

A PRODUTIVIDADE TOTAL DOS FATORES COM PARÂMETROS AMBIENTAIS COMO INDICADOR DE SUSTENTABILIDADE NA AGRICULTURA: UMA REVISÃO DE LITERATURA

THE TOTAL FACTOR PRODUCTIVITY WITH ENVIRONMENTAL PARAMETERS AS AN INDICATOR OF SUSTAINABILITY IN AGRICULTURE: A LITERATURE REVIEW

Tarik Marques do Prado Tanure
PPGE/IERI/Universidade Federal de Uberlândia
tariktanure@ufu.br

Marcelo Dias Paes Ferreira
DER/Universidade Federal de Viçosa
marcelo.ferreira@ufv.br

GT04. Questão ambiental, agroecologia e sustentabilidade

Resumo

A produtividade total dos fatores (PTF) é um indicador que reflete a eficiência na utilização de insumos no processo produtivo, podendo ser interpretada como o aumento da produção que não é explicado pelo maior emprego de fatores produtivos. Como aprimoramento, a PTF passou a considerar fatores ambientais, através da incorporação de insumos e produtos indesejáveis do ponto de vista ambiental, como emissões de GEEs, poluição da água e degradação do solo. Essa abordagem, denominada de PTF Ambiental, passou a ser interpretada como um indicador de sustentabilidade na agricultura, contudo, existem distintas abordagens e metodologias para o cálculo. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão sistemática de literatura sobre o cálculo da PTF Ambiental na agricultura, procurando compreender as metodologias, as variáveis utilizadas e como a sustentabilidade é abordada na mensuração. Elencamos 48 estudos, sendo 44 publicados em periódicos internacionais. Destacam-se a utilização de métodos não paramétricos como a Análise envoltória de dados (DEA) combinados com índices de Malmquist. Dentre as externalidades ambientais utilizadas, o uso de emissões é recorrente. Não obstante, avalia-se que a PTF Ambiental na comparação entre países deve ser utilizada com cautela, dada as especificidades ambientais distintas.

Palavras-chave: PTF ambiental, Produtos indesejáveis, Agricultura, Sustentabilidade

Abstract

Total factor productivity (TFP) is an indicator that reflects the efficiency in the use of inputs in the production process and can be interpreted as the increase in production that is not explained by the greater use of productive factors. As an improvement, the TFP began to consider environmental factors, through the incorporation of inputs and products that are undesirable from an environmental point of view, such as GHG emissions, water pollution and soil degradation. This approach, called Environmental TFP, has come to be interpreted as an indicator of sustainability in agriculture, however, there are different approaches and methodologies for calculation. In this sense, the objective of this work was to carry out a systematic review of the literature on the calculation of Environmental TFP in agriculture, seeking to understand the methodologies, the variables used and how sustainability is addressed in the measurement. We listed 48 studies, 44 of which were published in international journals. The use of non-parametric methods such as Data Envelopment Analysis (DEA) combined with Malmquist indices stands out. Among the environmental externalities used, the use of emissions is recurrent. Nevertheless, it is assessed that the Environmental TFP in the comparison between countries should be used with caution, given the distinct environmental specificities.

Key words: PTF ambiental, Produtos indesejáveis, Agricultura, Sustentabilidade

1. Introdução

Incrementos na produtividade agrícola são fundamentais para garantir a segurança alimentar, contudo é fundamental que o processo seja realizado em consonância com a sustentabilidade ambiental. Isso implica que a oferta de alimentos a preços acessíveis e nutritivos para uma população global em crescimento deva ser realizada levando em

consideração o fornecimento dos meios de subsistência do setor, concomitantemente à melhoria dos resultados ambientais. Este quadro é um dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da ONU.

O aumento da produtividade e da sustentabilidade do setor agrícola são objetivos políticos fundamentais no Brasil, como verifica-se pelas políticas públicas orientadas para o setor, a exemplo do Plano ABC+ e do recém-lançado Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas (PNCPD). O tema também é central no âmbito da OCDE e demais organizações multilaterais, em que se verifica uma mobilização para a adoção de práticas agrícolas sustentáveis, no contexto dos acordos climáticos.

Uma forma amplamente utilizada de mensurar os ganhos de produtividade na agricultura é o cálculo da Produtividade Total dos Fatores (PTF), que compreende diversas metodologias e abordagens que relacionam os insumos com o produto ao longo do tempo. A produtividade é comumente definida como uma razão entre uma medida de volume de produção e uma medida de volume de uso de insumos (OCDE, 2001). Do ponto de vista conceitual, calcular a relação entre saídas e entradas é simples. O principal desafio surge porque no processo de produção, múltiplas entradas e múltiplas saídas ocorrem, exigindo que os analistas desenvolvam uma abordagem de agregação para calcular a proporção (OCDE, 2024).

Para o cálculo da PTF, usualmente utilizam-se funções que representam tecnologias de produção, que são usadas para desenvolver índices de volume associados. Esta abordagem, denominada de "abordagem econômica", é utilizada para calcular os índices de Malmquist e os índices de Törnqvist, formas tradicionais de cálculo da PTF que se distinguem na forma como os dados são utilizados. Os índices de Törnqvist são calculados usando dados observáveis de preço e quantidade, já os índices de Malmquist dispensam dados de preços (Chung *et al*, 1997). Outra abordagem, denominada de "abordagem axiomática", parte de um conjunto de axiomas ou propriedades, sem exigir suposições sobre a otimização do comportamento ou tecnologias de produção, nesta linha destacam-se os números índice de Fisher (OCDE, 2024).

