

Métodos de remoção de agrotóxicos em produtos hortifrutícolas

Methods for the removal of pesticide residues in horticultural products

Métodos de remoción de plaguicidas en productos hortofrutícolas

Recebido: 21/12/2025 | Revisado: 04/01/2026 | Aceitado: 05/01/2026 | Publicado: 06/01/2026

Juliana de Oliveira Moraes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6366-5400>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas, Brasil

E-mail: juliana.moraes@ifal.edu.br

Aline Rocha

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3670-4865>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Brasil

E-mail: aline.rocha@ifsertao-pe.edu.br

Resumo

Esta revisão integrativa traz uma visão geral acerca de métodos para remoção de agrotóxicos em produtos hortifrutícolas, através de estudos publicados entre os anos de 2020 e 2025 na Biblioteca Virtual da Saúde usando-se os termos descritores: resíduos de pesticidas, agrotóxicos, agroquímicos, remoção, redução, eliminação, hortaliças, frutas, folhosos. Os resultados das buscas foram avaliados e selecionados, considerando o objetivo do estudo e fatores de inclusão e exclusão. Foram selecionados 30 estudos para análise, descrição, discussão e síntese do conhecimento. Todos os artigos incluídos nessa revisão foram publicados na língua inglesa. Os anos de 2021 e 2022 apresentaram os maiores números de estudos (56,67%). Além disso, 12 estudos (40,0%) foram publicados por pesquisadores vinculados a instituições chinesas. Os agrotóxicos mais analisados foram: boscalida, carbendazim, clorotalonil, difenoconazol, piraclostrobina, acetamiprid, λ -cialotrina e imidacloprido. A cromatografia foi a principal técnica utilizada nas quantificações dos resíduos dos agrotóxicos. Os métodos de remoção de agrotóxicos investigados pelos estudos avaliados nessa revisão foram: ozonização (12 estudos), imersão com ingredientes domésticos (10 estudos), aplicação de altas e baixas temperaturas (8 estudos), ultrassom (7 estudos), água eletrolisada (3 estudos) e líquido ativado por plasma (3 estudos). Os resultados destacam que a eficácia dos métodos de remoção de agrotóxicos está diretamente relacionada com características químicas dos agrotóxicos. Ademais, entende-se que o uso de um método isoladamente não é suficiente para eliminação total de resíduos de agrotóxicos em produtos hortifrutícolas. Portanto, como estratégia de potencialização dos efeitos de remoção resíduos de agrotóxicos, sugere-se o uso de métodos combinados.

Palavras-chave: Vegetais; Resíduos de pesticidas; Tecnologias.

Abstract

This integrative review provides an overview of methods for removing pesticides from horticultural products, based on studies published between 2020 and 2025 in the Virtual Health Library, using the following descriptors: pesticide residues, pesticides, agrochemicals, removal, reduction, elimination, vegetables, fruits, leafy greens. The search results were evaluated and selected considering the study objective and the inclusion and exclusion criteria. A total of 30 studies were selected for analysis, description, discussion, and knowledge synthesis. All articles included in this review were published in English. The years 2021 and 2022 showed the highest number of studies (56.67%). Additionally, 12 studies (40.0%) were published by researchers affiliated with Chinese institutions. The most analyzed pesticides were: boscalid, carbendazim, chlorothalonil, difenoconazole, pyraclostrobin, acetamiprid, λ -cyhalothrin, and imidacloprid. Chromatography was the main technique used to quantify pesticide residues. The pesticide removal methods investigated by the studies evaluated in this review were: ozonation (12 studies), soaking with household ingredients (10 studies), application of high and low temperatures (8 studies), ultrasound (7 studies), electrolyzed water (3 studies), and plasma-activated liquid (3 studies). The results highlight that the effectiveness of pesticide removal methods is directly related to the chemical characteristics of the pesticides. Furthermore, it is understood that the use of a single method is not sufficient for the complete elimination of pesticide residues in vegetables. Therefore, as a strategy to enhance pesticide residue removal, the use of combined methods is recommended.

Keywords: Vegetables; Pesticide residues; Technologies.

Resumen

Esta revisión integradora presenta una visión general de los métodos para la eliminación de plaguicidas en productos hortofrutícolas, basada en estudios publicados entre 2020 y 2025 en la Biblioteca Virtual en Salud, utilizando los siguientes descriptores: residuos de plaguicidas, pesticidas, agroquímicos, remoción, reducción, eliminación, vegetales, frutas, hortalizas de hoja. Los resultados de las búsquedas fueron evaluados y seleccionados considerando el objetivo

del estudio y los criterios de inclusión y exclusión. Se seleccionaron 30 estudios para análisis, descripción, discusión y síntesis del conocimiento. Todos los artículos incluidos en esta revisión fueron publicados en inglés. Los años 2021 y 2022 presentaron el mayor número de estudios (56,67%). Además, 12 estudios (40.0%) fueron publicados por investigadores vinculados a instituciones chinas. Los plaguicidas más analizados fueron: boscalida, carbendazim, clorotalonil, difenoconazol, piraclostrobina, acetamiprid, λ -cihalotrina e imidacloprido. La cromatografía fue la principal técnica utilizada para la cuantificación de los residuos de plaguicidas. Los métodos de eliminación investigados en los estudios evaluados en esta revisión fueron: ozonización (12 estudios), inmersión con ingredientes domésticos (10 estudios), aplicación de altas y bajas temperaturas (8 estudios), ultrasonido (7 estudios), agua electrolizada (3 estudios) y líquido activado por plasma (3 estudios). Los resultados destacan que la eficacia de los métodos de eliminación de plaguicidas está directamente relacionada con las características químicas de los compuestos. Además, se entiende que el uso de un solo método no es suficiente para la eliminación total de residuos de plaguicidas en vegetales. Por lo tanto, como estrategia para potenciar los efectos de eliminación de residuos de plaguicidas, se sugiere el uso de métodos combinados.

Palabras clave: Vegetales; Residuos de pesticidas; Tecnologías.

1. Introdução

O consumo regular de frutas e hortaliças está relacionado com a prevenção de doenças crônicas (diabetes, doenças cardiovasculares, obesidade e câncer). Esse grupo de alimentos apresentam em sua composição fitoquímicos bioativos que possuem ação frente ao estresse oxidativo e os danos causados pelos radicais livres em humanos (Kaur, 2023). Todavia, frutas e hortaliças estão frequentemente relacionadas com contaminação química, em especial, de agroquímicos. Os agroquímicos, conhecidos legalmente no Brasil como agrotóxicos, são compostos químicos utilizados na agricultura com o objetivo de controlar agentes bióticos, obter mais rendimento e estabilizar a produção agrícola (Zhao et al., 2024).

Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), “agrotóxicos são qualquer substância ou mistura de substâncias ou ingredientes biológicos destinados a repelir, destruir ou controlar qualquer praga ou a regular o crescimento das plantas” (FAO, 2025). Esse grupo de substâncias inclui várias classes químicas: herbicidas (usados para destruir ou controlar ervas daninhas ou vegetações indesejadas), inseticidas (usados para controlar insetos), bactericidas e fungicidas (usados para controlar bactérias e fungos fitopatogênicos, respectivamente) e desempenhando um papel na proteção das culturas. Outros produtos químicos usados principalmente na agricultura são reguladores de crescimento, herbicidas, desinfetantes de superfície, nematicidas, acaricidas e adjuvantes (Pal & Kioka, 2024).

Mesmo diante da relevância dos agroquímicos nas práticas agrícolas e para a agroindústria, sabe-se que o uso irregular dessas substâncias resulta em seu acúmulo no ecossistema, gerando impacto ambiental e efeitos nocivos para saúde dos consumidores (Nematollahi et al., 2022). Atualmente, existe uma ampla diversidade de agroquímicos agrícolas sendo usado de forma regular e irregular nas áreas agrícolas em todo o mundo. Consequentemente, esse uso generalizado, os tornaram contaminantes alimentares críticos, relacionados com efeitos deletérios à saúde humana.

Atualmente, inúmeros estudos evidenciam que os agroquímicos estão intrinsecamente relacionados à carcinogênese (Melanda et al., 2022; Wallace & Buha Djordjevic, 2020), desregulações endócrinas, defeitos congênitos (Sharma et al., 2020), hepatotóxicos (Alarcan et al., 2020; Chang et al., 2017; Lozano-Paniagua et al., 2021), distúrbios reprodutivos (Cremonese et al., 2017; El-Nahal, 2020; Landeros et al., 2022), e doenças cardiovasculares (Gavahian & Khaneghah, 2020; Mahdavi et al., 2021a, b; Valcke et al., 2017; Chiu et al., 2019).

Contudo, observa-se uma mudança de perfil alimentar em uma parcela relevante da população mundial. Existe uma tendência cada vez mais crescente da busca por alimentos isentos de resíduos de agroquímicos, pois diante do aumento da expectativa de vida, os consumidores estão preocupados com a repercussão sobre sua saúde. E ainda, estão atentos a informações acerca da cadeia produtiva de alimentos (produtor rural e indústria processadora de alimentos) relacionadas a responsabilidade social e ambiental (Mir et al., 2022). Portanto, o gerenciamento de resíduos de agroquímicos em frutas e hortaliças é uma questão sensível devido ao seu impacto na saúde pública, na segurança ambiental e no comércio.

A permanência de vestígios de pesticidas em produtos hortifrutícolas está relacionada com fatores intrínsecos ao agroquímico (propriedades químicas, formulação, concentração aplicada e ao período de carência) e relacionados às condições ambientais (luz, temperatura, umidade relativa do ar); e ainda, fatores intrínsecos relacionados à planta e seus órgãos (morfologia, tipos de órgãos vegetais, fases do ciclo fenológico) (Shayanrad & Hassanzadeh, 2024). O processamento dos produtos hortícolas pode gerar a redução dos resíduos de agroquímicos; contudo, o potencial de redução depende dos métodos empregados, das propriedades físico-químicas dos agroquímicos e da natureza dos produtos. No pós-colheita, frutas e hortaliças geralmente são submetidos a limpeza com água por imersão, aspersão, ou métodos combinados. No entanto, a maioria dos agroquímicos apresentam caráter químico hidrofóbico, resultando em baixa afinidade com a água (Qi et al., 2018).

Nesse contexto, destaca-se que produtos hortifrutícolas devem apresentar qualidade (relacionada a aspectos sensoriais, nutricionais e mercadológicos), mas sobretudo devem ser seguros, garantindo a segurança e bem-estar dos consumidores. Portanto, destaca-se a necessidade de pesquisas acerca de novas tecnologias e estratégias para a remoção externa do tecido vegetal e/ou minimização de resíduos de agroquímicos em frutas e hortaliças, pois a exposição a resíduos de agrotóxicos através da ingestão de alimentos representa um risco de saúde pública. Assim, esta revisão integrativa traz uma visão geral acerca de métodos para remoção de agrotóxicos em produtos hortifrutícolas, através de estudos publicados entre os anos de 2020 e 2025 na Biblioteca Virtual da Saúde usando-se os termos descritores: resíduos de pesticidas, agrotóxicos, agroquímicos, remoção, redução, eliminação, hortaliças, frutas, folhosos.

