

**Descarbonização e Transição de Sistemas Produtivos na Agricultura Contemporânea:
Uma Revisão Sistemática da inovação, sustentabilidade e desafios institucionais**

***Decarbonization and Transition of Production Systems in Contemporary Agriculture: A
Systematic Review of Innovation, Sustainability, and Institutional Challenges***

Heris Coutinho Vieira

Universidade de Brasília. Brasília, Distrito Federal (DF), Brasil

GT 12 – Impactos Socioambientais das Novas Tecnologias no Agronegócio

Resumo: Este artigo analisa como a literatura científica tem abordado a descarbonização e a transição dos sistemas produtivos na agricultura contemporânea. O estudo baseia-se em revisão de literatura de natureza qualitativa e analítica, apoiada em buscas bibliográficas realizadas nas bases Scopus e Web of Science. O recorte temporal compreende o período de 2015 a 2025, com foco em artigos publicados em periódicos revisados por pares, nos idiomas português, inglês e espanhol. Após a identificação e exclusão de duplicatas, o corpus final foi composto por 16 estudos únicos, analisados segundo sua aderência temática e sua contribuição para o problema de pesquisa. Os resultados indicam que a transição para sistemas produtivos de baixo carbono na agricultura vem sendo interpretada, de forma crescente, como processo multidimensional, que envolve não apenas mudança técnica, mas também coordenação institucional, dinâmica do uso da terra, inovação, política pública e capacidades diferenciadas de adoção. Os estudos analisados mostram que a descarbonização agrícola não pode ser reduzida à incorporação isolada de práticas mitigadoras, uma vez que sua efetivação depende de estabilidade regulatória, incentivos econômicos, mediações sociais e governança setorial. A literatura também evidencia que essa transição é atravessada por tensões, trade-offs e trajetórias desiguais entre contextos e arranjos produtivos. Conclui-se que a agricultura de baixo carbono deve ser compreendida menos como um conjunto de soluções ambientais pontuais e mais como processo de reorganização produtiva inscrito em transformações estruturais, tecnológicas e institucionais. Nesse sentido, o artigo contribui para fortalecer uma perspectiva analítica que articula agricultura, mudança climática e transições sociotécnicas.

Palavras-chave: Descarbonização; Agricultura; Sistemas produtivos; Transição de baixo carbono; Sustentabilidade.

Abstract: This article examines how the scientific literature has addressed decarbonization and the transition of productive systems in contemporary agriculture. The study is based on a qualitative and analytical literature review, supported by bibliographic searches conducted in the Scopus and Web of Science databases. The time frame considered spans from 2015 to 2025, focusing on peer-reviewed articles in Portuguese, English, and Spanish. After the identification and exclusion of duplicates, the final corpus comprised 16 unique studies, which were analyzed according to their thematic adherence and analytical contribution to the research problem. The results indicate that the transition to low-carbon productive systems in agriculture has been increasingly interpreted as a multidimensional process, involving not only technical change, but also institutional coordination, land-use dynamics, innovation, public policy, and differentiated capacities for adoption. The reviewed studies suggest that agricultural decarbonization cannot be reduced to the isolated incorporation of mitigating practices, since its implementation depends on regulatory stability, economic incentives, social mediation, and sectoral governance. The literature also reveals that this transition is marked by internal tensions, trade-offs, and uneven trajectories across contexts and productive arrangements. It is concluded that low-carbon agriculture should be understood less as a set of punctual environmental solutions and more as a broader process of productive reorganization, embedded in structural, technological, and institutional transformations. In this sense, the article contributes to strengthening an analytical perspective that connects agriculture, climate change, and socio-technical transitions

Keywords: Decarbonization; Agriculture; Productive systems; Low-carbon transition; Sustainability.

1. Introdução

Nas últimas décadas, a agricultura passou a ocupar lugar central no debate sobre mudança climática, sustentabilidade e reorganização dos sistemas produtivos. Essa centralidade decorre de um duplo movimento. De um lado, o setor agropecuário continua sendo estratégico para a segurança alimentar, a geração de renda e a estabilidade econômica de diferentes territórios rurais. De outro, sua dinâmica produtiva permanece associada a emissões de gases de efeito estufa, pressão sobre recursos naturais, mudanças no uso da terra e aprofundamento de desequilíbrios ambientais. Nesse contexto, a descarbonização deixou de ser tratada apenas como agenda ambiental setorial e passou a ser formulada como problema mais amplo de transformação produtiva, tecnológica e institucional, especialmente no âmbito dos sistemas agroalimentares contemporâneos (Norse, 2012; Geels et al., 2017).

A noção de transição para sistemas produtivos de baixo carbono, nesse debate, não se limita à adoção pontual de práticas menos emissoras ou à incorporação de tecnologias mais eficientes. Em sentido mais amplo, trata-se de um processo de reorganização das bases materiais, técnicas e institucionais da produção, no qual se redefinem critérios de eficiência, formas de uso dos recursos, mecanismos de coordenação e expectativas normativas sobre o futuro da agricultura. É por essa razão que a literatura internacional sobre transições sociotécnicas oferece contribuição analítica particularmente fecunda. Para Geels et al. (2017), transições de baixo carbono resultam da interação entre inovações emergentes, regimes estabelecidos e pressões estruturais mais amplas; não se trata, portanto, de mudança linear, mas de processo marcado por coevolução entre tecnologia, mercado, instituições, política e cultura. Em formulação posterior, Geels (2019) reforça que as transições para a sustentabilidade exigem leitura sistêmica e multiescalar, sobretudo quando envolvem setores fortemente enraizados em infraestruturas, rotinas produtivas e interesses organizados.

Quando essa discussão é deslocada para a agricultura, surgem camadas adicionais de complexidade. Diferentemente de outros setores frequentemente estudados pela literatura de transições, a agricultura combina forte dependência territorial, heterogeneidade de produtores, variabilidade ecológica e presença simultânea de objetivos produtivos, sociais e ambientais. Vermunt et al. (2020) argumentam, nesse sentido, que as transições no setor agroalimentar possuem características próprias, entre elas o enraizamento local das práticas produtivas e o fato de que muitos de seus resultados ambientais assumem a forma de bens públicos, como biodiversidade, qualidade do solo e serviços ecossistêmicos. Isso significa que a transição de

baixo carbono na agricultura não pode ser compreendida apenas como modernização tecnológica, pois envolve também dilemas de coordenação, governança e distribuição desigual de custos e benefícios. Em direção semelhante, El Bilali (2019) sustenta que as transições sustentáveis nos sistemas agroalimentares exigem mudanças profundas nas formas de produzir, circular e regular os alimentos, o que desloca o foco da inovação isolada para a transformação do próprio regime produtivo.