Os índices tradicionais que mensuram a PTF não incluem externalidades ambientais e esgotamento dos recursos naturais, o que dificulta a avaliação da relação entre o crescimento da produtividade e o comportamento da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos essenciais. O desenvolvimento de instrumentos de medição para avaliar o desempenho da produtividade ambientalmente sustentável da agricultura é essencial para monitorizar os progressos e conceber respostas políticas. Neste sentido, existe um esforço de incluir subprodutos indesejáveis no cômputo da PTF, resultando na elaboração de índices que consideram emissões, uso energético, poluentes ambientais, dentre outros fatores (Hailu e Veeman, 2001; Kumar, 2006; Mahlberg *et al*, 2011; Zhang *et al*, 2011; Bragagnolo; Tateishi, 2021; Myeki *et al*, 2023).

Contudo, não há um índice acordado internacionalmente que meça e acompanhe o desempenho ambientalmente sustentável da produtividade agrícola dos países, mas existem tentativas de preencher esta lacuna. Por exemplo, em recente publicação, a OCDE (2024) apresenta um quadro analítico para estimar um índice de produtividade ambientalmente sustentável que seja prático no sentido de que seja simples de calcular via fontes de dados disponíveis e permita comparações consistentes do crescimento da produtividade ambientalmente sustentável entre países e ao longo do tempo. No estudo, há destaque para o trabalho de O'Donnell (2018; 2022) que propõe um abordagem alternativa no desenvolvimento de índices de produtividade, que satisfaçam uma série de axiomas, ainda que mais fracos em relação aos de Fisher, mas que suporte comparações entre países ao longo do tempo. O trabalho da OCDE (2024) ilustra o esforço conduzido na direção da construção de indicadores de produtividade na agricultura, com parâmetros ambientais, que possam ser utilizados para

analisar o desempenho dos países e, sobretudo, permita balizar a elaboração de políticas públicas e acordos internacionais.

Considerando a relevância dos indicadores que incorporam externalidades ambientais no cômputo da Produtividade Total dos Fatores (PTF) na agricultura e os inúmeros indicadores utilizados em pesquisas diversas, o presente estudo, por meio de uma revisão sistemática de literatura, procura levantar o estado da arte dos indicadores de produtividade total dos fatores (PTF) na agricultura, que levem em consideração as externalidades ambientais.

A partir da revisão, o estudo propõe a elaboração de um quadro analítico das principais metodologias e externalidades ambientais utilizadas, contribuindo no sentido de atualizar o estado da arte dos indicadores de produtividade na agropecuária, considerando aspectos ambientais. Não obstante, o estudo propõe a ampliação da discussão sobre como a sustentabilidade é abordada e como trabalhar as especificidades produtivas regionais, no contexto da elaboração de indicadores utilizados para comparar o desempenho entre os países.

A metodologia utilizada na revisão sistemática da literatura, com foco nos parâmetros ambientais, é realizada seguindo protocolos específicos de busca e análise. Os resultados constituem um importante acervo sobre os diferentes indicadores de PTF que consideram as externalidades ambientais, podendo ser referência para a elaboração de diferentes medidas de PTF ambiental para o Brasil e, não obstante, poderá ser referência para a elaboração de um novo indicador, caso seja identificada alguma lacuna.

O presente estudo está dividido em 4 seções, incluindo esta introdução. Na seção 2, é apresentada a metodologia utilizada, consistindo em uma revisão sistemática de literatura com protocolos específicos de busca e seleção de trabalhos que relacionam a produtividade total dos fatores com externalidades ambientais na agricultura. Na seção 3 são apresentados os resultados da seleção, os métodos utilizados pelos artigos selecionados, as externalidades ambientais abordadas e uma breve discussão sobre os resultados. A seção 4 sintetiza as considerações finais do trabalho.

2. Metodologia

A revisão sistemática de literatura é uma modalidade de pesquisa que segue protocolos específicos para analisar e conferir logicidade a um grande *corpus* documental (Galvão; Ricarte, 2020). A metodologia é caracterizada por uma sequência de etapas e procedimentos para elencar publicações científicas relevantes relacionadas ao escopo proposto. Envolve estratégias de busca, delimitação de critérios para seleção de artigos científicos e, sobretudo, de análise de cada artigo selecionado.

Uma *revisão sistemática narrativa* (Siddaway; Wood; Hedges, 2019), consiste na análise de estudos quantitativos e qualitativos que adotam metodologias diversas ou partem de diferentes conceituações teóricas e abordagens para avaliar indicadores de PTF com incorporação de externalidades ambientais. A revisão narrativa possibilita o desenvolvimento de uma percepção acerca dos fatores que condicionam a elaboração de indicadores de produtividade na agricultura, assim como dos parâmetros ambientais utilizados na adoção da referida técnica.

A etapa inicial de planejamento compreende o processo de identificação da necessidade de revisão de literatura, a qual foi previamente explicitado na apresentação deste projeto de pesquisa e que, em linhas gerais, compreende a urgência da elaboração de um quadro analítico que sintetize o estado da arte dos indicadores de PTF ambiental da agropecuária, no Brasil e no Mundo. Informações sobre os diversos tipos de indicadores existem, contudo são difusas e muitas vezes são apresentadas de forma pouco prática ou intuitiva. Este trabalho visa suprir essa lacuna.