2. Metodologia

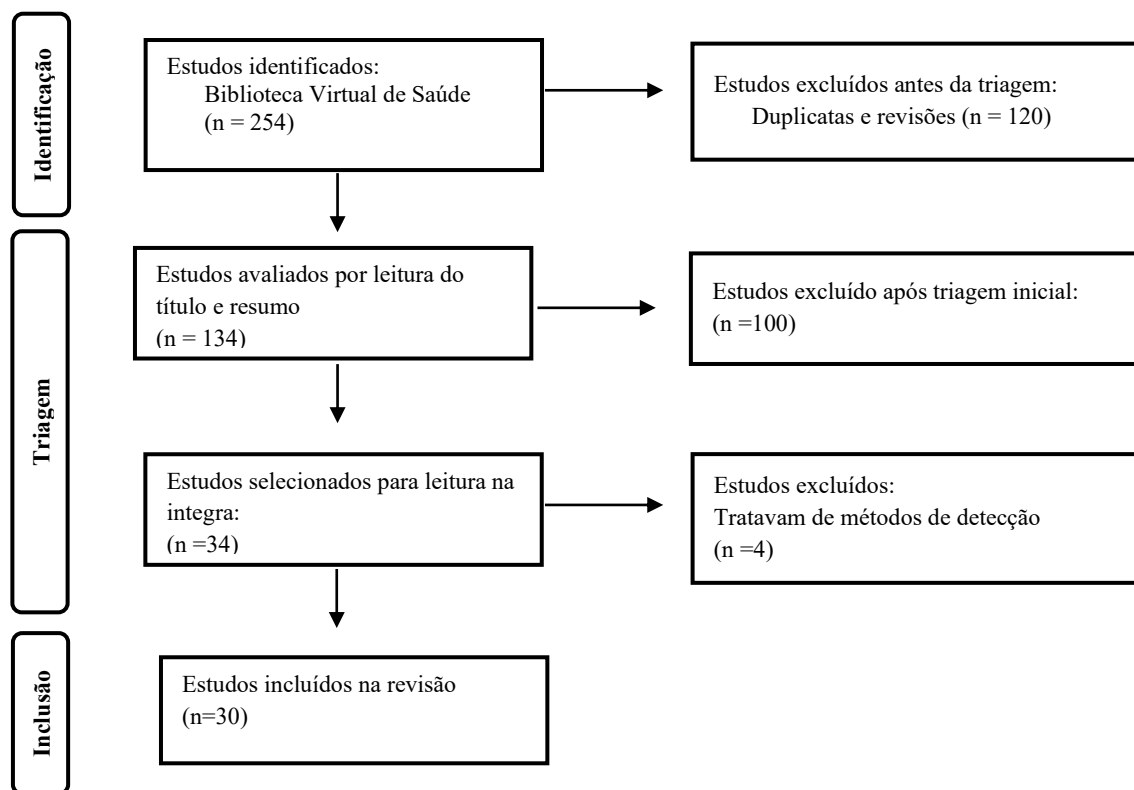
Realizou-se uma investigação documental de fonte indireta do tipo revisão em artigos científicos (Snyder, 2019), num estudo de natureza quantitativa em relação à quantidade de 30 (Trinta) artigos que foram selecionados para compor o “corpus” da pesquisa e, de natureza qualitativa em relação às discussões realizadas acerca dos artigos escolhidos (Pereira et al., 2018) numa revisão integrativa (Crossetti, 2012). O presente estudo trata-se de uma revisão integrativa, método que sintetiza sistematicamente o conhecimento científico produzido em um dado intervalo de tempo. A questão norteadora da revisão integrativa foi: “Quais os métodos eficazes utilizados para redução de agroquímicos em produtos hortifrutícolas?”.

A pesquisa bibliográfica foi realizada de agosto de 2025 a setembro de 2025, por meio de busca eletrônica na base de dados da Biblioteca Virtual da Saúde (BVS). A busca online ocorreu mediante a consulta dos termos/descriptores nos idiomas português e inglês: resíduos de agrotóxicos (pesticide residues), agrotóxicos (agrotoxics), agroquímicos (agrochemica), remoção (removal), redução (reduction), eliminação (elimination), vegetais (vegetables), frutas (fruits), folhosos (leafy greens). Com o intuito de garantir uma busca eficiente, utilizou-se o operador booleano “and” para cruzar os descritores.

Nesse estudo foram incluídos artigos originais, que responderam à questão norteadora, nos idiomas português e inglês, publicados na íntegra em periódicos científicos e publicados no período de 2020 a 2025. A delimitação desse período foi justificada pela avaliação da eficiência dos métodos mais recentes e promissores utilizados para mitigação de agroquímicos em produtos hortifrutícolas. Foram excluídos os editoriais (cartas, comentários, notas breves), cartas ao editor, estudos de revisão, resenhas, trabalhos de conclusão de curso, teses, dissertações, monografias e resumos publicados em anais de eventos. Os artigos em duplicidade foram considerados uma única vez.

O processo de busca e seleção dos estudos seguiu as recomendações Statement for Reporting Systematic Reviews and Meta-Analyses of Studies (PRISMA) nas etapas de identificação, seleção, elegibilidade e inclusão (Page et al., 2021), conforme apresentado na Figura 1. As publicações foram analisadas, interpretadas e apresentadas em uma tabela contendo as principais informações acerca dos estudos, a citar: apresentação de autores, ano de publicação, substâncias químicas avaliadas, descrição da amostra, métodos/tratamentos e principais resultados. Ao fim da análise e descrição dos estudos foi realizada uma discussão dos resultados encontrados e a síntese do conhecimento produzido através desses estudos.

Figura 1 - Fluxograma de seleção dos estudos que compuseram a amostra.



Fonte: Page et al., 2021 (adaptado).

3. Resultados e Discussão

O total de 30 artigos foram selecionados para análise neste estudo, sendo apresentados e descritos no Quadro 1. Todos os artigos incluídos nessa revisão integrativa foram publicados na língua inglesa. Os anos de 2021 e 2022 apresentaram os maiores números de estudos que se enquadraram nos critérios de inclusão, totalizando 17 estudos nesse intervalo (56,67%). Em adição, 40,0% (12 estudos) foram publicados por pesquisadores vinculados a instituições chinesas (Wang et al., 2021; , Li et al., 2021; Liu et al., 2021; Ali, Cheng & Sun, 2021; Mu et al., 2022; Yang, Zhou & Feng, 2022; Chang et al., 2023, Li et al., 2023; Zhao et al., 2024; Li et al., 2024; Wen et al., 2024; Dong et al., 2025); e apenas um estudo foi publicado por pesquisadores ligados a instituições brasileiras (Rodrigues et al., 2021).

Os estudos realizaram investigação de métodos de remoção de resíduos de agrotóxicos em diversos tipos de vegetais, todavia o tomate foi o vegetal mais utilizado nos estudos incluídos nesta revisão, sendo citado em 8 estudos (Pounraj et al., 2020; Ali, Cheng & Sun, 2021; Siddique et al., 2021a; Wasilewski et al., 2022; Ali et al., 2022; Mu et al., 2022; Yang, Zhou & Feng, 2022; Chang et al., 2023). Adicionalmente, outros vegetais frequentemente utilizados pelos estudos foram: espinafre, pepino e maçã, citados em quatro a seis estudos.

Dentre os resíduos de agrotóxicos avaliados pelos estudos, as principais classes encontradas foram os fungicidas e inseticidas. Os fungicidas mais frequentemente analisados foram boscalida, carbendazim, clorotalonil, difenoconazol e piraclostrobina, citados em quatro ou cinco estudos. Os resíduos de inseticidas que se destacaram foram: acetamiprid, λ -cialotrina e imidacloprido, também avaliados entre quatro ou cinco estudos. As quantificações dos resíduos dos agrotóxicos foram realizadas principalmente pela técnica de cromatografia, em especial: cromatografia gasosa com detector de captura de elétrons, cromatografia líquida de alta eficiência, cromatografia líquida de ultra performance acoplada à espectrometria de massas, cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa.

De modo geral, os métodos avaliados nos estudos foram, em ordem de frequência: ozonização (12 estudos), imersão com ingredientes domésticos (10 estudos), aplicação de altas e baixas temperaturas (8 estudos), ultrassom (7 estudos), água eletrolisada (3 estudos) e líquido ativado por plasma (3 estudos).

Quadro 1 - Síntese dos estudos (n=30) incluídos nesta revisão integrativa.

Referência	Agrotóxicos	Vegetais	Técnicas	Principais resultados
Słowik-Borowiec & Szpyrka (2020)	Ciprodinil ^(F) Difenoconazol ^(F) Fluopiram ^(F) Tebuconazol ^(F) Fludioxonil ^(F)	Maçã	Fervura Congelamento Descascamento Extração de suco Lavagem com água de torneira Lavagem ultrassônica	A produção de suco e congelamento apresentaram ótima eficiência de remoção: entre 63 e 100% e 52% até quase 100%, respectivamente. Semelhantemente, a lavagem ultrassônica e fervura resultaram em remoções significativas, 79-84% e 72-78%, respectivamente. O descascamento alcançou redução máxima em torno de 80% para a maioria dos fungicidas. Entretanto, a lavagem comum com água de torneira foi o método menos eficaz de remoção dos resíduos (35-38%).
Pounraj et al. (2020)	Clorpirifós ^(In) λ -cialotrina ^(In)	Tomate Pepino Cenoura Alface	Ácido láctico Ozônio	O tratamento combinado de ácido láctico (2,5 mL/L) e ozônio (9 mg/L) por 10 minutos resultou em redução de clorpirifós entre 26 e 97% dos vegetais. Nesse caso a eficiência de remoção foi maior em alface e tomate. Enquanto, o tratamento combinado também removeu 62–100% de λ -cialotrina, sendo menos eficiente para o tomate (62%) e mais eficiente para cenoura (100%).
Ali, Cheng & Sun (2021)	Chlorothalonil ^(F) Thiram ^(F)	Tomate	Líquido ativado por plasma	O estudo avaliou água ativada por plasma (AAP) e Solução tampão ativada por plasma (STAP), com 10min de ativação. A redução de Chlorothalonil foi ~ 85,3% (AAP) e ~ 74,2% (STAP). Enquanto, para Thiram observou-se reduções ~ 79,47% (APP) e ~ 72,21% (STAP).
Li et al. (2021)	Carbosufano ^(In) Triclorfom ^(In)	Maçã	Água torneira Água com hipoclorito de sódio Água ozonizada Microbolhas Microbolhas de ozônio	A taxa de remoção dos agrotóxicos foi maior com água ozonizada, microbolhas (MB) e tratamento microbolhas de ozônio (MBO) do que com água da torneira e água com hipoclorito de sódio. Após o tratamento com água ozonizada, MB e MBO por 5 min, as taxas de remoção foram de 86 a 88%, 90 a 91% e 98 a 100%, respectivamente. Assim, observou-se um efeito sinérgico específico quando o ozônio é acoplado às microbolhas.
Liu et al. (2021)	Forato ^(In) Clorpirifós ^(In) λ -cialotrina ^(In) Procimidona ^(F)	Repolho Brócolis Pimentão colorido	Água ácida eletrolisada Água alcalina eletrolisada	Observou-se que para o repolho, o melhor resultado ocorreu com tratamento com oscilação contínua, alcançando remoção na faixa de 72,28% a 91,04% para os agrotóxicos avaliados. Para o brócolis e o pimentão, o melhor resultado ocorreu com tratamento de 20 min com oscilação intermitente, removendo aproximadamente 72,28 - 90,11% no brócolis e 72,24 - 88,12% no pimentão. Quanto ao tipo de água eletrolisada, observou-se que a água ácida eletrolisada foi mais eficaz para remoção de inseticidas avaliados, em especial no repolho e brócolis. Enquanto, a água alcalina eletrolisada apresentou melhor desempenho para remoção de fungicidas.
Rodrigues et al. (2021)	Azoxistrobina ^(F) Difenoconazol ^(F) Clortalonil ^(F)	Pimentões	Lavagem com: - água destilada, - detergente, - ácido acético,	A imersão dos frutos em água pura removeu no máximo 29% dos três fungicidas. Em relação à remoção dos resíduos de azoxistrobina, os tratamentos com soluções de detergente a 0,25% e 1%, ácido acético a 5% e bicarbonato a 5%, bem como com água ozonizada e borbulhada com ozônio (1 e 3 mg/L), removeram significativamente mais fungicida do que a imersão em água pura (eficiência

