





















## O PARADOXO DA FRUTICULTURA IRRIGADA: IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS E A SAÚDE DO TRABALHADOR NO POLO PETROLINA–JUAZEIRO

THE PARADOX OF IRRIGATED FRUIT CULTURE: SOCIOENVIRONMENTAL IMPACTS AND OCCUPATIONAL HEALTH IN THE PETROLINA-JUAZEIRO HUB

LA PARADOJA DE LA FRUTICULTURA IRRIGADA: IMPACTOS SOCIOAMBIENTALES Y SALUD OCUPACIONAL EN EL POLO PETROLINA-JUAZEIRO

Paulo Roberto Ramos<sup>1</sup> ; Paulo César Fagundes Neves<sup>2</sup> ; Anne Caroline Coelho Leal Arias Amorim<sup>3</sup> ; Márcio Rafael Alves Bispo dos Santos<sup>4</sup> ; Bruna Erica Leite Rodrigues dos Santos<sup>5</sup> ; Antônio Fábio Ferreira<sup>6</sup> ; Edmo Henrique Martins Cavalcante<sup>7</sup> ; Herácliton Neves Araújo<sup>8</sup> ; Carla Valois Ribeiro<sup>9</sup> ; Hohenfeld Francisco Alves de Oliveira<sup>10</sup> ; Renatha Dayane Cabral de Araújo Ramos<sup>11</sup> ; Natália Gomes de Carvalho Freitas<sup>12</sup> ; Kayla Caianne Gonçalves Alves<sup>13</sup> ; Lucimara Silva Torres Santos<sup>14</sup> ; Eliane Soares Teixeira Dias<sup>15</sup> ; Márcio Felipe Bastos Coelho<sup>16</sup> ; Arlete Colaço de Azevêdo<sup>17</sup> ; Aila de Souza Santos<sup>18</sup> ; Raimundo Ribeiro Galvão Filho<sup>19</sup> ; Débora Cíntia Oliveira da Silva<sup>20</sup> 

<sup>1</sup>Doutor pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Docente da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Petrolina, Pernambuco, Brasil; <sup>2</sup>Doutor pela Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP). Docente da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Petrolina, Pernambuco, Brasil; <sup>3</sup> Doutora pela Universidade de Brasília (UnB). Docente da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Petrolina, Pernambuco, Brasil; <sup>4</sup>Mestrando da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Petrolina, Pernambuco, Brasil; <sup>5</sup>Mestra pela Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Petrolina, Pernambuco, Brasil; <sup>6</sup>Mestrando da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Petrolina, Pernambuco, Brasil; <sup>7</sup>Doutor pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Recife, Pernambuco, Brasil; <sup>8</sup>Mestre pela Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Petrolina, Pernambuco, Brasil; <sup>9</sup>Mestra pela Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Petrolina, Pernambuco, Brasil; <sup>10</sup>Especialista pelo Centro Universitário Internacional (UNINTER), Petrolina, Pernambuco, Brasil; <sup>11</sup>Mestranda da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Petrolina, Pernambuco, Brasil; <sup>12</sup>Mestranda da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Petrolina, Pernambuco, Brasil; <sup>13</sup>Mestranda da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Petrolina, Pernambuco, Brasil; <sup>14</sup>Mestranda da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Petrolina, Pernambuco, Brasil; <sup>15</sup>Mestranda da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Petrolina, Pernambuco, Brasil; <sup>16</sup>Graduado pela Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, Goiás, Brasil; <sup>17</sup>Mestranda pela Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Petrolina, Pernambuco, Brasil; <sup>18</sup>Mestranda da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Petrolina, Pernambuco, Brasil; <sup>19</sup>Mestrando pela Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Petrolina, Pernambuco, Brasil; <sup>20</sup>Graduada pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Docente do Centro Universitário Brasileiro (UNIBRAS), Juazeiro, Bahia, Brasil.

\*Autor correspondente: [paulo.ramos@univasf.edu.br](mailto:paulo.ramos@univasf.edu.br)

Recebido: 20/03/2026 | Aprovado: 03/04/2026 | Publicado: 07/04/2026

**Resumo:** A expansão acelerada da fruticultura irrigada no polo Petrolina–Juazeiro-Brasil consolidou o semiárido brasileiro como uma região estratégica para o agronegócio exportador, ao mesmo tempo em que intensificou desigualdades socioambientais e riscos à saúde do trabalhador. Esse paradoxo revela um modelo de desenvolvimento em que ganhos econômicos coexistem com formas difusas e frequentemente invisíveis de exposição. O objetivo deste estudo foi analisar os impactos socioambientais e à saúde associados ao agronegócio irrigado, com foco na interação entre exposição química, dinâmica hídrica e vulnerabilidade territorial. Foi realizada uma revisão integrativa da literatura em bases de dados nacionais e internacionais, complementada por literatura cinzenta. Inicialmente, 216 registros foram identificados e submetidos a processos sistemáticos de triagem e elegibilidade. A análise foi estruturada em três eixos: bioquímico-clínico, socioeconômico e geoambiental. A exposição a agrotóxicos na região é crônica, cumulativa e mediada por fatores ambientais e sociais. Evidências apontam associações com genotoxicidade, desregulação endócrina e doenças crônicas subnotificadas, além de precarização do trabalho e desigualdades de gênero. As vias de contaminação se estendem por solo e água, ampliando a

exposição para além do ambiente ocupacional. A discussão evidencia que essas dinâmicas estão inseridas em um contexto de injustiça ambiental, no qual os riscos são distribuídos de forma desigual e estruturalmente produzidos. A interação entre condições climáticas, irrigação e uso de insumos químicos intensifica a exposição, sustentando a noção de exposoma químico-hídrico. Conclui-se pela necessidade de políticas integradas, fortalecimento da vigilância e enfrentamento das desigualdades territoriais em regiões semiáridas.

**Palavras-chave:** Exposoma. Justiça Ambiental. Agronegócio. Exposição Crônica. Semiárido.

**Abstract:** The rapid expansion of irrigated fruit production in the Petrolina–Juazeiro–Brazil hub has positioned the Brazilian semiarid as a strategic agro-export region, while simultaneously intensifying socioenvironmental inequalities and occupational health risks. This paradox reflects a development model in which economic gains coexist with diffuse and often invisible forms of exposure. This study aims to analyze the socioenvironmental and health impacts associated with irrigated agribusiness, focusing on the interaction between chemical exposure, water dynamics, and territorial vulnerability. An integrative literature review was conducted using international and regional databases, complemented by grey literature. A total of 216 records were initially identified and subjected to systematic screening and eligibility procedures. The analysis was structured around three axes: biochemical-clinical, socioeconomic, and geoenvironmental. The results indicate that pesticide exposure in the region is chronic, cumulative, and mediated by environmental and social factors. Evidence shows associations with genotoxicity, endocrine disruption, and underreported chronic diseases, alongside labor precariousness and gender inequality. Contamination pathways extend through soil and water systems, amplifying exposure beyond occupational settings. The discussion reveals that these dynamics are embedded in a broader framework of environmental injustice, where risks are unevenly distributed and structurally produced. The interaction between climate conditions, irrigation systems, and chemical use intensifies exposure, supporting the conceptualization of a chemical-hydric exposome. In conclusion, the study highlights the need for integrated regulatory approaches, improved surveillance systems, and policies that address cumulative exposure and territorial inequalities in semiarid agro-export regions.

**Keywords:** Exposome. Environmental Justice. Agribusiness. Chronic Exposure. Semiarid.

**Resumen:** La expansión acelerada de la fruticultura irrigada en el polo Petrolina–Juazeiro–Brasil ha consolidado el semiárido brasileño como una región estratégica para el agronegocio exportador, al mismo tiempo que ha intensificado las desigualdades socioambientales y los riesgos para la salud ocupacional. Este fenómeno refleja un modelo de desarrollo en el que los beneficios económicos coexisten con formas difusas y frecuentemente invisibles de exposición. El objetivo de este estudio fue analizar los impactos socioambientales y sanitarios asociados al agronegocio irrigado, enfocándose en la interacción entre exposición química, dinámica hídrica y vulnerabilidad territorial. Se realizó una revisión integradora de la literatura utilizando bases de datos internacionales y regionales, complementadas con literatura gris. Se identificaron inicialmente 216 registros, los cuales fueron sometidos a procesos sistemáticos de selección y elegibilidad. El análisis se estructuró en tres ejes: bioquímico-clínico, socioeconómico y geoambiental. Los resultados muestran que la exposición a pesticidas es crónica, acumulativa y mediada por factores ambientales y sociales. Se identificaron asociaciones con genotoxicidad, disrupción endocrina y enfermedades crónicas subregistradas, junto con precarización laboral y desigualdades de género. Las vías de contaminación se extienden a través del suelo y el agua, ampliando la exposición más allá del ámbito ocupacional. La discusión evidencia que estas dinámicas se inscriben en un contexto de injusticia ambiental, donde los riesgos se distribuyen de forma desigual y estructural. La interacción entre condiciones climáticas, sistemas de riego y uso de agroquímicos intensifica la exposición, respaldando el concepto de exposoma químico-hídrico. En conclusión, se destaca la necesidad de políticas integradas, fortalecimiento de los sistemas de vigilancia y reducción de las desigualdades territoriales en regiones semiáridas.

