

Elicidores: implicações bioéticas para a agricultura e a saúde humana

Laura Helena Caicedo-López¹, Ana Laura Villagómez Aranda¹, Diana Sáenz de la O¹, Carlos Eduardo Zavala Gómez¹, Estefanía Espinoza Márquez¹, Hilda Romero Zepeda¹

1. Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

Resumo

Nas últimas décadas, compostos agroquímicos têm sido utilizados na agricultura para evitar pragas, nutrir o solo e aumentar a produtividade e a qualidade das plantas. No entanto, o uso dessas substâncias muitas vezes contamina o meio ambiente e traz riscos à saúde. Por isso, novas alternativas, como os elicitores, surgiram na produção alimentar a fim de consolidar uma agricultura mais sustentável, sem efeitos adversos para a saúde do consumidor. Os elicitores podem estimular o próprio metabolismo das plantas para produzir compostos que resultarão em características agronômicas desejadas, como metabólitos secundários para uso nutracêutico. Este artigo mostra a perspectiva científica e ética de projetos de pesquisa em que diferentes elicitores substituem agroquímicos.

Palavras-chave: Agroquímicos. Saúde. Biotecnologia. Agricultura sustentável.

Resumen

Elicidores: implicaciones bioéticas para la agricultura y la salud humana

Los compuestos agroquímicos se han utilizado en la agricultura en las últimas décadas para evitar pérdidas por plagas, nutrir la tierra, aumentar el rendimiento y la calidad de los cultivos. Sin embargo, el uso de estas sustancias en muchas ocasiones representa una fuente de contaminación ambiental y riesgos a la salud. Por ello, han surgido nuevas alternativas en la producción alimentaria, como el uso de elicitores, para consolidar una agricultura más sostenible y sin efectos adversos a la salud del consumidor. Los elicitores pueden estimular el metabolismo propio de las plantas para producir compuestos que resultarán en rasgos agronómicos deseados, como metabolitos secundarios de uso nutracéutico. En el presente artículo se muestra la perspectiva científica y ética de proyectos de investigación en los cuales se emplean diferentes elicitores para sustituir el uso de agroquímicos.

Palabras clave: Agroquímicos. Salud. Biotecnología. Agricultura sostenible.

Abstract

Elicitors: bioethical implications for agriculture and human health

In recent decades, agrochemicals have been used in agriculture to increase crop yields and quality and avoid losses due to pests. However, the use of these substances often imply environmental contamination and potential health risks. To move towards a more sustainable agriculture with less undesirable effects to human health, a novel line of research has recently emerged, proposing alternatives for the use of agrochemicals, such as elicitors. Elicitors, either biotic or abiotic, can stimulate plants biochemical mechanism to produce compounds that will result in desired agronomic traits, such as secondary metabolites to be used as nutraceuticals. This article shows the scientific and the ethic perspective of research projects evaluating the role of different elicitors in replacing the use of agrochemicals.

Keywords: Agrochemicals. Health. Biotechnology. Sustainable agriculture.

Declararam não haver conflito de interesse.

A agricultura tem sido um dos pilares da sociedade desde os tempos antigos e vem sendo transformada juntamente com as necessidades do homem. Desde 1960, com a Revolução Verde, uma das principais mudanças para aumentar a produção agrícola foi a introdução de agroquímicos como pesticidas, inseticidas, herbicidas e fertilizantes¹. O uso desses elementos trouxe benefícios como aumento do lucro para o agricultor, redução da mão de obra, economia de combustíveis fósseis, aumento do rendimento dos cultivos, redução dos custos alimentares e melhoria da qualidade dos produtos². Apesar disso, os rendimentos agrícolas nas regiões em desenvolvimento diminuíram ou até estagnaram². Em 2010, o número de pessoas subnutridas no mundo era de 925 milhões, sendo 98% delas residentes em países em desenvolvimento³.

Apesar das vantagens, agroquímicos são controversos por conta do impacto ambiental negativo¹. A aplicação excessiva de pesticidas desenvolve a resistência das pragas e, como danos colaterais, prejudica organismos benéficos ao meio ambiente³. Além disso, a permanência dessas substâncias no subsolo e nos aquíferos traz riscos para o ambiente e a saúde humana⁴. Os agroquímicos têm elevada atividade cancerígena e teratogênica, bem como altas doses e elevada exposição a compostos organofosforados que interferem na regulação hormonal³ e têm sido associados a doenças crônicas não transmissíveis e não diagnosticadas que afetam o sistema cardiovascular, hepático, renal, nervoso e reprodutivo. Dois exemplos são a doença renal crônica de etiologia desconhecida e a síndrome do intestino permeável, doenças comuns em vários países da América Central, do sul da Europa, na Índia e na China^{4,5}.

Devido à legislação insuficiente, países em desenvolvimento e subdesenvolvidos lidam indiscriminadamente com agroquímicos e só regulamentam esses produtos em caso de exportação⁶. Em contraste, em países desenvolvidos da União Europeia (UE) e nos Estados Unidos, mais de 500 agroquímicos foram proibidos por causa de seus efeitos nocivos⁷.

Na UE, a Autoridade Europeia para Segurança Alimentar (EFSA – European Food Safety Authority), baseada no Regulamento UE 396/2005, verifica o cumprimento dos limites permitidos

para pesticidas estabelecidos na legislação alimentar⁸. Nos Estados Unidos, a Agência de Proteção Ambiental (EPA – Environmental Protection Agency) avalia efeitos potenciais de diferentes agroquímicos sobre o meio ambiente e a saúde humana, revisa e verifica as medidas de segurança e o cumprimento dos regulamentos sob a Lei Federal de Inseticidas, Fungicidas e Raticidas e a Lei Federal de Alimentos, Medicamentos e Cosméticos⁹⁻¹².

