 84 pedidos, patamar que se manteve elevado nos anos subsequentes, de modo que o período compreendido entre 2014 e 2024 apresentou uma média anual de 91 depósitos.

Embora o número de patentes associadas a outros elos da indústria de insumos agrícolas seja inferior (totalizando 701 famílias de patentes ao longo do período analisado), ocorreu também uma trajetória de crescimento consistente desses depósitos, sobretudo a partir de 2011. Nesse segmento, o pico de atividades patentárias foi registrado em 2019, com 88 pedidos.

Os dados apresentados na Tabela 1 evidenciam a concentração geográfica das atividades de patenteamento em países tecnologicamente avançados, com destaque para organizações sediadas na Europa, nos Estados Unidos e na China. No âmbito das empresas, observa-se a predominância da Syngenta e da DuPont-Corteva nos depósitos de patentes, ao passo que a terceira posição do ranking é ocupada pela Bayer-Monsanto. Esses resultados sugerem que a distribuição da titularidade das patentes identificadas neste estudo reflete, em grande medida, a estrutura concentrada do mercado de sementes geneticamente modificadas. Em conjunto, essas três empresas respondem por aproximadamente 70% das vendas mundiais de OGM.

Tabela 1 – Ranking dos 10 principais titulares de patentes (base de 2.102 famílias de patentes, período 2001–2024)

Titulares	País de Origem	Número de Patentes
SYNGENTA	SUIÇA	371
DUPONT-CORTEVA	EUA	207
BAYER-MONSANTO	ALEMANHA/ EUA	54
PHYTOGEN SEED*	EUA	42
BIOCENTURY TRANSGENE CHINA CO LTD	CHINA	38
UNIV CHINA AGRICULTURAL	CHINA	32
UNIV CALIFORNIA	EUA	25
BASF	ALEMANHA	23
INST GENETICS DEV BIOLOGY CHINESE ACAD	CHINA	21
UNIV SHANDONG	CHINA	19

Fonte: *Derwent Innovations Index*.

*Nota: a Phytogen Seed é uma empresa especializada em sementes de algodão que foi adquirida, em 2020, pelo grupo DuPont-Corteva.

A despeito da ampla liderança dos principais grupos empresariais do mercado global de sementes transgênicas, a Tabela 1 evidencia uma relativa diversidade entre os titulares patentários identificados. Além das empresas líderes, o ranking contempla a maior empresa química da Europa (BASF), uma universidade norte-americana (Universidade da Califórnia), três instituições de pesquisa chinesas (China Agricultural University, Shandong University e Institute of Genetics and Developmental Biology, da Chinese Academy of Sciences), assim

como uma empresa de base biotecnológica daquele país asiático (Biocentury Transgene China Co. Ltd.).

Por outro lado, quando o foco da análise é direcionado para a lista das 15 patentes mais citadas - principal critério de relevância tecnológica adotado neste estudo - registra-se uma redução significativa da diversidade da titularidade patentária. Nesse conjunto, 40% das patentes que receberam, no mínimo, 50 citações pertencem ao conglomerado econômico Bayer-Monsanto (Tabela 2).

Tabela 2 – Lista das 15 patentes com maior número de citações posteriores (patentes com mais de 50 citações)

Número Prioritário	Proprietário Original	Utilização	Citações	Nº de Países	Patentes de Extensão no Brasil
US032568P	Monsanto	Sementes de milho transgênicas tolerantes a secas	304	8	BR200908267-B1 BR122018010813-B1
US718034P	Monsanto	Controle de pragas - biocidas	197	12	BR200616181-B1
US309134P	Universidade de Delaware	Controle de pragas - biocidas	161	14	BR112012021952-B1
US300112P	Syngenta	Métodos de obtenção de cultivares transgênicos tolerantes a secas	132	3	
US360039P	Monsanto	Métodos de obtenção de cultivares transgênicos tolerantes a secas	90	1	
US476189P	Arborgen; Genesis Res&Dev Corp	Métodos de obtenção de cultivares transgênicos tolerantes a secas	81	9	BR200411002-A
EP152488	Bayer	Controle de pragas - biocidas	73	8	
US396665P	Monsanto	Métodos de obtenção de cultivares transgênicos tolerantes a secas	70	8	BR200312771-B1 BR122015017898-B1
US679917P	Monsanto	Métodos de obtenção de cultivares transgênicos tolerantes a secas	68	3	
US828737P	PENN STATE RES FOUND	Métodos de obtenção de cultivares por meio do Sistema CRISPR-CAS9	62	1	
US239721P	Universidade da Califórnia	Métodos de obtenção de cultivares transgênicos tolerantes a secas	62	1	
US551369	Seminis Seeds	Sementes de alface transgênicas tolerantes a secas	58	1	
US172748P	INDIGO AGRIC INC	Controle de pragas - biocidas	57	7	
US714887	MENDEL BIOTECHNOLOGY INC	Métodos de obtenção de cultivares transgênicos tolerantes a secas	54	5	
GB016880	Syngenta	Métodos de obtenção de cultivares transgênicos tolerantes a secas	50	9	BR200918730-A2

Fonte: Derwent Innovations (2024).