Essa perspectiva permite compreender com maior densidade a agenda da descarbonização agrícola. Norse (2012) já observava que a agricultura de baixo carbono não deve ser definida apenas pela redução do uso de combustíveis fósseis ou das emissões diretas, mas por uma combinação entre menor intensidade de carbono, maior eficiência no uso de insumos e construção de trajetórias produtivas compatíveis com objetivos ambientais de longo prazo. Mais recentemente, estudos internacionais têm mostrado que essa transição depende de mudanças combinadas em manejo do solo, fertilização, uso da terra, padrões de consumo, financiamento e instrumentos de política pública. Borychowski, Grzelak e Popławski (2022), ao analisarem a experiência polonesa, identificam que a agricultura de baixo carbono está associada à eficiência energética, ao uso mais racional de fertilizantes e à incorporação de inovações qualitativas. Já Lehtonen e Ramo (2023), no caso finlandês, demonstram que trajetórias de descarbonização agrícola exigem rearranjos moderados, porém consistentes, no uso da terra e nos sistemas alimentares, sem que isso implique abandono automático da produtividade.

No entanto, apesar do avanço dessa agenda, ainda persiste uma assimetria importante na literatura. Há crescimento expressivo de trabalhos sobre agricultura sustentável, agricultura de precisão, climate-smart agriculture e inovação verde, mas permanecem menos frequentes as análises que tratam a descarbonização como transição dos sistemas produtivos agrícolas em sentido amplo, articulando mudança tecnológica, reconfiguração institucional e condicionantes econômicos. Em muitos estudos, a ênfase recai sobre práticas específicas, métricas de mitigação ou soluções tecnológicas particulares; em outros, privilegia-se a escala micro do estabelecimento rural, sem maior problematização dos regimes produtivos, das estruturas de financiamento e das assimetrias de adoção. Essa lacuna se torna ainda mais evidente quando se observa que a própria literatura recente sobre transições em sistemas agroalimentares insiste na necessidade de integrar dimensões biofísicas, institucionais e sociotécnicas para compreender mudanças de maior fôlego no setor (Vermunt et al., 2020; Alonso-Adame et al., 2024).

No caso da agricultura contemporânea, essa lacuna analítica é particularmente relevante porque a transição para sistemas produtivos de baixo carbono não ocorre em terreno homogêneo. Sua viabilidade depende de capacidades muito desiguais de investimento, acesso à inovação, infraestrutura, assistência técnica e inserção em mercados regulados por exigências ambientais. Em consequência, a descarbonização não pode ser presumida como trajetória automática nem universalmente acessível. Ao contrário, ela deve ser analisada como processo em disputa, no qual convivem oportunidades reais de mitigação e adaptação com bloqueios institucionais, econômicos e territoriais que limitam sua difusão.

É dessa lacuna que deriva a pergunta central deste estudo: como a literatura científica tem interpretado a descarbonização e a transição dos sistemas produtivos na agricultura contemporânea, e quais são os principais desafios tecnológicos, institucionais e econômicos envolvidos nesse processo?

A partir dessa questão, o objetivo geral do artigo é analisar como a literatura científica aborda a descarbonização e a transição dos sistemas produtivos na agricultura contemporânea, com ênfase nas transformações tecnológicas, institucionais e econômicas associadas a esse processo. De modo específico, busca-se identificar os sentidos predominantes atribuídos à descarbonização agrícola, examinar os fatores que impulsionam ou limitam a transição de baixo carbono e discutir em que medida essa agenda reconfigura os parâmetros de modernização e sustentabilidade no setor.

A justificativa do estudo assenta-se em três razões principais. A primeira é de ordem empírica: a agricultura tornou-se componente incontornável da agenda climática global, não apenas por sua contribuição para as emissões, mas também por seu potencial de mitigação e adaptação. A segunda é de natureza analítica: compreender a descarbonização como transição de sistemas produtivos permite superar leituras excessivamente tecnicistas e incorporar o papel das instituições, da governança e das desigualdades estruturais. A terceira é de caráter político e estratégico: em um contexto de crescente pressão regulatória, reorganização de cadeias globais e ampliação das exigências ambientais sobre o setor agropecuário, torna-se necessário compreender de que modo a literatura vem interpretando os caminhos, os limites e as contradições dessa transição. Assim, mais do que examinar um repertório de técnicas mitigadoras, este artigo propõe discutir a descarbonização como expressão de uma mudança mais ampla no modo de organizar a produção agrícola contemporânea.

2. Revisão da Literatura

A literatura sobre descarbonização na agricultura vem se consolidando na interface entre estudos de sustentabilidade, economia ambiental, sociologia das transições e políticas públicas. Em termos gerais, esse campo parte do reconhecimento de que os sistemas produtivos agrícolas ocupam posição ambígua na crise climática contemporânea: ao mesmo tempo em que são afetados por eventos extremos, alterações no regime hídrico e instabilidade ecológica, também participam da geração de emissões e da pressão sobre terra, água e energia. Nessa perspectiva, a agricultura passa a ser observada não apenas como setor produtivo, mas como espaço estratégico de reorganização das relações entre produção, ambiente e governança. A formulação de uma agricultura de baixo carbono emerge justamente desse deslocamento, ao propor que a mitigação de emissões seja incorporada à lógica de funcionamento dos sistemas produtivos, e não tratada como mera externalidade corretiva (Norse, 2012).

Sob esse prisma, o debate adquire maior densidade quando aproximado da literatura sobre transições sociotécnicas. Em vez de compreender a mudança produtiva como simples difusão linear de inovação, essa abordagem enfatiza a interação entre tecnologias, instituições, infraestruturas, mercados, normas e disputas sociais. Geels et al. (2017) mostram que as transições de baixo carbono resultam do alinhamento entre inovações emergentes, regimes estabelecidos e pressões estruturais mais amplas, segundo uma lógica multinível. Esse ponto é relevante porque impede leituras excessivamente tecnicistas da descarbonização: a adoção de práticas ou equipamentos menos intensivos em carbono não altera, por si só, a lógica do sistema produtivo, caso os regimes institucionais, financeiros e organizacionais permaneçam inalterados. Desse modo, a literatura de transições oferece uma chave analítica fértil para pensar a agricultura contemporânea, sobretudo quando se busca compreender por que certas inovações permanecem marginais, enquanto outras se consolidam como padrão setorial (Geels et al., 2017; Geels, 2019).

Além disso, quando essa discussão é transportada para o setor agroalimentar, a complexidade aumenta. Vermunt et al. (2020) argumentam que as transições no agro possuem características específicas que as distinguem de setores mais frequentemente estudados, como energia ou mobilidade. Entre essas especificidades, os autores destacam o enraizamento territorial da produção e o fato de muitos resultados ambientais assumirem a forma de bens públicos, como biodiversidade, qualidade do solo e estabilidade ecológica. Isso significa que a mudança no agro não depende apenas de eficiência privada ou de competitividade mercantil, mas também de mecanismos coletivos de coordenação e de reconhecimento político de

benefícios ambientais difusos. Em consequência, a transição para sistemas produtivos de baixo carbono na agricultura não pode ser reduzida à adoção de tecnologias “verdes”, pois envolve transformações mais amplas nas relações entre produtores, cadeias, políticas e ecossistemas (Vermunt et al., 2020).