Do ponto de vista da biotecnologia, o campo do desenvolvimento de produtos e técnicas como alternativa aos agroquímicos integra diversas áreas do conhecimento, como química, biologia e engenharia. Da mesma forma, a definição de biotecnologia foi revista várias vezes no último século¹³. Neste texto, a biotecnologia vegetal é entendida como o conjunto de fenômenos biológicos e fatores envolvidos na melhoria da agricultura, alimentação e outras indústrias derivadas. Da mesma forma, a bioética deve oferecer uma solução promissora para enfrentar o desafio da demanda de alimentos, abordando preocupações éticas e socioculturais para garantir a confiança e aceitação generalizada por parte de produtores e consumidores¹⁴.

Dado que a produção de alimentos terá que dobrar até 2050, devido ao crescimento exorbitante da população, o uso de compostos agroquímicos aumentará nas próximas décadas¹. O risco que isso implica para a saúde da população exige novas ferramentas biotecnológicas para reduzir ou substituir o uso desses compostos. Entre as várias abordagens ou estratégias que existem atualmente estão os elicitores, estímulos de estresse que, quando aplicados em pequenas quantidades nas plantas, podem ativar sua resposta de defesa e capacidade adaptativa por meio da produção de metabólitos secundários, reconhecidos por sua função nutracêutica nos alimentos. As plantas estão permanentemente expostas ao estresse, e por isso desenvolvem estratégias de tolerância para lidar com ambientes desfavoráveis e permanecer sob determinado estado sem sofrer alterações morfológicas significativas^{15,16}.

Os fatores de estímulo de estresse podem ser classificados como bióticos ou abióticos, de acordo com sua origem e efeito sobre a planta. Um estímulo positivo, capaz de induzir o sistema

imunológico da planta, é chamado “eustressor”, sendo “distressor” um estímulo com consequências negativas para a planta, como a morte¹⁷. Neste sentido, todo eustressor é considerado um elicitor. Os elicitores, por sua vez, são classificados da mesma forma que os fatores de estímulo ao estresse, em bióticos ou abióticos.

Elicitores bióticos são todas aquelas substâncias geradas por organismos vivos, tais como proteínas, carboidratos, bactérias, fungos e fitormônios (hormônios vegetais). Os fitormônios têm sido amplamente estudados por sua interação com várias respostas fisiológicas e metabólicas na planta¹⁸. Eles também têm sido chamados de “bioestimulantes”, visto que há neles grande diversidade de compostos, e cada um tem uma função biológica específica¹⁹.

Elicitores abióticos são todos os estímulos físicos aos quais as plantas são suscetíveis, tais como luz, temperatura, sinais elétricos de longa distância, ondas eletromagnéticas, ondas de radiofrequência, percepção de estímulos mecânicos e emissões acústicas, entre outros^{20,21}. É importante ressaltar que as plantas desenvolveram uma extensa engenharia de sinalização como resultado de seu aprendizado associativo adaptativo para responder a condições ambientais²². Assim, elicitores ativam sinais de resposta que aumentam a produção de metabólitos secundários, levando a uma resposta de defesa na planta¹⁸.

Uma das preocupações quanto ao uso desses fatores, uma vez que se tornem ferramentas eficazes, é o interesse de setores industriais em comercializar avanços científicos como produtos ou pacotes tecnológicos. Com o desenvolvimento da engenharia genética, o sistema de patentes se expandiu para incluir a biologia e a biotecnologia, gerando uma discussão importante, uma vez que as patentes biotecnológicas geram problemas específicos quando o objetivo das grandes empresas de biotecnologia é apenas obter benefícios comerciais²³.

Entretanto, a avaliação bioética dos estudos associados a este tipo de bioestimulantes é limitada ao setor acadêmico. Assim, novas alternativas procuram satisfazer a necessidade urgente de métodos baseados em novas substâncias biologicamente ativas, ambientalmente inócuas e seguras. Por esse motivo, bioestimulantes são definidos como fatores que intervêm nos processos naturais de nutrição das plantas e que podem melhorar a

eficiência do uso de nutrientes, com mecanismo que envolve tolerância ao estresse abiótico, melhoria dos traços de qualidade e aumento da disponibilidade de nutrientes²⁴.

Em geral, o objetivo da elicitação é interagir com vias bioquímicas para produzir metabólitos secundários. Embora haja informações sobre este aspecto, o efeito dessas estratégias não pode ser generalizado, já que se observou que a resposta do metabolismo vegetal depende do modelo de estudo, da concentração e do tempo de uso do estímulo, bem como de sua natureza^{25,26}.

Além disso, é necessário saber que tipo e que dose de fatores de estresse podem induzir uma resposta epigenética na planta, para o rápido reconhecimento do estresse e ativação das respostas de defesa, o que pode ser crítico na ativação oportuna do sistema de defesa e, conseqüentemente, na adaptação fisiológica ao estresse²⁷.

Elicitores em potencial

Os elicitores representam uma alternativa agrícola sustentável ao uso de agroquímicos na produção de alimentos e outros produtos de uso humano. No entanto, o conceito é relativamente novo e ainda está sendo pesquisado. Existem diferentes tipos de elicitores e todos eles influenciam o crescimento, desenvolvimento e expressão gênica das plantas, embora seu uso na agricultura varie de acordo com o mecanismo de ação.

Considerando a necessidade de comunicar novos desenvolvimentos científicos, a seguir são mencionados os elicitores bióticos – ácido salicílico e peróxido de hidrogênio – e abióticos – emissões acústicas e luz ultravioleta (UV) – com aplicação potencial na agricultura.