			- bicarbonato de sódio, - hipoclorito de sódio. Água ozonizada Água borbulhada com ozônio	variando de 37 a 67%). Até 58%, 67%, 80% e 81% dos resíduos de clorotalonil foram removidos nos tratamentos com as maiores concentrações de detergente, ácido acético, hipoclorito de sódio e bicarbonato de sódio, respectivamente. Nos tratamentos com água ozonizada e água borbulhada com ozônio foram obtidas reduções de 71% e 80% (1 mg/L) e de 75% e 87% (3 mg/L) de clorotalonil, respectivamente. Considerando as diferentes estratégias de remoção de resíduos, a imersão dos frutos em água, solução de ácido acético a 0,15% e os tratamentos com solução de bicarbonato de sódio a 5%, água ozonizada (1 e 3 mg/L) e água borbulhada com ozônio (1 e 3 mg/L) foram responsáveis pelas maiores taxas de remoção de difenoconazol, sem diferença significativa entre esses tratamentos.
Siddique et al. (2021) _a	Acetamiprida ^(In) Carbendazim ^(F) Imidacloprida ^(In) Tiacloprida ^(In) Tiametoxam ^(In)	Couve-flor Pimentas Pepino Espinafre Tomate Uvas Goiaba Pêssego	Ozonização e Ultrassom (Sonozonização)	O tratamento combinado de ozônio dissolvido (0,3-0,4 mg/L) e ultrassom (40 kHz) reduziu quase 100% de tiametoxam, 97,17% de tiacloprida e 77,78% de imidacloprida. No tratamento com 10 min para hortaliças e 6 min para frutas verificou-se redução média de resíduos de 64% em hortaliças e 44,6% em frutas. Para os agrotóxicos específicos, as médias de reduções observadas foram: ~65,2% de acetamiprida, 72% de carbendazim, ~99,3% de imidacloprida, ~87,3% de tiacloprida e ~31% de tiametoxam.
Siddique et al. (2021) _b	Tiametoxam ^(In) Imidacloprida ^(In) Acetamiprida ^(In)	Espinafre	Ozonização e Ultrassom (Sonozonização)	Foi observada uma redução significativa nas concentrações de tiametoxam, imidacloprida e acetamiprida de até 51,1%, 49,5% e 26,7%, respectivamente, no tratamento de sonozonização por 5 min. Enquanto reduções adicionais foram registradas no tempo de 10 min nas concentrações de tiametoxam, imidacloprida e acetamiprida de até 100%, 93,5% e 100%, respectivamente. No tratamento de 15 min a redução foi de 100% para tiametoxam, 99,7% para imidacloprida e 100% para acetamiprida.
Swami, Kumar & Singh (2021)	Azoxistrobina ^(F) Clorotalonil ^(F) Clorpirifós ^(In) Cipermetrina ^(In) Hexaconazo ^(F) Metil-paration ^(In)	Uva Pimentões	Água ozonizada	O tratamento com água ozonizada por 15 e 30 min reduziu entre 48,7% e 96,9% dos resíduos dos diferentes agrotóxicos testados, respectivamente. No entanto, foi detectado metil-paraoxon, um produto de degradação tóxico do metil-paration, na água ozonizada, sugerindo que a ozonização pode gerar subprodutos.
Wang et al. (2021)	Malationa ^(In) Carbosulfano ^(In)	Acelga chinesa	Água ozonizada	O tratamento com água ozonizada (2,0 mg/L) durante 15 min mostrou redução de resíduos de malationa (53%) e carbosulfano (33%). Entretanto, o tratamento com 2,0 mg/L durante 30 min, resultou em redução de 58,3% para malationa e 38,2% para carbosulfano.
Ali et al. (2022)	Clorotalonil ^(F)	Tomate	Líquido ativo por plasma Ultrassom	A combinação de água ativada por plasma (AAP) (ativação por 10 min) e ultrassom (15 min) reduziu até 89,3% dos resíduos de clorotalonil. Assim, as maiores reduções de clorotalonil foram observadas com o maior tempo de ativação por plasma, alcançando reduções de 85,3% para AAP, em comparação com reduções de 48,8% observadas uso isolado do ultrassom.

Mu et al. (2022)	Mandipropamida ^(F)	Tomate Pepino Acelga chinesa Feijão-caupi	Processamento doméstico: -Imersão em soluções (10%): ▪ ácida (ácido acético) ▪ salina (NaCl) ▪ alcalina (Na ₂ CO ₃) - Descascamento - Produção de conservas - Extração de suco -Cozimento (imersão e à vapor)	A imersão em solução ácida reduziu os resíduos de mandipropamida nos vegetais em 54,1 - 82,2%. A produção de conserva resultou em uma perda de 6,2 - 65,2% em pepino, acelga chinesa e feijão-caupi. A remoção da casca e a produção de suco foram as melhores técnicas para eliminar resíduos de mandipropamida em tomate e pepino (> 91%), e o cozimento por 5 min resultou na redução de forma eficaz dos níveis de mandipropamida em acelga chinesa e feijão-caupi (81,4 e 99,7%), respectivamente.
Singh et al. (2022)	Acetamiprida ^(In) Ethion ^(In)	Quiabo Pimenta verde	Ozonização	O quiabo quando lavado em água ozonizada por 3, 8 ou 10 min, a remoção de acetamiprido variou de cerca de 39,2% a 59,4%. No caso da pimenta verde, a remoção de ethion com água ozonizada variou entre 24,2% e 51,4% para os diferentes tempos de lavagem. Em geral, a lavagem com água ozonizada por 3 min registrou a remoção máxima de acetamiprida e ethion em quiabo e pimenta verde.
Yang et al. (2022)	Azoxistrobina ^(F) Chlorantraniliprole ^(In) Clorfenapir ^(In) Diniconazol ^(F) Fludioxonil ^(F) Imidacloprida ^(In) Indoxacarbe ^(In) Lufenuron ^(In) Piraclostrobina ^(F) Tiametoxam ^(In)	Alface Espinafre Crisântemo Ssamchoo - <i>Brassica lee ssp.</i> <i>Namai</i>	Água corrente da torneira Água parada Água alcalina Limpeza ultrassônica Vinagre 5% Bicarbonato de sódio 2% Detergente vegetal Branqueamento/fervura	A alface apresentou a maior redução (67,4%), enquanto o ssamchoo apresentou a menor (40,6%). De modo geral, as reduções para cada método foram as seguintes: água corrente (77,0%), fervura (59,5%), água alcalina (56,4%), branqueamento (54,9%), limpeza ultrassônica (52,8%), bicarbonato de sódio (52,0%), água parada (51,4%), vinagre (51,2%) e detergente (43,7%).
Yang, Zhou & Feng (2022)	Dimetoato ^(In) Triclorfom ^(In) Carbofurano ^(In)	Espinafre Alface Tomate Aipo Feijão	Cloro livre Ultrassom	O processo combinado de cloro livre e ultrassom, resultou na remoção de 86,7% do dimetoato (DMT), 79,8% do triclorfon (TCF) e 71,3% do carbofurano (CBF) da alface. Para o espinafre observou-se as seguintes reduções: 74,7% (DMT), 72,3% (TCF) e 70,2% (CBF). Enquanto para aipo, 88,5% (DMT), 82,2% (TCF) e 78,8% (CBF). A eficiência de remoção foi maior para feijão e tomate, cujo as reduções foram 90,4 e 93,2% (DMT), 86,1 e 86,4% (TCF) e 80,4 e 81% (CBF), respectivamente.
Wasilewski et al. (2022)	Boscalida ^(F) Acetamiprida ^(In) Piraclostrobi ^(F)	Tomate cereja Tangerina Pepino	Detergentes contendo partículas abrasivas de talco	A eficácia dos detergentes de lavagem dependeu do tamanho das partículas de talco. Detergentes contendo partículas de talco de 50 - 125µm apresentaram o desempenho mais eficaz. Para tomates-cereja remoção de 85%, 81% e 75% para boscalida, piraclostrobina e acetamiprida, respectivamente. Para tangerinas, reduções de 87%, 87% e 75% de acetamiprida, piraclostrobina e boscalida, respectivamente. Enquanto para pepinos, 58%, 53% e 36% de boscalida, piraclostrobina e acetamiprida foram removidos, respectivamente.