Nessa mesma direção, El Bilali (2019) observa que o campo das transições sustentáveis em sistemas agroalimentares ainda é relativamente jovem, mas já evidencia a necessidade de tratar a mudança como processo estrutural, e não apenas como soma de iniciativas isoladas. Seu levantamento mostra que grande parte da literatura se concentra em nichos de inovação, estudos localizados e agendas temáticas fragmentadas, enquanto permanece menos desenvolvida a articulação entre transformação dos regimes produtivos, segurança alimentar, sustentabilidade e governança. Esse diagnóstico é particularmente útil para o presente estudo, porque reforça a percepção de que a descarbonização da agricultura ainda é frequentemente analisada por meio de práticas específicas ou agendas setoriais dispersas, sem que se consolide, com a mesma força, uma leitura integrada da transição dos sistemas produtivos (El Bilali, 2019).

A partir desse quadro, a literatura passa a distinguir duas camadas analíticas da descarbonização agrícola. A primeira refere-se ao plano técnico-produtivo, envolvendo práticas e estratégias como melhor manejo do solo, maior eficiência energética, uso mais racional de fertilizantes, integração de sistemas, recuperação de pastagens, manejo florestal e reorganização do uso da terra. A segunda diz respeito ao plano institucional e político, que envolve crédito, regulação, assistência técnica, difusão do conhecimento, incentivos econômicos e construção de capacidades de adoção. A importância dessa distinção está em evitar o reducionismo tecnológico. Em outros termos, não basta identificar práticas potencialmente mitigadoras; é preciso compreender sob quais condições elas se difundem, quem consegue adotá-las, quais custos de entrada estão implicados e como essas práticas se articulam com os regimes produtivos já consolidados (Norse, 2012; Geels et al., 2017).

No plano empírico, os estudos internacionais reforçam essa leitura. Borychowski, Grzelak e Popławski (2022), ao examinarem propriedades rurais da região de Wielkopolska, na Polônia, identificam que a agricultura de baixo carbono está associada à eficiência energética, ao uso mais racional de fertilizantes e à incorporação de inovações qualitativas no manejo produtivo. A contribuição do estudo está em mostrar que a descarbonização não opera como categoria abstrata, mas como combinação concreta entre eficiência operacional e reorganização do uso de insumos. De modo semelhante, Lehtonen e Rämö (2023), no caso finlandês, demonstram que o desenvolvimento de uma agricultura de baixo carbono é viável com

mudanças moderadas, porém consistentes, no uso da terra e nas dietas, o que sugere que a transição agrícola não depende apenas da unidade produtiva isolada, mas de arranjos mais amplos nos sistemas alimentares e nas formas de coordenação da produção (Borychowski; Grzelak; Popławski, 2022; Lehtonen; Rämö, 2023).

Entretanto, esses trabalhos também ajudam a relativizar uma leitura linear da relação entre descarbonização e produtividade. Em parte da literatura aplicada, permanece a tendência de apresentar a transição de baixo carbono como trajetória mutuamente benéfica em todos os contextos, como se ganhos ambientais e ganhos produtivos convergissem de modo automático. A produção mais analítica, contudo, sugere cautela. A incorporação de práticas menos intensivas em carbono pode depender de investimentos iniciais elevados, novas capacidades técnicas, reorganização do uso da terra e adequações institucionais nem sempre disponíveis aos diferentes perfis de produtores. Por isso, a transição deve ser lida também como processo de redistribuição de oportunidades e de riscos, o que remete a uma questão recorrente na literatura de transições: mudanças sociotécnicas raramente são neutras do ponto de vista social e econômico (Geels, 2019; Vermunt et al., 2020).

Quando essa reflexão é trazida para o contexto brasileiro, a discussão adquire contornos ainda mais nítidos. Viola e Mendes (2022) inserem o agronegócio nacional no debate sobre transições sociotécnicas de baixo carbono, argumentando que a relação entre agricultura 4.0 e mudança climática não pode ser analisada fora das diferenças estruturais entre segmentos do campo. Os autores mostram que a incorporação de novas tecnologias e de estratégias ambientais não se distribui de forma homogênea entre agricultura familiar, agronegócio conservador e segmentos mais orientados à sustentabilidade. A relevância desse argumento está em demonstrar que a descarbonização agrícola, no Brasil, precisa ser lida também como problema de assimetria estrutural, e não apenas como difusão de inovação (Viola; Mendes, 2022).

Além disso, essa interpretação dialoga com análises sobre políticas públicas voltadas à agropecuária de baixa emissão de carbono. A institucionalização do Plano ABC e, posteriormente, do ABC+, representa tentativa importante de articular mitigação, produtividade e sustentabilidade por meio de instrumentos públicos de financiamento e indução tecnológica. Ainda assim, a literatura aponta que o acesso a tais instrumentos tende a reproduzir desigualdades regionais e diferentes capacidades de absorção. Gianetti e Ferreira Filho (2021) mostram que a alocação dos recursos do Programa ABC apresentou concentração regional, o que relativiza a ideia de que a política, por si só, seja suficiente para induzir mudança estrutural ampla e homogênea no território. Desse modo, a agenda de baixo carbono, embora relevante,

não garante automaticamente uma transição equilibrada dos sistemas produtivos, pois seu alcance depende da forma como crédito, assistência técnica, infraestrutura e coordenação institucional se distribuem entre regiões e perfis produtivos (Gianetti; Ferreira Filho, 2021).

Por fim, diante desse panorama, a principal lacuna identificada na literatura não é a ausência de estudos sobre sustentabilidade agrícola ou mitigação climática, mas a insuficiência de análises que tratem a descarbonização como transição dos sistemas produtivos agrícolas em sentido forte. Há muitos trabalhos sobre práticas específicas, instrumentos de política e soluções tecnológicas, mas ainda são menos frequentes as abordagens que integrem, em um mesmo quadro analítico, mudança técnica, rearranjo institucional, estrutura produtiva e desigualdade de capacidades de adoção. É justamente essa lacuna que orienta este artigo. Ao adotar a noção de transição dos sistemas produtivos, busca-se ir além da enumeração de estratégias mitigadoras e examinar a descarbonização como processo de reorganização econômica, tecnológica e institucional da agricultura contemporânea (El Bilali, 2019; Vermunt et al., 2020; Viola; Mendes, 2022).

3. Metodologia

O presente artigo adota como procedimento metodológico uma revisão sistemática da literatura, de abordagem qualitativa, com finalidade descritiva e analítica, orientada para mapear, sistematizar e interpretar a produção científica nacional e internacional acerca dos impactos das crises de preços dos alimentos sobre a segurança alimentar de famílias urbanas e rurais. Trata-se de uma estratégia particularmente adequada quando o objetivo não é apenas reunir estudos existentes, mas examiná-los de maneira crítica e organizada, de modo a identificar recorrências temáticas, lacunas de investigação, matrizes analíticas predominantes e diferentes formas de interpretação do fenômeno estudado. Nesse sentido, a revisão sistemática distingue-se de revisões narrativas mais abertas por exigir a explicitação dos critérios e das etapas que orientam a busca, a seleção e a análise do material bibliográfico, o que tende a conferir maior rigor, rastreabilidade e consistência à síntese produzida, conforme argumentam Snyder (2019) e Xiao e Watson (2019).