Emissões acústicas

Nas plantas, o som atua como mediador de sinais em processos ecológicos e adaptativos. Isso tem gerado interesse pelos mecanismos envolvidos na detecção e emissão de vibrações acústicas, particularmente sob condições ambientais específicas, uma vez que foi demonstrado que emissões acústicas (EA) podem indicar a reação das plantas a mudanças ambientais que afetam seu estado hídrico.

As plantas são sensíveis a frequências específicas, pois podem crescer e se dirigir a uma fonte de propagação sonora de 200 a 300 hertz (Hz), demonstrando alta seletividade de sinais acústicos²⁸. Além disso, elas têm mecanismos específicos para detectar frequências, por exemplo aquelas emitidas por insetos (500 a 2.000 Hz), que aumentam os glucosinolatos na planta²⁹.

Embora esta informação ainda seja discutida, foi proposto que a elicitação com EA pode estimular vários mecanismos de resposta, incluindo induzir tolerância à seca³⁰ e produzir compostos bioativos com atividade antioxidante, como carotenoides, fenóis e peptídeos³¹. Além disso, o objetivo da agroindústria é intensificar a absorção de substâncias ou nutrientes que permitam reduzir aplicações químicas e custos da produção, sendo uma alternativa amigável para o meio ambiente na produção agrícola³².

Luz ultravioleta

A radiação ultravioleta (RUV) é um tipo de radiação solar com comprimentos de onda entre 100 e 400 nm, com espectro dividido em três regiões: UV-C (<280 nm), que é absorvida pela atmosfera; UV-B (280-315 nm), que chega parcialmente; e UV-A (315-400 nm), a mais transmitida para a Terra³³. A RUV representa entre 7% e 9% da radiação solar total que atinge a biosfera, mas é altamente energética³⁴ e causa reações nas moléculas atingidas por ela. Portanto, a concepção geral que se tem da RUV é negativa, uma vez que ela está associada a queimaduras solares e câncer de pele³³.

Entretanto, a RUV desempenha papel vital para as plantas, fornecendo-lhes energia para fotossíntese e desenvolvimento, desde a germinação até a floração. Assim, as plantas evoluíram para detectar a RUV e explorá-la eficientemente, sem danificar suas biomoléculas. Entre os mecanismos de defesa estão os processos de fotoreparação e a capacidade antioxidante, que proporcionam proteção contra raios UV e outros tipos de estresse³⁵.

De fato, foi sugerido que a radiação UV-B atua como modulador positivo para melhorar a sobrevivência das plantas em condições de estresse biótico e abiótico. Por exemplo, uma dose baixa de UV-B pode induzir respostas de defesa nas

plantas a infecções patogênicas como o fungo *B. cinérea*, estresse foto-oxidativo, tolerância ao calor e proteção contra baixas temperaturas sob condições de laboratório e de campo³⁶. Portanto, o uso da luz UV para otimizar a produtividade e a qualidade das culturas vem despertando cada vez mais interesse, dada sua capacidade de alterar o metabolismo secundário e regular positivamente a resposta antioxidante da planta³⁷.

Ácido salicílico

O ácido salicílico (AS), composto fenólico sintetizado pelas plantas, é considerado um fitormônio porque desempenha um papel fundamental como regulador do crescimento e desenvolvimento das plantas³⁸. A aplicação do AS em plantas tem vários efeitos, como aumento da floração e alta eficácia contra ataques fúngicos³⁹. Esse composto se acumula rapidamente no local da infecção durante o ataque de patógenos e se espalha para outras partes da planta para induzir a resistência adquirida sistematicamente na interação planta-patógeno³⁸.

A literatura apresenta diversos exemplos de uso bem-sucedido de elicitores físicos e sintéticos como imunostimulantes na agricultura, mostrando que o mais desejável é encontrar elicitores cuja capacidade indutora de defesa seja suficientemente potente para oferecer alternativas atraentes a agroquímicos convencionais⁴⁰. No caso de elicitores de moléculas sintéticas que induzem respostas de defesa nas plantas, a maioria pertence ao grande grupo de análogos do AS. Esses elicitores podem proteger as culturas contra doenças sem a necessidade de serem diretamente tóxicos para os organismos patogênicos⁴⁰.

Além disso, o AS está envolvido em vários processos fisiológicos e bioquímicos, tais como fotossíntese, equilíbrio osmótico, produção de metabólitos secundários, indução do sistema de defesa antioxidante e expressão de genes relacionados à defesa de estresse em ampla gama de estresses biótico e abiótico⁴¹.

Peróxido de hidrogênio

O peróxido de hidrogênio (H₂O₂) é um composto produzido durante o metabolismo aeróbico e pertencente às espécies reativas de oxigênio (ROS - Reactive Oxygen Species). Durante muito

tempo ele foi considerado prejudicial por sua atividade oxidativa; no entanto, o H_2O_2 funciona como molécula de sinalização no controle da fisiologia vegetal⁴², de modo que pode aumentar os parâmetros de crescimento e melhorar as características anatômicas das plantas⁴³.

Além disso, o peróxido de hidrogênio é essencial nos mecanismos de resposta ao estresse por ser um dos primeiros compostos produzidos diante de diferentes tipos de estímulos e por participar dos mecanismos de tolerância. Ele ativa várias vias reguladoras, como sinais dependentes do cálcio, biossíntese de moléculas protetoras e vias associadas a fitormônios como o AS e o ácido abscísico, bem como algumas cascatas de MAP-quinase, síntese e regulação da via de ROS^{42,44}, que atuam sobre os fatores de transcrição e regulam a expressão gênica, ativando, por exemplo, a expressão de genes que, juntos, podem dar origem à resposta de resistência a condições de estresse ambiental⁴². Para mencionar alguns exemplos, o H_2O_2 tem efeito positivo na tolerância ao estresse salino⁴⁵, secas, alagamentos⁴⁶, altas temperaturas e condições de baixa luminosidade. Da mesma forma, a aplicação exógena pode gerar tolerância à infecção por vírus e outros patógenos⁴⁷.