**Palabras clave:** Exposoma. Justicia Ambiental. Agronegocio. Exposición Crónica. Semiárido.

## 1 INTRODUÇÃO

O polo Petrolina–Juazeiro no Nordeste do Brasil consolidou-se como um polo estratégico de agroexportação no semiárido brasileiro, marcado pela rápida integração aos mercados globais de frutas e pela forte dependência de sistemas de produção irrigados. Essa trajetória reflete uma reorganização mais ampla do território, na qual a expansão econômica coexiste com persistentes assimetrias socioambientais. Longe de constituir um processo homogêneo de desenvolvimento, a região apresenta uma paisagem fragmentada, caracterizada pelo acesso desigual aos recursos e por diferentes níveis de exposição aos riscos ambientais (Silva, 2012; Barros, 2010).

A expansão da agricultura irrigada intensificou os ciclos produtivos e reconfigurou as dinâmicas espaciais, reforçando estruturas de governança que privilegiam grandes atores orientados à exportação. Esses arranjos aprofundam as dualidades agrárias entre o agronegócio irrigado e os sistemas tradicionais marginalizados, consolidando desigualdades estruturais no semiárido (Sobel, 2011; Baiardi & Ribeiro, 2023; Brandão & Rist, 2020). Nesse contexto, o agronegócio opera como um sistema sociotécnico que redistribui benefícios e riscos de forma desigual, inserindo a região nos circuitos globais de uso de agroquímicos e externalização ambiental (Bombardi, 2017; Gomes, 2019). O polo Petrolina–Juazeiro configura-se, assim, como uma expressão condensada das dinâmicas do Antropoceno, na qual os ganhos de produtividade são inseparáveis das pressões ecológicas e da vulnerabilidade social.

Os marcos científicos e regulatórios voltados aos riscos dos agrotóxicos têm privilegiado a intoxicação aguda, negligenciando os efeitos cumulativos da exposição crônica. Essa limitação obscurece a natureza difusa e multivetorial da exposição em territórios agrícolas, onde se sobrepõem vias ocupacionais, ambientais e alimentares. No Brasil, o uso de agrotóxicos apresenta ampla distribuição espacial e caráter socialmente desigual, afetando de forma desproporcional populações rurais (Pignati *et al.*, 2017).

Evidências associam a exposição crônica a efeitos genotóxicos, desregulação endócrina e alterações neurológicas, ainda que esses desfechos permaneçam subnotificados ou inadequadamente classificados nos sistemas de vigilância (Nogueira, Szwarcwald & Damacena, 2020). O Dossiê ABRASCO destaca a persistência de cenários de exposição contínua que escapam ao monitoramento e à regulação efetivos (Carneiro *et al.*, 2015). Nesse contexto, o conceito de exposoma oferece uma abordagem mais abrangente ao integrar exposições cumulativas ao longo da vida. Aplicado ao semiárido, esse referencial revela um contexto em que agentes químicos interagem com estresse climático e vulnerabilidade social, sustentando a formulação do exposoma do semiárido como categoria analítica capaz de apreender riscos sinérgicos (Milhorange *et al.*, 2020; Gomes, 2019; Nogueira, Szwarcwald & Damacena, 2020; Souza, Silva & Pinheiro, 2022).

A água ocupa um papel central e paradoxal na dinâmica do polo Petrolina–Juazeiro. O rio São Francisco sustenta a agricultura irrigada e eleva o valor econômico da água nas estratégias de desenvolvimento regional (Alcoforado de Moraes *et al.*, 2018). Ao mesmo tempo, atua como via de dispersão de contaminantes, uma vez que o uso intensivo de agroquímicos favorece o escoamento superficial, a lixiviação e o acúmulo de resíduos em sistemas aquáticos (Pignati *et al.*, 2017; Nogueira, Szwarcwald & Damacena, 2020; Souza, Silva & Pinheiro, 2022; Silva *et al.*, 2014).

Essa dinâmica amplia a exposição para além do ambiente ocupacional, atingindo comunidades do entorno por meio de processos difusos de contaminação. A noção de comércio de água virtual reforça essa perspectiva ao evidenciar que a degradação ambiental e o esgotamento de recursos estão incorporados nos produtos exportados (Nascimento & Becker, 2009). A água assume, portanto, um papel dual, ao mesmo tempo em que viabiliza a produção e intensifica a circulação de riscos, tensionando as fronteiras entre exposição ambiental e ocupacional (Gomes, 2019; Nogueira, Szwarcwald & Damacena, 2020).

Apesar dos avanços na literatura, a relação entre exposição química, processos hidrológicos e condições climáticas permanece fragmentada entre diferentes abordagens disciplinares. Os estudos tendem a isolar

dimensões bioquímicas, ambientais ou socioeconômicas, limitando a compreensão de suas interações em contextos semiáridos (Brandão & Rist, 2020; Brandão, Santos & Rist, 2020; Milhorange *et al.*, 2020; Gomes, 2019).

Este estudo enfrenta essa lacuna ao propor o conceito de exposoma químico-hídrico, definido como a interação entre exposição a agrotóxicos, vias mediadas pela água e estressores ambientais característicos do semiárido. Ademais, introduz a noção de zonas de sacrifício para descrever territórios nos quais os ganhos econômicos são sustentados pela externalização dos custos ambientais e à saúde para populações vulneráveis.

Os objetivos consistem em sintetizar evidências nas dimensões bioquímica, socioeconômica e geoambiental, examinar criticamente o papel do agronegócio irrigado na produção de desigualdades na distribuição de riscos e desenvolver um modelo conceitual que articule a teoria do exposoma à justiça ambiental no semiárido brasileiro.

Ao enquadrar o polo Petrolina–Juazeiro como um espaço crítico de interseção entre exposições ambientais, sociais e biológicas, este estudo propõe uma transição de análises fragmentadas de risco para uma compreensão integrada da vulnerabilidade induzida pelo desenvolvimento. Ao articular os conceitos de exposoma químico-hídrico e zonas de sacrifício, a análise ultrapassa descrições setoriais e interroga as condições estruturais que normalizam exposições desiguais e invisibilizam danos crônicos. Essa abordagem reposiciona o semiárido nos debates globais sobre saúde planetária e justiça ambiental, ao mesmo tempo em que questiona as narrativas dominantes da modernização agrícola ao evidenciar seus custos epidemiológicos e territoriais.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Delineamento do estudo: revisão integrativa da literatura

Este estudo foi delineado como uma revisão integrativa da literatura, abordagem metodológica particularmente adequada para problemas complexos de saúde pública e de natureza socioambiental que não podem ser plenamente compreendidos a partir de uma única perspectiva disciplinar. Diferentemente de formatos de revisão estritamente clínicos, a revisão integrativa permite a inclusão simultânea de estudos empíricos, teóricos e documentais (Torraco, 2005), mostrando-se especialmente pertinente para examinar as interseções entre agronegócio, contaminação ambiental, exposição ocupacional e vulnerabilidade territorial no polo Petrolina–Juazeiro. Em termos metodológicos, distingue-se por sua capacidade de sintetizar evidências heterogêneas sem perder rigor analítico, favorecendo construções interpretativas mais amplas e avanços teóricos críticos (Torraco, 2005; Mendes *et al.*, 2008; Souza *et al.*, 2010).

A justificativa epistemológica para a adoção desse delineamento decorre da própria natureza do problema investigado. O objeto de análise não se restringe a um desfecho clínico específico ou a uma única via de exposição, mas envolve um processo multidimensional no qual degradação ambiental, exposição química crônica, circulação hídrica de contaminantes, precarização do trabalho e políticas de desenvolvimento regional se articulam. Nesse sentido, uma revisão sistemática convencional, embora rigorosa para questões delimitadas, imporá restrições excessivas quanto aos tipos de evidência elegíveis, reduzindo a capacidade explicativa necessária para uma síntese crítica do fenômeno. Em contraste, a revisão integrativa possibilita articular resultados provenientes de diferentes desenhos metodológicos, escalas e tradições disciplinares, condição essencial para sustentar a proposição

conceitual do exposoma químico-hídrico e das zonas de sacrifício no semiárido brasileiro (Torraco, 2005; Mendes *et al.*, 2008).

A revisão seguiu as etapas clássicas recomendadas: identificação do problema norteador, definição da estratégia de busca, estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão, seleção crítica dos estudos, extração e organização das informações relevantes e síntese interpretativa dos achados (Mendes *et al.*, 2008; Souza *et al.*, 2010). Adicionalmente, para ampliar a transparência, reprodutibilidade e clareza procedimental, adotou-se uma lógica inspirada no protocolo PRISMA para as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão final dos estudos. Essa estratégia não converte a revisão em um modelo sistemático estrito, mas fortalece a rastreabilidade do processo analítico, assegurando rigor por meio da explicitação das etapas e da coerência entre seleção do corpus e síntese interpretativa.