Com vistas a assegurar maior transparência e coerência na delimitação do corpus documental, o percurso de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos será orientado pelas diretrizes do PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). A versão atualizada do protocolo, apresentada por Page et al. (2021), aprimora a diretriz anterior ao oferecer parâmetros mais precisos para o relato dos procedimentos

metodológicos e dos resultados das revisões sistemáticas. A adoção desse protocolo contribuiu para tornar mais explícitas as decisões tomadas ao longo do processo de seleção dos estudos, além de favorecer a reprodutibilidade da pesquisa e a clareza na apresentação do desenho metodológico.

No que se refere ao recorte temporal, definiu-se o intervalo de 2015 a 2025, por corresponder a uma década em que o debate sobre descarbonização, transição de sistemas produtivos e sustentabilidade na agricultura adquiriu maior densidade analítica, impulsionado tanto pelo avanço da agenda climática internacional quanto pela expansão de políticas, estratégias e estudos voltados à agropecuária de baixa emissão de carbono. Esse período permite captar a produção mais recente e consolidada sobre o tema, contemplando trabalhos publicados em contexto de intensificação das discussões sobre mitigação, adaptação e reorganização produtiva no setor agropecuário.

Quanto aos critérios de inclusão, foram selecionados: i) artigos científicos publicados entre 2015 e 2025; ii) textos veiculados em periódicos revisados por pares; iii) estudos redigidos em português, inglês ou espanhol; e iv) trabalhos que abordassem de forma direta a descarbonização, a transição para sistemas produtivos de baixo carbono e seus desdobramentos na agricultura. Além disso, com o objetivo de conferir maior consistência e relevância ao corpus analítico, optou-se por priorizar, entre os resultados recuperados, os 15 artigos com maior número de citações, tomando a frequência de citação como indicador complementar de circulação, reconhecimento e impacto acadêmico no interior da literatura especializada.

3.1 Estratégia de busca e critérios de seleção

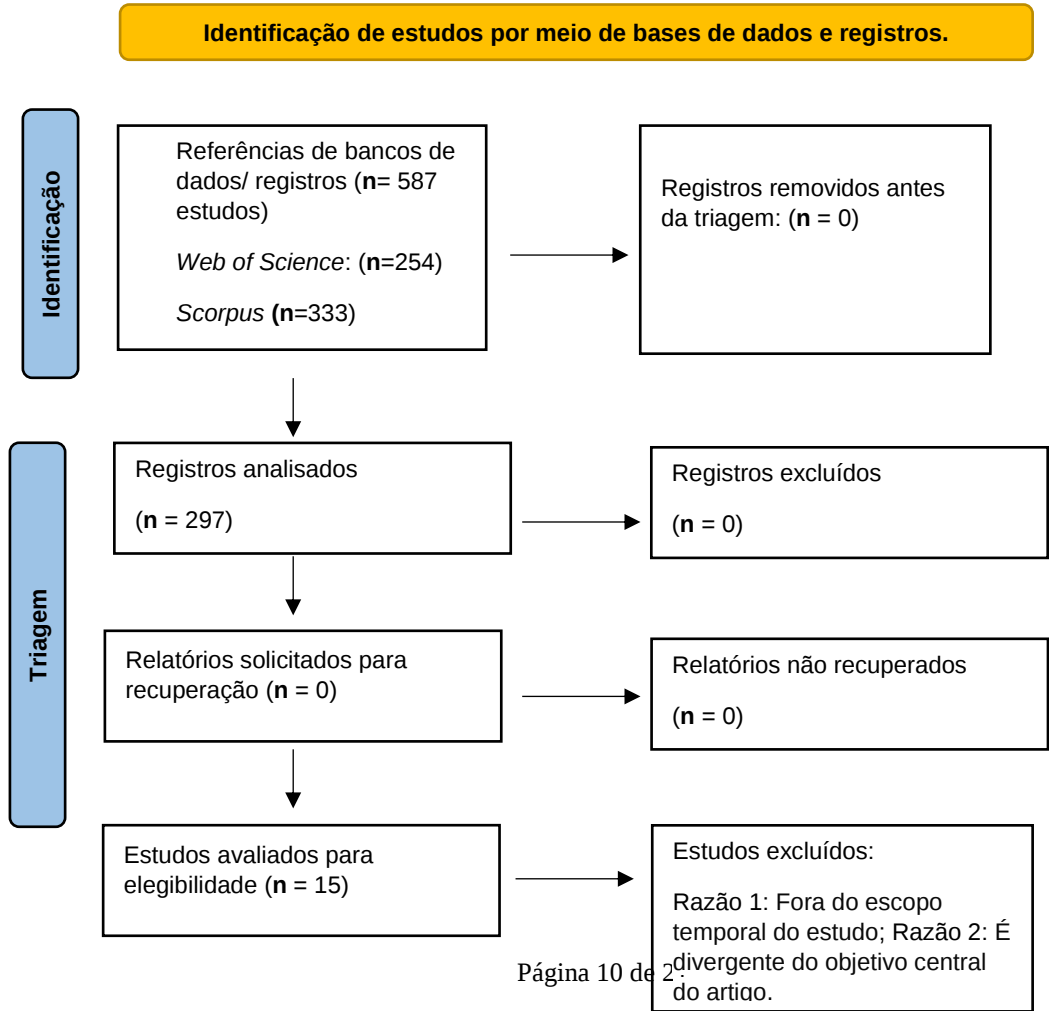
A estratégia de busca foi delineada a partir da combinação de descritores com operadores booleanos, utilizando termos recorrentes na literatura internacional para identificar estudos voltados à relação entre variações nos preços dos alimentos e seus efeitos sobre a segurança alimentar. O objetivo dessa etapa foi construir uma base de busca suficientemente ampla para captar diferentes abordagens do fenômeno, sem perder aderência ao problema de pesquisa. No Quadro 1, apresentam-se os descritores empregados nas duas bases de dados consultadas, definidos em consonância com os objetivos do estudo.

Quadro 1 - Estratégia de busca dos artigos para a RSL

Base de dados	Busca em	String utilizada
Web of Science	Título, resumo, palavras-chave	TS = (decarbonization OR "low-carbon transition" OR "low-carbon agriculture" OR "socio-technical transition*") AND (agriculture OR agribusiness OR "agricultural systems" OR "production systems")
Scopus	Todos os campos	

Como critérios de exclusão, conforme Figura 1, serão descartados documentos duplicados, resumos sem texto completo, editoriais, ensaios opinativos, relatórios sem arbitragem científica e trabalhos cujo foco recaia apenas sobre preços agrícolas ou funcionamento de mercados sem interface clara com segurança alimentar domiciliar. A definição prévia desses critérios busca reduzir arbitrariedade e fortalecer a coerência interna da revisão, em linha com as recomendações metodológicas de Page et al. (2021) e Xiao e Watson (2019).