Discussão ética

O conhecimento científico sobre elicitores indica que eles são uma opção viável para resolver problemas na agricultura. Entretanto, como o conhecimento tende a ser valorizado mais por sua utilidade imediata ao humano, tecnologias implementadas na sociedade trouxeram consigo efeitos adversos. No caso dos agroquímicos, sua permanência no solo e em águas subterrâneas tem afetado negativamente a saúde humana e ambiental. Portanto, a aplicação dos elicitores mencionados será aqui discutida a partir de princípios éticos, considerando seu impacto na sociedade.

Compreender como elicitores acionam a biossíntese de metabólitos secundários envolve um estudo profundo de caminhos complexos e redes de sinais de defesa das plantas. Considerando que cada tipo de elicitação, seja química ou física, gera efeitos diferentes na fisiologia do estresse vegetal, o estudo de cada um

deles é ferramenta poderosa, que proporciona conhecimento abrangente sobre a imunidade vegetal^{40,48}. Nesse sentido, os recursos científicos e tecnológicos devem apresentar responsabilidade ética, ser relevantes para pessoas de diferentes origens culturais e sociais e facilmente comunicáveis.

Princípio de beneficência

O uso de elicitores produz uma ampla gama de benefícios diretos para a produtividade agrícola, tais como redução de danos causados por fungos, alguns patógenos⁴¹, pragas, insetos e herbívoros, assim como redução de lesões causadas por fatores ambientais⁴⁹. Além disso, elicitores como o AS e o H_2O_2 podem ser facilmente aplicados a diferentes sistemas de cultivo; o método mais comum é a pulverização⁴⁹. Elicitores físicos como a EA e RUV podem ser facilmente combinados com outros métodos de tratamento, sejam químicos ou biológicos⁵⁰.

O estresse gerado na planta por elicitores geralmente leva ao acúmulo de compostos bioativos, que são usados como nutracêuticos em humanos, com efeito positivo sobre a saúde. Finalmente, e não menos importante, não há risco de elicitores e ativadores de imunidade em plantas selecionarem cepas patogênicas resistentes a agroquímicos devido a seu mecanismo de ação, que é direcionado ao sistema de defesa inato na interação planta-hospedeiro. A este respeito, destaca-se a resistência a agroquímicos como fungicidas, inseticidas e herbicidas, grandes ameaças à saúde global e à segurança alimentar⁵¹.

Princípio de não maleficência

Com relação ao princípio de não maleficência, até agora não há relatos de que o uso de elicitores, bióticos ou abióticos, cause qualquer dano colateral às plantas, aos seres humanos ou ao meio ambiente^{39,41}. Os tratamentos com elicitores podem até mesmo ser uma alternativa ao uso de plantas geneticamente modificadas, com menos riscos ecológicos⁴⁹.

Elicitores abióticos, como EA e RUV, só podem ser aplicados à produção agrícola em ambientes controlados, pois exigem equipamentos especializados, como buzinhas, amplificadores, lâmpadas UV e revestimentos fotosseletivos.

Além disso, a manipulação da luz em estufas é uma técnica comum para otimizar a produtividade, de modo que, quando aplicada em espaço controlado, os riscos colaterais potenciais, tanto para seres humanos quanto para outros organismos silvestres, são minimizados.

Além disso, a elicitação aplicada a plantas tem probabilidade muito baixa de causar danos a seres humanos, tendo em vista a forma como é aplicada. Por exemplo, embora envolva o fornecimento de grandes quantidades de energia, a elicitação abiótica por UV-B ou UV-C estimula a planta por um curto período de tempo, sem causar mutações em sua composição física ou nutricional⁵⁰. Ela também não é perigosa para seres humanos e outros organismos.

No caso dos elicidores bióticos, as doses utilizadas são muito baixas para gerar qualquer alteração no meio ambiente ou em organismos vivos. O H_2O_2 , por exemplo, não é cancerígeno; apesar de ser um forte corrosivo e considerado perigoso à saúde, as concentrações e quantidades capazes de causar efeitos como irritação são muito altas: a partir de uma concentração acima de 5%, com dose média letal, ou LD50, de 376 mg/kg (oral) e 4,06 g/kg (pele). Contudo, o peróxido de hidrogênio é comumente usado como antisséptico em concentrações de 3%, enquanto as concentrações nanomolares, que são de 10 a 100 vezes menores, são usadas para estimular plantas. Da mesma forma, o AS, também não carcinogênico, é considerado pouco nocivo à saúde. Ele tem LD50 de 891 mg/kg (oral), 10 g/kg (pele) e, no sangue, é prejudicial em níveis superiores a 35 mg/dL⁵². Em tratamentos cutâneos tópicos, o AS é usado em concentrações em torno de 1%, mas, para estimular plantas, são utilizadas concentrações mais baixas. Por fim, vale mencionar ainda que a degradação fotoquímica tanto do H_2O_2 quanto do AS é rápida, de modo que sua permanência no ambiente é efêmera.

Princípio de justiça

Utilizar essas alternativas sustentáveis na produção agroalimentar está ao alcance de todos. No entanto, a definição do tratamento de elicitação a ser recomendado ao produtor ainda tem limitações relacionadas ao tipo de planta, estado fisiológico e genético, fatores ambientais e interações⁵⁰.

Portanto, é necessário desenvolver pesquisas que gerem informações precisas, capazes de abarcar a complexidade de diversos fenômenos e condições. O que não quer dizer que a elicitação implique dependência de pacotes tecnológicos patenteados e manipulados por grandes empresas.