## 2.2 Estratégia de busca e bases de dados

A busca bibliográfica foi realizada no período de outubro de 2025 a março de 2026, contemplando as etapas de refinamento das estratégias de busca, exploração das bases de dados, identificação de duplicatas, triagem por título e resumo, avaliação de elegibilidade em texto completo e consolidação do corpus final. A estratégia foi definida com o objetivo de captar estudos relacionados ao agronegócio, uso de agrotóxicos, saúde ocupacional e ambiental, dinâmica hídrica e processos territoriais em contextos semiáridos, com ênfase no Vale do São Francisco e no polo Petrolina–Juazeiro.

Foram utilizadas as seguintes bases de dados: PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science e Embase, complementadas por SciELO e LILACS, de modo a garantir maior sensibilidade à produção científica latino-americana e brasileira publicada no período de outubro de 2025 a março de 2026. A estratégia metodológica foi orientada pelos princípios da revisão integrativa, conforme proposto por Torraco (2005) e operacionalizado no contexto da saúde por Mendes, Silveira e Galvão (2008), com apoio das diretrizes de sistematização descritas por Souza, Silva e Carvalho (2010). Considerando que o tema envolve dimensões institucionais e políticas frequentemente sub-representadas em periódicos indexados, também foi incorporada literatura cinzenta, especialmente o dossiê da ABRASCO sobre agrotóxicos e saúde. A inclusão dessa literatura foi justificada por sua relevância analítica para a discussão sobre justiça ambiental, crítica regulatória e invisibilização de danos crônicos.

Os termos de busca foram combinados por operadores booleanos e adaptados às especificidades de indexação de cada base. A estrutura central articulou descritores relacionados ao agronegócio e à fruticultura, agrotóxicos e agroquímicos, saúde ocupacional e ambiental, além do território semiárido. Termos como agronegócio, fruticultura, agrotóxicos, agroquímicos, saúde ocupacional, impacto ambiental, semiárido, Vale do São Francisco, Petrolina e Juazeiro foram combinados de diferentes formas. A estratégia foi refinada iterativamente para evitar a predominância de estudos agrônômicos desvinculados das dimensões de exposição, saúde ou território.

Foram inicialmente identificados 216 registros. Após a recuperação, os estudos passaram por etapas sucessivas de triagem, incluindo remoção de duplicatas, avaliação preliminar por título e resumo e análise de elegibilidade em texto completo, conforme critérios previamente estabelecidos. O objetivo não foi apenas reunir

estudos sobre irrigação ou economia regional, mas selecionar produções capazes de contribuir de forma substantiva para o modelo analítico proposto, especialmente aquelas que abordassem impactos à saúde, desigualdades socioespaciais e vias de contaminação envolvendo água, solo e populações vulneráveis.

### 2.3 Critérios de inclusão e exclusão

Os critérios de elegibilidade foram definidos previamente ao processo de triagem, com o objetivo de assegurar consistência analítica e evitar seleções arbitrárias. Esses critérios foram orientados pela questão norteadora da pesquisa e pelo compromisso teórico de integrar dimensões bioquímicas, socioeconômicas e geoambientais.

Critérios de inclusão:

- Estudos publicados em português, inglês ou espanhol;
- Estudos recuperados entre outubro de 2025 e março de 2026 nas bases selecionadas e na literatura cinzenta;
- Estudos empíricos, análises teóricas, teses, dissertações e documentos institucionais com relevância direta para o problema de pesquisa;
- Publicações com foco no semiárido brasileiro, no Vale do São Francisco ou especificamente no polo Petrolina–Juazeiro;
- Estudos que abordem ao menos uma das seguintes dimensões: exposição a agrotóxicos, saúde ocupacional, contaminação ambiental, uso e circulação da água, reestruturação territorial, vulnerabilidade do trabalho, desigualdades agrárias ou políticas públicas relacionadas à agricultura irrigada;
- Estudos cujos resultados contribuam para um ou mais dos três eixos analíticos definidos.

Critérios de exclusão:

- Publicações centradas exclusivamente em produtividade agrícola, manejo de culturas ou desempenho de mercado, sem conexão com exposição, saúde, ambiente ou território;
- Estudos realizados em contextos sem relação analítica com o semiárido irrigado ou com o Vale do São Francisco;
- Editoriais, textos opinativos, resumos de eventos ou comunicações breves sem consistência metodológica ou analítica;
- Registros duplicados em diferentes bases;
- Textos indisponíveis em versão completa após busca em bases e repositórios;
- Estudos com foco temático distante do objetivo da revisão, mesmo quando relacionados genericamente à agricultura ou desenvolvimento.

O processo de triagem ocorreu em três etapas: remoção de duplicatas, leitura de títulos e resumos para exclusão inicial e análise de textos completos para verificação de aderência conceitual, pertinência geográfica e contribuição analítica. Apenas os estudos com relevância efetiva para o problema central foram incluídos na

síntese.

## 2.4 Estrutura analítica

A estrutura analítica foi desenvolvida com o objetivo de superar leituras fragmentadas da literatura e sustentar uma síntese crítica capaz de articular exposição, território e desenvolvimento. Os estudos selecionados foram analisados a partir de um modelo tridimensional que permitiu identificar convergências, tensões e lacunas explicativas.

O primeiro eixo, bioquímico-clínico, reuniu estudos que abordam efeitos diretos e indiretos da exposição a agrotóxicos, incluindo toxicidade, genotoxicidade, desregulação endócrina, danos neurológicos, doenças crônicas e percepção de risco. Esse eixo foi fundamental para compreender como os danos à saúde são produzidos, reconhecidos ou invisibilizados.

O segundo eixo, socioeconômico, contemplou estudos sobre relações de trabalho, precarização, desigualdades de gênero, dualidades agrárias, governança, políticas públicas e distribuição desigual de riscos e benefícios no agronegócio irrigado. Essa dimensão permitiu analisar a exposição como um fenômeno socialmente estruturado.

O terceiro eixo, geoambiental, incluiu estudos sobre valorização da água, dependência hídrica, degradação de matas ciliares, circulação de contaminantes, comércio de água virtual e transformações ambientais associadas à agricultura irrigada. Esse eixo foi central para compreender a mediação ecológica da exposição.

Após a classificação, os estudos foram submetidos a uma síntese interpretativa voltada à identificação de padrões recorrentes, complementaridades e lacunas. Foi dada especial atenção às interseções entre os três eixos, considerando que a hipótese central deste estudo sustenta que os danos crônicos no polo Petrolina–Juazeiro emergem da interação entre exposição química, circulação hídrica, adversidade climática e desigualdade territorial. É dessa convergência analítica que se fundamenta a construção dos conceitos de exposoma químico-hídrico e zonas de sacrifício desenvolvidos nas seções subsequentes.

O Quadro 1 sistematiza os elementos centrais da estratégia adaptada ao PRISMA adotada nesta revisão integrativa, organizando o processo de busca em cinco componentes principais: bases de dados, literatura cinzenta, estratégia de busca, critérios de inclusão e critérios de exclusão. Essa estrutura amplia a transparência ao explicitar a relação entre cada decisão metodológica, sua operacionalização e sua finalidade analítica. Além de apresentar etapas procedimentais, a tabela evidencia como cada componente contribuiu para a construção de um corpus coerente e direcionado, alinhado aos objetivos da pesquisa. A inclusão de bases indexadas e de literatura cinzenta expressa o compromisso simultâneo com rigor científico e abrangência crítica, especialmente no que se refere à justiça ambiental e à subnotificação de impactos à saúde.

**Quadro 1.** Estratégia de busca e critérios de elegibilidade adaptados ao PRISMA

Componente	Descrição	Operacionalização	Finalidade na revisão
<b>Bases de dados</b>	Fontes indexadas internacionais e regionais	PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, Embase; SciELO, LILACS	Garantir ampla cobertura e inclusão de evidências globais e latino-americanas
<b>Literatura cinzenta</b>	Fontes institucionais e não indexadas	Dossiê ABRASCO e documentos de saúde pública relacionados	Captar perspectivas críticas e questões socioambientais subnotificadas
<b>Estratégia de busca</b>	Combinações booleanas de descritores	<i>(Agribusiness OR "Fruit culture") AND (Pesticides OR Agrochemicals) AND ("Occupational health" OR "Environmental impact") AND ("Semi-arid" OR "São Francisco Valley" OR Petrolina OR Juazeiro)</i>	Identificar estudos que articulem produção, exposição, saúde e território
<b>Crítérios de inclusão</b>	Parâmetros de elegibilidade dos estudos	Relevância geográfica;nexo exposição-saúde-ambiente; contribuição empírica ou teórica; idiomas (EN/PT/ES)	Manter coerência analítica e alinhamento com o problema de pesquisa
<b>Crítérios de exclusão</b>	Parâmetros de remoção de estudos irrelevantes	Foco exclusivamente agrônômico ou econômico; ausência de relação com exposição ou saúde; duplicatas; indisponibilidade de texto completo	Evitar dispersão analítica e assegurar consistência conceitual

**Fonte:** Elaborado pelos autores.

A configuração apresentada no Quadro 1 revela um equilíbrio deliberado entre sensibilidade e especificidade na estratégia de busca. A combinação de bases internacionais com repositórios regionais reduz vieses epistemológicos ao incorporar perspectivas do Sul Global frequentemente ausentes na literatura indexada dominante. Ao mesmo tempo, a estruturação por operadores booleanos garante que os estudos recuperados não se limitem à produtividade agrônômica, mas dialoguem com dimensões de saúde, ambiente e território.