Chang et al. (2023)	Penthiopirade ^(F)	Tomate Pepino	Imersão em: - Água em temperatura ambiente - Água aquecida - Solução de NaCl - Solução de ácido acético - Solução de detergente Ultrassom	A imersão em água à temperatura ambiente removeu parte dos resíduos de penthiopirade em tomate e pepino (33%). Quando a água estava aquecida (45 °C), a remoção aumentou significativamente para ambos os vegetais. A imersão com ultrassom (40 kHz) teve efeito diferente entre os vegetais: em tomates, melhorou a remoção (> 70%); já em pepinos, reduziu a eficiência (< 62%). O uso de aditivos na água (NaCl, ácido acético, detergente) melhorou muito a remoção.
Flammini et al. (2023)	Fluopicolida ^(F) Propamocarb ^(F) Clorantniliprole ^(In) λ -cialotrina ^(In)	Espinafre	Processamento doméstico: - Lavagem na torneira - Branqueamento - Congelamento	Em geral, a lavagem em torneira (15 °C por 1 min) removeu de 20 a 60% dos resíduos para os compostos avaliados. O branqueamento (80 °C por 2, 6 e 10 min) foi muito mais eficaz que a lavagem. No caso dos agrotóxicos termolábeis, a redução foi quase completa. Particularmente, nos branqueamentos de 6 e 10 min verificou-se um aumento de fluopicolida de 28 e 26%, respectivamente. O congelamento (-20° C por 4 dias a 10 meses) isoladamente não remove resíduos, mas ao longo do armazenamento congelado ocorre degradação lenta e contínua. Durante o período de congelamento, observou-se uma redução adicional de 5–30%. O efeito combinados dos três procedimentos geraram reduções acima de 80–95%, sendo o branqueamento o fator que mais contribuiu para a remoção global.
Li et al. (2023)	Azoxystrobin ^(F) Boscalid ^(F) Benzoato de emamectina ^(In) Carbendazim ^(F) Difenoconazol ^(F)	Aipo Feijão- caupi	Microbolhas de ozônio	No feijão-caupi o tratamento reduziu os agrotóxicos em um intervalo de 15% a 47%. Além disso, em comparação com os outros quatro agrotóxicos sistêmicos, o benzoato de emamectina apresentou melhor taxa de remoção (65% a 94%) por ser um pesticida não sistêmico com alta solubilidade em água. A eficiência máxima de remoção dos agrotóxicos foi obtida em 18 min, com valores entre 57% e 94% para o aipo e entre 59% e 86% para o Feijão-caupi.
Rutkowska et al. (2023)	Tiofanato-metil ^(F) Carbendazim ^(F) Captan ^(F) Tetraidroftalimida ^(F) Piraclostrobina ^(F) Trifloxistrobina ^(F) Difenoconazol ^(F) Tebuconazol ^(F) Tetraconazol ^(F)	Maçã	Cozimento à seco Liofilização	No processo de cozimento (calor seco a 210°C) observou-se maior redução na concentração de tetraconazol. Na liofilização (- 40 °C) observou-se apenas uma redução em média 35% para o captan. A maior redução ocorreu no grupo dos triazóis (50%) e para o grupo dos estrobilurinas (40%) após a liofilização. O processo de liofilização mostrou-se mais eficaz na remoção dos grupos triazóis e estrobilurinas do que o cozimento a seco. Destaca-se que houve 100% de remoção de tiofanato metil como resultado do processo de cozimento. Todavia, destaca-se que a liofilização resultou na redução de maior número de resíduos.
Terfe, Mekonen & Jemal (2023)	DDT ^{*(In)} Lindano ^(In) C-Clordano ^(In) Dimetacoloro ^(He) Heptacoloro ^(In)	Batata Cebola Repolho	Processamento doméstico: - Lavagem - Descascamento - Fervura	A lavagem com água da torneira reduziu a maioria dos agrotóxicos em cebola e repolho, mas concentrou de deltametrina, lindano, heptacoloro e dimetacoloro em batatas. O descascamento diminuiu significativamente DDT e γ-chlordane. Para DDT e seus metabólitos, a combinação de lavagem, descascamento e fervura apresentou maior eficiência, alcançando até 100% de redução em batata e repolho. Para cipermetrina, o efeito combinado foi efetivo apenas em cebola (~75%). Já

	Cipermetrina ^(In) Deltametrina ^(In)			deltametrina e heptacloro foram quase totalmente removidos em batata e cebola. O mesmo ocorreu para γ -chlordane em batata e repolho. Dimetacloro apresentou maior redução em cebola (99,9%) e repolho (72%).
Bhamdare et al. (2024)	Monocrotofos ^(In) Imidacloprida ^(In)	Espinafre Grão de bico	Lavagem doméstica: - Água + limão (1%) - Solução salina (1%) - Água morna 37- 40° C - Ozonizador comercial	O ozonizador comercial se mostrou com o método mais eficaz. No entanto, dentre as alternativas domésticas, destacaram-se: água com suco de limão (1%) e solução salina (1%), ambas com imersão durante 6 min. As principais reduções foram: água e suco de limão com 67% de monocrotofos (MCF) e 64% de imidacloprida (ICP); solução salina 1% com 63% (MCF) e 61% (ICP). Em contraste, no tratamento com água morna verificou-se reduções de 46% para MCF e 43% para ICP.
Dong et al. (2025)	Imidacloprida ^(In)	Morango	Água ativada por plasma Ultrassom	O tratamento combinado de água ativada por plasma (AAP) e ultrassom (US) resultou em degradação de 90,2% do imidacloprida. Entretanto, no tratamento isolado com AAP verificou-se uma redução de 61,6%. Em adição, o ultrassom (US) isoladamente mostrou-se com baixa taxa de degradação do imidacloprida.
Li et al. (2024)	Benzoato emamectina ^(In) Azoxistrobina ^(F) Boscalida ^(F) Difenoconazol ^(F)	Cereja Damasco Morango	Microbolha ozonizadas	Esse estudo avaliou o tratamento com diferentes variáveis: tempos (2, 10, e 18 min), volumes de água (4 , 8 , e 12 L) e pH (4,6, 7,6 e 10,6). Em geral, o tratamento de 18 min e pH 7,6 foi o mais eficaz na redução dos resíduos dos agrotóxicos avaliados, com volumes ótimos variando por fruta: 12 L (morango), 8 L (cereja) e 4 L (damasco).
Singh et al. (2024)	Azoxistrobina ^(F) Carbendizim ^(F) Ditianona ^(F) Difenoconazol ^(F) Hexaconazol ^(F) Tebuconazol ^(F) Tiofanato-metil ^(F) Piraclostrobina ^(F) Trifloxystrobin ^(F)	Maçã	Cozimento	O Cozimento a 48, 50, 52, e 54 °C durante 2, 3, 4, e 5 minutos reduziu entre 90% e 98% dos resíduos dos fungicidas. Destacam-se os tratamentos de 48 °C por 5 min e 50 °C por 2 min como aqueles mais eficientes na remoção de resíduos dos agrotóxicos na maçã. Todavia, os agrotóxicos mais resistentes aos tratamentos térmicos foram: azoxistrobina e hexaconazol.
Studzinski, Narloch & Dabrowski (2024)	Malationa ^(In) Fenitrothion ^(In) DDT ^(In)	Cenoura Limão Pepino	Água eletrolisada	Esse estudo avaliou dispositivos comerciais (275 nm). Para malationa e fenitrothion (hidrofílicos) os dispositivos testados conseguiram reduzir os resíduos dos agrotóxicos em até 80%. Ao contrário, para o DDT (lipofílico) observou-se uma remoção menor, de 20% a 40%. O dispositivo 2 (72 W - 20 min) foi o que apresentou a maior remoção de malationa e fenitrothion, reduzindo cerca de 20 a 30% do valor inicial. Para a remoção de DDT, o dispositivo (85W - 20 min) foi o mais eficaz.
Zhao et al. (2024)	Fenobucarb ^(In) Fenprotrina ^(Ac, In) Indoxacarbe ^(In) λ -cialotrina ^(In)	Alface	Imersão em soluções: - Ácido acético - Bicarbonato de sódio - NaCl Ultrassom	Os agrotóxicos fenobucarb e indoxacarbe apresentaram remoção acima de 80% com o uso de imersão em 1,0% NaCl por 15 min. Enquanto, fenprotrina foi reduzido em ~80% com o tratamento de imersão em 1,0% ácido acético por 15 min. E ainda, λ -cyhalothrin teve remoção de 73% com o uso de imersão em 0,5% NaCl por 15 min. O tratamento com ultrassom (potência 240 W) com período de exposição de 15 min foi o tratamento mais eficiente.

Wen et al. (2024)	Mancozeb ^(F)	Uva	Água ozonizada Água eletrolisada	O tratamento combinado com água ozonizada (AO) e água eletrolisada (AE) demonstrou um efeito sinérgico na degradação do mancozeb. Após a aplicação dos métodos combinados durante 10 min, a eficiência de remoção do mancozeb atingiu 80,6%. Todavia, o tratamento combinado resultou em riscos mínimos de formação de etilenotieureia, um produto de degradação tóxico do mancozeb.
Du et al. (2025)	Tiabendazol ^(F)	Maça Uva Morango Limão	Ingredientes domésticos: - Amido de milho - Farinha de trigo - Farinha de arroz - Bicarbonato de sódio - Agentes de lavagem comercial	A estratégia caseira mais eficiente (remoção de 94,1%) foi a imersão sequencial: amido de milho (2%) e bicarbonato de sódio (5%). Quanto a avaliação de agentes comerciais, um dos produtos nomeado como “Produto 4” diluído a 2% e usado para imersão por 5 min, removeu 95,3% do tiabendazol. De forma geral, a estratégia caseira mais eficiente (amido + bicarbonato) resultou nas seguintes reduções: ~83,5% para maçãs, ~98,9% para uvas, ~95,9% para limões, ~88,7% para morangos. Enquanto, a estratégia comercial mais eficiente (Produto 4) resultou nas seguintes reduções: ~86% para maçãs, ~97,9% para uvas, ~97,5% para limões, ~87,9% para morangos.
Kim et al (2025)	Hexaconazol ^(F)	Cebola	Métodos de cozimento: - Fervura - Fritura - Assamento	A fervura foi o método mais eficiente, resultando na maior taxa de degradação do hexaconazol. Adicionalmente, a fritura também demonstrou uma alta eficácia na redução dos resíduos. Entretanto, o assamento apresentou a menor taxa de redução do resíduo de hexaconazol.

Min.: minutos; (~): aproximadamente; (*) Diclorodifeniltricloroetano; (AC) acaricidas; (F) fungicida; (In) inseticidas; (He) herbicida.

Fonte: Autores.

A avaliação da eficiência dos métodos domésticos e/ou utilizados pela indústria processadora de alimentos, nas etapas de higienização para remoção de resíduos de agrotóxicos, foram os métodos mais investigados entre os artigos incluídos nessa revisão. A imersão em água da torneira, soluções ácidas, detergentes, ingredientes domésticos ou sanitizantes foram investigadas em 10 estudos (Rodrigues et al., 2021; Pounraj et al., 2020; Yang et al., 2022; Mu et al., 2022; Chang et al., 2023; Flammini et al., 2023; Terfe, Mekonen & Jemal, 2023; Zhao et al., 2024; Bhamdare et al., 2024; Du et al., 2025).

Alguns estudos incluídos nessa revisão avaliaram o efeito de ingredientes domésticos (bicarbonato de sódio, limão, farinha de trigo, amido e vinagre) na redução de agrotóxicos em vegetais (Rodrigues et al., 2021; Yang et al., 2022; Bhamdare et al., 2024; Du et al., 2025). Esses estudos são importantes porque apresentam estratégias de mitigação de agrotóxicos acessíveis e disponíveis para a maioria da população em seus lares. Mesmo diante de tecnologias emergentes, grande parte da população não terá acesso a esses recursos ao longo da vida. Assim, pesquisas que avaliam opções domésticas para a redução de agrotóxicos em produtos hortifrutícolas apresentam potencial impacto para saúde pública.