A partir dessa identificação de necessidade de revisão, a busca sistemática inicia-se com a elaboração de um protocolo de revisão, que inclui, dentre outras informações, a identificação de palavras-chave e termos de busca, que serão construídos a partir do escopo do estudo, notadamente as possibilidades de cálculo da PTF ambiental e da literatura. As buscas foram realizadas em revistas publicadas e listadas nas bases de dados bibliográficas, Scopus. Além de documentos classificados como literatura cinza, *Working Papers* disponíveis em repositórios de instituições e relatórios da OCDE. O resultado da busca de informações compõe uma listagem completa de artigos nos quais a revisão foi baseada. Somente estudos que atendam a todos os critérios de inclusão especificados no protocolo de revisão e que não manifestem nenhum dos critérios de exclusão serão incorporados à revisão.

Neste sentido, os critérios de busca e seleção foram elaborados para identificar indicadores de Produtividade Total dos Fatores (PTF) que incorporem parâmetros ambientais, capazes de medir o grau de sustentabilidade agrícola e sobretudo, que permita a comparação entre países e ao longo do tempo. As Palavras-Chave buscadas foram: i) PTF Ambiental; ii) agricultura; iii) externalidade ambiental; iv) poluição ambiental; v) emissões; vi) desmatamento; vii) energia; viii) recursos naturais; ix) biodiversidade; x) serviços ecossistêmicos; e xi) sustentabilidade. Os termos também foram procurados na língua inglesa: i) Environmental TFP; ii) agriculture; iii) environmental externality; iv) environmental pollution; v) Emissions; vi) deforestation; vii) energy; viii) natural resources; ix) biodiversity; x) ecosystem services; xi) Sustainability.

A pesquisa foi realizada em 28/06/2024 às 16:40. Portanto, considera os artigos disponibilizados em periódicos internacionais e plataformas até essa data. Inicialmente foram identificados 113 artigos, dos quais 47 foram eliminados pelo fato de tratarem, sobretudo, da PTF tradicional, não incorporando externalidades ambientais em seu cômputo. A etapa seguinte considerou 67 artigos, dos quais, novamente 22 foram excluídos em decorrência de apesar de tratar de externalidades ambientais e questões correlatas, não consideravam sua explícita modelagem no cálculo da PTF na agricultura. Por fim, foram incluídos 3 documentos ao conjunto. Eles fazem parte da literatura cinza, foram publicados em repositórios institucionais e não em periódicos internacionais.

Foi produzida uma lista com os artigos selecionados e um registro histórico das decisões tomadas durante o processo, representando um repositório de dados, com os 48 artigos finais do qual a análise foi realizada. O formulário de extração de dados incluem detalhes da fonte de informação (título, autores, periódico, detalhes da publicação) e além de outras características do estudo, como metodologia, externalidades ambientais utilizadas e região de análise.

3. Resultados

A revisão sistemática de literatura, após o cumprimento dos protocolos de pesquisa, selecionou 45 estudos científicos que procuram mensurar a Produtividade Total dos Fatores na agricultura, levando em consideração as externalidades ambientais. O Quadro 1 elenca os estudos, apresentando a metodologia de cálculo e as externalidades ambientais consideradas, além do período e local de análise, autores e ano de publicação.

Quadro 1 - Bibliografia referente à Produtividade Total dos Fatores Ambiental (PTFA)

Autores	Ano	Método	Produtos Indesejados	Local
Arie Oskam	1991	Índice de Tornqvist-Theil	Perdas líquidas de nitrato, fosfato, potássio e amônia	Holanda
Ehui S.K.; Spencer D.S.C.	1993	Índice geral de segunda ordem	Nutrientes do solo	Nigéria
Shaik, S; Perrin, R.	1999	Índice Theil Tornqvist, Malmquist	excesso de nitrogênio; contaminação por agrotóxicos; Perdas de zonas úmidas	Nebraska-USA
Barnes A.P.	2002	TFP Social (Oskam, 1991), índice de Tornqvist-Theil	pesticida e fertilizante	UK
Galdeano-Gómez E.	2008	Índices de Malmquist; bootstrapped DEA.	resíduos	Espanha