Figura 1. Fluxograma da Pesquisa Baseado no Método PRISMA



Incluída

Estudos incluídos na revisão
(n = 15)

Fonte: Dados da pesquisa

4. Discussão dos Resultados

A leitura conjunta dos 16 estudos selecionados permite afirmar, em primeiro lugar, que a literatura recente sobre descarbonização na agricultura tem se afastado de interpretações estritamente tecnicistas e se aproximado de uma compreensão mais ampla da mudança produtiva. Em vez de reduzir o tema à adoção de técnicas mitigadoras ou à melhoria de indicadores de eficiência, os trabalhos analisados sugerem que a transição para sistemas produtivos de baixo carbono envolve reconfigurações mais profundas nas formas de produzir, coordenar, regular e legitimar a atividade agrícola.

Nessa direção, a descarbonização passa a ser tratada como processo de transformação estrutural, no qual inovação, uso da terra, infraestrutura, política pública e organização setorial se articulam de maneira indissociável. No Quadro 2, estão sistematizados os estudos identificados pertinentes a essa discussão.

Quadro 2 – Artigos identificados na revisão sistemática, contexto e principais resultados

Autor(es)	Ano	Título abreviado	Tema central	Contribuição para o artigo
Wang et al.	2015	<i>Carbon Footprint Analysis for Mechanization of Maize Production...</i>	Pegada de carbono e mecanização agrícola	Introduz a mensuração da intensidade carbônica na produção agrícola e contribui para a discussão sobre eficiência ambiental dos sistemas produtivos.
Gil et al.	2018	<i>Tradeoffs in the quest for climate smart agricultural intensification in Mato Grosso, Brazil</i>	Intensificação agrícola e trade-offs climáticos	Evidencia tensões entre intensificação produtiva, mudança climática e sustentabilidade, com foco no contexto brasileiro.
Hou e Hou	2019	<i>Farmers' adoption of low-carbon agriculture in China...</i>	Adoção de agricultura de baixo carbono	Discute fatores comportamentais e institucionais que condicionam a adoção de práticas de baixo carbono.

Roberts e Geels	2019	<i>Conditions for politically accelerated transitions...</i>	Transições sociotécnicas	Oferece a base teórica mais consistente para interpretar a descarbonização como mudança de regime produtivo.
Jiang et al.	2020	<i>Strategies for Sustainable Substitution of Livestock Meat</i>	Sistemas alimentares sustentáveis	Amplia a discussão para os sistemas agroalimentares e para alternativas sustentáveis na produção de alimentos.
Liu, Zhu e Guo	2020	<i>Evolutionary Game Analysis of Multiple Stakeholders...</i>	Difusão de inovação agrícola de baixo carbono	Reforça a importância da coordenação entre múltiplos atores na difusão da inovação de baixo carbono.
Wu, Leslie e Sawyerr	2020	<i>Low-impact land use pathways to deep decarbonization of electricity</i>	Uso da terra e energia	Conecta descarbonização, uso da terra e planejamento energético, ampliando a escala de análise.
Sovacool et al.	2021	<i>Decarbonizing the food and beverages industry...</i>	Descarbonização da indústria de alimentos	Expande a discussão para cadeias agroindustriais e para a dimensão sistêmica da descarbonização.
Chen et al.	2022	<i>Strategies to achieve a carbon neutral society...</i>	Sociedade carbono neutro	Situa a agricultura em uma moldura mais ampla de transição climática e neutralidade de carbono.
Farghali et al.	2022	<i>Integration of biogas systems into a carbon zero and hydrogen economy...</i>	Biogás e economia de carbono zero	Relaciona agroenergia, circularidade e integração de sistemas produtivos em cenário de baixo carbono.
Grangeia et al.	2022	<i>The Brazilian biofuel policy (RenovaBio) and its uncertainties...</i>	Política pública e biocombustíveis	Traz o caso brasileiro e evidencia o papel da regulação na transição de baixo carbono.
Lovering et al.	2022	<i>Land-use intensity of electricity production and tomorrow's energy landscape</i>	Uso da terra e descarbonização energética	Amplia a análise da transição para a relação entre território, energia e mudança de uso da ter

Fonte: Elaboração própria, com base nos registros recuperados nas bases Scopus e Web of Science, conforme corpus bibliográfico selecionado para a pesquisa.

Essa interpretação encontra seu ponto de sustentação mais consistente em Roberts e Geels (2019), cujo estudo fornece a base conceitual mais robusta do corpus para pensar a mudança de baixo carbono como transição de regime. Ao analisarem casos históricos de transformação politicamente acelerada, os autores mostram que mudanças setoriais mais profundas não decorrem automaticamente da existência de soluções técnicas mais eficientes,

mas da convergência entre pressões externas, inovação emergente, capacidade institucional e ação política coordenada. Quando esse argumento é trazido para o campo agrícola, ele permite compreender que a descarbonização não deve ser lida como simples modernização incremental, mas como processo dependente de rearranjos institucionais e de disputas em torno das trajetórias legítimas de desenvolvimento.

A partir dessa chave de leitura, torna-se possível interpretar os demais estudos não como casos isolados, mas como manifestações empíricas de uma transição mais ampla. É o que se observa, por exemplo, nos trabalhos que articulam agricultura, energia e uso da terra. Lovering et al. (2022) e Wu, Leslie e Sawyerr (2020) mostram que trajetórias de descarbonização exigem considerar a intensidade do uso territorial e os efeitos espaciais das escolhas energéticas, o que amplia o problema muito além da escala da unidade produtiva. Em vez de restringir o debate à eficiência de técnicas agrícolas específicas, esses estudos evidenciam que os sistemas produtivos estão inseridos em redes mais amplas de circulação de energia, infraestrutura e reorganização territorial. Assim, a descarbonização agrícola aparece conectada a uma ecologia política do território, na qual o uso da terra se torna variável estratégica para a transição.

Nessa mesma linha de ampliação analítica, Farghali et al. (2022) discutem a integração de sistemas de biogás em uma economia orientada ao carbono zero e ao hidrogênio, sugerindo que a transição produtiva pode envolver formas mais complexas de circularidade e reaproveitamento energético. O interesse desse tipo de abordagem está em mostrar que a agricultura de baixo carbono não se resume a reduzir emissões no interior da lavoura ou da pecuária, mas pode envolver a criação de novos arranjos técnico-produtivos, nos quais resíduos, biomassa e energia passam a integrar uma lógica de reorganização mais abrangente do sistema. De forma convergente, Walston et al. (2022), ao explorarem o potencial dos sistemas agrivoltaicos, reforçam a ideia de que a transição de baixo carbono pode gerar sinergias entre produção de alimentos, geração de energia e conservação ambiental. Ainda que tais soluções dependam de condições espaciais, econômicas e regulatórias específicas, o resultado mais importante desses estudos é tornar visível que a transição produtiva contemporânea tende a combinar setores e funções antes tratados separadamente.