Nesse cenário, Rodrigues et al. (2021) avaliaram diferentes concentrações de soluções de lavagem (detergente, ácido acético, bicarbonato de sódio e soluções de hipoclorito de sódio) para redução de resíduos de agrotóxicos (azoxistrobina, difenoconazol, clorotalonil) em pimentões. Os maiores percentuais de redução foram obtidos para clorotalonil, que revelaram reduções de até 58%, 67%, 80% e 81% nos tratamentos com as maiores concentrações de detergente (1%), ácido acético (5%), hipoclorito de sódio (1%) e bicarbonato de sódio (5%), respectivamente. Considerando os processos de lavagem domésticos mais usuais, a solução com 5% de bicarbonato de sódio foi a mais eficiente na remoção de resíduos de difenoconazol (66%) e clorotalonil (81%).

Semelhantemente, Yang et al. (2022) avaliou o efeito da lavagem com vinagre 5%, bicarbonato de sódio 2% e detergente vegetal na redução de dez diferentes agrotóxicos em vegetais. Em geral, as médias de redução dos agrotóxicos foram: bicarbonato de sódio (52,0%) vinagre (51,2%) e detergente (43,7%). Em adição, Bhamdare et al. (2024) avaliaram a lavagem de espinafre e grão de bico, durante 6 minutos com água com limão (1%) e solução salina (1%) frente a redução de monocrotofós e imidaclopride e verificaram reduções entre 61 e 67% dos agrotóxicos avaliados, respectivamente.

Du et al. (2025) avaliaram o efeito de amido de milho, farinha de trigo, farinha de arroz, bicarbonato de sódio e de quatro agentes de lavagem comerciais na redução de tiabendazol em frutas. Os autores observaram que a estratégia caseira mais eficiente foi a seguinte imersão sequencial: primeiro em 2% de amido de milho e por fim em 5% de bicarbonato de sódio. Essa combinação resultou na remoção de ~83,5% para maçãs, ~98,9% para uvas, ~95,9% para limões, ~88,7% para morangos. Quanto aos agentes de lavagem comerciais, o produto comercial nomeado pelos autores da pesquisa como produto 4 (2% por 5 minutos), apresentou de ~95% de redução de tiabendazol. O efeito de limpeza desse produto foi relacionado com seus principais ingredientes emulsificantes: ácido oleico e oleato de potássio.

No Brasil a solução de hipoclorito de sódio é distribuída pelo Sistema Único de Saúde (SUS), em especial, nas Unidades Básicas de Saúde (UBS) como um agente sanitizante para produtos hortifrutícolas com objetivos de reduzir casos de surtos de doenças alimentares causadas por bactérias, cistos de protozoários e helmintos. Além disso, o cloro é um agente sanitizante amplamente utilizado em etapas de higienização de indústrias processadora de alimentos (Nakatsu, Bronharo & Michelin, 2011). Assim como o estudo de Rodrigues et al. (2021), o estudo de Li et al. (2021) também avaliaram o efeito da solução a base de cloro na redução de agrotóxicos em vegetais. Esse último estudo, que avaliou a lavagem com solução clorada (40-80 mg/kg) durante 5 e 10 minutos em maçãs, evidenciou que o tempo de lavagem de 10 minutos foi mais eficiente, reduzindo mais de 90% de carbusufano e um pouco mais de 75% de triclorfom.

Em geral, a remoção de agrotóxicos é mais eficiente com uso de soluções oxidantes em concentrações mais elevadas, como no caso da solução de hipoclorito de sódio, avaliados por Rodrigues et al., (2021) e Li et al. (2021). Todavia, é importante

destacar que os compostos clorados devem ser usados em concentrações moderadas, pois esses podem gerar subprodutos tóxicos e carcinogênicos, a citar: compostos organoclorados, trihalometanos (THMs) e ácidos haloacéticos (Chiattonne, Torres & Zambiasi, 2008; Rodrigues et al., 2021).

As variações dos efeitos dos tratamentos para redução de diferentes agrotóxicos estão associadas tanto às características dos agrotóxicos quanto às características dos vegetais. No caso dos agrotóxicos, as propriedades físico-químicas (solubilidade, constante de reação e coeficiente de partição) e modo de ação dessas substâncias irão influenciar o grau de dificuldade de remoção de seus resíduos (Kaushik et al., 2020). Assim como as características do vegetal, como: órgão vegetal, formato, relação área superfície/volume, morfologia, características da epiderme (lisa, rugosa, felpuda, espinhosa), densidade, composição da cera da superfície da derme; podem afetar o modo de ação dos agentes usados na lavagem para remoção dos resíduos de agrotóxicos (Li et al., 2021). Por exemplo, azoxistrobina e difenoconazol, em geral, são absorvidos e penetram mais profundamente na camada cerosa e na cutícula dos frutos. Consequentemente, a remoção de seus resíduos por meio de soluções de lavagem é mais ineficiente. Diferentemente, o clorotalonil geralmente permanece na superfície dos vegetais, sendo mais facilmente arrastados pelo processo de lavagem com soluções.

A lavagem é utilizada para remover sujeira e possíveis resíduos de agrotóxicos da superfície de vegetais. Usualmente, a lavagem ocorre com água da torneira com o objetivo de remover sujidades físicas. Todavia o uso isolado de água não é capaz de remover com alta eficácia contaminantes químicos como os agrotóxicos, pois diversos agrotóxicos apresentam natureza química hidrofóbica. Portanto, a lavagem de vegetais apenas com água tem efeito limitado na remoção de agrotóxicos. Diante disso, vários estudos têm focado no desenvolvimento de detergentes com potencial inovador esfoliante fazendo uso de compostos inertes e atóxicos.

Nessa perspectiva, o trabalho de Wasilewski et al. (2022) avaliou a efetividade de um detergente abrasivo contendo 40% de partículas de talco em diferentes dimensões (50–125, 250–500 e 710–1000 µm) na redução de boscalida, acetamiprida e piraclostrobina em vegetais. Os resultados demonstraram que detergentes contendo partículas de talco de 50–125 µm apresentaram um desempenho mais eficaz, resultando na remoção de resíduos de 85%, 81% e 75% (tomates cerejas), 75%, 87% e 87 % (tangerinas) e 58%, 53% e 36% (pepinos) para boscalida, piraclostrobina e acetamiprida, respectivamente. Nesse estudo o talco atuou como doador de cátion magnésio, pois suas partículas possuem superfície hidrofóbica, caracterizando um detergente a base de surfactante aniônico. Além disso, o talco é um componente não tóxico, sendo seguro para uso em alimentos (Yi et al., 2018).

A redução de temperatura e aplicação de calor foram analisadas por oito estudos (Słowik-Borowiec & Szpyrka, 2020; Mu et al., 2022; Rutkowska et al., 2023; Flammini et al., 2023; Terfe; Mekonen & Jemal, 2023; Bhamdare et al., 2024; Singh et al., 2024; Kim et al., 2025). Os tratamentos que fazem uso de água em elevada temperatura resultam na volatilização, hidrólise, aceleração a dissolução e difusão dos agrotóxicos; e ainda, gera aumento na degradação térmica de vários compostos e decomposição de agrotóxicos. Esses efeitos ocorrem porque as altas temperaturas geram a quebra de ligações químicas dos agrotóxicos, gerando uma redução total ou eliminação parcial desses. Entretanto, é importante destacar que os efeitos dos processos térmicos estão intrinsecamente relacionados com o ponto de degradação dos agrotóxicos e da pressão de vapor desses (Heshmati et al. 2019; Flammini et al., 2023).

Em geral, entende-se que o calor aumenta a evaporação e degradação dos agrotóxicos voláteis. Nesse contexto, sabe-se que a taxa de degradação é mais lenta para agrotóxicos que possuem baixa volatilidade. Ao contrário, para os agrotóxicos que possuem alto ponto de degradação espera-se que estes sejam mais estáveis e sofram lentas reduções (Yigit & Velioglu, 2020). Nesse contexto, em um estudo desenvolvido por Flammini et al. (2023), que avaliaram os efeitos da aplicação de calor (úmido) e redução de temperatura em espinafres, os autores destacaram que nem todos os fungicidas têm a mesma estabilidade frente a

altas temperaturas. Os resultados demonstraram que fungicidas como difenoconazol, tebuconazol, carbendazim e dithianon se degradaram mais rapidamente do que os demais avaliados. Ao contrário, os fungicidas azoxistrobina e hexaconazol apresentaram degradação mais lenta sob as mesmas condições.

Adicionalmente, Rutkowska et al. (2023), avaliou o efeito do calor seco (210 °C) em maçã na redução de onze agrotóxicos, a maior eficiência foi detectada para captan, o qual foi 100% eliminado. Ademais, um estudo desenvolvido por Yang et al. (2022), que avaliou dentre outros métodos, a aplicação de água em ebulição, durante 5 minutos em vegetais folhosos, afirmam que o uso da água em ebulição resultou na menor redução dos resíduos de agrotóxicos avaliados (59,5%). Entretanto, ao avaliarem métodos de redução de mandipropamida em vegetais, Mu et al. (2022) verificaram que o cozimento por 5 minutos resultou em redução de 81,4 e 99,7% em acelga chinesa e feijão-caupi, respectivamente.

Em geral, observou-se que o efeito da aplicação de calor é potencializado quando usado de forma combinada com outros métodos comumente usados em preparações doméstica e/ou em indústrias processadoras de alimentos. O estudo desenvolvido por Terfe, Mekonen & Jemal (2023) corroboram com essa informação, pois avaliaram o efeito combinado da lavagem, descascamento e cozimento em cebola, batata e repolho. Os achados desse estudo evidenciam a redução de 100% de DDT (Diclorodifeniltricloroetano) e seus metabólitos na batata e repolho. Em adição, os resíduos de deltametrina e heptacloro foram quase que totalmente removidos pela combinação dos processos em batata e cebola.

Semelhantemente, Singh et al. (2024) avaliaram o efeito do cozimento de maçãs em diferentes temperaturas (48, 50, 52 e 54 °C) e tempos (2, 3, 4 e 5 minutos), verificando reduções entre 90% e 98% dos resíduos dos nove fungicidas avaliados. Além disso, definiram os tratamentos de 48 °C por 5 minutos e 50 °C por 2 minutos como os mais eficientes na remoção de resíduos dos agrotóxicos. O cozimento também foi avaliado por Bhamdare et al. (2024), porém com temperaturas mais amenas (37-40 °C) em espinafre e grão de bico, esses observaram média de remoção de 46% de monocrotofos e 43% de imidaclopride. Além disso, diferentes métodos de aplicação de calor foram avaliados por Kim et al (2025) quanto a redução de hexaconazol em cebola, a citar: refogado (óleo vegetal a 180 °C durante 30 segundos e por 1, 3 e 5 minutos), cozimento (água a 100 °C por 1, 3, 5, 7 e 10 minutos) e assamento (forno pré-aquecido a 180 °C por 5, 10, 15 e 20 minutos). Os autores concluíram que o cozimento foi o método mais eficiente, enquanto o assamento o menos eficiente.