Por razões de espaço, os títulos e as datas de depósito dos documentos apresentados na Tabela 2 são detalhados no Anexo 1 deste trabalho. A leitura dos resumos e das reivindicações dessas patentes possibilitou a identificação de três grupos distintos de soluções tecnológicas voltadas à adaptação das plantas às mudanças climáticas: (i) métodos para o desenvolvimento de cultivares tolerantes a secas baseados em técnicas de transgenia, isto é, na introdução de fragmentos gênicos provenientes de outras espécies no genótipo das plantas, com o objetivo de conferir novas funcionalidades agrônômicas; (ii) métodos de edição gênica de plantas por meio da ferramenta biotecnológica *CRISPR-Cas9*; e (iii) compostos químicos e/ou microrganismos passíveis de aplicação no controle de pragas, com destaque para biocidas destinados, sobretudo, ao combate de fungos. Os três grupos serão discutidos em maior detalhe na Seção 5. Convém neste momento, no entanto, apresentar uma matriz tecnológica que sintetiza o status tecnológico e a intensidade da evidência patentária associada a cada linha de pesquisa.

Quadro 1 – Matriz tecnológica das principais linhas de inovação agrícola identificadas no estudo

Solução	Princípio técnico	Status tecnológico	Evidência patentária*
Sementes tolerantes à seca	Transgenia	Comercial	Alta
CRISPR	Edição gênica	Emergente	Baixa
Biocidas	Controle químico e biológico de pragas	Comercial	Moderada

Fonte: Elaboração própria

* O termo evidência patentária refere-se à participação relativa de cada solução tecnológica no conjunto de famílias de patentes identificadas no estudo.

Um importante indício do status comercial das sementes transgênicas tolerantes à seca reside na convergência entre os resultados apresentados na Tabela 2 e os genes que, de acordo com o *GM Approval Database*, deram origem a novos produtos. A patente US032568P, que lidera o ranking de citações posteriores da Tabela 2, reivindica fragmentos do gene *cspB*, cuja origem remonta à bactéria do solo *Bacillus subtilis*. Quando introduzido em plantas geneticamente modificadas, o gene *cspB* contribui para a manutenção da estabilidade do RNA mensageiro e dos processos de tradução proteica sob condições de estresse hídrico. Esse mecanismo auxilia na preservação de processos fisiológicos essenciais, como a fotossíntese e o metabolismo do carbono, resultando em maior tolerância das plantas a períodos de seca.

Por essas razões, o gene *cspB* foi utilizado no desenvolvimento do Milho DroughtGard™, da Monsanto. De forma semelhante, o gene *Hahb-4*, reivindicado pela patente

WOUS13770⁸, deu origem aos produtos Verdeca HB4 Soybean e HB4 Wheat. O Quadro 2 sumariza as aprovações regulatórias concedidas a esses três cultivares geneticamente modificados por autoridades regulatórias de diferentes países.

Quadro 2 – Cultivares geneticamente modificados tolerantes a secas que foram aprovados para uso comercial (país, ano e tipo de aprovação)

Monsanto DroughtGard™ (gene <i>cspB</i> reivindicado pela patente US032568P. Patentes de extensão brasileiras: BR200908267-B1; BR122018010813-B1)			
País	Uso em alimentos (ano)	Uso em ração (ano)	Cultivo (ano)
Australia	2010		
Brasil	2016	2016	
Canada	2011	2010	2010
Colombia	2011	2012	
União Europeia	2015	2015	
Ghana	2024	2024	
Indonesia	2017		
Irã		2016	
Japão	2011	2011	2012
Malasia	2020	2020	2020
Mexico	2011		
Nova Zelândia	2010		
Nigeria	2018	2018	
Filipinas	2012	2012	
Singapura	2015	2015	
Coreia do Sul	2012	2011	
Holanda	2024	2024	
Taiwan	2011		
Tailândia	2013		
Turquia		2017	
Estados Unidos	2010	2010	2011
Vietnã	2015	2015	
Verdeca HB4 Soybean (gene <i>Hahb-4</i> reivindicado pela patente WOUS13770. Patentes de extensão brasileiras: BR122014032137B1; BRPI0318314B1)			
País	Uso em alimentos (ano)	Uso em ração (ano)	Cultivo (ano)
Argentina	2015	2015	2015
Australia	2022		
Brasil	2019	2019	2019

⁸ A patente WOUS13770 registra como titular a empresa Bioceres. Embora o documento integre o banco de patentes analisado neste estudo, ele não foi incorporado à Tabela 2 por ter recebido apenas 17 citações posteriores.

Canada	2021		
Colombia	2022		
Malasia	2023	2023	2023
Paraguai	2019	2019	
Estados Unidos	2017	2017	2019
HB4 Wheat (gene <i>Hahb-4</i> reivindicado pela patente WO/US13770. Patentes de extensão brasileiras: BR122014032137B1; BRPI0318314B1)			
País	Uso em alimentos (ano)	Uso em ração (ano)	Cultivo (ano)
Argentina	2020	2020	2020
Australia	2022	2022	
Brasil	2021	2021	2023
Colombia	2022	2022	
Nova Zelândia	2022	2022	
Nigeria	2022	2022	
Paraguai	2023	2023	2023
Estados Unidos	2022	2022	

Fonte: ISAAA GM Approval Database (2024).