Esse movimento de ampliação também se expressa nos estudos que deslocam o olhar da produção primária para os sistemas agroalimentares e agroindustriais. Sovacool et al. (2021), ao examinarem a descarbonização da indústria de alimentos e bebidas, mostram que a redução de emissões não pode ser compreendida apenas no plano do estabelecimento rural, pois envolve cadeias industriais, sistemas logísticos, padrões de produção e escolhas tecnológicas mais

amplas. Em sentido semelhante, Jiang et al. (2020) discutem estratégias de substituição sustentável da carne de origem animal, enquanto Chen et al. (2022) situam a agricultura em uma estratégia mais abrangente de neutralidade carbônica. Em conjunto, esses estudos ampliam a escala de análise e sugerem que a descarbonização agrícola integra uma transição mais vasta dos sistemas alimentares contemporâneos. Para o presente artigo, essa constatação é importante porque evidencia que o conceito de sistema produtivo não deve ser restringido ao momento estrito da produção, mas compreendido em conexão com cadeias, mercados, processamento e consumo.

Além disso, a transição de baixo carbono também aparece associada à modernização tecnológica das bases materiais do agronegócio. Yin, Wang e Xu (2022) mostram que a inovação verde digital pode desempenhar papel relevante na transformação da manufatura de equipamentos agrícolas de alta complexidade, o que desloca parte da discussão para a base industrial que sustenta a agricultura contemporânea. Por sua vez, Wang et al. (2015), ao analisarem a pegada de carbono da mecanização na produção de milho, oferecem uma contribuição importante para a compreensão da intensidade carbônica associada aos suportes técnicos da produção. Os dois estudos, ainda que situados em níveis distintos, convergem ao mostrar que a descarbonização agrícola não depende apenas de novas práticas agronômicas, mas também da reconfiguração da infraestrutura tecnológica, dos equipamentos e dos sistemas de produção materialmente envolvidos no setor.

Entretanto, os resultados do corpus também mostram que essa transição não ocorre de forma linear nem isenta de tensões. Gil et al. (2018), ao discutirem os trade-offs da intensificação agriculturalmente inteligente em Mato Grosso, oferecem um contraponto importante às leituras excessivamente normativas da sustentabilidade. O estudo evidencia que estratégias produtivas orientadas à eficiência climática podem coexistir com contradições socioambientais e com novas formas de pressão territorial. Esse achado é especialmente relevante porque impede compreender a descarbonização como trajetória necessariamente harmoniosa. Ao contrário, a transição aparece como processo atravessado por compensações, disputas e limites, o que reforça a necessidade de tratá-la como mudança estrutural, politicamente condicionada e socialmente desigual.

Desse modo, os estudos reunidos nesta subseção convergem ao sugerir que a descarbonização da agricultura vem sendo progressivamente construída na literatura como transição dos sistemas produtivos. Essa formulação permite articular, em um mesmo quadro analítico, mudança técnica, reorganização territorial, transformação industrial, reconfiguração

de cadeias e disputa entre modelos de desenvolvimento. Mais do que um repertório de técnicas mitigadoras, o corpus aponta para uma mudança de natureza sistêmica, na qual o baixo carbono se torna princípio organizador de novas formas de coordenação econômica, tecnológica e ambiental no campo.

4.2 Adoção, difusão e condicionantes institucionais da agricultura de baixo carbono

Se a primeira subseção evidenciou a dimensão estrutural da descarbonização, os estudos também mostram, de maneira bastante consistente, que a transição depende de condições concretas de adoção, difusão e coordenação institucional. Em outras palavras, a mudança para sistemas produtivos de baixo carbono não se efetiva apenas porque existem tecnologias disponíveis ou porque a agenda climática se tornou mais urgente. Ela depende de como produtores, instituições, mercados e políticas públicas respondem a essa agenda, em contextos marcados por diferentes níveis de risco, recursos, informação e capacidade de implementação.

Esse ponto aparece de forma nítida nos trabalhos voltados ao comportamento e às decisões dos produtores. Hou e Hou (2019) demonstram que a adoção de práticas de agricultura de baixo carbono é influenciada não apenas por cálculo econômico, mas também por atitudes, normas subjetivas e percepção de controle sobre a decisão. O resultado é importante porque revela que a transição não pode ser explicada por um modelo estritamente racionalista de difusão tecnológica. Em vez disso, ela depende de mediações subjetivas e sociais, nas quais a disposição para inovar é atravessada por expectativas, valores e percepções sobre viabilidade e risco.

Na mesma direção, Mao, Quan e Fu (2023) mostram que as preferências de risco afetam diretamente a adoção de tecnologias agrícolas de baixo carbono. O estudo reforça a ideia de que a transição se realiza em ambiente de incerteza, no qual os produtores avaliam custos, benefícios e ameaças potenciais antes de incorporar novas práticas. Esse resultado é particularmente expressivo para o debate sobre sistemas produtivos, pois indica que a mudança não depende apenas de oferta tecnológica ou de pressão normativa, mas também da capacidade dos agentes de absorver riscos e de lidar com possíveis perdas de curto prazo. Assim, a descarbonização aparece não apenas como problema técnico, mas também como problema econômico-comportamental.

Contudo, os estudos mostram que a adoção individual não esgota o problema. Liu, Zhu e Guo (2020), ao analisarem a difusão da inovação agrícola de baixo carbono por meio de um

modelo de interação entre múltiplos stakeholders, evidenciam que a transição depende de coordenação estratégica entre diferentes atores. O resultado central do estudo é mostrar que produtores, instituições e demais agentes influenciam reciprocamente suas decisões, o que torna insuficiente uma leitura da mudança baseada apenas na escolha individual. Em outras palavras, a difusão da agricultura de baixo carbono depende da existência de mecanismos de coordenação, incentivos e aprendizagem coletiva. Com isso, a literatura aponta para uma dimensão institucional da transição que vai além da figura isolada do produtor e recoloca a importância das redes, das políticas e dos ambientes regulatórios.

Essa dimensão também aparece nos estudos voltados à eficiência e ao desempenho das emissões agrícolas. Han, Xu e Zhang (2024) mostram que a eficiência carbônica dos sistemas produtivos varia conforme fatores estruturais e produtivos, sugerindo que o desempenho ambiental não se distribui de modo homogêneo. A relevância desse achado reside em mostrar que a transição de baixo carbono não pode ser presumida como resultado uniforme da difusão tecnológica. Ao contrário, os próprios resultados ambientais da produção dependem de contextos diferenciados de infraestrutura, intensidade produtiva e capacidade de gestão. Nesse ponto, a literatura reafirma que a agricultura de baixo carbono é marcada por heterogeneidade, o que exige cuidado analítico para não universalizar experiências localizadas.

Quando se passa do plano microprodutivo para o plano das políticas públicas, essa heterogeneidade torna-se ainda mais visível. Grangeia et al. (2022), ao examinarem o RenovaBio, mostram que a política brasileira de biocombustíveis está permeada por incertezas técnicas, socioeconômicas e institucionais. O achado mais importante do estudo é que a descarbonização, quando traduzida em instrumento regulatório, depende de estabilidade normativa, coerência de desenho institucional e articulação entre objetivos econômicos e ambientais. Isso significa que a política pública não atua apenas como elemento complementar, mas como componente constitutivo da própria transição. Sem regulação estável, financiamento adequado e capacidade de implementação, a agenda de baixo carbono tende a permanecer fragmentada ou seletivamente apropriada.