No entanto, a fim de utilizá-la de forma segura e responsável no campo, devem ser estabelecidos procedimentos para avaliar produtos químicos e fitossanitários como os da EFSA, entre outras legislações relacionadas. O intuito é implementar normas e técnicas que garantam que as aplicações não tragam riscos secundários, como a presença de resíduos tóxicos ou impurezas relevantes que representem ameaças à cadeia alimentar, aos produtores ou ao meio ambiente.

Princípio de autonomia

A atividade agrícola em si é uma prática autônoma, desde a seleção da cultura até o sistema de produção, com aplicação de produtos e práticas específicas. Dessa forma, agricultores podem escolher novos métodos de produção mais ecológicos, como o uso de elicidores. Os consumidores, por sua vez, têm liberdade de escolher produtos que desejam consumir de acordo com a forma de produção.

Contudo, para que a aplicação de elicidores seja totalmente autônoma, é necessário disseminar informações sobre tecnologias alternativas de melhoria de culturas, de modo que tais práticas sejam realizadas com pleno conhecimento de suas vantagens, desvantagens e limitações.

Princípio de precaução

Ainda que não haja registros de consequências adversas, é necessário compreender vários tipos de estímulos e como eles atuam sobre o mecanismo de defesa das culturas. Este avanço melhorará a proteção e o gerenciamento de culturas sustentáveis. O mecanismo de ação das EA nas plantas ainda não é conhecido de forma segura; é preciso mais informações sobre a interação entre as ondas sonoras e as funções biológicas dos mecanismos de percepção UV, vias de sinalização, regulação e vias metabólicas envolvidas na resposta biológica⁵⁰. Por outro lado, faltam estudos de campo aberto sobre o efeito dos elicidores bióticos AS e H_2O_2 no meio ambiente

e sua interação com outros organismos da área em longo prazo.

O objetivo da agricultura sustentável é otimizar a saúde e a produtividade de comunidades interdependentes do solo, das plantas e dos animais, bem como de diversos grupos da sociedade, como agricultores, produtores, processadores e consumidor final. Considerando os novos problemas no campo da proteção de plantas, é urgente desenvolver sistemas mais eficientes e sustentáveis, além de ferramentas mais ecológicas. Portanto, a disponibilidade de aplicações inovadoras e técnicas moleculares abre novas possibilidades na proteção de plantas para a agricultura orgânica e sustentável. Novas estratégias protegem diretamente as plantas contra agentes patogênicos e podem induzir aumento da imunidade contra suas cepas⁵³.

Princípio de responsabilidade social

Uma questão importante a considerar é que precisamos continuar aumentando a produção de alimentos para atender às necessidades da população a partir de sistemas agroalimentares sustentáveis. Devido às dificuldades implicadas, é necessário utilizar produtos que melhorem a produtividade agrícola. Neste caso, em comparação com agroquímicos, os elicitores são uma alternativa que atende nossas exigências de forma menos prejudicial ao meio ambiente, sem comprometer recursos naturais de que as gerações futuras dependerão.

Nesta análise, vale destacar esforços que vêm sendo feitos para melhorar as perspectivas na comunidade agrícola e na sociedade em geral no que se refere a métodos alternativos aos insumos químicos. Por outro lado, também é pertinente mencionar que a literatura é clara ao afirmar que bioestimulantes, elicitores e semioquímicos não devem ser usados como métodos exclusivos de manejo agroecológico, mas podem ser integrados em estratégias de fertilização e controle de doenças e pragas, complementando os insumos químicos e contribuindo para reduzir doses, aplicação e frequência.

Considerações finais

Ainda que as ferramentas mencionadas tenham sido amplamente endossadas por suas vantagens, agricultores e produtores ainda não estão completamente seguros para utilizá-las em grande escala, principalmente devido a seu desempenho flutuante. Nesse sentido, os agricultores precisam de mais informações sobre como utilizar estas ferramentas em suas práticas no campo.

Os elicitores são de grande interesse para proteger culturas e manejar pragas. O desenvolvimento de técnicas de estimulação de defesa vegetal baseadas em elicitores ainda se encontra nos estágios iniciais do uso agrícola em larga escala. Além disso, órgãos reguladores, investidores, produtores e consumidores também precisam estar bem informados sobre as vantagens desses métodos alternativos e seu potencial para promover a agricultura sustentável⁵⁴.

Apesar do grande potencial, ainda são necessários mais estudos para compreender os parâmetros ambientais que afetam a eficiência desses produtos, particularmente para culturas extensivas. No entanto, a partir da ética de princípios, os elicitores cumprem o princípio da beneficência – promovendo a presença de compostos bioativos benéficos à saúde humana –, o princípio da não maleficência – pois não são perigosos ou prejudiciais ao ser humano ou ao meio ambiente – e os princípios da justiça e autonomia – são uma opção de livre acesso e aplicação para as culturas.

Portanto, os elicitores são promissores o bastante para justificar seu estudo e implementação pela comunidade científica e agrícola, de modo que se alcance maior conhecimento das possíveis interações destes produtos com o ambiente vegetal. Tudo isso permitirá estabelecer claramente o papel que a decisão de utilizá-los em larga escala pode implicar, com base em políticas governamentais que favoreçam sistemas de produção alternativos e seguros.

Os autores Laura Helena Caicedo-López, Diana Sáenz de la O, Ana Laura Villagómez Aranda, Carlos Eduardo Zavala Gómez e Estefanía Espinoza Márquez expressam seus agradecimentos ao Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología pelas bolsas concedidas.