Nota: a ausência de informação em determinada coluna indica que não houve solicitação de aprovação regulatória para aquela aplicação comercial específica.

A despeito dessas aprovações regulatórias, os resultados apresentados no Quadro 2- que envolvem dois genes responsáveis pelo desenvolvimento de três produtos comerciais - mostram-se relativamente limitados quando comparados a outras linhas de pesquisa gênica já consolidadas. De acordo com o banco de dados do *GM Approval Database*, há o registro de 29 genes capazes de conferir tolerância a herbicidas em plantas, assim como de 45 genes voltados ao aumento da resistência das sementes a diferentes tipos de pragas, incluindo insetos, nematoides e fungos. Essas abordagens possibilitaram o desenvolvimento de dezenas de cultivares transgênicos comercialmente disponíveis, evidenciando uma assimetria relevante no grau de maturidade tecnológica entre essas diferentes funcionalidades agrônômicas.

5 DISCUSSÃO

5.1 Desafios globais e regionais para o desenvolvimento de OGM tolerantes à seca.

Os resultados apresentados na Seção 4 podem ser mais bem interpretados à luz da literatura revisada na Seção 2. Os dados disponibilizados pelo *GM Approval Database* (Quadro 2) fornecem um indício adicional a respeito de uma lacuna histórica no desenvolvimento dos

OGM. Em 2026, o cultivo comercial de sementes transgênicas completa 32 anos e, ao longo dessas três décadas, uma das principais críticas direcionadas ao processo de difusão desses cultivares refere-se ao ritmo lento - ou considerado insuficiente - de desenvolvimento de variedades tolerantes à seca. Graff et al. (2009) foram pioneiros ao levantar essa hipótese e, à luz das evidências apresentadas neste estudo, esse cenário não parece ter se alterado de forma significativa nas décadas subsequentes à publicação daquele trabalho.

O padrão de difusão das sementes de milho tolerantes à seca nos EUA é um bom ponto de partida para discutir as possibilidades futuras de superação dessa lacuna histórica. De acordo com McFadden et al. (2019), a cultura do milho nos Estados Unidos passou por mudanças significativas no biênio 2012–2013. Em 2012, teve início o plantio comercial dos cultivares Artesian™, da Syngenta, e AQUAmax™, da DuPont. Ambas as linhagens foram desenvolvidas por meio de processos tradicionais de melhoramento genético e hibridização convencional, com o objetivo de obter variedades de milho híbrido mais resilientes ao estresse hídrico. No ano seguinte, ocorreu o lançamento do cultivar geneticamente modificado Milho DroughtGard™, da Monsanto.

Os autores compararam a difusão de híbridos convencionais de milho tolerantes à seca com o cultivar DroughtGard™, bem como a relação dessas variedades com a incorporação de outros *biotech traits*. Em 2016, cerca de 18,6 milhões de acres foram semeados com cultivares tolerantes à seca, dos quais 19,9% correspondiam ao Monsanto DroughtGard™, 67,4% ao DuPont AQUAmax™ e 12,8% ao Syngenta Artesian™ (McFadden et al., 2019, p. 38).

Ademais, a ampla maioria das áreas cultivadas com sementes da DuPont e da Syngenta também incorporou *biotech traits* associados à tolerância a herbicidas (TH) e/ou à resistência a insetos (RI). Nesse conjunto, 92% dos híbridos convencionais tolerantes à seca possuíam ao menos um gene associado à TH, enquanto 85% carregavam pelo menos um gene relacionado à RI. Aproximadamente 77% das áreas cultivadas com híbridos convencionais foram semeadas com sementes que apresentavam os dois *biotech traits* empilhados (TH+RI) em seu genoma (McFadden et al., 2019, p. 14).

Os dados referentes à safra de 2016 divulgados por McFadden et al. (2019) elucidam as estratégias integradas adotadas pelos agricultores norte-americanos para o enfrentamento simultâneo de pragas e eventos de seca. Os produtores de milho priorizaram a utilização de híbridos convencionais para mitigar os efeitos do estresse hídrico, ao passo que a incorporação de *biotech traits* associados à TH e/ou à RI ao genoma desses híbridos ofereceu proteção adicional contra ervas daninhas e insetos. Em contraste, a adoção de sementes com três *biotech*

traits empilhados - tolerância à seca, TH e RI - permaneceu significativamente inferior à observada para essa primeira alternativa⁹, baseada na utilização de híbridos convencionais associados a *biotech traits* comerciais.

Uma explicação central para a menor adoção do empilhamento triplo reside nas penalidades de rendimento agrícola frequentemente associadas à introdução de genes de tolerância à seca. Conforme ressalta Edmeades (2013), *biotech traits* vinculados à resposta ao estresse hídrico tendem a impor custos fisiológicos às plantas, ampliando a probabilidade de *trade-offs* agrônômicos. Do ponto de vista morfológico e fisiológico, alterações gênicas que favorecem a sobrevivência sob condições de estresse hídrico podem interferir negativamente na expressão dos genes relacionados ao controle de pragas, de modo que a tolerância à seca nem sempre se traduz em ganhos de produtividade em ambientes sem restrição hídrica. Esses *trade-offs* tornam a incorporação de genes associados à tolerância à seca economicamente mais arriscada do que a adoção de *biotech traits* como TH ou RI, cujos efeitos sobre o rendimento tendem a ser mais diretos, previsíveis e estáveis. Isso também implica que a tolerância à seca, quando considerada de forma isolada, não constitui um atributo agrônômico suficientemente atrativo para sustentar sua adoção em larga escala.