Os critérios de inclusão e exclusão operam como filtros epistemológicos, evitando a fragmentação da análise e reforçando a lógica integrativa da revisão. Essa arquitetura metodológica foi fundamental para sustentar a síntese subsequente, uma vez que assegurou que o *corpus* selecionado seja não apenas amplo, mas também conceitualmente alinhado ao referencial do exposoma químico-hídrico e à identificação de zonas de sacrifício.

### 3 RESULTADOS

Os estudos selecionados foram analisados a partir de sua contribuição para a compreensão integrada dos impactos da fruticultura irrigada no polo Petrolina–Juazeiro, considerando dimensões bioquímico-clínicas, socioeconômicas e geoambientais. O corpus final incluiu artigos científicos, dissertações, teses e documentos institucionais, publicados majoritariamente entre 2006 e 2025, com predominância de estudos realizados no semiárido brasileiro, especialmente na região do Vale do São Francisco.

De modo geral, os estudos abordam populações expostas direta ou indiretamente aos agrotóxicos, incluindo trabalhadores rurais, agricultores familiares e comunidades ribeirinhas. As evidências convergem para a caracterização da exposição como crônica, cumulativa e mediada por fatores ambientais, climáticos e sociais, evidenciando a complexidade dos processos de contaminação e seus efeitos à saúde e ao território.

O Quadro 2 apresenta uma síntese dos principais estudos incluídos na revisão, destacando suas características metodológicas e principais achados.

**Quadro 2** – Síntese dos estudos analisados

Título do estudo	Autores (ano)	Local / contexto	Público-alvo	Principais conclusões
Exposição a agrotóxicos e agravos à saúde em trabalhadores agrícolas	Rigotto <i>et al.</i> (2020)	Brasil (contextos rurais)	Trabalhadores agrícolas	Evidencia associação entre exposição crônica e efeitos genotóxicos, endócrinos e neurológicos
Distribuição espacial do uso de agrotóxicos no Brasil	Pignati <i>et al.</i> (2017)	Brasil	População rural	Uso intensivo de agrotóxicos correlaciona-se com regiões agrícolas e maior risco de exposição
<i>Health risk perception of pesticide use in Petrolina/Juazeiro</i>	Silvério <i>et al.</i> (2025)	Petrolina–Juazeiro	Trabalhadores rurais	Baixa percepção dos riscos crônicos, apesar do reconhecimento de riscos agudos
<i>Risks to the environment and to the health of family farmers</i>	Souza, Silva e Pinheiro (2022)	Brasil (agricultura familiar)	Agricultores familiares	Exposição contínua representa risco persistente à saúde e ao ambiente
Dossiê ABRASCO: impactos dos agrotóxicos na saúde	Carneiro <i>et al.</i> (2015)	Brasil	População geral	Exposição crônica é difusa, cumulativa e subnotificada nos sistemas de vigilância
<i>Local representations of riparian forest change</i>	Silva <i>et al.</i> (2014)	Rio São Francisco	Comunidades locais	Degradação ambiental reduz capacidade de contenção de contaminantes
<i>The impact of global change on water value</i>	Alcoforado de Moraes <i>et al.</i> (2018)	Bacia do São Francisco	Sistemas de irrigação	Valoração econômica da água desconsidera externalidades ambientais

**Fonte:** Elaborado pelos autores.

A síntese apresentada no Quadro 2 evidencia que a exposição a agrotóxicos no semiárido brasileiro não se configura como um evento isolado, mas como um processo sistêmico, cumulativo e multiescalar. Os estudos convergem ao demonstrar que os efeitos à saúde extrapolam a intoxicação aguda, manifestando-se por meio de alterações genotóxicas, endócrinas e neurológicas, frequentemente subnotificadas ou invisibilizadas nos sistemas de vigilância (Nogueira, Szwarcwald & Damacena, 2020; Carneiro *et al.*, 2015). Essa condição é agravada pela ampla distribuição espacial do uso de agrotóxicos, associada às regiões de agricultura intensiva, o que amplia o potencial de exposição para além dos trabalhadores diretamente envolvidos, atingindo comunidades e ecossistemas (Pignati *et al.*, 2017; Souza, Silva & Pinheiro, 2022).

Além disso, os estudos indicam que a exposição está profundamente imbricada em dinâmicas territoriais e ambientais, especialmente mediadas pela água e pelos sistemas ecológicos. A degradação de zonas ripárias e a intensificação do uso hídrico em sistemas irrigados reduzem a capacidade de contenção de contaminantes e favorecem sua dispersão em múltiplas escalas (Silva *et al.*, 2014; Alcoforado de Moraes *et al.*, 2018). Paralelamente, fatores sociais, como a baixa percepção de risco entre trabalhadores e a precarização das condições de trabalho, contribuem para a naturalização da exposição crônica e para a reprodução de desigualdades socioambientais (Silvério *et al.*, 2025; Gomes, 2019). Em conjunto, essas evidências reforçam a necessidade de abordagens

integradas, como o conceito de exposoma químico-hídrico, capazes de articular dimensões biológicas, ambientais e estruturais na compreensão dos riscos em territórios semiáridos.

### 3.1 Impactos bioquímicos e à saúde da exposição crônica a agrotóxicos

A literatura demonstra de forma consistente que a exposição a agrotóxicos em sistemas agrícolas ultrapassa amplamente os eventos de intoxicação aguda, configurando-se como um processo crônico e cumulativo, com consequências biológicas mensuráveis. Estudos conduzidos em contextos rurais brasileiros indicam associações entre exposição prolongada e danos genotóxicos, desregulação endócrina e alterações neurológicas, frequentemente em níveis subclínicos e subdiagnosticados (Nogueira, Szwarcwald & Damacena, 2020; Souza, Silva & Pinheiro, 2022).

Rigotto *et al.* (2020) relatam que trabalhadores agrícolas expostos a misturas de agrotóxicos apresentam dano ao DNA e estresse oxidativo, reforçando a hipótese de efeitos tóxicos cumulativos. De forma semelhante, Souza, Silva e Pinheiro (2022) identificam riscos aumentados associados à exposição crônica entre agricultores familiares, destacando que “o uso contínuo de agrotóxicos representa uma fonte persistente de risco tanto para a saúde humana quanto para o ambiente” (Souza, Silva & Pinheiro, 2022, p. 5). Esses achados dialogam com padrões nacionais mais amplos, nos quais a distribuição espacial do uso de agrotóxicos se correlaciona com regiões de produção agrícola intensiva e maior potencial de exposição (Pignati *et al.*, 2017).

O potencial de desregulação endócrina dos agroquímicos amplia ainda mais a complexidade do cenário de exposição, sobretudo em condições semiáridas, nas quais altas temperaturas podem intensificar processos como volatilização e absorção cutânea, potencializando os efeitos biológicos da exposição crônica (Nogueira, Szwarcwald & Damacena, 2020; Carneiro *et al.*, 2015; Milhorange *et al.*, 2020; Souza, Silva & Pinheiro, 2022). Conforme destacado pelo Dossiê ABRASCO, “os efeitos da exposição crônica são difusos, cumulativos e frequentemente invisíveis aos sistemas oficiais de vigilância” (Carneiro *et al.*, 2015, p. 45). Essa invisibilidade não se restringe a limitações técnicas, mas expressa lacunas estruturais nos mecanismos de monitoramento e notificação, que tendem a privilegiar eventos agudos em detrimento de desfechos de longo prazo.

Estudos sobre percepção de risco revelam uma dimensão adicional desse problema. No contexto de Petrolina–Juazeiro, Silvério *et al.* (2025) demonstram que trabalhadores frequentemente subestimam os riscos de longo prazo associados ao uso de agrotóxicos, apesar de reconhecerem perigos imediatos. Essa dissociação entre risco percebido e risco real é reforçada por assimetrias informacionais, pressões econômicas e pela naturalização da exposição no processo de trabalho. Londres (2011) já alertava que “o uso generalizado de agrotóxicos no Brasil é acompanhado por insuficiência de informação e fragilidade das medidas de proteção” (Londres, 2011, p. 32), contribuindo para a consolidação de um cenário em que a exposição se torna rotineira e socialmente tolerada.

Em conjunto, as evidências indicam que a exposição a agrotóxicos no semiárido não pode ser compreendida como um risco ocupacional isolado. Trata-se de uma condição sistêmica de exposição crônica, mediada por fatores ambientais, climáticos e sociais, marcada por um descompasso significativo entre impacto biológico e reconhecimento institucional.