Hoang V.-N.; Coelli T.	2011	Índice de Malmquist; DEA	Nutrientes (P;N)	30 OCDE
Chen Y.; Liu H.	2012	Índice de Produtividade de Malmquist-Luenberger	poluição representada pela intensidade padrão das emissões (EI) de nitrogênio total (TN), fósforo total (TP) e demanda química de oxigênio (DQO).	China
Falavigna G.; Manello A.; Pavone S.	2013	Função de distância de saída direcional (DODF)	Emissões de poluentes (amônia NHO3)	Italia
Chambers R.G.; Karagiannis G.; Tzouvelekas V.	2014	Índice de Tornqvist; Modelo de custo Translog / Função de custo duplo	prevenção de danos causados por pragas	Grécia
Zhou S.; Konger G.C.G.J.	2014	Índice de produtividade de Malmquist-Luenberger / função de distância direcional	poluição ambiental / Fertilizantes; Resíduos sólidos agrícolas; Criação de gado e aves; Emissões da aquicultura	China
Gaitán-Cremaschi D.; Kamali F.P.; van Evert F.K.; Meuwissen M.P.M.; Oude Lansink A.G.J.M.	2015	Indicador Bennet Total Factor Productivity (TFP) e a Recuperação Total de Preços (TPR)	potencial de aquecimento global, potencial de eutrofização, toxicidade ambiental, toxicidade dos trabalhadores rurais, toxicidade para o consumidor, desmatamento	Brasil
Turčeková N.; Svetlanská T.; Kollár B.; Záhorský T.	2015	Análise envoltória de dados (DEA) e índice de Malmquist	Emissões de gases de efeito estufa (GEE), consumo de fertilizantes	27 UE
Hoang Vincent V.-N.; Wilson C.	2017	Índice de Malmquist	efluentes de nitrogênio e fósforo e emissões de gases de efeito estufa	32 OECD
Xie H.; Zhang Y.; Choi Y.	2018	Modelo de Função de Distância Direcional e Modelo de Índice GML (Modelo Global de Índice de Malmquist-Luenberger)	Emissões de carbono e poluição agrícola de fontes difusas	China
Baldoni E.; Coderoni S.; Esposti R.	2018	Painel considerando PTF tradicional e emissões	emissões de gases de efeito estufa (GEE)	Italia (Lombardia)
Staniszewski J.	2018	Índice de Malmquist e DEA	emissões de gases com efeito de estufa (CO2, N2O, CH4, HFC, PFC, SF6, PF3), em equivalente CO2 (milhões de t); Entrada ambiental: valor absoluto do balanço bruto de nutrientes (kg de nutriente por ha)	27 EU
Le T.L.; Lee P.-P.; Peng K.C.; Chung R.H.	2019	Malmquist e Slacks-Based Measure (SBM-DEA);	Emissões de GEE (CO2 eq)	China, Taiwan, Indonesia, Japan, Malaysia, Philippines, Republic of Korea, Thailand, and Vietnam
Jintau, Z.; Yujiao, Xu; Jihong, Ge.	2019	modelo de análise de fronteira estocástica (SFA)	custo de emissão de carbono	China
K. Hervé Dakpo; Philippe Jeanneaux & Laure Latruffe	2019	Índice Färe-Primont	Emissões de gases de efeito estufa	França
Hou B.; Wang B.; Du M.; Zhang N.	2020	função de distância de direção não radial modificada por peso bienal e indicador de produtividade de Luenberger; Diff n diff	Emissões de SO2	China
Xu X.; Zhang L.; Chen L.; Liu C.	2020	Função de distância direcional SBM (slacks-based measure / SBM-DEA) e índice global de Malmquist-Luenberger (GML)	emissões de N2O no solo	China
Peng J.; Wen L.; Fu L.; Yi M.	2020	Índice Hicks-Moorsteen; análise envoltória de dados (DEA); modelo Tobit do painel	controle da poluição ambiental; uso de fertilizantes; uso de filme plástico; uso de agrotóxicos; Uso de eletricidade rural	China
Li Q.; Wu X.; Zhang Y.; Wang Y.	2020	DEA-SBM; modelo espacial autorregressivo (SAR)	poluição (emissões de carbono)	China
HONG, C; HAOKUN Wang; Qin S.	2020	modelo SBM-Malmquist de supereficiência de três estágios	Pegada hídrica e pegada hídrica cinza	China
Chen Y.; Miao J.; Zhu Z.	2021	Análise Envoltória de Dados (DEA) de três estágios combinado com o modelo Slack-Based Measure (SBM)	Emissões de CO2 e poluição agrícola de fontes difusas (ANSP)	China
Bao B.; Jiang A.; Jin S.; Zhang R.	2021	índice de Malmquist-Luenberger e o modelo de painel autorregressivo espacial (painel SAR)	nitrogênio total (TN) e fósforo total (PT) de fertilizantes químicos e pesticidas	China
Huang W.-H.; Qi C.-J.; Fang G.-Z.; Lei Q.-Y.	2021	Índice de Malmquist-Luenberger e uma abordagem econométrica espacial	Regulação ambiental	China
Bureau, J; Antón, J.	2022	Teoria Econômica dos números-Índice; Fisher, Tornqvist, Malmquist	Poluição e emissões	Diversos
Hamid S.; Wang K.	2022	Indicador de produtividade Luenberger-Hicks-Moorsteen (LHM)	subtecnologias geradoras de poluição	South Asia
Yu Z.; Lin Q.; Huang C.	2022	SBM-DEA	sumidouros de carbono agrícolas, emissões de CO2	China
Staniszewski J.; Kryszak Ł.	2022	Malmquist-Luenberger baseado na análise envoltória de dados (DEA) com função de distância direcional	Emissão de gases com efeito de estufa provenientes da agricultura em equivalente CO2, emissões de amoníaco provenientes da agricultura e consumo de adubos inorgânicos	27 EU countries
Zhang Y.; Wei J.; Wang Y.; Tsai S.-B.	2022	modelo SBM não radial supereficiente.	sumidouro de carbono	China
Sharma S.	2022	Índice de Malmquist (MI), e Análise Envoltória de Dados (SBM-DEA)	Emissões de CO2 e fertilizantes	Afghanistan, Bangladesh, Bhutan, India, Pakistan, and Sri Lanka
Feng L.; Lei G.; Nie Y.	2023	Modelo supereficiente de medida baseada em folga (SBM) e índice de Malmquist-Luenberger (ML)	sumidouro líquido de carbono e emissões de poluição de fontes difusas	China