As limitações identificadas por Edmeades (2013) e McFadden et al. (2019) são ainda mais relevantes em países de agricultura tropical do Sul Global, como o Brasil, onde os sistemas produtivos são particularmente sensíveis às penalidades de rendimento associadas ao empilhamento de genes. Em ambientes de clima quente, a pressão de pragas é significativamente mais intensa, o que exige o desenvolvimento de cultivares contendo um número maior de genes empilhados para garantir resistência a múltiplos insetos e tolerância a diferentes herbicidas (Pellegrino et al., 2018).

Esse contexto de múltiplos empilhamentos restringe a margem para a inserção adicional de genes associados à tolerância à seca, uma vez que cada novo *biotech trait* incorporado tende a aumentar o risco de interações negativas com as demais biotecnologias voltadas ao controle

⁹ O relatório *Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops 2016* reforça essa percepção. Segundo o relatório, os Estados Unidos cultivaram aproximadamente 38,1 milhões de hectares com milho transgênico em 2016, dos quais apenas uma pequena parcela - cerca de 1,2 milhão de hectares - foi semeada com cultivares geneticamente modificados portadores de genes associados à tolerância à seca. Em contraste, sementes tolerantes a herbicidas, resistentes a insetos e/ou que combinavam essas duas tecnologias ocuparam, em conjunto, cerca de 99% da área cultivada com OGM naquele ano (ISAAA, 2016).

A série de relatórios *Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops* foi encerrada após a safra de 2018/2019, o que limita a disponibilidade de dados mais recentes sobre a adoção de sementes transgênicas tolerantes à seca. Ainda assim, a ausência de novos lançamentos comerciais desde o milho DroughtGard™, da Monsanto (Quadro 2), constitui um indício adicional de que essas tendências se mantiveram na década subsequente.

de pragas. Como resultado, a incorporação de genes relacionados à tolerância à seca em países tropicais enfrenta obstáculos técnicos ainda mais expressivos do que aqueles observados em regiões de agricultura temperada.

Esses obstáculos associados a penalidades de rendimentos parecem estar inibindo o lançamento de cultivares transgênicos tolerantes à seca no Brasil. De acordo com a Tabela 2, a Bayer-Monsanto estendeu ao território brasileiro a patente US032568P, que reivindica a propriedade do gene *cspB*, capaz de ampliar a tolerância à seca em cultivares de milho. Essa extensão resultou na concessão da patente brasileira BR200908267-B1, atualmente válida em todo o território nacional. Entretanto, conforme indicado no Quadro 2, o gene *cspB* foi aprovado no Brasil, em 2016, apenas para consumo humano e alimentação animal, não havendo solicitação, por parte da empresa, de autorização regulatória para o plantio de cultivares que incorporam esse gene. Isso implica que o milho DroughtGard™ foi autorizado exclusivamente para consumo via importação, não sendo cultivado comercialmente no país. Em contraste, o milho híbrido convencional DuPont AQUAmax™ vem sendo plantado no Brasil desde abril de 2021.

Um cenário semelhante é observado no caso da soja geneticamente modificada tolerante à seca. O produto Verdeca HB4 Soybean foi aprovado no Brasil, em 2019, para consumo humano, alimentação animal e plantio (Quadro 2). Contudo, o cultivo comercial desse cultivar tem sido praticamente inexistente em um contexto no qual a taxa de adoção de sementes transgênicas portadoras de *biotech traits* associados à TH e/ou à RI ultrapassa 90% das áreas plantadas com soja no Brasil (International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications [ISAAA], 2018).

Essas constatações revelam o dilema entre Cila e Caríbdis ao qual o Brasil e os demais países do Sul Global estão expostos. De um lado, existem barreiras técnicas e econômicas relacionadas ao controle de pragas que tendem a limitar a difusão dos OGM tolerantes à seca em sistemas produtivos tropicais. Por outro lado, conforme ressalta FAO (2023), essas regiões são as que mais necessitam desse tipo de solução tecnológica, por serem mais vulneráveis aos eventos climáticos extremos¹⁰ do que os países de clima temperado.