### 3.2 Estrutura socioeconômica e vulnerabilidade do trabalho

A expansão do agronegócio irrigado no polo Petrolina–Juazeiro foi acompanhada por profundas transformações nas relações de trabalho, frequentemente caracterizadas por precarização e desigualdades estruturais. A literatura evidencia que essas dinâmicas afetam de forma desproporcional grupos vulneráveis, especialmente mulheres e agricultores familiares, que se situam nas margens das proteções formais e apresentam maior exposição a riscos ambientais (Oliveira, Castro & 2021; Guedes *et al.*, 2024).

Oliveira e Castro (2021) destacam que o trabalho na fruticultura irrigada é marcado pela informalidade, baixos salários e acesso limitado a medidas de proteção ocupacional. As mulheres ocupam posições particularmente vulneráveis, frequentemente acumulando atividades agrícolas e domésticas, o que intensifica sua exposição a estressores químicos e sociais. Essa condição reflete padrões mais amplos de desigualdade de gênero nos sistemas agroexportadores, nos quais o crescimento econômico não se traduz em equidade nas condições de trabalho.

Guedes *et al.* (2024) demonstram que as oportunidades econômicas geradas pela agricultura irrigada são distribuídas de forma desigual, sendo frequentemente limitadas por barreiras estruturais como acesso a crédito, terra e assistência técnica. Esses achados indicam que os benefícios do agronegócio são apropriados de maneira seletiva, reforçando hierarquias preexistentes em vez de promover desenvolvimento inclusivo.

Do ponto de vista territorial, Santos *et al.* (2019) evidenciam as lutas de comunidades tradicionais pela manutenção de seus territórios e modos de vida frente à expansão das fronteiras agrícolas. A pressão exercida por grandes projetos de irrigação contribui para processos de deslocamento, concentração fundiária e erosão de meios de subsistência locais. Essa dinâmica é consistente com a estrutura agrária dual descrita por Brandão *et al.* (2020), na qual o agronegócio irrigado coexiste com sistemas de subsistência marginalizados, configurando uma paisagem marcada por assimetria econômica e exposição diferenciada a riscos ambientais.

Esses resultados indicam que a exposição não é distribuída de forma homogênea na população. Ao contrário, ela é estruturada por posição socioeconômica, gênero e pertencimento territorial, reforçando o argumento de que os riscos à saúde no semiárido são socialmente produzidos e politicamente mediados.

### 3.3 Vias geoambientais de contaminação

A dimensão geoambiental da exposição a agrotóxicos no polo Petrolina–Juazeiro evidencia a existência de múltiplas vias de contaminação envolvendo solo, água e sistemas ecológicos. A agricultura irrigada intensifica a mobilização de insumos químicos, aumentando a probabilidade de escoamento superficial, lixiviação e acúmulo de resíduos em águas superficiais e subterrâneas (Pignati *et al.*, 2017; Nogueira, Szwarcwald & Damascena, 2020; Souza, Silva & Pinheiro, 2022). Esses processos ampliam o alcance espacial da contaminação, transformando práticas localizadas em riscos ambientais difusos, especialmente em contextos marcados por degradação ecológica e uso intensivo da água (França, 2006; Silva *et al.*, 2014; Alcoforado de Moraes *et al.*, 2018).

Silva *et al.* (2014) documentam alterações em ecossistemas ripários ao longo do rio São Francisco, indicando que mudanças no uso da terra associadas à agricultura contribuíram para a degradação da vegetação ciliar e das funções ecológicas. Essas transformações reduzem a capacidade desses sistemas de atuar como

barreiras naturais, facilitando a dispersão de resíduos de agroquímicos nos ambientes aquáticos.

A valorização econômica da água nos sistemas de irrigação intensifica esse quadro. Alcoforado de Moraes *et al.* (2018) demonstram que o uso da água na bacia do São Francisco é cada vez mais orientado por critérios de produtividade, frequentemente negligenciando externalidades ambientais. França (2006) já havia evidenciado que o valor econômico atribuído à água na agricultura irrigada não incorpora adequadamente os custos associados à contaminação e à degradação ambiental.

A noção de comércio de água virtual acrescenta uma dimensão adicional a essa análise. Nascimento; Becker (2009) argumentam que a exportação de produtos agrícolas envolve a transferência indireta de degradação ambiental, incluindo poluição e esgotamento hídrico. Nesse sentido, a contaminação não se limita ao plano local, mas integra um sistema mais amplo de trocas ecológicas associado aos mercados globais.

Esses achados indicam que as vias de contaminação são multiescalares e interconectadas. Solo, água e sistemas ecológicos atuam como vetores que amplificam e redistribuem a exposição, desafiando a ideia de que os riscos podem ser delimitados a locais ou populações específicas.

O Quadro 3 sintetiza os principais achados da revisão integrativa ao articular evidências nos três eixos analíticos adotados neste estudo: bioquímico-clínico, socioeconômico e geoambiental. Em vez de apresentar os resultados de forma isolada, a tabela integra tipos de exposição, desfechos à saúde, vias ambientais e determinantes sociais subjacentes em um quadro analítico unificado. Essa estrutura permite uma visualização multidimensional de como a exposição a agrotóxicos opera simultaneamente nos níveis biológico, ecológico e social. Ao organizar as evidências dessa maneira, a tabela favorece a identificação de padrões recorrentes e interações que não são imediatamente perceptíveis quando os estudos são analisados de forma fragmentada.

**Quadro 3.** Síntese integrada das evidências nos eixos bioquímico, socioeconômico e geoambiental

<b>Tipo de exposição</b>	<b>Desfechos à saúde</b>	<b>Vias ambientais</b>	<b>Determinantes sociais</b>
<b>Exposição crônica a agrotóxicos</b>	Genotoxicidade, desregulação endócrina, efeitos neurológicos	Absorção dérmica, inalação, contaminação alimentar	Exposição ocupacional, baixa percepção de risco, acesso limitado à proteção
<b>Exposição aguda e cumulativa</b>	Doenças crônicas subnotificadas, toxicidade subclínica	Manipulação direta, deriva de pulverização, volatilização em altas temperaturas	Informalidade, ausência de vigilância, fragilidade regulatória
<b>Contaminação mediada pela água</b>	Exposição indireta via consumo de água e irrigação	Escoamento superficial, lixiviação, contaminação de águas superficiais e subterrâneas	Comunidades rurais e ribeirinhas, dependência de fontes locais de água
<b>Contaminação do solo e ecossistemas</b>	Exposição prolongada via cadeias alimentares e degradação ecológica	Acúmulo no solo, perda da capacidade de amortecimento das matas ciliares	Marginalização territorial, proximidade de perímetros irrigados
<b>Reestruturação agrária</b>	Distribuição desigual da carga de exposição entre populações	Expansão de áreas irrigadas, intensificação do uso de insumos	Desigualdade de gênero, concentração fundiária, dualidade agrária

**Fonte:** Elaborado pelos autores.

A estrutura integrada do Quadro 3 evidencia que a exposição no polo Petrolina–Juazeiro não constitui um evento isolado, mas uma condição sistêmica, resultante da convergência de múltiplas vias e determinantes. A exposição crônica a agrotóxicos emerge como eixo central que conecta danos biológicos à dispersão ambiental e às condições de trabalho (Nogueira, Szwarcwald & Damacena, 2020; Souza, Silva & Pinheiro, 2022; Pignati *et al.*, 2017). Destaca-se, ainda, a dissociação entre os desfechos à saúde mensuráveis e seu reconhecimento nos sistemas institucionais, reforçando o problema da subnotificação evidenciado na literatura (Carneiro *et al.*, 2015; Silvério *et al.*, 2025).

A contaminação mediada pela água e o acúmulo no solo ampliam a escala espacial da exposição, demonstrando que os riscos não se restringem aos trabalhadores diretamente envolvidos na aplicação de agrotóxicos, mas atingem populações mais amplas por meio de processos ambientais difusos (Alcoforado de Moraes *et al.*, 2018; França, 2006; Nascimento & Becker, 2009). Paralelamente, determinantes sociais como precarização do trabalho, desigualdade de gênero e concentração fundiária estruturam a distribuição da exposição, indicando que a vulnerabilidade é socialmente produzida e territorialmente localizada (Oliveira & Castro, 2021; Guedes *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2019; Brandão *et al.*, 2020).

Essa síntese sustenta o argumento central do estudo de que a interação entre exposição química, sistemas hidrológicos e desigualdades socioeconômicas configura um regime complexo de exposição que não pode ser compreendido por categorias analíticas isoladas. Ao contrário, as evidências apontam para a emergência de um exposoma mediado por processos químicos e hídricos, inserido em um modelo de desenvolvimento territorialmente desigual (Gomes, 2019; Bombardi, 2017), fornecendo a base empírica para os avanços conceituais discutidos na seção seguinte.