Alguns estudos relatam que a redução de temperatura usadas domesticamente e em indústrias processadoras de alimentos (congelamento e liofilização) isoladamente não promovem redução de agrotóxicos (Concha-Meyer et al., 2019; Flamminii et al., 2023; Yang et al., 2023). Segundo Flamminii et al. (2023), o congelamento por si só, pode até aumentar ligeiramente a concentração de agrotóxicos, mas durante o armazenamento ocorre degradação lenta desses.

A liofilização, um tipo de desidratação a frio, pode promover retenção de agrotóxicos na matriz alimentar tratada. De acordo com Yang et al. (2023), no processo de liofilização a água é sublimada, não havendo contato com água no estado líquido que possa arrastar os compostos químicos (agrotóxicos). Além disso, os alimentos liofilizados apresentam baixo teor de umidade, o que aumenta a retenção dos agrotóxicos por longos períodos de armazenamento. Logo, os agrotóxicos hidrofóbicos e pouco voláteis dificilmente são reduzidos pela liofilização.

Nesse contexto, Słowik-Borowiec & Szpyrka (2020) avaliaram o efeito do congelamento de maçãs na redução de cinco agrotóxicos e obtiveram resultados de ótima eficiência de remoção de 52% até quase 100%. Em adição, Rutkowska et al. (2023) avaliaram o efeito do processo de liofilização e do descascamento de maçãs frente a redução de onze agrotóxicos; e consequentemente, relataram que o processo de liofilização resultou na mitigação de 90,91% (10/11) dos agrotóxicos avaliados, na faixa de 15,9 - 100,0% em maçãs descascadas e 22,5 - 83,5% em maçãs com casca.

Quanto às técnicas atualmente em fase de pesquisa e ainda não amplamente aplicadas em ambientes domésticos e/ou industriais, a eficiência do processo de ozonização foi objetivo de avaliação em dose estudos (35,48%). Em geral, os estudos

mostraram que o tratamento com ozônio isoladamente tem ação efetiva frente a redução de agrotóxicos (Wang et al., 2021; Swami, Kumar & Singh, 2021; Singh et al., 2022; Li et al., 2023; Bhandare et al., 2024; Wen et al., 2024). Entretanto, quando associado com outro método sua eficácia é potencializada (Pounraj et al., 2020; Li et al., 2021; Rodrigues et al., 2021; Siddique et al., 2021a; Siddique et al., 2021b; Li et al., 2024).

O ozônio (O_3) é naturalmente presente na atmosfera, e bastante estudado e aplicado em diversas áreas pelo seu potencial oxidante e ampla ação antimicrobiana. Além disso, não é considerado tóxico e é classificado na categoria GRAS (Generally Recognized As Safe), pois ao se decompor transforma-se em produtos inofensivos, como dióxido de carbono, água e outras substâncias inertes (Aidoo et al., 2023). Todavia, sua auto-decomposição promove instabilidade do O_3 em meios aquosos, caracterizando-se como uma limitação desse tratamento.

Nesse contexto, surgem estratégias para potencializar o efeito do ozônio e reduzir a dissipação desse composto rapidamente, a citar: uso de microbolhas de ozônio e a combinação da ozonização com outro método (ultrassom, gerando a técnica conhecida como sonozonização). Por exemplo, o efeito sinérgico da ozonização (9 mL/L) e ácido láctico (2,5 mL/L) foi avaliado por Pounraj et al. (2020), frente aos agrotóxicos clorpirifós e λ -cialotrina em tratamento de 10 minutos. Os resultados demonstraram redução de até 97% de clorpirifós (maior eficiência em tomate e alface) e reduções de até 100% da λ -cialotrina (maior eficiência em cenoura, pepino e alface).

Em geral, a produção de ozônio pode ocorrer por diferentes métodos: i) tecnologia de descarga em corona (corona discharge), cujo o ar ou gás oxigênio é passado por uma descarga elétrica de alta voltagem; ii) eletrólise, usada para dividir moléculas de água, liberando oxigênio que se combina para formar ozônio; iii) Irradiação UV, nesse método o oxigênio passa sobre a lâmpada UV (185 nm) e as moléculas de O_2 se dividem em átomos individuais de oxigênio, que então se ligam a outras moléculas de O_2 para formar O_3 ; iv) método de plasma frio, nesse processo o oxigênio puro passa através de um campo de plasma frio para geração de O_3 sem necessidade de altas temperaturas. ou por irradiação com luz UV (Pal & Kioka, 2024)

Os métodos de descarga em corona e irradiação UV, são o mais frequentemente utilizados para converter o ozônio gasoso em O_3 aquoso na forma de microbolhas (MBs). As micro e nanobolhas promovem aumento do contato gás-líquido, o que gera maior eficácia por meio da transferência de massa aprimorada (Pal & Anantharaman, 2022). As microbolhas (MBs) são bolhas com diâmetros típicos de 10–100 μm e apresentam as seguintes propriedades: geração de radicais livres, auto-pressurização e possuem carga superficial negativa/potencial zeta. Essas propriedades potencializam a capacidade oxidativa, promovem estabilidade pelo longo tempo de retenção e fornece versatilidade na possibilidade de aplicação (Jia et al., 2023).

O mecanismo de ação do ozônio aquoso e microbolhas de ozônio, inicia-se pelo ataque por parte dos radicais aos grupos funcionais dos agrotóxicos (amino, metoxi, diclorovinila, nitro, alcanos e alcinos). Consequentemente, essa perturbação química estrutural gera a perda da eficiência por meio da clivagem oxidativa (Yu et al., 2024). Essa etapa é conhecida como reação direta, que ocorre pela auto-decomposição do O_3 e produção de uma molécula estável de oxigênio (O_2) e um átomo ativado de oxigênio (O). Enquanto, a reação indireta ocorre pela geração de radicais hidroxila ($\bullet OH$) resultantes da decomposição do O_3 em múltiplas etapas ou por oxidação secundária (Aidoo et al., 2023).

O tratamento com ultrassom foi investigado por sete estudos inclusos nesta revisão (Siddique et al., 2021a; Siddique et al., 2021b; Ali et al., 2022; Yang, Zhou & Feng, 2022; Chang et al., 2023; Zhao et al., 2024; Dong et al., 2025). O ultrassom utilizado no processamento de alimentos é tipicamente ultrassom de alta potência com frequência mais baixa (20–100 kHz), conhecido como ultrassom de potência. O processo que faz uso de ultrassom (ultrassonicação) produz efeitos mecânicos e de cavitação, assim à medida que o ultrassom se propaga em um meio líquido resulta em processos físicos e químicos (Yu et al., 2024).

Em geral, os efeitos mecânicos promovem a emulsificação de líquidos, a liquefação de géis e a dispersão de sólidos.

Enquanto os efeitos da cavitação são resultado da formação, crescimento e colapso rápido de cavidades microscópicas criadas por rápidas mudanças de pressão. A propagação das ondas ultrassônicas na água gera a formação de milhares de minúsculas bolhas. Na sequência, essas bolhas aumentam rapidamente de tamanho e se rompem, gerando ondas de choque que submetem as áreas circundantes a milhares de pressões atmosféricas, desprendendo assim agrotóxicos insolúveis e dispersando-os no fluido de limpeza. Além disso, algumas moléculas de agrotóxicos podem sofrer oxidação devido à presença de radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$) altamente reativos, produzidos durante a quebra das moléculas de água (Zhao et al., 2024). Assim, ultrassonicação é eficaz para materiais e vegetais de superfícies ásperas e enrugadas, e sobretudo para agrotóxicos insolúveis.

A sonozonização é a combinação de ultrassom (US) e ozonização (O_3). Essa combinação promove um efeito sinérgico, pois potencializa a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), melhorando a eficiência geral da degradação. O_3 , quando introduzido na água, decompõe-se em radicais hidroxila ($-\text{OH}$) e outras espécies reativas de oxigênio sob certas condições (Yang et al., 2022). No estudo descrito por Siddique et al. (2021b), avaliando o efeito combinado de Ultrassom e O_3 em espinafre em diferentes tempos (5, 10 e 15 minutos), verificaram que o tratamento de 15 minutos promoveu redução de 100% para tiametoxam, 99,75% para imidacloprido e 100% para acetamiprido. Corroborando com esses resultados, Siddique et al. (2021a) avaliaram a combinação de ozônio dissolvido ($\sim 0,3\text{-}0,4$ mg/L) e ultrassom (40 kHz), verificando que o tratamento com 10 minutos para hortaliças e 6 minutos para frutas, resultam na redução média de 64,0 e 44,6% dos agrotóxicos avaliados, respectivamente.

A eficiência da água eletrolisada (AE) foi avaliada em três estudos (Liu et al., 2021; Studzinski, Narloch & Dabrowski, 2024; Wen et al., 2024). Esses estudos confirmaram a eficiência da AE na redução de agrotóxicos. O estudo realizado por Liu et al. (2021) avaliaram a remoção de organofosforados, piretroides e fungicidas. Quanto ao tipo de água eletrolisada, observou-se que a água eletrolisada ácida foi mais eficaz para remoção de organofosforados e piretroides; e a água eletrolisada alcalina apresentou melhor desempenho para remoção de fungicidas. Enquanto, Studzinski, Narloch & Dabrowski (2024) avaliaram a eficiência de três aparelhos comerciais que usavam a tecnologia de água eletrolisada frente a redução de três tipos de agrotóxicos, demonstrando que o tempo de eletrolisação afeta diretamente a eficiência de remoção dos agrotóxicos. Em adição, Wen et al. (2024) avaliaram o efeito combinado de água ozonizada e AE, e confirmaram o efeito sinérgico na degradação de mancozeb.

A água eletrolisada (AE) refere-se à solução ácida ou alcalina produzida pela eletrólise de diversas soluções de sais neutros em uma célula eletrolítica. Como o cloreto de sódio (NaCl), enquanto eletrólito, pode produzir água eletrolisada com excelentes funções de desinfecção e limpeza. Em geral, o termo “água eletrolisada” refere-se à água eletrolisada com NaCl como eletrólito. Após a eletrólise, água eletrolisada ácida ou oxidada é produzida no ânodo, possui pH de 2 a 3 e sua concentração de cloro disponível é de 10 a 90 ppm e o potencial de oxirredução é superior a 1100 mV. Enquanto, água eletrolisada alcalina ou reduzida apresenta pH de 10 a 13 e potencial de oxirredução de -800 a -900 (Zhang, Cao & Jiang, 2021).

As propriedades da água eletrolisada são determinadas principalmente pelo tipo e concentração do eletrólito, pela intensidade da corrente elétrica, pela temperatura e dureza da água. De modo geral, a justificativa da capacidade de redução de agrotóxicos pela água eletrolisada é baseada em seu alto potencial de oxirredução e capacidade de absorção de cloro (Munir et al., 2024).