Esse argumento se conecta, ainda, aos trabalhos que mostram a crescente interdependência entre agricultura, energia e sistemas produtivos ampliados. Embora Lovering et al. (2022), Wu, Leslie e Sawyerr (2020) e Farghali et al. (2022) operem em escalas mais amplas, seus resultados reforçam indiretamente a mesma conclusão: a transição depende de coordenação intersetorial e de planejamento institucional. De modo semelhante, os estudos sobre sistemas alimentares, como os de Sovacool et al. (2021), Jiang et al. (2020) e Chen et al.

(2022), sugerem que a agricultura de baixo carbono não se consolidará apenas pela mudança do produtor individual, mas pela reconfiguração simultânea de cadeias, mercados, infraestrutura e normas sociais de produção e consumo.

Assim, os resultados desta subseção indicam que a descarbonização agrícola deve ser compreendida como processo de adoção socialmente mediada e institucionalmente condicionada. A literatura mostra que tecnologias e práticas de baixo carbono só ganham escala quando encontram ambientes favoráveis de coordenação, incentivo, informação e redução de risco. Isso implica reconhecer que a transição não depende apenas da existência de soluções técnicas, mas da capacidade de construir condições materiais e institucionais para sua difusão. Em contextos desiguais, essa observação se torna ainda mais importante, pois evidencia que a agricultura de baixo carbono pode avançar de forma seletiva, beneficiando com maior rapidez os agentes e territórios já mais bem posicionados em termos de recursos, infraestrutura e acesso à inovação.

Em síntese, os estudos analisados mostram que a transição para sistemas produtivos de baixo carbono envolve, simultaneamente, uma dimensão estrutural e uma dimensão de implementação. Se, de um lado, a descarbonização deve ser lida como transformação mais ampla dos regimes produtivos, de outro, seu avanço concreto depende de mecanismos de adoção, difusão, coordenação e política pública. É justamente a articulação entre essas duas dimensões que dá unidade ao corpus e sustenta a principal interpretação deste artigo: a agricultura de baixo carbono não constitui apenas um repertório técnico de mitigação, mas uma agenda de reorganização produtiva cuja efetivação depende de condições institucionais, econômicas e sociais específicas.

À luz dessas duas dimensões, a transição estrutural dos sistemas produtivos e os condicionantes concretos de adoção e coordenação, os resultados do corpus permitem concluir que a descarbonização agrícola vem sendo construída na literatura como processo multidimensional, ainda em consolidação, mas já suficientemente denso para sustentar uma agenda analítica própria.

5. Considerações finais

. Este artigo buscou analisar como a literatura científica recente tem abordado a descarbonização e a transição dos sistemas produtivos na agricultura contemporânea, com base em um corpus de 16 estudos únicos recuperados nas bases Scopus e Web of Science. A questão que orientou a análise partiu do entendimento de que a agricultura de baixo carbono não pode

ser compreendida apenas como somatório de técnicas mitigadoras, mas como processo mais amplo de reorganização produtiva, tecnológica e institucional. À luz dessa preocupação, a revisão permitiu sustentar que a literatura vem, de fato, deslocando o debate para uma compreensão mais sistêmica da mudança, ainda que esse movimento ocorra de forma desigual entre os diferentes eixos temáticos identificados.

Os resultados mostraram, em primeiro lugar, que a descarbonização tem sido cada vez mais tratada como transição dos sistemas produtivos, e não apenas como inovação técnica pontual. Os estudos analisados indicam que a mudança de baixo carbono envolve reconfigurações que atingem o uso da terra, a infraestrutura energética, a base material do agronegócio, os sistemas agroindustriais e os próprios critérios de modernização agrícola. Nesse sentido, a literatura recuperada oferece elementos consistentes para compreender a transição como processo sociotécnico, condicionado por instituições, trajetórias históricas, disputas políticas e capacidades de coordenação. Essa constatação é especialmente importante porque afasta leituras simplificadas da sustentabilidade e permite situar a agricultura contemporânea no interior de transformações mais amplas associadas à crise climática e à reorganização das economias de base material.

Em segundo lugar, a revisão evidenciou que a transição para sistemas produtivos de baixo carbono depende fortemente de condições de adoção, difusão e coordenação institucional. Os estudos voltados ao comportamento dos produtores, às preferências de risco, à difusão da inovação e à eficiência das emissões mostraram que a mudança não ocorre de forma automática nem homogênea. Ao contrário, sua efetivação depende de fatores econômicos, subjetivos, organizacionais e regulatórios que condicionam a capacidade concreta de incorporar novas práticas e tecnologias. Essa dimensão é central porque demonstra que a descarbonização não deve ser tratada apenas como disponibilidade de soluções técnicas, mas como processo socialmente mediado, atravessado por assimetrias de informação, recursos e capacidade de implementação.

Além disso, a análise do corpus revelou que a literatura se encontra em fase de adensamento recente, com maior concentração de publicações entre 2018 e 2024. Esse dado sugere que se trata de um campo ainda em consolidação, no qual convivem estudos mais estruturais, voltados à mudança de regime, e trabalhos mais aplicados, centrados na adoção de práticas, na política pública ou na integração entre agricultura, energia e sistemas alimentares. Em vez de ser um problema, essa heterogeneidade mostrou-se analiticamente produtiva, pois tornou possível visualizar as múltiplas escalas em que a descarbonização agrícola vem sendo

debatida. Ao mesmo tempo, ela também evidenciou uma lacuna importante: ainda são menos frequentes os estudos que integrem, em um mesmo quadro analítico, mudança técnica, estrutura produtiva, desigualdade de adoção, política pública e reorganização territorial.

Dessa forma, a principal contribuição deste artigo está em defender que a descarbonização da agricultura deve ser interpretada como agenda de transição produtiva, e não apenas como repertório de soluções ambientais. Essa formulação permite aproximar o debate agrícola da literatura sobre transições sociotécnicas e, ao mesmo tempo, conferir maior densidade à análise da sustentabilidade no campo. Em vez de presumir convergência automática entre produtividade, inovação e mitigação climática, o estudo mostrou que a transição de baixo carbono é marcada por tensões, condicionantes e seletividades. Em outras palavras, trata-se de processo desigual, politicamente disputado e institucionalmente dependente.

Por fim, é importante reconhecer os limites desta pesquisa. O corpus analisado foi composto por 16 estudos únicos, organizados a partir de critérios de aderência temática, recorte temporal e relevância bibliográfica. Embora esse conjunto seja suficiente para identificar tendências e construir uma interpretação analítica consistente, ele não esgota a complexidade da produção científica sobre o tema. Além disso, a heterogeneidade do material recuperado indica que a própria área ainda carece de maior consolidação conceitual e de sínteses que articulem, com mais sistematicidade, as diferentes escalas da transição de baixo carbono na agricultura.