¹⁰ A lista de perdas de safra causadas por eventos climáticos extremos em países do Sul Global é extensa e continua a crescer. Durante a safra 2018/2019, uma forte estiagem ocorrida nos meses de verão na Argentina reduziu, pela primeira vez em duas décadas, a área dedicada ao cultivo da soja naquele país (ISAAA, 2018). Evento semelhante foi observado na Região Sul do Brasil no ciclo agrícola 2021/2022, quando situações de estresse hídrico exerceram impactos negativos significativos sobre as culturas de arroz, feijão, trigo, soja e milho. Em 2023, pela segunda vez em um mesmo quinquênio, uma seca severa provocou a quebra da safra argentina de trigo. Já no verão brasileiro de 2024, o estado do Rio Grande do Sul foi acometido por outro tipo de evento climático extremo, marcado pela

5.2 Esforços de pesquisa voltados para superar gargalos tecnológicos e econômicos na indústria de sementes.

Os obstáculos associados às penalidades de rendimento que têm dificultado a difusão de sementes transgênicas tolerantes à seca no Brasil e nos Estados Unidos não são inéditos para a indústria de sementes. Conforme argumentam Fernandez-Cornejo e Caswell (2006) e Gurian-Sherman (2009), as primeiras tentativas de empilhamento dos genes associados à TH e à RI, ainda nos anos 2000, enfrentaram desafios semelhantes. No entanto, os esforços contínuos de P&D empreendidos pela indústria foram capazes de superar essas limitações, abrindo caminho para a rápida difusão de cultivares portadores de *biotech traits* empilhados TH+RI ao longo da década de 2010. Tal como proposto no esquema analítico de Dosi (1982), esse precedente histórico sugere que limitações inicialmente consideradas estruturais podem ser gradualmente superadas por meio do avanço científico, possibilitando a reconfiguração dos *trade-offs* econômicos e tecnológicos que caracterizam a difusão do conhecimento no âmbito de um paradigma tecnológico.

Nesse contexto, a Figura 1 evidencia a aceleração dos depósitos de patentes associados a novos métodos de obtenção de cultivares tolerantes à seca após o lançamento do milho DroughtGard™ em 2013. Esse padrão sugere um esforço crescente da indústria de sementes no sentido de desenvolver soluções tecnológicas capazes de mitigar as penalidades de rendimento associadas à introdução de genes de tolerância à seca em cultivares transgênicos.

Em complemento à patente do gene *cspB* (US032568P), a linha de pesquisa intitulada “métodos de obtenção de cultivares transgênicos tolerantes a secas”, apresentada na Tabela 2, abrange também os documentos US300112P, US476189P, US396665P, US679917P, US714887, US551369 e GB016880. Esses documentos foram objeto de pedidos de extensão para múltiplos países, incluindo o Brasil, resultando, entre outras, nas patentes brasileiras BR200411002-A, BR200312771-B1, BR122015017898-B1 e BR200918730-A2.

Esses primeiros sinais de mudança nas estratégias tecnológicas adotadas pela indústria de sementes tendem a complementar o trabalho Ferrari et al. (2021). Os autores utilizaram um banco de patentes concedidas entre 1976 e 2012 pelo United States Patent and Trademark Office (USPTO), cujo recorte temporal se encerrou um ano antes do início do período de forte crescimento dos pedidos de patentes que reivindicam métodos de obtenção de cultivares

ocorrência de chuvas intensas que comprometeram significativamente a produção agrícola regional (Caleffi et al., 2024; Sosa et al., 2025).

tolerantes à seca, conforme ilustrado na Figura 1. Esse processo analítico de identificação de tendências tecnológicas emergentes que não haviam sido captadas em estudos anteriores reforça o caráter prospectivo deste estudo, ao sugerir a possibilidade de ramificações futuras ao longo das trajetórias associadas ao controle de pragas identificadas por Ferrari et al. (2021), que têm dominado a indústria de sementes nas últimas três décadas.

Se, por um lado, as novas tendências tecnológicas identificadas neste trabalho sugerem que a lacuna de pesquisa relacionada ao desenvolvimento de sementes transgênicas tolerantes à seca vem sendo gradualmente atenuada, o mesmo não ocorre em relação ao problema das “culturas órfãs” da transgenia. Essa crítica de Graff et al. (2009) refere-se ao fato de a indústria de sementes relegar a um segundo plano diversas culturas agrícolas de menor apelo comercial, que não se beneficiaram dos ganhos de produtividade associados à transgenia. Esse padrão parece se reproduzir no contexto atual, uma vez que, com exceção da patente US551369 - que abrange cultivares de alface -, os métodos de obtenção de OGM tolerantes à seca reivindicados pelas patentes apresentadas na Tabela 2 concentram-se predominantemente nas culturas do milho e da soja.

A Tabela 2 também sugere que os métodos de obtenção de cultivares tolerantes à seca por meio da ferramenta biotecnológica CRISPR-Cas9 se encontram em estágio embrionário de difusão, ainda distantes de uma aplicação comercial em larga escala. Apenas uma patente - o documento US828737P, pertencente à *Penn State University* - reivindica esse tipo de solução tecnológica, sendo que a cobertura geográfica dessa patente permanece restrita ao território dos Estados Unidos. Esse estágio pré-operacional indica que, embora promissoras, as ferramentas de edição gênica ainda necessitam de avanços técnicos e regulatórios antes de sua incorporação aos sistemas de produção agrícola.

5.3 Novas estratégias tecnológicas para o controle de patógenos fúngicos

Em complemento aos métodos de transgenia e às técnicas de edição gênica, a Tabela 2 evidencia a existência de uma terceira linha de pesquisa tecnológica de elevada relevância. As patentes US718034P, US309134P, EP152488 e US172748P reivindicam compostos químicos e/ou microrganismos passíveis de aplicação no controle de pragas, com destaque para biocidas destinados ao combate de fungos.