O método de líquido ativo por plasma foi avaliado por três estudos (Ali, Cheng & Sun, 2021; Ali et al., 2022; Dong et al., 2025). O tratamento usando água e solução tampão ativadas por plasma foram avaliadas por Ali, Cheng & Sun (2021), os quais verificaram que o uso da água pura resultou nas maiores reduções de clorotalonil (85,3%) e thiram (85,3%) em tomates. Semelhantemente, Ali et al. (2022) obtiveram reduções de clorotalonil com água pura ativada por plasma, alcançando reduções de 85,29% (ativação de 10 minutos). Enquanto, Dong et al. (2025) avaliaram o efeito do tratamento combinado de água ativada por plasma e ultrassom em morangos, esses observaram uma degradação de 90,2% do resíduo de imidacloprida, já a água ativada por plasma isoladamente resultou em 61,6% de redução.

A degradação de agrotóxicos nos tratamentos com água ativada por plasma (AAP) é resultante da natureza oxidativa e ácida do líquido ativado por plasma e; adicionalmente, à sua alta retenção de radicais livres (oxigênio atômico e grupos hidroxila) (Ali et al., 2022). Durante a geração do AAP ocorre a dissociação das moléculas de água quando átomos de oxigênio entram em contato com moléculas de água na interface gás-líquido. A exposição prolongada do líquido ao plasma frio dissocia o N_2 para formar óxidos de nitrogênio (NO_x), e a dissolução dos NO_x na água gera íons H (Esua et al., 2019). Porém, é importante destacar que alguns estudos têm relatado que o uso de AAP pode estar associado a produção de nitritos (NO_2^-) e nitratos (NO_3^-) nos alimentos. Consequentemente, o NO_2^- pode ser convertido em compostos N-nitroso carcinogênicos (Ekezie, Cheng & Sun (2019); Esua et al., 2019).

5. Considerações Finais

Os estudos incluídos nessa revisão exploram vários métodos eficazes na redução de resíduos de agrotóxicos em produtos hortifrutícolas. Entretanto, diante da ampla diversidade de agrotóxicos utilizados no campo, dificilmente um método e/ou tecnologia isoladamente é capaz de promover eliminação total desses contaminantes. Assim, a utilização de abordagens combinadas surge como estratégia promissora para maximizar a eficiência de remoção. Além disso, os resultados apresentados nessa revisão destacam a capacidade de redução de resíduos de agrotóxicos através do uso de métodos simples e fácil execução em ambientes domiciliares.

Adicionalmente, os estudos destacaram que a eficiência dos métodos de redução de resíduos de agrotóxicos em vegetais está intrinsecamente relacionada com as características químicas dos agrotóxicos e, também com as características dos vegetais que se objetiva tratar. Assim, estudos que avaliam diferentes métodos e/ou tecnologias frente a redução de agrotóxicos devem ser realizados em uma variedade de órgãos vegetais (frutos, folhas, hastes, raízes, tubérculos, bulbos); e testados para a mais ampla variedade de agrotóxicos. Consequentemente, os resultados de trabalhos nessa temática configurem importantes subsídios para geração de estratégias e desenvolvimentos de novos métodos/tecnologias cada vez mais eficientes na remoção de resíduos de agrotóxicos em vegetais. E sobretudo, represente um alerta acerca da alta concentração desses produtos químicos presentes na alimentação da população mundial.

A mitigação de resíduos de agrotóxicos em produtos hortícolas configura um desafio multidimensional, envolvendo interesses de órgãos de saúde pública, do setor agrícola e dos consumidores. A produtividade e a rentabilidade da cadeia hortícola devem se fundamentar em práticas sustentáveis e, sobretudo, seguras. Nesse cenário, a formulação de políticas públicas eficazes, o aprimoramento das regulamentações referentes ao uso de agrotóxicos e o fortalecimento das ações de fiscalização são medidas indispensáveis para assegurar a oferta de produtos que garantam tanto a segurança quanto a soberania alimentar da população.

Referências

- Aidoo, O. F., Osei-Owusu, J., Chia, S. Y., Dofuor, A. K., Antwi Agyakwa, A. K., Okyere, H., Gyan, M., E. G., Ninsin, K. D., Duker, R. Q., Siddiqui, S. A., & Borgemeister, C. (2023). Remediation of pesticide residues using ozone: A comprehensive overview. *Science of the Total Environment*, 894, 164933. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023>
- Alarcan, J., Waizenegger, J., De Solano, M., Lichtenstein, D. L. M., Luckert, C., Peijnenburg, A., Stoop, G., Sharma, R. P., Kumar, V., Marx-Stoelting, P., Lampen, A., & Braeuning, A. (2020). Hepatotoxicity of the pesticides imazalil, thiacloprid and clothianidin – Individual and mixture effects in a 28-day study in female Wistar rats. *Food and Chemical Toxicology*, 140, 111306. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111306>
- Ali, M., Cheng, J. H., & Sun, D. (2021). Effect of plasma activated water and buffer solution on fungicide degradation from tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit. *Food Chemistry*, 350, 129195.
- Ali, M., Sun, D.-W., Cheng, J.-H., & Esua, O. J. (2022). Effects of combined treatment of plasma activated liquid and ultrasound for degradation of chlorothalonil fungicide residues in tomato. *Food Chemistry*, 371, 131162. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131162>
- Bhambare, H., Pahade, P., Bose, D., Durgbanshi, A., Carda-Broch, S., & Peris-Vicente, J. (2024). Evaluating the effectiveness of different household washing techniques for removal of insecticides from spinach and chickpea leaves by micellar liquid chromatography. *Journal of Chromatography A*, 1730, 465043.

- Chang, J., Dou, L., Ye, Y., & Zhang, K. (2023). Reduction in the residues of penthiopyrad in processed edible vegetables by various soaking treatments and health hazard evaluation in China. *Foods*, 12(4).
- Chang, J., Li, W., Xu, P., Guo, B., Wang, Y., Li, J., & Wang, H. (2017). The tissue distribution, metabolism and hepatotoxicity of benzoylurea pesticides in male *Eremias argus* after a single oral administration. *Chemosphere*, 183, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.009>
- Chiattonne, P. V., Torres, L. M., & Zambiasi, R. C. (2008). Aplicação do ozônio na indústria de alimentos. *Alimentos e Nutrição*, 19(3), 341–350.
- Chiu, H., Sandoval-Insausti, S., Ley, S. H., Bhupathiraju, S. N., Hauser, R., Rimm, E. B., Manson, J. E., Sun, Q., & Chavarro, J. E. (2019). Association between intake of fruits and vegetables by pesticide residue status and coronary heart disease risk. *Environment International*, 132. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105100>
- Concha-Meyer, A., Grandon, S., Sepúlveda, G., Diaz, R., Yuri, J. A., & Torres, C. (2019). Pesticide residues quantification in frozen fruit and vegetables in Chilean domestic market using QuEChERS extraction with UHPLC Orbitrap MS. *Food Chemistry*, 295, 64–71.
- Cremonese, C., Piccoli, C., Pasqualotto, F., Clapauch, R., Koifman, R. J., Koifman, S., & Freire, C. (2017). Occupational exposure to pesticides, reproductive hormone levels and sperm quality in young Brazilian men. *Reproductive Toxicology*, 67, 174–185.
- Crossetti, M. G. O. (2012). Integrative review of nursing research: scientific rigor required. *Rev. Gaúcha Enferm.* 33(2). <https://doi.org/10.1590/S1983-14472012000200001>.
- Dong, S., Ou, Y., Jiao, Y., Misra, N. N., & Shi, H. (2025). Reduction of imidacloprid on strawberry using combined plasma-activated water and ultrasound treatment: efficacy and mechanisms. *Food Chemistry*, 493, 146059.
- Du, X., Ho, L., Li, S., Doherty, J., Lee, J., Clark, J. M., & He, L. (2025). Efficacy of household and commercial washing agents in removing the pesticide thiabendazole residues from fruits. *Foods*, 14(318). <https://doi.org/10.3390/foods14020318>
- Ekezie, F. G. C., Cheng, J.-H., & Sun, D.-W. (2019). Effects of atmospheric pressure plasma jet on the conformation and physicochemical properties of myofibrillar proteins from king prawn. *Food Chemistry*, 276, 147–156.
- El-Nahhal, Y. (2020). Pesticide residues in honey and their potential reproductive toxicity. *Science of the Total Environment*, 741, 139953.
- Esua, O. J., Chin, N. L., Yusof, Y. A., & Sukor, R. (2019). Combination of ultrasound and ultraviolet-C irradiation on tomato quality during storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(10).
- FAO. (2025). Q&A on Pests and Pesticide Management. <https://www.fao.org/newsroom/detail/Q-A-on-Pests-and-Pesticide-Management/en>
- Flaminii, F., Minetti, S., Mollica, A., Cichelli, A., & Cerretani, L. (2023). The effect of washing, blanching and frozen storage on pesticide residue in spinach. *Foods*, 12(14).
- Gavahian, M., & Khanagheh, A. M. (2020). Plasma frio como ferramenta para a eliminação de contaminantes alimentares. *Food Research International*, 60(9), 1581–1592.
- Heshmati, A., Ebrahimi, A., Kazemi, S., Dabirian, F., & Zohal, M. (2019). Removal of pesticide residues from vegetables by washing techniques: A review. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13, 1781–1790.
- Jia, M., Farid, M. U., Kharraz, J. A., Kumar, N. M., Chopra, S. S., Jang, A., Chew, J., Khanal, S. K., Chen, G., & An, A. K. (2023). Nanobubbles in water and wastewater treatment systems. *Water Research*, 245, 120613.
- Kaur S. (2023). Barriers to consumption of fruits and vegetables and strategies to overcome them in low- and middle-income countries: a narrative review. *Nutrition research reviews*, 36(2), 420–447. <https://doi.org/10.1017/S0954422422000166>
- Kaushik, V., Murudkar, S., Gohil, K., Ghatkar, S., Gode, V., & Mhaskar, S. (2020). Review on household decontamination technologies. *International Journal of Food Science and Nutrition Engineering*, 10, 12–36.
- Kim, M., Cho, M., Im, J., Seo, C., Park, C., & Im, M.-H. (2025). Effect of stir-frying, boiling, and baking on hexaconazole in Welsh onion. *Foods*, 14(2).
- Landeros, N., Duk, S., Márquez, C., Inzunza, B., Acuña-Rodríguez, I. S., & Zúñiga Venegas, L. A. (2022). Genotoxicity and reproductive risk in workers exposed to pesticides in rural areas of Curicó, Chile: A pilot study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(24), 16608. <https://doi.org/10.3390/ijerph192416608>
- Li, C., Yao, W., Xie, Y., Guo, Y., Cheng, Y., Yu, H., Qian, H., & Yao, W. (2021). Effects of ozone-microbubble treatment on the removal of residual pesticides and the adsorption mechanism of pesticides onto the apple matrix. *Food Control*, 120, 107548. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107548>
- Li, X., Liu, C., Liu, F., Zhang, X., Peng, Q., Wu, G., Lin, J., & Zhao, Z. (2023). Accelerated removal of five pesticide residues in three vegetables with ozone microbubbles. *Food Chemistry*, 403, 134386.
- Li, X., Liu, C., Liu, F., Zhang, X., Chen, X., Peng, Q., Wu, G., & Zhao, Z. (2024). Substantial removal of four pesticide residues in three fruits with ozone microbubbles. *Food Chemistry*, 441, 138293.
- Liu, Y., Wang, J., Wan, Y., Li, N., Zhu, X., Yang, L., Liu, Y., Song, P., Cheng, M., & Xing, W. (2021). Effects of electrolyzed water treatment on pesticide removal and texture quality in fresh-cut cabbage, broccoli, and color pepper. *Food Chemistry*, 353, 129408. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129408>