Referências

1. Liu Y, Pan X, Li J. A 1961-2010 record of fertilizer use, pesticide application and cereal yields: a review. *Agron Sustain Dev* [Internet]. 2015 [acesso 8 abr 2020];35(1):83-93. DOI: 10.1007/s13593-014-0259-9
2. Copping LG. Review of major agrochemical classes and uses. In: Knowles DA, editor. *Chemistry and technology of agrochemical formulations*. Berlin: Springer; 1998. p. 8-40.
3. Pickett JA. Food security: intensification of agriculture is essential, for which current tools must be defended and new sustainable technologies invented. *Food Energy Secur* [Internet]. 2013 [acesso 8 abr 2020];2(3):167-73. DOI: 10.1002/fes3.32
4. Wimalawansa SA, Wimalawansa SJ. Agrochemical-related environmental pollution: effects on human health. *GJBAHS* [Internet]. 2014 [acesso 8 abr 2020];3(3):72-83. Disponível: <https://bit.ly/3skJTPc>
5. Köck Schulmeyer MA. Plaguicidas polares en el medio ambiente: análisis, presencia y evaluación de riesgo [tese] [Internet]. Barcelona: Universitat de Barcelona; 2014 [acesso 1º jan 2021]. Disponível: <https://bit.ly/3qUUKbL>
6. Almeida Filho N, Rouquayrol MZ, Martinovich V. *Introducción a la epidemiología*. Buenos Aires: Lugar; 2008.
7. Pelaez V, Mizukawa G. Diversification strategies in the pesticide industry: from seeds to biopesticides. *Ciênc Rural* [Internet]. 2017 [acesso 8 abr 2020];47(2):e20160007. DOI: 10.1590/0103-8478cr20160007
8. Cuenca MR, Cuenca PR, González PR, Mata NC. Resíduos peligrosos para la salud en alimentos: la toma de muestras como garantía de control. In: Linares JJG, Jurado MMM, Pérez-Fuentes MC, Martínez ÁM, Márquez MMS, Martín ABB, Sisto M, organizadores. *La convivencia escolar: un acercamiento multidisciplinar*. Almería: Asociación Universitaria de Educación y Psicología; 2018. p. 307-12.
9. Erzinger GS, Häder D-P. Regulations, political and societal aspects, toxicity limits. In: Häder D-P, Erzinger GS, editores. *Bioassays: advanced methods and applications* [Internet]. Amsterdam: Elsevier; 2018 [acesso 8 abr 2020]. p. 51-67. DOI: 10.1016/B978-0-12-811861-0.00004-8
10. Spadotto CA, Mingoti R. Exposure characterization tools for ecological risk assessment of pesticides in water. In: Vaz S Jr, editor. *Sustainable agrochemistry: a compendium of technologies*. Berlin: Springer; 2019. p. 321-60.
11. Arora NK, Verma M, Prakash J, Mishra J. Regulation of biopesticides: global concerns and policies. In: Arora NK, Mehnaz S, Balesrini R, editores. *Bioformulations: for sustainable agriculture*. Berlin: Springer; 2016. p. 283-99.
12. Cruse C. Food fraud and the Food, Drug, and Cosmetic Act: bridging a disconnect. *Food Drug Law J* [Internet]. 2019 [acesso 8 abr 2020];74(2):322-47. Disponível: <https://bit.ly/3qXns23>
13. Thompson PB. Biotechnology, controversy and the philosophy of technology. In: Thompson PB. *Food and agricultural biotechnology in ethical perspective*. Cham: Springer; 2020. p. 375-400.
14. Harfouche AL, Petousi V, Meilan R, Sweet J, Twardowski T, Altman A. Promoting ethically responsible use of agricultural biotechnology. *Trends Plant Sci* [Internet]. 2021 [acesso 1º mar 2021]. No prelo. DOI: 10.1016/j.tplants.2020.12.015
15. Acevedo FE, Peiffer M, Ray S, Meagher R, Luthe DS, Felton GW. Intraspecific differences in plant defense induction by fall armyworm strains. *New Phytol* [Internet]. 2018 [acesso 8 abr 2020];218(1):310-21. DOI: 10.1111/nph.14981
16. Narayani M, Srivastava S. Elicitation: a stimulation of stress in in vitro plant cell/tissue cultures for enhancement of secondary metabolite production. *Phytochem Rev* [Internet]. 2017 [acesso 8 abr 2020];16(6):1227-52. DOI: 10.1007/s11101-017-9534-0
17. Vázquez-Hernández MC, Parola-Contreras I, Montoya-Gómez LM, Torres-Pacheco I, Schwarz D, Guevara-González RG. Eustressors: chemical and physical stress factors used to enhance vegetables production. *Sci Hortic* [Internet]. 2019 [acesso 8 abr 2020];250:223-9. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.02.053
18. Naik PM, Al-Khayri JM. Abiotic and biotic elicitors: role in secondary metabolites production through in vitro culture of medicinal plants. In: Shanker AK, Shanker C, editores. *Abiotic and biotic stress in plants: recent advances and future perspectives*. London: InTech; 2016. p. 247-77. DOI: 10.5772/61442