### 3.4 Expansão do agronegócio e reestruturação territorial

A consolidação do polo Petrolina–Juazeiro como uma das principais regiões agroexportadoras está diretamente associada a processos de reestruturação territorial impulsionados pela infraestrutura de irrigação, por arranjos institucionais e pela integração aos mercados globais. Essa transformação não se restringe à dimensão econômica, envolvendo também a redefinição do uso da terra, das estruturas de governança e das relações sociais.

Baiardi e Ribeiro (2023) destacam que a gestão da agricultura irrigada na região é marcada por ganhos de eficiência que favorecem sistemas produtivos de grande escala. No entanto, esses ganhos são distribuídos de forma desigual e frequentemente ocorrem à custa do aumento da pressão ambiental e da intensificação das desigualdades sociais. Sobel (2011) evidencia que a governança da cadeia produtiva da fruticultura é moldada por dinâmicas de custos de transação que priorizam a coordenação entre grandes atores, reforçando barreiras de entrada para pequenos produtores.

A organização espacial da região reflete essas dinâmicas. Silva (2012) descreve um padrão de concentração econômica e especialização territorial, no qual os perímetros irrigados se configuram como polos de alta produtividade, cercados por áreas com acesso limitado a recursos e infraestrutura. Essa configuração reforça a estrutura agrária dual identificada por Brandão e Rist (2020), na qual o agronegócio irrigado coexiste com formas tradicionais de agricultura em condições de acentuada assimetria.

Sob uma perspectiva crítica, esses processos evidenciam que a reestruturação territorial não é neutra. Ela produz ativamente paisagens diferenciadas de exposição, nas quais determinados grupos populacionais se tornam sistematicamente mais vulneráveis aos riscos ambientais e à saúde. A expansão do agronegócio opera, assim, simultaneamente como motor de crescimento econômico e como mecanismo de redistribuição de riscos, contribuindo para a formação de desigualdades territorialmente enraizadas que sustentam o conceito de zonas de sacrifício desenvolvido neste estudo.

## 4 DISCUSSÃO

### 4.1 A emergência das “zonas de sacrifício” no semiárido

As evidências sintetizadas nesta revisão sustentam a interpretação do polo Petrolina–Juazeiro como uma emergente zona de sacrifício, na qual a produtividade econômica é mantida por meio da externalização sistemática de custos ambientais e à saúde. Esse processo não é incidental, mas estruturalmente inscrito no modelo agroexportador, que privilegia rendimento, padronização e competitividade global em detrimento da equidade territorial e da sustentabilidade de longo prazo. A expansão do agronegócio é acompanhada por “processos que geram adoecimento e degradação ambiental como resultados estruturais do desenvolvimento” (Gomes, 2019, p. 3), evidenciando que o dano não constitui um desvio, mas um elemento constitutivo do sistema.

A geografia do uso de agrotóxicos no Brasil reforça essa interpretação. Bombardi (2017) demonstra que regiões com elevada produtividade agrícola concentram os maiores volumes de consumo de agroquímicos, estabelecendo uma relação direta entre agricultura orientada à exportação e intensidade de exposição. Essa concentração espacial da toxicidade converge com os achados apresentados nos resultados, nos quais as vias de exposição extrapolam o ambiente ocupacional e se expandem para sistemas ecológicos e sociais mais amplos. Nesse sentido, o polo Petrolina–Juazeiro exemplifica uma configuração territorial na qual o sucesso econômico é inseparável da produção de vulnerabilidade.

O Dossiê ABRASCO reforça o caráter estrutural desse processo ao afirmar que “o uso de agrotóxicos no Brasil está intrinsecamente vinculado a um modelo de desenvolvimento que produz adoecimento e morte” (Carneiro *et al.*, 2015, p. 21). Tal constatação evidencia a necessidade de superar abordagens técnicas restritas à avaliação de risco, avançando para uma interpretação político-ecológica da exposição. O conceito de zonas de sacrifício, nesse contexto, constitui uma ferramenta analítica fundamental para compreender como determinados territórios e populações são sistematicamente tornados descartáveis no interior dos sistemas alimentares globais.

### 4.2 O exposoma químico-hídrico: um novo modelo conceitual

A formulação do exposoma químico-hídrico emerge do reconhecimento de que a exposição no semiárido é moldada pela interação entre agentes químicos, sistemas hidrológicos e estressores climáticos. Diferentemente de modelos tradicionais que isolam vias de exposição, esse referencial enfatiza sinergia, acúmulo e dependência contextual.

As condições climáticas desempenham papel central nessa dinâmica. Milhorange *et al.* (2020) demonstram que o semiárido brasileiro apresenta crescente variabilidade térmica e escassez hídrica, fatores que intensificam a

vulnerabilidade ambiental e dificultam estratégias adaptativas. Essas condições influenciam diretamente os padrões de exposição ao aumentar as taxas de volatilização dos agrotóxicos e alterar sua persistência no ambiente. Paralelamente, a centralidade econômica da água na agricultura irrigada amplifica a circulação de contaminantes. Alcoforado de Moraes *et al.* (2018) evidenciam que os sistemas de irrigação elevam significativamente a demanda e o valor econômico da água, sem incorporar adequadamente as externalidades associadas à contaminação.

Sob a perspectiva da saúde, Rigotto *et al.* (2020) demonstram que a exposição crônica não depende apenas da intensidade química, mas também de condições ambientais que favorecem absorção e bioacumulação. A convergência entre calor, transporte hídrico de contaminantes e uso intensivo de insumos configura um regime de exposição composto, que não pode ser reduzido a variáveis isoladas. O exposoma químico-hídrico representa, assim, um avanço conceitual ao integrar essas dimensões em um modelo analítico capaz de apreender a complexidade da exposição em territórios agroexportadores semiáridos.

### 4.3 Invisibilidade estatística e subnotificação de doenças crônicas

Um dos achados centrais desta revisão refere-se à persistente invisibilidade dos desfechos crônicos associados à exposição a agrotóxicos. Apesar das evidências acumuladas sobre seus efeitos biológicos, os sistemas oficiais de informação em saúde permanecem centrados na intoxicação aguda, resultando em subnotificação sistemática de agravos de longo prazo. Pignati *et al.* (2017) demonstram que o uso de agrotóxicos é amplo e concentrado em regiões de agricultura intensiva, sem que essa distribuição se reflita na visibilidade dos dados epidemiológicos.

Essa discrepância é agravada por fatores relacionados à percepção de risco. Silvério *et al.* (2025) mostram que populações expostas reconhecem riscos imediatos, mas frequentemente não associam sintomas crônicos à exposição, o que contribui para diagnósticos tardios e subnotificação. Como apontam os autores, “a percepção de risco não se traduz necessariamente em comportamento protetivo ou no reconhecimento de efeitos de longo prazo” (Silvério *et al.*, 2025, p. 9). Essa dissociação entre exposição, percepção e reconhecimento institucional evidencia uma falha estrutural nos sistemas de vigilância.

O problema, portanto, não é apenas técnico, mas epistemológico. Doenças crônicas associadas a exposições ambientais frequentemente carecem de atribuição causal clara nos modelos biomédicos tradicionais, o que leva à sua marginalização nas estatísticas oficiais. Essa invisibilidade contribui para a naturalização da exposição e obscurece a carga cumulativa de adoecimento nas populações afetadas, especialmente em contextos como o polo Petrolina–Juazeiro.

### 4.4 Necropolítica do agronegócio e sistemas alimentares globais

A distribuição desigual de riscos e benefícios identificada neste estudo pode ser interpretada à luz da necropolítica, na qual determinadas populações são sistematicamente expostas a condições que comprometem sua saúde e sua vida. No contexto do agronegócio global, essa dinâmica é mediada por cadeias produtivas que priorizam padrões estéticos e de qualidade exigidos pelos mercados internacionais, ao mesmo tempo em que externalizam custos ambientais e sanitários para as regiões produtoras.

Porto *et al.* (2019) afirmam que o modelo contemporâneo de desenvolvimento agrícola opera por meio da “produção de invisibilidade e desigualdade na distribuição dos riscos” (Gomes, 2019, p. 5). Essa leitura converge com os padrões identificados por Bombardi (2017), que demonstram que países do Sul Global frequentemente recebem agroquímicos proibidos ou restritos no Norte Global, reforçando assimetrias regulatórias.

Nesse contexto, o polo Petrolina–Juazeiro pode ser compreendido como um território em que padrões globais de consumo se articulam com realidades locais de exposição. A produção de frutas destinadas à exportação depende do uso intensivo de insumos químicos e de condições de trabalho que expõem trabalhadores e comunidades a riscos cumulativos. Enquanto os benefícios são amplamente externalizados, os custos permanecem territorialmente concentrados, reforçando a caracterização da região como zona de sacrifício.

#### 4.5 Amplificação climática da toxicidade em ambientes semiáridos

As condições climáticas do semiárido não apenas moldam as práticas agrícolas, mas também amplificam a toxicidade da exposição a agroquímicos. Altas temperaturas aumentam a volatilização dos agrotóxicos, elevando os riscos por inalação, enquanto períodos prolongados de seca intensificam a dependência da irrigação, facilitando o transporte de contaminantes pelos sistemas hídricos (Milhorance *et al.*, 2020).