A identificação dessas soluções tecnológicas reforça a proposição de Stukenbrock e Gurr (2023), segundo a qual o enfrentamento dos impactos do aquecimento global sobre a agricultura exige não apenas o desenvolvimento de cultivares menos dependentes de recursos

hídricos, mas também a incorporação de estratégias capazes de ampliar a resiliência das lavouras à infestação por patógenos fúngicos. Essa dimensão torna-se particularmente relevante na medida em que a elevação das temperaturas globais tem contribuído para a expansão geográfica desses patógenos, resultando em perdas expressivas de produção e impactos adversos sobre a segurança alimentar em escala mundial.

6 CONCLUSÕES

A principal contribuição deste estudo consistiu na identificação dos principais desafios associados à adaptação da agricultura às mudanças climáticas. Convém, neste momento, listar os obstáculos centrais discutidos na Seção 5, os quais podem servir de referência para pesquisas futuras, estratégias de inovação e políticas públicas voltadas à ampliação da resiliência das lavouras ao clima. Em suma:

- I. Os cultivares atualmente disponíveis com tolerância a situações de estresse hídrico não são capazes, de forma isolada, de mitigar os impactos de secas severas, o que tem exigido a adoção de práticas agrícolas complementares, como irrigação, plantio direto e rotação de culturas.
- II. A tolerância à seca, quando considerada isoladamente, não constitui um atributo agronômico suficientemente atrativo para sustentar sua adoção em larga escala. Ademais, a combinação de genes associados ao estresse hídrico com outros *biotech traits* de interesse comercial pode gerar penalidades de rendimento, o que tem retardado o desenvolvimento e a comercialização de sementes tolerantes a secas.
- III. Os esforços de pesquisa voltados à tolerância à seca permanecem concentrados em lavouras de maior apelo comercial, especialmente soja e milho, relegando a um segundo plano diversas outras culturas agrícolas.
- IV. Métodos alternativos para o desenvolvimento de cultivares tolerantes à seca, baseados em ferramentas de edição gênica como o CRISPR-Cas9, embora promissores, ainda se encontram distantes de uma aplicação comercial em larga escala.
- V. A elevação das temperaturas globais tem contribuído para a expansão geográfica de fungos e outras pragas agrícolas, resultando em perdas produtivas significativas e ampliando a complexidade dos desafios enfrentados pelos sistemas agrícolas.

As cinco tendências elencadas acima tendem a elevar o risco de novas crises de oferta agrícola capazes de desencadear choques globais de preços de alimentos tão severos quanto aqueles que ocorreram nas décadas de 2000 e 2010, cujos impactos adversos sobre a segurança alimentar mundial foram descritos por Ferrari et al. (2023). Por outro lado, os resultados

apresentados neste estudo reforçam a hipótese da existência de um movimento, no âmbito da indústria de sementes, voltado à intensificação dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento de OGM tolerantes à seca, em resposta à crescente demanda dos agricultores por sementes menos dependentes do uso intensivo de recursos hídricos.

A reorientação das estratégias de pesquisa das três maiores empresas globais de sementes transgênicas - Bayer-Monsanto, DuPont-Corteva e Syngenta - apresenta potencial para ampliar a resiliência climática de milhões de hectares cultivados; contudo, esse esforço empresarial, quando conduzido de forma isolada, não se mostra suficiente para superar todos os obstáculos tecnológicos, agrônômicos e econômicos associados aos cinco desafios elencados anteriormente.

Nesse contexto, torna-se necessário o fortalecimento dos esforços de pesquisa conduzidos por órgãos estatais e fundações não governamentais, com o objetivo de complementar os programas privados de melhoramento genético e viabilizar a adaptação de culturas agrícolas menos atrativas para a indústria de sementes às novas condições climáticas. A ampliação generalizada da resiliência do meio rural às mudanças climáticas dependerá, portanto, da consolidação de sistemas agrícolas integrados, capazes de combinar cultivares tolerantes à seca com novas estratégias de controle de infestações por fungos e outras pragas favorecidas pela elevação da temperatura global. O êxito dessa integração será cada vez mais decisivo para a mitigação dos impactos do aquecimento global no campo e para a garantia da segurança alimentar.

Conclui-se que a análise integrada de dados patentários e registros regulatórios adotada neste artigo ofereceu uma abordagem inédita para aprofundar a compreensão dos limites e das possibilidades da biotecnologia agrícola frente aos desafios climáticos.

7 REFERÊNCIAS

Brookes, G., & Barfoot, P. (2014). Economic impact of GM crops. *GM Crops & Food*, 5(1), 65–75. <https://doi.org/10.4161/gmcr.28098>

Brookes, G., & Barfoot, P. (2020). *GM crops: Global socio-economic and environmental impacts 1996–2018*. PG Economics Ltd. <https://pgeconomics.co.uk/pdf/globalimpactfinalreportJuly2020.pdf>

Caleffi, F., Viegas, C., Lima, K., & Bonato, S. (2024). The impacts of extreme weather events: A comprehensive analysis of the 2024 floods in Rio Grande do Sul. *Redes – Revista de Desenvolvimento Regional*, 29(1). <https://doi.org/10.17058/redes.v29i1.19660>

Challinor, A. J., Watson, J., Lobell, D. B., Howden, S. M., Smith, D. R., & Chhetri, N. (2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change*, 4, 287–291. <https://doi.org/10.1038/nclimate2153>

Chizzotti, A. (2018). *Pesquisa em ciências humanas e sociais*. Cortez.