19. Yakhin OI, Lubyantsov AA, Yakhin IA, Brown PH. Biostimulants in plant science: a global perspective. *Front Plant Sci* [Internet]. 2017 [acesso 8 abr 2020];7:2049. DOI: 10.3389/fpls.2016.02049
20. Dannehl D. Effects of electricity on plant responses. *Sci Hortic* [Internet]. 2018 [acesso 8 abr 2020];234:382-92. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.02.007
21. Jung J, Kim S-K, Kim JY, Jeong M-J, Ryu C-M. Beyond chemical triggers: evidence for sound-evoked physiological reactions in plants. *Front Plant Sci* [Internet]. 2018 [acesso 8 abr 2020];9:25. DOI: 10.3389/fpls.2018.00025
22. Gagliano M, Vyazovskiy VV, Borbély AA, Grimonprez M, Depczynski M. Learning by association in plants. *Sci Rep* [Internet]. 2016 [acesso 8 abr 2020];6:38427. DOI: 10.1038/srep38427
23. Nambisan P. Relevance of intellectual property rights in biotechnology. In: Nambisan P. *An introduction to ethical, safety and intellectual property rights issues in biotechnology*. Cambridge: Academic Press; 2017. p. 291-309.
24. Kocira S, Szparaga A, Hara P, Treder K, Findura P, Bartoš P, Filip M. Biochemical and economical effect of application biostimulants containing seaweed extracts and amino acids as an element of agroecological management of bean cultivation. *Sci Rep* [Internet]. 2020 [acesso 1º jan 2021];10:17759. DOI: 10.1038/s41598-020-74959-0
25. Aguirre-Becerra H, Vázquez-Hernández MC, Saenz de la O D, Alvarado-Mariana A, Guevara-Gonzalez RG, Garcia-Trejo JF, Feregrino-Perez AA. Role of stress and defense in plant secondary metabolites production. In: Pal D, Nayak AK, editores. *Bioactive natural products for pharmaceutical applications* [Internet]. Cham: Springer; 2021 [acesso 1º jan 2021]. p. 151-95. Disponível: <https://bit.ly/3stQnLK>
26. Alvarado AM, Aguirre-Becerra H, Vázquez-Hernández MC, Magaña-Lopez E, Parola-Contreras I, Caicedo-Lopez LH et al. Influence of elicitors and eustressors on the production of plant secondary metabolites. In: Akhtar MS, Swamy MK, Sinniah UR, editores. *Natural bio-active compounds* [Internet]. Singapore: Springer; 2019 [acesso 1º jan 2021]. v. 1, p. 333-88. Disponível: <https://bit.ly/3kolRQm>
27. Villagómez-Aranda AL, García-Ortega LF, Torres-Pacheco I, Guevara-González RG. Whole-Genome DNA methylation analysis in hydrogen peroxide overproducing transgenic tobacco resistant to biotic and abiotic stresses. *Plants* [Internet]. 2021 [acesso 1º jan 2021];10(1):178. DOI: 10.3390/plants10010178
28. Vicent CM. The effect of frequency-specific sound signals on the germination of maize seeds. *BMC Res Notes* [Internet]. 2017 [acesso 8 abr 2020];10:323. DOI: 10.1186/s13104-017-2643-4
29. Appel HM, Cocroft RB. Plants respond to leaf vibrations caused by insect herbivore chewing. *Oecologia* [Internet]. 2014 [acesso 8 abr 2020];175(4):1257-66. DOI: 10.1007/s00442-014-2995-6
30. López-Ribera I, Vicent CM. Drought tolerance induced by sound in *Arabidopsis* plants. *Plant Signal Behav* [Internet]. 2017 [acesso 8 abr 2020];12(10):e1368938. DOI: 10.1080/15592324.2017.1368938
31. Fernandez-Jaramillo AA, Duarte-Galvan C, García-Mier L, Jimenez-García SN, Contreras-Medina LM. Effects of acoustic waves on plants: an agricultural, ecological, molecular and biochemical perspective. *Sci Hortic* [Internet]. 2018 [acesso 8 abr 2020];235:340-8. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.02.060
32. Zakariya FH, Rivai M, Aini N. Effect of automatic plant acoustic frequency technology (PAFT) on mustard pakcoy (*Brassica rapa* var. *parachinensis*) plant using temperature and humidity parameters [Internet]. In: *Proceedings of the 2017 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications*; 28-29 ago 2017; Surabaya. New York: IEEE; 2017 [acesso 8 abr 2020]. DOI: 10.1109/ISITIA.2017.8124105
33. Bornman JF, Barnes PW, Robinson SA, Ballaré CL, Flint SD, Caldwell MM. Solar ultraviolet radiation and ozone depletion-driven climate change: effects on terrestrial ecosystems. *Photochem Photobiol Sci* [Internet]. 2015 [acesso 8 abr 2020];14(1):88-107. DOI: 10.1039/c4pp90034k
34. Searles PS, Flint SD, Caldwell MM. A meta-analysis of plant field studies simulating stratospheric ozone depletion. *Oecologia* [Internet]. 2001 [acesso 8 abr 2020];127:1-10. DOI: 10.1007/s004420000592
35. Robson TM, Klem K, Urban O, Jansen MAK. Re-interpreting plant morphological responses to UV-B radiation. *Plant Cell Environ* [Internet]. 2015 [acesso 8 abr 2020];38:856-66. DOI: 10.1111/pce.12374
36. Neugart S, Schreiner M. UVB and UVA as eustressors in horticultural and agricultural crops. *Sci Hortic* [Internet]. 2018 [acesso 8 abr 2020];234:370-81. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.02.021