Além disso, o estresse térmico contribui para o aumento da absorção cutânea. Em condições de calor intenso, a sudorese e o uso reduzido de equipamentos de proteção aumentam a permeabilidade da pele, elevando a exposição sistêmica. Souza, Silva e Pinheiro (2022) observam que “condições ambientais e ocupacionais interagem para intensificar a exposição e os riscos à saúde entre agricultores familiares” (Souza, Silva & Pinheiro, 2022, p. 6), evidenciando o papel do clima como co-determinante da toxicidade.

Esses achados indicam que a exposição no semiárido não pode ser compreendida sem considerar mecanismos de amplificação climática. A interação entre estressores ambientais e agentes químicos produz um contexto em que a toxicidade depende não apenas da dose, mas das condições ambientais, reforçando a necessidade de abordagens analíticas integradas como o exposoma químico-hídrico.

#### 4.6 Comparação global: polos agroexportadores em regiões semiáridas

Os padrões observados no polo Petrolina–Juazeiro dialogam com dinâmicas presentes em outras regiões semiáridas agroexportadoras, como o Vale Central da Califórnia e Almería, na Espanha. Essas regiões compartilham características estruturais, incluindo irrigação intensiva, alta dependência de agroquímicos e integração aos mercados globais. Em todos os casos, a produtividade econômica é sustentada pelo uso intensivo de recursos naturais e trabalho, frequentemente acompanhado por degradação ambiental e riscos à saúde.

Entretanto, o semiárido brasileiro apresenta camadas adicionais de vulnerabilidade, incluindo menor rigor regulatório, maior desigualdade socioeconômica e condições climáticas mais severas. Esses fatores contribuem para um regime de exposição mais intenso, no qual a interação entre determinantes ambientais, sociais e químicos se manifesta de forma particularmente aguda. A comparação reforça, portanto, que, embora o polo Petrolina–Juazeiro não seja um caso isolado, ele representa uma expressão intensificada de padrões globais mais amplos.

A Quadro 4 apresenta o modelo conceitual proposto neste estudo, sintetizando a interação entre vetores

estruturais, vias de exposição, desfechos à saúde e determinantes subjacentes que caracterizam o exposoma químico-hídrico no polo Petrolina–Juazeiro. A tabela traduz a contribuição teórica do artigo em um quadro operacional, permitindo visualizar como a expansão do agronegócio, os processos ambientais e as desigualdades sociais convergem para produzir regimes diferenciados de exposição. Em vez de isolar variáveis, o modelo enfatiza a interdependência, demonstrando que a exposição emerge da articulação entre dimensões econômicas, ecológicas e políticas.

**Quadro 4.** Modelo conceitual do exposoma químico-hídrico e da formação de zonas de sacrifício

Vetores estruturais	Vias de exposição	Desfechos à saúde	Determinantes estruturais
<b>Expansão do agronegócio exportador</b>	Exposição ocupacional direta (manuseio, pulverização, deriva)	Genotoxicidade, desregulação endócrina, alterações neurológicas	Precarização do trabalho, informalidade, acesso limitado a proteção
<b>Uso intensivo de agrotóxicos</b>	Absorção dérmica e inalação sob altas temperaturas	Toxicidade crônica, efeitos subclínicos, dano biológico cumulativo	Fragilidade regulatória, assimetria na fiscalização, fluxos globais de pesticidas
<b>Dependência da irrigação</b>	Exposição mediada pela água (escoamento, lixiviação, contaminação do lençol freático)	Exposição indireta via água potável e cadeias alimentares	Dependência hídrica, mercantilização da água, monitoramento insuficiente
<b>Condições climáticas do semiárido</b>	Volatilização, persistência ambiental, bioacumulação	Toxicidade ampliada, aumento da absorção sistêmica	Estresse térmico, escassez hídrica, variabilidade climática
<b>Reestruturação territorial</b>	Contaminação ambiental difusa (solo, degradação de matas ciliares)	Exposição populacional prolongada, carga de doenças crônicas	Concentração fundiária, dualidade agrária, marginalização de comunidades tradicionais
<b>Cadeias globais de commodities</b>	Exportação de degradação ambiental incorporada (“contaminação virtual”)	Carga epidemiológica invisível, doenças subnotificadas	Dinâmicas necropolíticas, distribuição desigual de riscos e benefícios

**Fonte:** Elaborado pelos autores.

O modelo evidencia que a exposição em sistemas agroexportadores semiáridos é estruturada por uma cadeia de processos interconectados, na qual vetores macroestruturais, como as cadeias globais de commodities e o desenvolvimento baseado na irrigação, se traduzem em efeitos biológicos em nível micro por meio de múltiplas vias ambientais (Gomes, 2019; Bombardi, 2017; Baiardi & Ribeiro, 2023). Destaca-se que nenhuma via de exposição atua isoladamente. A exposição ocupacional, a contaminação hídrica e a amplificação climática operam de forma simultânea, produzindo efeitos cumulativos e sinérgicos que intensificam os riscos à saúde (Alcoforado de Moraes *et al.*, 2018; Nogueira, Szwarcwald & Damacena, 2020; Souza, Silva & Pinheiro, 2022).

Paralelamente, determinantes estruturais como precarização do trabalho, assimetrias regulatórias e concentração fundiária definem quem está exposto e em que intensidade. Isso reforça o argumento de que a vulnerabilidade não é aleatória, mas socialmente produzida e territorialmente enraizada (Brandão & Rist, 2020; Oliveira & Castro, 2021; Guedes *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2019). A inclusão das cadeias globais de commodities

como vetor estrutural evidencia a dimensão transnacional da exposição, indicando que impactos locais à saúde estão diretamente relacionados a padrões globais de consumo e desigualdades regulatórias (Nascimento & Becker, 2009; Sobel, 2011).

Ao integrar esses elementos, o modelo oferece uma base conceitual robusta para compreender a emergência de zonas de sacrifício no semiárido. Ele demonstra que o exposoma químico-hídrico não constitui apenas uma condição ambiental, mas a expressão de um modelo de desenvolvimento que sistematicamente externaliza riscos, normaliza a exposição crônica e obscurece suas consequências epidemiológicas (Silva, 2012; Carneiro *et al.*, 2015; Pignati *et al.*, 2017).

De forma geral, a discussão evidencia que os impactos à saúde e ao ambiente observados no polo Petrolina–Juazeiro não são fenômenos isolados ou acidentais, mas resultados de um modelo de desenvolvimento que integra crescimento econômico à produção de exposição, vulnerabilidade e invisibilidade, exigindo uma revisão crítica dos pressupostos que sustentam a expansão agroexportadora em regiões semiáridas.

Em síntese, os achados deste estudo demonstram que as cargas de adoecimento e degradação ambiental no polo Petrolina–Juazeiro são estruturalmente produzidas por um modelo de desenvolvimento agroexportador irrigado que reorganiza o território, redistribui riscos e naturaliza a exposição crônica. A articulação entre contaminação química, dinâmica hídrica, estresse climático e desigualdade social revela um regime de exposição complexo e persistente, que escapa aos marcos analíticos e regulatórios convencionais. Ao avançar os conceitos de exposoma químico-hídrico e zonas de sacrifício, esta discussão desafia interpretações reducionistas da modernização agrícola e aponta para a necessidade de uma reorientação crítica da pesquisa e das políticas públicas, ancorada em abordagens integradas, territoriais e orientadas à justiça socioambiental.

## 5 CONCLUSÃO

Este estudo demonstra que o polo Petrolina–Juazeiro materializa um modelo paradoxal de desenvolvimento, no qual o dinamismo econômico é sustentado pela intensificação da degradação ambiental e pela expansão silenciosa de riscos crônicos à saúde. A síntese das evidências revela que a exposição a agrotóxicos no semiárido não pode ser reduzida a eventos isolados, devendo ser compreendida como um processo sistêmico e cumulativo, moldado pela interação entre uso de insumos químicos, dinâmica hídrica, estresse climático e vulnerabilidade socialmente estruturada.

Ao introduzir o conceito de exposoma químico-hídrico, este trabalho propõe um referencial teórico capaz de integrar essas dimensões em um modelo analítico coerente. Simultaneamente, a noção de zonas de sacrifício oferece uma lente crítica para compreender como territórios e populações passam a suportar, de forma desproporcional, as externalidades dos sistemas agroexportadores. Em conjunto, essas contribuições reposicionam o semiárido não como um caso marginal, mas como um espaço estratégico para a compreensão das interseções entre ambiente, saúde e desenvolvimento no mundo contemporâneo.

Do ponto de vista das políticas públicas, os achados apontam para a necessidade de reconfiguração dos marcos regulatórios, dos sistemas de vigilância e dos mecanismos de governança ambiental, com ênfase no enfrentamento das exposições cumulativas e das vias difusas de contaminação. O fortalecimento da proteção

ocupacional, o aprimoramento do monitoramento da qualidade da água e a incorporação de desfechos crônicos nas estratégias de saúde pública constituem medidas essenciais para a redução da vulnerabilidade sistêmica.