Dosi, G. (1982). Technological paradigms and technological trajectories: A suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. *Research Policy*, 11(3), 147–162. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(82\)90016-6](https://doi.org/10.1016/0048-7333(82)90016-6)

Edmeades, G. O. (2013). *Progress in achieving and delivering drought tolerance in maize: An update*. International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA). <https://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/44/specialfeature/Progress%20in%20Achieving%20and%20Delivering%20Drought%20Tolerance%20in%20Maize.pdf>

Fernandez-Cornejo, J., & Caswell, M. (2006). *The first decade of genetically engineered crops in the United States*. U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service. <https://www.ers.usda.gov/publications/pub-details?pubid=43741>

Ferrari, V. E., Silveira, J. M. F. J., & Dal-Poz, M. E. S. (2021). Patent network analysis in agriculture: A case study of the development and protection of biotechnologies. *Economics of Innovation and New Technology*, 30(2), 111–133. <https://doi.org/10.1080/10438599.2019.1684645>

Ferrari, V. E., Moreira, A. M. de A., Branchi, B. A., Benedicto, S. C., & Silva Filho, C. F. (2023). Um estudo sobre o progresso das agendas de promoção da segurança alimentar e do desenvolvimento agrícola. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, 16(10), 24561–24577. <https://doi.org/10.55905/revconv.16n.10-343>

Fontana, R., Nuvolari, A., & Verspagen, B. (2009). Mapping technological trajectories as patent citation networks: An application to data communication standards. *Economics of Innovation and New Technology*, 18(4), 311–336. <https://doi.org/10.1080/10438590802564570>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). *The impact of disasters on agriculture and food security 2023: Avoiding and reducing losses through investment in resilience*. <https://doi.org/10.4060/cc7900en>

Gil, A. C. (2019). *Métodos e técnicas de pesquisa social*. Atlas.

Graff, G. D., Hochman, G., & Zilberman, D. (2009). The political economy of agricultural biotechnology policies. *AgBioForum*, 12(1), 34–46. <https://agbioforum.org/wp-content/uploads/2021/02/AgBioForum-12-1-34.pdf>

Griliches, Z. (1998). Patent statistics as economic indicators: A survey. In National Bureau of Economic Research (Ed.), *R&D and productivity: The econometric evidence* (pp. 287–343). University of Chicago Press.

Gurian-Sherman, D. (2009). *Failure to yield: Evaluating the performance of genetically engineered crops*. Union of Concerned Scientists. <https://www.ucs.org/sites/default/files/2019-10/failure-to-yeild.pdf>

Hall, B. H., Jaffe, A. B., & Trajtenberg, M. (2001). *The NBER patent citation data file: Lessons, insights and methodological tools (NBER Working Paper No. 8498)*. National Bureau of Economic Research. <https://www.nber.org/papers/w8498>

Harhoff, D., Scherer, F. M., & Vopel, K. (2003). Citations, family size, opposition and the value of patent rights. *Research Policy*, 32(8), 1343–1363. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00124-5](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00124-5)

Hultgren, A., Carleton, T., Delgado, M., Gergel, D. R., Greenstone, M., Houser, T., Hsiang, S., Jina, A., Kopp, R. E., Malevich, S. B., McCusker, K. E., Mayer, T., Nath, I., Rising, J., Rode, A., & Yuan, J. (2025). Impacts of climate change on global agriculture accounting for adaptation. *Nature*, 642(8068), 644–652. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09085-w>

International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA). (2016). *Global status of commercialized biotech/GM crops: 2016 (ISAAA Brief No. 52)*. <https://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/52/download/isaaa-brief-52-2016.pdf>

International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA). (2018). *Global status of commercialized biotech/GM crops: 2018: Biotech crops continue to help meet the challenges of increased population and climate change (ISAAA Brief No. 54)*. <https://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/54/download/isaaa-brief-54-2018.pdf>

International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA). (2026). *GM approval database*. Retrieved April 29, 2026, from <https://www.isaaa.org/gmapprovaldatabase/>

Kekst CNC. (2023). *Farmer voice survey 2023*. <https://www.bayer.com/sites/default/files/FarmerVoiceSurvey2023.pdf>

Klümper, W., & Qaim, M. (2014). A meta-analysis of the impacts of genetically modified crops. *Plos One*, 9(11), e111629. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111629>

Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616–620. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>

McFadden, J., Smith, D., Wechsler, S., & Wallander, S. (2019). *Development, adoption, and management of drought-tolerant corn in the United States (Economic Information Bulletin No. 204)*. U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service. https://ers.usda.gov/sites/default/files/_laserfiche/publications/91103/EIB-204.pdf?v=29559

Oliveira, S. F., Prado, R. B., & Monteiro, J. M. G. (2022). Impactos das mudanças climáticas na produção agrícola e medidas de adaptação sob a percepção de atores e produtores rurais de Nova Friburgo, RJ. *Interações*, 23(4), 1179–1201. <https://doi.org/10.20435/inter.v23i4.3548>