Como agenda futura, recomenda-se aprofundar investigações em pelo menos três direções. A primeira consiste em examinar os efeitos distributivos da transição, considerando as diferentes capacidades de adoção entre territórios, cadeias e perfis de produtores. A segunda envolve analisar com maior precisão a articulação entre crédito, assistência técnica, regulação e inovação, uma vez que esses elementos aparecem de forma recorrente como condicionantes da mudança. A terceira diz respeito à necessidade de estudos que integrem, de forma mais densa, transição sociotécnica, política pública e reorganização territorial, especialmente em contextos marcados por heterogeneidade estrutural, como o brasileiro. É justamente nessa direção que o presente artigo pretende contribuir: ao tratar a descarbonização como questão de transição dos sistemas produtivos, busca oferecer uma base interpretativa mais ampla para o debate contemporâneo sobre agricultura, clima e mudança estrutural.

Referências

- ALONSO-ADAME, Alba; VAN MEENSEL, Jef; LAUWERS, Ludwig; MARCHAND, Fleur. Sustainability transitions in agri-food systems through the lens of agent-based modelling: a systematic review. **Sustainability Science**, [s. l.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11625-024-01551-0>.
- BORYCHOWSKI, Michał; GRZELAK, Aleksander; POPLAWSKI, Łukasz. What drives low-carbon agriculture? The experience of farms from the Wielkopolska region in Poland. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 29, p. 18641-18652, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17022-3>.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável (2020-2030): visão estratégica para um novo ciclo**. Brasília, DF: MAPA, 2021.
- CHEN, L.; MSIGWA, G.; YANG, M.; OSMAN, A. I.; FAWZY, S.; ROONEY, D. W.; YAP, P.-S. Strategies to achieve a carbon neutral society: a review. **Environmental Chemistry Letters**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 2277-2310, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01435-8>.
- EL BILALI, Hamid. Research on agro-food sustainability transitions: a systematic review of research themes and an analysis of research gaps. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 221, p. 353-364, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.232>.
- FARGHALI, M.; OSMAN, A. I.; UMETSU, K.; ROONEY, D. W. Integration of biogas systems into a carbon zero and hydrogen economy: a review. **Environmental Chemistry Letters**, [s. l.], v. 20, n. 5, p. 2853-2927, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01468-z>.
- GEELS, Frank W. Socio-technical transitions to sustainability: a review of criticisms and elaborations of the Multi-Level Perspective. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, [s. l.], v. 39, p. 187-201, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.06.009>.
- GEELS, Frank W.; SOVACOOOL, Benjamin K.; SCHWANEN, Tim; SORRELL, Steve. The socio-technical dynamics of low-carbon transitions. **Joule**, [s. l.], v. 1, n. 3, p. 463-479, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.09.018>.
- GIANETTI, Giovani William; FERREIRA FILHO, Joaquim Bento de Souza. O Plano e Programa ABC: uma análise da alocação dos recursos. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 59, n. 1, e216524, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.216524>.
- GIL, Juliano D. B.; GARRETT, Rachael D.; ROTZ, C. A.; DAI OGLOU, Vassilis; VALENTIM, Judson; PIRES, G. F.; COSTA, Marcos H.; LOPES, L.; REIS, J. C. Tradeoffs in the quest for climate smart agricultural intensification in Mato Grosso, Brazil. **Environmental Research Letters**, [s. l.], v. 13, n. 6, 064025, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac4d1>.
- GRANGEIA, C.; SANTOS, L.; LAZARO, L. L. B. The Brazilian biofuel policy (RenovaBio) and its uncertainties: an assessment of technical, socioeconomic and institutional aspects. **Energy Conversion and Management: X**, [s. l.], v. 13, 100156, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100156>.
- HAN, G. H.; XU, J. H.; ZHANG, X.; PAN, X. Efficiency and driving factors of agricultural carbon emissions: a study in Chinese state farms. **Agriculture**, [s. l.], v. 14, n. 9, 1454, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture14091454>.

HOU, J.; HOU, B. Farmers' adoption of low-carbon agriculture in China: an extended theory of the planned behavior model. **Sustainability**, [s. l.], v. 11, n. 5, 1399, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su11051399>.

JIANG, G. H.; AMEER, K.; KIM, H. Y.; LEE, E. J.; RAMACHANDRAIAH, K.; HONG, G. P. Strategies for sustainable substitution of livestock meat. **Foods**, [s. l.], v. 9, n. 9, 1227, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/foods9091227>.

LEHTONEN, Heikki; RÄMÖ, Janne. Development towards low carbon and sustainable agriculture in Finland is possible with moderate changes in land use and diets. **Sustainability Science**, [s. l.], v. 18, p. 425-439, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11625-022-01244-6>.

LIU, L. X.; ZHU, Y. C.; GUO, S. B. The evolutionary game analysis of multiple stakeholders in the low-carbon agricultural innovation diffusion. **Complexity**, [s. l.], v. 2020, 6309545, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2020/6309545>.

LOVERING, Jessica; SWAIN, Mathew; BLOMQVIST, Linus; HERNANDEZ, Rebecca R. Land-use intensity of electricity production and tomorrow's energy landscape. **PLoS ONE**, [s. l.], v. 17, n. 7, e0270155, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270155>.

MAO, H.; QUAN, Y.-R.; FU, Y. Risk preferences and the low-carbon agricultural technology adoption: evidence from rice production in China. **Journal of Integrative Agriculture**, [s. l.], v. 22, n. 8, p. 2577-2590, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jia.2023.07.002>.

NORSE, David. Low carbon agriculture: objectives and policy pathways. **Environmental Development**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 25-39, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2011.12.004>.

ROBERTS, Chris; GEELS, Frank W. Conditions for politically accelerated transitions: historical institutionalism, the multi-level perspective, and two historical case studies in transport and agriculture. **Technological Forecasting and Social Change**, [s. l.], v. 140, p. 221-240, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.11.019>.

SOVACOO, Benjamin K.; BAZILIAN, Morgan; GRIFFITHS, Steve; KIM, Jinsoo; FOLEY, Aidan; ROONEY, David. Decarbonizing the food and beverages industry: a critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 143, 110856, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110856>.

VERMUNT, Daan A.; NEGRO, Simona O.; VAN LAERHOVEN, Frank S. J.; VERWEIJ, Peter A.; HEKKERT, Marko P. Sustainability transitions in the agri-food sector: how ecology affects transition dynamics. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, [s. l.], v. 36, p. 236-249, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.06.003>.

VIOLA, Eduardo; MENDES, Vinícius. Agricultura 4.0 e mudanças climáticas no Brasil. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 25, e02462, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200246r2vu2022L3OA>.

WALSTON, Leroy J.; BARLEY, Troy; BHANDARI, Indra; CAMPBELL, Brian; MCCALL, Julia; HARTMANN, Heidi M.; DOLEZAL, Alan G. Opportunities for agrivoltaic systems to achieve synergistic food-energy-environmental needs and address sustainability goals. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, [s. l.], v. 6, 932018, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.932018>.