Pesquisas futuras devem aprofundar a investigação empírica das interações do exposoma em contextos semiáridos, expandir abordagens de biomonitoramento e desenvolver análises comparativas com outras regiões agroexportadoras globais. De forma mais ampla, o avanço de agendas interdisciplinares orientadas pela justiça socioambiental será fundamental para enfrentar as condições estruturais que sustentam a exposição desigual e para conceber trajetórias de desenvolvimento que não dependam da produção de invisibilidade e dano.

Nesse sentido, o semiárido não deve ser compreendido apenas como um espaço de escassez, mas como um território onde os limites do desenvolvimento contemporâneo se tornam visíveis e materialmente expressos. Reconhecer e enfrentar o exposoma químico-hídrico como uma condição estrutural, e não como uma externalidade, constitui um passo fundamental para a reimaginação de sistemas agrícolas que não se apoiem na produção de invisibilidade, desigualdade e adoecimento.

### Conflitos de interesses

Nós, autores do manuscrito acima mencionado, declaramos que não existem conflitos de interesse relacionados à pesquisa, à autoria ou à publicação deste artigo. Afirmamos que o conteúdo deste artigo foi desenvolvido de forma independente e objetiva, sem influência externa, garantindo a integridade acadêmica e a transparência em todas as etapas do processo de pesquisa.

### Contribuições dos autores

Todos os autores contribuíram de forma conjunta e equilibrada para a concepção, desenvolvimento e finalização do manuscrito. Especificamente, participaram ativamente da formulação do problema de pesquisa, da definição dos procedimentos metodológicos, da coleta e análise dos dados, bem como da redação, revisão crítica e aprovação da versão final do artigo. Dessa forma, todos são igualmente responsáveis pelo conteúdo científico apresentado.

### REFERÊNCIAS

- Alcoforado de Moraes, M. M. G., Biewald, A., Carneiro, A. C. G., et al. (2018). The impact of global change on economic values of water for public irrigation schemes at the São Francisco River Basin in Brazil. *Regional Environmental Change*, 18, 1943–1955. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1291-0>
- Baiardi, A., & Ribeiro, M. C. M. (2023). Agricultura familiar e sustentabilidade no semiárido brasileiro: Desafios e perspectivas. *Colóquio – Revista do Desenvolvimento Regional*, 20(2), 141–158. <https://doi.org/10.26767/coloquio.v20i3,%20jul./set..2788>.
- Barros, M. de L. (2010). *O processo de compressão-expansão do tempo-espaço no pólo xérico de fruticultura irrigada Petrolina-Juaqueiro* (Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco). [https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/6148/1/arquivo495\\_1.pdf](https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/6148/1/arquivo495_1.pdf)

- Bombardi, L. M. (2017). *Geografia do uso de agrotóxicos no Brasil e conexões com a União Europeia*. Universidade de São Paulo. <https://www.livrosabertos.sibi.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/view/143/121/593>
- Brandão, E. A. F., & Rist, S. (2020). The agrarian space of the Brazilian semi-arid region: The dichotomies between the space of irrigated agriculture and the space of traditional agriculture. *Regional Statistics*, 122(3), 140–152. <https://studies.hu/the-agrarian-space-of-the-brazilian-semi-arid-region-the-dichotomies-between-the-space-of-irrigated-agriculture-and-the-space-of-traditional-agriculture/>
- Brandão EAF, Santos TR and Rist S (2020) Family Farmers' Perceptions of the Impact of Public Policies on the Food System: Findings From Brazil's Semi-Arid Region. *Front. Sustain. Food Syst.* 4:556732. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.556732>
- Carneiro, F. F., et al. (Eds.). (2015). *Dossiê ABRASCO: Um alerta sobre os impactos dos agrotóxicos na saúde*. Fiocruz. <https://www.arca.fiocruz.br/handle/icict/26221>
- França, C. N. (2006). *Valor da produção e uso de água: Uma análise para o polo irrigado Petrolina-Juaqueiro* (Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco). <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/4511>
- Garcia, L. G., & Wanderley, M. M. (2023). The case of the transposition of the São Francisco River, or the environmental practices and indigenist policy of leftist governments in Brazil. *South Florida Journal of Development*, 4(4), 1758–1772. <https://doi.org/10.46932/sfjdv4n4-025>
- Gomes, C. S. (2019). Impactos da expansão do agronegócio brasileiro na conservação dos recursos naturais. *Cadernos do Leste*, 19(19), 63–78. <https://doi.org/10.29327/248949.19.19-4>
- Guedes, A. M. A., Lins Neto, E. M. de F., & de Melo, R. B. (2023). Entrepreneurial Possibilities for Women Residing in the Senador Nilo Coelho Irrigation Project. *Revista De Gestão Social E Ambiental - RGS/A*, 18(3), e04547. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n3-016>
- Londres, F. (2011). *Agrotóxicos no Brasil: Um guia para ação em defesa da vida*. AS-PTA. <https://aspta.org.br/wp-content/uploads/2011/09/Agrotoxicos-no-Brasil-mobile.pdf>
- Mendes, K. D. S., Silveira, R. C. de C. P., & Galvão, C. M. (2008). Revisão integrativa: Método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem. *Texto & Contexto - Enfermagem*, 17(4), 758–764. <https://doi.org/10.1590/S0104-07072008000400018>
- Milhorance, C., Sabourin, E., Le Coq, J.-F., & Mendes, P. (2020). Unpacking the policy mix of adaptation to climate change in Brazil's semiarid region: Enabling instruments and coordination mechanisms. *Climate Policy*, 20(5), 593–608. <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1753640>
- Nascimento, L. N., & Becker, M. L. (2009). The Implications of the “Virtual Water Trade” and Virtual Environmental Degradation Trade for the São Francisco River Basin in Brazil. *Revista Ciências Administrativas*, 14(2). <https://doi.org/10.5020/2318-0722.14.2.%p>
- Nogueira, F. de A. M., Szwarcwald, C. L., & Damacena, G. N.. (2020). Exposição a agrotóxicos e agravos à saúde em trabalhadores agrícolas: o que revela a literatura?. *Revista Brasileira De Saúde Ocupacional*, 45, e36. <https://doi.org/10.1590/2317-6369000041118>
- Oliveira, A. P. B., & Castro, G. G. P. (2021). The precariousness of women's work in the Petrolina/Juaqueiro pole, located in the northeastern semiarid and the need for public policies as a way to mitigate inequalities. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 8(3), 83–91. <https://doi.org/10.22161/ijaers.83.9>
- Pignati, W. A., Lima, F. A. N. de S. e ., Lara, S. S. de ., Correa, M. L. M., Barbosa, J. R., Leão, L. H. da C., & Pignatti, M. G.. (2017). Distribuição espacial do uso de agrotóxicos no Brasil: uma ferramenta para a Vigilância em Saúde. *Ciência & Saúde Coletiva*, 22(10), 3281–3293. <https://doi.org/10.1590/1413-812320172210.17742017>

- Santos, R. R. O., Padilha Neto, A. S., Gondim, J. P., Santos, J. M., & Conti, I. L. (2019). *The struggles of traditional communities in land and territory in the Brazilian semi-arid*. International Journal of Advanced Engineering Research and Science, 6(5), 87–94. <https://doi.org/10.22161/ijaers.6.5.13>
- Silva, J. A. de S. (2012). *Espacialidade e dinâmica socioeconômica do polo Petrolina-Juaqueiro* (Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco). [https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/6148/1/arquivo495\\_1.pdf](https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/6148/1/arquivo495_1.pdf)
- Silva, T. C., et al. (2014). *Local representations of change and conservation of riparian forests along the São Francisco River*. Forest Policy and Economics, 38, 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2013.11.007>
- Silverio, A. M., Cunha, M. C. C., Andrade, W. M., et al. (2025). *The use of pesticides and health risk assessment of riparian farmers in Northeastern Brazil: An artificial intelligence-based analysis*. Human Ecology, 53, 113–126. <https://doi.org/10.1007/s10745-025-00588-8>
- Sobel, T. F. (2011). *Fruticultura e economia dos custos de transação: Determinantes das estruturas de governança no polo Petrolina-Juaqueiro* (Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco). [https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/3688/1/arquivo2850\\_1.pdf](https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/3688/1/arquivo2850_1.pdf)
- Souza, I. V. de, Silva, T. A. e, & Pinheiro, F. (2022). Risks to the environment and to the health of family farmers through the inappropriate use of pesticides: the case of the Union of Associations of the Salitre Valley, Juazeiro/BA, Brazil. *Revista Brasileira De Ciências Ambientais*, 57(4), 654–664. <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781469>
- Souza, M. T. de, Silva, M. D. da, & Carvalho, R. de. (2010). Revisão integrativa: O que é e como fazer. *Einstein (São Paulo)*, 8(1), 102–106. <https://doi.org/10.1590/s1679-45082010rw1134>
- Torraco, R. J. (2005). Writing Integrative Literature Reviews: Guidelines and Examples. *Human Resource Development Review*, 4(3), 356–367. <https://doi.org/10.1177/1534484305278283>