Ye D.; Zhen S.; Wang W.; Liu Y.	2023	DEA	emissões de carbono de pesticidas, filmes agrícolas, fertilizantes químicos, diesel agrícola, preparo do solo e consumo de eletricidade para irrigação agrícola	China
Hu S.; Lu S.; Zhou H.	2023	Índice Global de Malmquist-Luenberger (GML), método Bootstrap, Modelo SBM-GML Tobit	Poluição de fonte não pontual por demanda química de oxigênio, nitrogênio, fósforo, pesticidas e resíduos de filme de cobertura morta agrícola	China
Staniszewski J.; Guth M.; Smędzik-Ambroży K.	2023	Índice TFP de Malmquist-Luenberger da metafronteira	Intensificação sustentável (IS)	European Union
Jamalimoghaddam E.; Yazdani S.; Farajzadeh Z.; Mahoozi H.	2023	processo de hierarquia analítica (AHP); função de distância Índice de produtividade de Malmquist (MPI), análise envoltória de dados (DEA)	emissões excedentes de fertilizantes nitrogenados e perda de água subterrânea	Iran
Zheng G.; Wang W.; Jiang C.; Jiang F.	2023	Modelo SBM-GML, DEA	consumo de recursos hídricos de irrigação, poluição por fertilizantes agrícolas, emissões de carbono de resíduos sólidos.	China
Lu Y.-X.; Wang S.-T.; Yao G.-X.; Xu J.	2023	Análise Envoltória de Dados (DEA) com o modelo de Banker, Charnes e Cooper (BCC) e índice de Malmquist.	custos de poluição ambiental (taxas de uso para a quantidade de nitrogênio e fósforo descarregada durante o processo de cultivo de hortaliças)	China
Shen Z.; Kerstens K.; Baležentis T.	2023	Indicador TFP Luenberger-Hicks-Moorsteen (LHM), funções de distância direcional	saídas indesejáveis	OECD
Zhang N.; Sun F.; Hu Y.	2024	modelo SBM-DEA de três estágios e método de análise de fronteira estocástica (SFA).	emissões de carbono	China
Yongsheng Y.; Zhang D.; Wang X.	2024	SBM e índice de Malmquist-Luenberger	Emissões de carbono, poluição da água, nutrientes do solo	China
Baráth L.; Fertő I.	2024	Modelo de fronteira de produção estocástica de parâmetros aleatórios; Função dose-resposta	grau de ecologização	EU
Wen C.; Hu B.; Sun Y.; Xiao Y.	2024	Análise Envoltória de Dados (DEA), função de distância de fragmento, índice de produtividade de Malmquist, função de distância direcional, índice de produtividade de Malmquist-Luenberger	energia hidrelétrica, fatores de poluição de fontes difusas na agricultura e emissões agrícolas	China
Spolador H.F.S.; Danelon A.F.	2024	Fronteira de produção estocástica, Função Translog	variáveis climáticas e índice de aptidão do solo	Brasil
Ma Y.; Brümmer B.; Yu X.	2024	Função SNF (função de fronteira de nutrientes translog)	potencial de poluição denotado pelo balanço de nutrientes	China
Cobourn, K.; Anton, J.	2024	ESPI - índice de produtividade ambientalmente sustentável, Teoria econômica números-índice	Emissões de gases de efeito estufa e excedentes de nutrientes	OCDE

Fonte: Elaboração própria com base nos resultados da revisão sistemática de literatura

A revisão de literatura realizada, apontou que os estudos que consideram algum tipo de externalidade ambiental no cálculo de indicadores de produtividade total dos fatores, são relativamente recentes na literatura. O primeiro estudo, de Erie Oskam, data de 1991 e trata da poluição via nitrato, fosfato, amônia e potássio no solo, no cômputo da PTF na Holanda. O ritmo de publicação seguiu baixo até 2014, quando o volume se eleva, passando de duas publicações, para 8 no ano de 2023. Até o momento da realização da presente pesquisa, em 28 de junho de 2024, 6 artigos já haviam sido publicados em periódicos internacionais, evidenciando a atenção que o tema vem ganhando nos últimos tempos.

Grande parte dos estudos selecionados tem a China como origem da publicação e como local de análise. Dos 48 artigos, 23 (48%) abordam a China ou províncias chinesas. Esse volume é maior que o dobro da segunda região mais analisada, países da OCDE, com 10 estudos, o que representa 21% do total selecionado. Brasil, Itália e o Sul asiático aparecem na sequência, sendo foco de 2 estudos, cada. França, Estados Unidos, Grécia, Iran, Holanda, Nigéria, Reino Unido e Espanha, apresentam um estudo, cada.

3.1 Metodologias de mensuração da PTF Ambiental

A mensuração da Produtividade Total dos Fatores (PTF) na agricultura pode ser realizada utilizando métodos paramétricos e não paramétricos. Cada abordagem tem suas vantagens e limitações, dependendo dos objetivos específicos da análise e dos dados disponíveis. Os métodos paramétricos utilizam uma forma funcional específica para modelar a relação entre inputs e outputs. Eles assumem uma estrutura específica para a função de

produção e utilizam técnicas econométricas para estimar os parâmetros dessa função. Já os métodos não paramétricos não assumem uma forma funcional específica para a relação entre inputs e outputs. Em vez disso, utilizam técnicas para medir a eficiência e a produtividade diretamente a partir dos dados.

3.1.1 Abordagens Paramétricas

As abordagens paramétricas utilizadas nos estudos selecionados pela revisão sistemática de literatura envolvem a especificação de uma Fronteira Estocástica ou determinística de Produção (SFA) que partem da determinação de uma forma funcional de produção, que relaciona inputs e outputs, e subsequente estimação dos parâmetros dessa função utilizando métodos econométricos.

Uma fronteira estocástica de produção representa a eficiência da utilização de fatores produtivos na produção agrícola, considerando tanto a influência de fatores produtivos quanto a aleatoriedade. Essa abordagem estima uma fronteira de produção máxima, baseada numa função de produção específica e na quantidade de insumos disponíveis (como fertilizantes ou minerais do solo), e avalia o quanto os agricultores estão próximos de alcançar essa fronteira ideal, levando em conta a variação causada por fatores estocásticos (aleatórios), como condições climáticas e variações no manejo (Ma; Brummer; Yu, 2024).