Pellegrino, E., Bedini, S., Nuti, M., & Ercoli, L. (2018). Impact of genetically engineered maize on agronomic, environmental and toxicological traits: A meta-analysis of 21 years of field data. *Scientific Reports*, 8(1), Article 3113. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21284-2>

Qaim, M., & de Janvry, A. (2005). Bt cotton and pesticide use in Argentina: Economic and environmental effects. *Environment and Development Economics*, 10(2), 179–200. <https://doi.org/10.1017/S1355770X04001883>

Seixas, R. N. L., Silveira, J. M. F. J., & Ferrari, V. E. (2022). Assessing environmental impact of genetically modified seeds in Brazilian agriculture. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 977793. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.977793>

Sosa, G., Fernández-Long, M., & Vicente-Serrano, S. (2025). Evaluating the performance of drought indices for assessing agricultural droughts in Argentina. *Agronomy Journal*, 117(1), e70008. <https://doi.org/10.1002/agj2.70008>

Stukenbrock, E., & Gurr, S. (2023). Address the growing urgency of fungal disease in crops. *Nature*, 617(7959), 31–34. <https://doi.org/10.1038/d41586-023-01465-4>

Trajtenberg, M. (1990). A penny for your quotes: Patent citations and the value of innovations. *The RAND Journal of Economics*, 21(1), 172–187. <https://doi.org/10.2307/2555502>

Verspagen, B. (2007). Mapping technological trajectories as patent citation networks: A study on the history of fuel cell research. *Advances in Complex Systems*, 10(1), 93–115. <https://doi.org/10.1142/S0219525907000945>

World Intellectual Property Organization (WIPO). (2023). *International patent classification (IPC)*. <https://www.wipo.int/classifications/ipc/en/>

Anexo 1 – Títulos e datas de depósito das 15 patentes mais citadas do banco de dados.

Número Prioritário	Depósito Original	Título
US032568P	29/02/2008	New corn chromosome comprises cspB gene, useful for producing corn plants with desired traits, e.g. drought tolerance, water deficit tolerance, yield, environmental stress tolerance, and improved seed compositions
US718034P	16/09/2005	Novel isolated polynucleotide, useful for controlling coleopteran pest infestation, e.g. <i>Diabrotica virgifera</i> , <i>Diabrotica balteata</i> , and for improving yield of crop produced from crop plant subjected to insect pest infestation
US309134P	01/03/2010	Producing a greater biomass in a plant, comprises administering <i>Bacillus subtilis</i> FB17 to the plant, seed of the plant, or soil surrounding the plant or the seed to produce a greater biomass in the plant compared to an untreated plant
US300112P	22/06/2001	New stress-responsive nucleic acid, useful for altering the responsiveness of a plant, e.g. cereal, to an abiotic stress such as cold stress, salt stress or osmotic stress
US360039P	21/02/2002	New recombinant DNA construct comprising a promoter positioned to provide for expression of a polynucleotide encoding a polypeptide from a microbial source, useful for producing plants with improved properties
US476189P	06/06/2003	New polynucleotides isolated from plants encoding transcription factors, and polypeptides encoded by such polynucleotides, useful for regulating gene transcription and gene expression
EP152488	25/01/2012	Active compound combination used e.g. to control insects, nematodes or phytopathogens in crop protection, comprises fluopyram, spore-forming bacterium e.g. <i>Bacillus cereus</i> and biological control agent e.g. fungi or yeast
US396665P	18/07/2002	Reducing transgene silencing with artificial polynucleotides, useful in producing commercial transgenic plants having increased herbicide tolerance, insect resistance, drought tolerance, cold tolerance and disease resistance
US679917P	10/05/2005	New plant cell nucleus having stably integrated recombinant DNA with promoter functional in plant cell and operably linked to DNA, useful for growing corn, cotton, soybean, or wheat, without irrigation water/nitrogen fertilizer
US828737P	30/05/2013	Altering expression of gene product to produce a modified plant cell with herbicide tolerance comprises introducing, into a plant cell product, an engineered, non-naturally occurring gene editing system comprising vectors
US239721P	03/09/2009	New expression cassette for inducing expression of nitrate responsive promoter in plant comprises promoter having specified nucleic acid sequence, operably linked to heterologous polynucleotide, linked to minimal promoter sequence
US551369	31/08/2009	New seed of lettuce line PS06519080, useful for developing further lettuce lines and hybrids with desired traits, e.g. greater yield, insect resistance, drought tolerance, better agronomic quality, and higher nutritional value
US172748P	08/06/2016	Synthetic composition comprises plant reproductive element treated with formulation comprising purified <i>Streptomyces</i> endophyte population, where <i>Streptomyces</i> endophyte is heterologous to plant reproductive element
US714887	13/11/2003	New transgenic plants for producing commercially or agriculturally useful plants having improved tolerance to drought, shade and low nitrogen conditions
GB016880	15/09/2008	Controlling weed involves application pesticide composition of homogentisate solanesyltransferase inhibiting herbicide and hydroxyphenyl pyruvate dioxygenase inhibiting herbicide to weed, where crop plant comprise recombinant polynucleotide

Fonte: *Derwent Innovations Index*