- Lozano-Paniagua, D., Parrón, T., Alarcón, R., Requena, M., López-Guarnido, O., Lacasaña, M., & Hernández, A. F. (2021). Evaluation of conventional and non-conventional biomarkers of liver toxicity in greenhouse workers occupationally exposed to pesticides. *Food and Chemical Toxicology*, 151, 112127. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112127>
- Mahdavi, V., Eslami, Z., Golmohammadi, G., Tajdar-Oranj, B., Behbahan, A. K., & Khanegah, A. M. (2021a). Simultaneous determination of multiple pesticide residues in Iranian saffron: A probabilistic health risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis*, 100, 103915. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103915>
- Melanda, V. S., Galicioli, M. E. A., Lima, L. S., Figueiredo, B. C., & Oliveira, C. S. (2022). Impact of pesticides on cancer and congenital malformation: A systematic review. *Toxics*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/toxics10110676>
- Mir, S. A., Dar, B. N., Mir, M. M., Sofi, S. A., Shah, M. A., Sidiq, T., Sunooj, K. V., Hamdani, A. M., & Mousavi Khanegah, A. (2022). Current strategies for the reduction of pesticide residues in food products. *Journal of Food Composition and Analysis*, 106, 104274. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104274>
- Mu, S., Dou, L., Ye, Y., Chi, D., & Zhang, K. (2022). Effects of household processing on residues of the chiral fungicide mandipropamid in four common vegetables. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 15543. <https://doi.org/10.3390/ijerph192315543>
- Munir, S., Azeem, A., Zaman, M. S., & Haq, M. Z. U. (2024). From field to table: Ensuring food safety by reducing pesticide residues in food. *Science of the Total Environment*, 922, 171382. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171382>
- Nakatsu, V. A., Bronharo, T. M., & Michelin, A. de F. (2011). Solução de hipoclorito de sódio na higienização de vegetais comestíveis. *Boletim do Instituto Adolfo Lutz – BIAL*, (43–44).
- Nematollahi, A., Rezaei, F., Afsharian, Z., & Mollakhalili-Meybodi, N. (2022). Diazinon reduction in food products: A comprehensive review of conventional and emerging processing methods. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 40342–40357. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19294-9>
- Pal, P., & Anantharaman, H. (2022). CO₂ nanobubbles utility for enhanced plant growth and productivity: Recent advances in agriculture. *Journal of CO₂ Utilization*, 61, 102008. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102008>
- Pal, P., & Kioka, Y. (2024). Micro and nanobubbles enhanced ozonation technology: A synergistic approach for pesticides removal. *Journal of Water Process Engineering*, 58, 104106. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104106>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pounraj, S., Bhilwadiakar, T., Manivannan, S., Rastogi, N. K., & Negi, P. S. (2020). Effect of ozone, lactic acid and combination treatments on the control of microbial and pesticide contaminants of fresh vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(3), 1155–1165. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10972>
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J. & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da Pesquisa Científica*. Santa Maria: Editora da UFSM.
- Qi, Z., Tian, E., Song, Y., Sosnin, E. A., Skakun, V. S., Li, T., Xia, Y., Zhao, Y., Lin, X. S., & Liu, D. (2018). Inactivation of *Shewanella putrefaciens* by plasma activated water. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 38(5), 1035–1050. <https://doi.org/10.1007/s11090-018-9911-5>
- Rodrigues, A. A. Z., de Queiroz, M. E. L. R., Faroni, L. R. D., Prates, L. H. F., Neves, A. A., de Oliveira, A. F., de Freitas, J. F., Heleno, F. F., & Zambolim, L. (2021). The efficacy of washing strategies in the elimination of fungicide residues and the alterations on the quality of bell peppers. *Food Research International*, 147, 110579. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110579>
- Rutkowska, E., Łozowicka, B., Wolejko, E., Kaczyński, P., & Łuniewski, S. (2023). High and low temperature processing: Effective tool reducing pesticides in/on apple used in a risk assessment of dietary intake protocol. *Chemosphere*, 313, 137498. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137498>
- Shayanrad, P., & Hassanzadeh, N. (2024). Reduction and health risk assessment of imidacloprid insecticide residues in grapes using home washing methods. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 13(1), 35–44. <https://doi.org/10.34172/jaehr.1370>
- Siddique, Z., Malik, AU, Asi, MR, Inam-ur-Raheem, M., Iqbal, MM, & Abdullah, M. (2021a). Impact of sonolytic ozonation (O₃/US) on degradation of pesticide residues in fresh vegetables and fruits: Case study of Faisalabad, Pakistan. *Ultrasonics Sonochemistry*, 79.
- Siddique, Z., Malik, A. U., Asi, M. R., Anwar, R., & Raheem, M. I.-U. (2021b). Sonolytic-ozonation technology for sanitizing microbial contaminants and pesticide residues from spinach (*Spinacia oleracea* L.) leaves, at household level. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 52913–52924. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14203-y>
- Singh, S., Solanki, V., Bardhan, K., Kansara, R., Vyas, T. K., Gandhi, K., Dhakan, D., Ali, H. M., & Siddiqui, M. H. (2022). Valuation of ozonation technique for pesticide residue removal in okra and green chili using GC-ECD and LC-MS/MS. *Plants*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/plants11233206>
- Singh, A. K., Banerjee, T., Sethi, S., Tippannanavar, M., Joshi, A., Kumar, R., Dhiman, M. R., Sharma, R. M., Asrey, R., & Pandey, R. (2024). Fungicide residue degradation in hot water treated apple. *Applied Fruit Science*, 66, 385–397. <https://doi.org/10.1007/s10341-024-01041-8>
- Słowik-Borowiec, M., & Szpyrka, E. (2020). Selected food processing techniques as a factor for pesticide residue removal in apple fruit. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(2), 2361–2373.
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–9.
- Statista Research Department. (2024). Global pesticide agricultural use 2022, by leading country. <https://www.statista.com/statistics/1263069/global-pesticide-use-by-country/>

- Studzinski, W., Narloch, L., & Dąbrowski, L. (2024). Removal of pesticides from lemon and vegetables using electrolyzed water kitchen devices. *Molecules*, 29(23).
- Swami, S., Kumar, B., & Singh, S. B. (2021). Effect of ozone application on the removal of pesticides from grapes and green bell peppers and changes in their nutraceutical quality. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 56(8), 722–730.
- Terfe, A., Mekonen, S., & Jemal, T. (2023). Pesticide residues and effect of household processing in commonly consumed vegetables in Jimma Zone, Southwest Ethiopia. *Journal of Environmental and Public Health*, 2023, Article 7503426.
- Valcke, M., Bourgault, L., Rochette, L., Normandin, O., Samuel, D., Belleville, C., Blanchet, D., & Phaneuf, D. (2017). Human health risk assessment on the consumption of fruits and vegetables containing residual pesticides: A cancer and non-cancer risk/benefit perspective. *Environment International*, 108, 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.07.015>
- Wallace, D. R., & Buha Djordjevic, A. (2020). Heavy metal and pesticide exposure: A mixture of potential toxicity and carcinogenicity. *Current Opinion in Toxicology*, 19, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2020.01.001>
- Wang, S., Wang, J., Li, C., Xu, Y., & Wu, Z. (2021). Ozone treatment pak choi for the removal of malathion and carbosulfan pesticide residues. *Food Chemistry*, 337, 127755.
- Wasilewski, T., Hordyjewicz-Baran, Z., Zarebska, M., Ząjszły-Turko, E., Zimoch, J., Kanios, A., & de Barros Sanches, M. (2022). Effect of talc particle size in detergents for fruits and vegetables on the ability to remove pesticide residues. *ACS Omega*, 7(29), 25046–25054.
- Wen, A., Gao, F., Guo, B., Wang, L., Yuan, S., Yu, H., Guo, Y., Cheng, Y., Yang, L., & Yao, W. (2024). Electrolyzed water combined with ozone treatment for efficient removal of mancozeb residues from grapes. *Journal of Food Science*, 89(11), 7521–7533.
- Yang, L., Zhou, J., & Feng, Y. (2022). Removal of pesticide residues from fresh vegetables by the coupled free chlorine/ultrasound process. *Ultrasonics Sonochemistry*, 82, 105891. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105891>
- Yang, S.-J., Mun, S., Kim, H. J., Han, S. J., Kim, D. W., Cho, B.-S., Kim, A. G., & Park, D. W. (2022). Effectiveness of different washing strategies on pesticide residue removal: The first comparative study on leafy vegetables. *Foods*, 11(18).
- Yang, B., Wang, S., Ma, W., Li, G., Tu, M., Ma, Z., Zhang, Q., Li, H., & Li, X. (2023). Simultaneous determination of neonicotinoid and carbamate pesticides in freeze-dried cabbage by modified QuEChERS and ultra-performance liquid chromatography–tandem mass spectrometry. *Foods*, 12(4), 699. <https://doi.org/10.3390/foods12040699>
- Yi, H., Zhao, Y., Rao, F., & Song, S. (2018). Hydrophobic agglomeration of talc fines in aqueous suspensions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 538, 327–332.
- Yigit, N., & Velioglu, Y. S. (2019). Effects of processing and storage on pesticide residues in foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60, 3622–3641.
- Yu, Y., Wang, Y., Okonkwo, C. E., Chen, L., & Zhou, C. (2024). Multimode ultrasonic-assisted decontamination of fruits and vegetables: A review. *Food Chemistry*, 450, 139356. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139356>
- Zhang, W., Cao, J., & Jiang, W. (2021). Application of electrolyzed water in postharvest fruits and vegetables storage: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 599–607. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.005>
- Zhao, S., Huang, X., Chen, G., Qin, H., Xu, B., Luo, Y., Liao, Y., Wang, S., Yan, S., & Zhao, J. (2024). Causal inference and mechanism for unraveling the removal of four pesticides from lettuce (*Lactuca sativa* L.) via ultrasonic processing and various immersion solutions. *Ultrasonics Sonochemistry*, 108, 106937. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106937>