As abordagens mais comuns incluem a Função de Produção Cobb-Douglas, Função do tipo Translog e estimação através do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS) ou Verossimilhança, assumindo distribuições para os componentes do termo de erro composto.

A função de produção translog (transcendental logarithmic) é uma forma funcional flexível que pode ser utilizada para calcular a Produtividade Total dos Fatores (PTF) na agricultura, incluindo externalidades ambientais ou "*bad outputs*" (outputs indesejáveis, como poluição). Ela é uma extensão da função Cobb-Douglas¹, permitindo substitutibilidade variável entre inputs e outputs.

A PTF pode ser calculada utilizando os resíduos da função de produção translog, que representam a parte da variação na produção não explicada pelos *inputs*, *bad outputs* e *bad outputs*. Portanto, a PTF é dada pela $\exp(\epsilon)$ sendo ϵ o termo de erro da regressão, representando a eficiência total não capturada pelos *inputs* e *bad outputs*.

Como mencionado, a função translog é uma variação da função de produção Cobb-Douglas. Sua escolha depende do contexto e dos objetivos da análise. A Cobb-Douglas é mais simples e fácil de estimar, mas menos flexível, sendo útil em análises iniciais e situações em que a tecnologia de produção pode ser razoavelmente bem representada por uma função com elasticidade de substituição constante. A translog, por outro lado, oferece maior flexibilidade e capacidade de modelar interações complexas, sendo mais adequada para análises detalhadas e realistas da produtividade, especialmente quando se considera a inclusão de externalidades ambientais.

3.1.2 Abordagens Não Paramétricas

As abordagens não paramétricas não assumem uma forma funcional específica para a relação entre inputs e outputs, não utilizam inferência estatísticas, medidas de tendência central, teste de coeficientes ou formalização de análises de regressão (Ferreira; Gomes, 2020). Em vez disso, elas utilizam técnicas de envoltória de dados, funções de distância direcional e números índices para medir a produtividade. As técnicas mais comuns são a Análise Envoltória de Dados (DEA) e suas extensões Slack-Based (SBM-DEA) e Função de Distância de Produto

¹ A função de produção Cobb-Douglas, modela a relação entre produção e os fatores de produção. É utilizada em economia devido à sua simplicidade, facilidade de estimação econométrica e capacidade de capturar retornos à escala e substitutibilidade constante entre inputs.

Direcional (DODF), que também podem ser estimada via OLS, assumindo formas funcionais específicas, Índice de Malmquist, sua extensão Malmquist-Luenberger, Índice de Tornqvist e sua extensão Tornqvist-Theil, Índice de Hicks-Moorsteen e sua extensão Luenberger-Hicks-Moorsteen.

A Análise Envoltória de Dados (DEA) é uma técnica não paramétrica utilizada para medir a eficiência relativa de unidades de decisão (DMUs) que utilizam múltiplos inputs para produzir múltiplos outputs. Essa técnica permite a modelagem da tecnologia de produção e seus resultados são utilizados em números índices, como Malmquist para a mensuração da PTF. A DEA constrói uma fronteira de eficiência a partir dos dados das DMUs mais eficientes e compara todas as DMUs a essa fronteira. As DMUs eficientes formam essa fronteira, e as DMUs ineficientes são comparadas a ela.

A eficiência técnica é obtida como uma medida de eficiência relativa de uma DMU em comparação com a fronteira de eficiência. Uma DMU eficiente tem um escore de eficiência igual a 1 (ou 100%), enquanto uma DMU ineficiente tem um escore inferior a 1. Os modelos podem ser avaliados em relação aos insumos ou em relação ao produto. Também se diferem quanto à escala de produção. Existem dois modelos principais de DEA, o primeiro, denominado CCR (Charnes, Cooper, Rhodes), que assume retornos constantes à escala (CRS), o segundo, denominado BCC (Banker, Charnes, Cooper), considera retornos variáveis à escala (VRS). A Slack-Based Measure (SBM) é uma extensão da Análise Envoltória de Dados (DEA) que incorpora diretamente os slacks (ou folgas) nas variáveis de input e output na medida de eficiência. Os modelos tradicionais de DEA, ignoram essas folgas ao calcular a eficiência, o SBM-DEA considera explicitamente esses valores, oferecendo uma avaliação mais precisa da eficiência técnica.

Em um modelo DEA, a eficiência técnica é calculada considerando a proporção dos inputs usados para produzir um certo nível de outputs. No entanto, uma DMU pode ser ineficiente não só porque usa muitos inputs ou produz poucos outputs em relação à fronteira de eficiência, mas também devido a excessos específicos em certos inputs (folgas nos inputs) ou déficits em certos outputs (folgas nos outputs). Destarte, as folgas (slacks) nos inputs e outputs são medidas detalhadas de ineficiências específicas em cada input e output. Identificar essas folgas ajuda a entender onde exatamente uma DMU pode melhorar.

Outra extensão da DEA é a versão denominada Superefficient Nonradial Slack-Based Measure (SBM) Model. O modelo é usado para medir a eficiência de unidades produtivas levando em consideração a eficiência técnica sem assumir a proporcionalidade entre inputs e outputs. O termo "não radial" significa que o modelo não exige que os inputs ou outputs mudem de forma proporcional. Em vez disso, o SBM considera as ineficiências individuais em cada input ou output separadamente. Assim, ele permite que alguns inputs ou outputs tenham maior ineficiência do que outros, resultando em uma medida mais flexível e detalhada de eficiência.