37. Wargent JJ, Jordan BR. From ozone depletion to agriculture: understanding the role of UV radiation in sustainable crop production. *New Phytol* [Internet]. 2013 [acesso 8 abr 2020];197(4):1058-76. DOI: 10.1111/nph.12132
38. Ho T-T, Lee J-D, Jeong C-S, Paek K-Y, Park S-Y. Improvement of biosynthesis and accumulation of bioactive compounds by elicitation in adventitious root cultures of *Polygonum multiflorum*. *Appl Microbiol Biotechnol* [Internet]. 2018 [acesso 8 abr 2020];102(1):199-209. DOI: 10.1007/s00253-017-8629-2
39. Arenas-Castro H, Muñoz-Gomez SA, Uribe-Acosta M, Castano-Castano L, Lizarazo-Medina PX. Richness, cellulolytic activity, and fungicide susceptibility of fungi from a bird biological collection. *Acta Biol Colomb* [Internet]. 2016 [acesso 8 abr 2020];21(1):167-73. DOI: 10.15446/abc.v21n1.49240
40. Bektas Y, Eulgem T. Synthetic plant defense elicitors. *Front Plant Sci* [Internet]. 2015 [acesso 1º mar 2021];5:804. DOI: 10.3389/fpls.2014.00804
41. Papadopoulou GV, Maedicke A, Grosser K, Van Dam NM, Martínez-Medina A. Defence signalling marker gene responses to hormonal elicitation differ between roots and shoots. *AoB Plants* [Internet]. 2018 [acesso 8 abr 2020];10(3):ply031. DOI: 10.1093/aobpla/ply031
42. Czarnocka W, Karpiński S. Friend or foe? Reactive oxygen species production, scavenging and signaling in plant response to environmental stresses. *Free Radic Biol Med* [Internet]. 2018 [acesso 8 abr 2020];122:4-20. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2018.01.011
43. Farouk S, Abdul Qados AMS. Enhancing seed quality and productivity as well as physio-anatomical responses of pea plants by folic acid and/or hydrogen peroxide application. *Sci Hortic* [Internet]. 2018 [acesso 8 abr 2020];240:29-37. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.05.049
44. Smirnoff N, Arnaud D. Hydrogen peroxide metabolism and functions in plants. *New Phytol* [Internet]. 2019 [acesso 8 abr 2020];221(3):1197-214. DOI: 10.1111/nph.15488
45. Bagheri M, Gholami M, Baninasab B. Hydrogen peroxide-induced salt tolerance in relation to antioxidant systems in pistachio seedlings. *Sci Hortic* [Internet]. 2019 [acesso 8 abr 2020];243:207-13. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.08.026
46. Andrade CA, Souza KRD, Santos MO, Silva DM, Alves JD. Hydrogen peroxide promotes the tolerance of soybeans to waterlogging. *Sci Hortic* [Internet]. 2018 [acesso 8 abr 2020];232:40-5. DOI: 10.1016/j.scienta.2017.12.048
47. Mejía-Teniente L, Torres-Pacheco I, González-Chavira MM, Ocampo-Velazquez RV, Herrera-Ruiz G, Chapa-Oliver AM, Guevara-González RG. Use of elicitors as an approach for sustainable agriculture. *Afr J Biotechnol* [Internet]. 2010 [acesso 8 abr 2020];9(54):9155-62. Disponível: <https://bit.ly/3dO6qQu>
48. Jacobo-Velázquez DA, Cuéllar-Villarreal MR, Welti-Chanes J, Cisneros-Zevallos L, Ramos-Parra PA, Hernández-Brenes C. Nonthermal processing technologies as elicitors to induce the biosynthesis and accumulation of nutraceuticals in plant foods. *Trends Food Sci Technol* [Internet]. 2017 [acesso 8 abr 2020];60:80-7. DOI: 10.1016/j.tifs.2016.10.021
49. Thakur M, Sohal BS. Role of elicitors in inducing resistance in plants against pathogen infection: a review. *ISRN Biochem* [Internet]. 2013 [acesso 8 abr 2020];2013:62412. DOI: 10.1155/2013/762412
50. Urban L, Chabane Sari D, Orsal B, Lopes M, Miranda R, Aarrouf J. UV-C light and pulsed light as alternatives to chemical and biological elicitors for stimulating plant natural defenses against fungal diseases. *Sci Hortic* [Internet]. 2018 [acesso 8 abr 2020];235:452-9. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.02.057
51. Iriti M, Vitalini S. Sustainable crop protection, global climate change, food security and safety: plant immunity at the crossroads. *Vaccines* [Internet]. 2020 [acesso 8 abr 2020];8(1):42. DOI: 10.3390/vaccines8010042
52. Madan RK, Levitt J. A review of toxicity from topical salicylic acid preparations. *JAAD* [Internet]. 2014 [acesso 8 abr 2020];70(4):788-92. DOI: 10.1016/j.jaad.2013.12.005
53. Jamiolkowska A. Natural compounds as elicitors of plant resistance against diseases and new biocontrol strategies. *Agronomy* [Internet]. 2020 [acesso 8 abr 2020];10(2):173. DOI: 10.3390/agronomy10020173
54. Le Mire G, Nguyen ML, Fassotte B, Du Jardin P, Verheggen F, Delaplace P, Jijakli MH. Review: implementing plant biostimulants and biocontrol strategies in the agroecological management of cultivated ecosystems. *Base* [Internet]. 2016 [acesso 8 abr 2020];20(n esp 1):299-313. DOI: 10.25518/1780-4507.12717

Laura Helena Caicedo-López – Mestre – inglauraclo23@gmail.com

 0000-0001-5184-0112


Ana Laura Villagómez Aranda – Mestre – annvillaranda@gmail.com

 0000-0002-6886-7116


Diana Sáenz de la O – Mestre – sadedi_13@hotmail.com

 0000-0001-5115-6513

Carlos Eduardo Zavala Gómez – Mestre – ezavala2@gmail.com

 0000-0002-9416-0608

Estefanía Espinoza Márquez – Mestre – e_espinozam@hotmail.com

 0000-0002-3910-8137

Hilda Romero Zepeda – Doutora – phd.hromero@gmail.com

 0000-0002-5553-8962

Correspondência

Hilda Romero Zepeda – Universidad Autónoma de Querétaro. Av. Hidalgo, s/n, Colonia Las Campanas CP 76010. Querétaro, México.

Participação dos autores

Os autores contribuíram igualmente para o trabalho.

Recebido: 6.8.2019

Revisado: 2.2.2021

Aprovado: 9.2.2021