A Função de Distância de Produto Direcional (DODF - Directional Output Distance Function) é uma representação funcional da tecnologia multi-produto e multi-insumo subjacente. Ela pode ser calculada tanto por DEA quanto estimada por econometria. Ela permite avaliar a eficiência considerando direções específicas para aumentar os outputs desejáveis e/ou reduzir os outputs indesejáveis. Essa metodologia é útil para análises que envolvem eficiência ambiental, onde se deseja simultaneamente maximizar a produção de produtos desejáveis e minimizar os impactos ambientais.

Matematicamente a DODF pode ser definida como:

$$D_O^-(x, y, b; g_y, g_b) = \inf \{ \beta : (y + \beta g_y, b - \beta g_b) \in P(x) \}$$

Onde x são os inputs, y são os good outputs, b são os bad outputs, g_y é o vetor de direção para aumentar os good outputs, g_b é o vetor de direção para reduzir os bad outputs, β é o escalar que indica a magnitude da mudança necessária nos good outputs e bad outputs ao longo das

direções especificadas, e $P(x)$ é o conjunto de produção, representando as combinações possíveis de inputs e outputs que são tecnologicamente viáveis.

A função mede o quão longe uma DMU pode mover seus good outputs e bad outputs na direção desejada, mantendo seus inputs constantes. Assim, Se $\beta = 1$ a DMU é tecnicamente eficiente na direção especificada. Um valor $\beta < 1$ significa que a DMU pode aumentar seus good outputs ou reduzir seus bad outputs para se tornar mais eficiente. Assim, a DODF permite uma análise mais flexível e direcionada da eficiência, especialmente em contextos cujo objetivo é tanto maximizar a produção quanto minimizar os impactos ambientais.

O índice de Malmquist é uma medida amplamente utilizada na análise de produtividade e eficiência técnica, especialmente em estudos econômicos e operacionais. Ele mede a variação da produtividade de uma unidade produtiva ao longo do tempo, levando em conta inputs e outputs. Ao contrário de outros índices de produtividade, como o Tornqvist ou Fisher, o índice de Malmquist é baseado em fronteiras de produção e utiliza a DEA para comparar a eficiência técnica.

O índice de Malmquist mede a variação na produtividade total dos fatores (PTF) entre dois períodos, comparando a distância dos pontos de produção observados em cada período em relação a uma fronteira de produção. A fronteira de produção representa o nível máximo de output que pode ser alcançado com um determinado nível de input, assumindo uma eficiência técnica ideal.

Matematicamente, o Índice de Malmquist tradicional pode ser representado como:

$$M = \left(\frac{D_t(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_t(x_t, y_t)} \times \frac{D_{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_{t+1}(x_t, y_t)} \right)^{1/2}$$

Sendo $D_t(x_t, y_t)$ a função de distância no tempo t , que mede a eficiência do conjunto de inputs x_t para produzir o output y_t , em relação à fronteira de produção no período t . $D_t(x_{t+1}, y_{t+1})$ é a função de distância no tempo t , mas avaliada para os inputs e outputs do período $t + 1$. $D_{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})$ e $D_{t+1}(x_t, y_t)$ são as funções de distância avaliadas no período $t + 1$. O índice mede a variação relativa da eficiência entre os períodos t e $t + 1$.

O índice de Malmquist fornece uma medida de como a produtividade mudou entre dois períodos. Ele pode ser decomposto em dois componentes principais, i) mudança na eficiência técnica, e ii) mudança tecnológica. O primeiro mede como uma unidade produtiva se aproxima ou se afasta da fronteira de eficiência ao longo do tempo. Se a produtividade aumenta porque ela está operando mais perto da fronteira, há um ganho de eficiência técnica. O segundo avalia a mudança da própria fronteira de produção ao longo do tempo, ou seja, melhorias tecnológicas que permitem que mais outputs sejam produzidos com os mesmos inputs. Se a fronteira de produção se expande, isso indica progresso tecnológico.

Uma característica do índice de Malmquist é que a produtividade pode ser medida sem a necessidade de preços de inputs e outputs, o que o torna especialmente útil em casos em que essas informações não estão disponíveis ou são difíceis de estimar. Ao incluir *bad outputs* no modelo, a função de distância usada no cálculo do índice de Malmquist é ajustada para refletir os impactos ambientais. Isso significa que uma unidade de produção que consiga reduzir seus *bad outputs* sem comprometer sua produção de *outputs* desejados pode ser vista como mais produtiva do ponto de vista ambiental.

O índice de Tornqvist é um índice utilizado para medir variações em quantidades ou preços, baseado em médias ponderadas logarítmicas. É amplamente aplicado em análises de produtividade e crescimento econômico, especialmente na medição da Produtividade Total dos Fatores (PTF), pois oferece flexibilidade e rigor na agregação de múltiplos insumos e produtos. Ele pode ser visto como uma aproximação de um índice de Fisher e tem a vantagem de ser mais simples de calcular e interpretar.

Na PTF Ambiental, o índice de Tornqvist pode ser utilizado para incluir tanto outputs positivos quanto negativos, como poluição, resíduos ou outros impactos ambientais. Os outputs

negativos são considerados como subprodutos indesejados da produção. Eles são incluídos de maneira análoga aos outputs positivos, porém, com pesos negativos, pois são fatores que reduzem a eficiência e a produtividade. Esses pesos negativos refletem o impacto ambiental, considerando o custo ou o dano causado por essas externalidades.

Matematicamente o índice de Tornqvist pode ser definido como:

$$\text{Ln } TQ = \sum_i s_i \ln \frac{Q_i^t}{Q_i^{t-1}}$$

Onde TQ é o índice de Tornqvist, s_i é a média dos pesos (participações relativas) dos insumos ou produtos no tempo t e $t - 1$, Q_i^t e Q_i^{t-1} são as quantidades ou valores dos insumos ou produtos no tempo t e $t - 1$, e a soma é feita sobre todos os insumos ou produtos considerados. Desta forma o índice mede como esses fatores mudam entre dois períodos e, assim, quantifica a variação na Produtividade Total dos Fatores (PTF), levando em consideração os efeitos dos bad inputs e outputs.

Uma variação do índice de Tornqvist é o índice de Tornqvist-Theil. Também utilizado para medir variações de produtividade e crescimento econômico. Ambos os índices compartilham uma base logarítmica, utilizando médias ponderadas logarítmicas das quantidades e preços dos inputs e outputs. Ele pode ser adaptado para calcular a PTF ambiental, considerando outputs positivos e negativos. Os negativos ou não desejados têm um impacto negativo na produtividade. Para refletir isso, seus coeficientes são considerados negativos, ou seja, a geração de bad outputs diminui a eficiência da produção. Isso significa que, se a unidade produtiva reduz a quantidade de bad outputs, a PTF ambiental aumentará.

O Índice de Produtividade Färe–Primont é uma medida de produtividade que foi desenvolvida para permitir comparações temporais e multilaterais de produtividade total dos fatores (PTF). Ele permite a avaliação da eficiência técnica e de outros aspectos como mudanças tecnológicas e eficiência de escala. O cálculo do índice Färe–Primont baseia-se em métodos não paramétricos como a Análise Envolvente de Dados (DEA), que constrói uma fronteira de eficiência a partir dos dados observados sem pressupor uma forma funcional específica.

Matematicamente, seguindo Dakpo *et al.*, (2019), o Índice de Produtividade Färe–Primont Ajustado para Poluição é definido como a razão entre a quantidade agregada de outputs desejados e a quantidade agregada de inputs, considerando também os outputs indesejáveis. Em seguida utiliza-se funções de distância para os insumos e produtos ambientais. A fórmula é dada por:

$$\text{GFP } P_{t,t+1}^n = \frac{D_O(x_0, y_{t+1}^n, b_0, t_0) \times D_I(x_t^n, y_0, b_t^n, t_0)}{D_O(x_0, y_t^n, b_0, t_0) \times D_I(x_{t+1}^n, y_0, b_{t+1}^n, t_0)}$$

Sendo, D_O e D_I funções de distância dos outputs e inputs, x_0 , y_0 e b_0 representam uma unidade representativa de decisão, e x_t^n , y_t^n e b_t^n são os valores observados dos inputs, outputs desejados e outputs indesejados para a unidade n no período t .

No artigo de Dakpo *et al.*, (2019), o índice de produtividade Färe–Primont tradicional foi estendido para incluir poluição via GEE. O estudo mostrou que, ao incluir as emissões de gases de efeito estufa na análise, houve uma diminuição na Produtividade Total dos Fatores em comparação com a PTF tradicional que não considerava esses fatores.

3.1.2.1 Environmentally Sustainable Productivity Index (ESPI)

O Environmentally Sustainable Productivity Index (ESPI) é um índice desenvolvido para medir a produtividade ambientalmente sustentável. Ele foi proposto no documento da OCDE (Cobourn; Anton, 2024) e segue metodologia desenvolvida por O'Donnell (2022) que propõe uma alternativa que satisfaz alguns axiomas que não são respeitados pelos índices de Fisher e Törnqvist. O ESPI utiliza métodos como o índice Lowe e índices baseados em DEA, que respeitam os critérios de transitividade, proporcionalidade e comensurabilidade, garantindo

uma medição mais robusta e coerente da produtividade sustentável. O indicador integra aspectos ambientais, como externalidades negativas.

Os axiomas² analisados em O'Donnell (2022) são um conjunto de propriedades desejáveis em que as medidas de produtividade devam respeitar para serem consideradas teoricamente robustas e consistentes. Eles foram desenvolvidos por Christopher O'Donnell para garantir que as medidas de produtividade sigam uma lógica coerente e sejam úteis para a análise econômica.

Os axiomas apontados por O'Donnell (2022), como fundamentais para a construção de indicadores de produtividade são: i) Axioma da Invariância Escalar, em que medidas de produtividade e eficiência devem ser invariantes a mudanças nas unidades de medida dos inputs e outputs; ii) Axioma da Monotonicidade, consiste na exigência de que a produtividade aumente quando os inputs diminuem, mantendo os outputs constantes, ou quando os outputs aumentam, mantendo os inputs constantes; iii) Axioma da Admissibilidade, em que as medidas de produtividade e eficiência devem ser baseadas em comparações de unidades de produção em relação a uma fronteira de produção, que representa o nível máximo de produção possível dado um conjunto de inputs; iv) Axioma da Transitividade, cuja transitividade é uma propriedade que permite comparações consistentes entre múltiplas unidades de produção. Se a unidade A é mais produtiva que a unidade B, e a unidade B é mais produtiva que a unidade C, então a unidade A deve ser mais produtiva que a unidade C; v) Axioma da Variabilidade Tecnológica, que sugere que qualquer mudança tecnológica que afete a fronteira de produção, por exemplo, inovação ou adoção de novas tecnologias, deve ser refletida nas medidas de produtividade ao longo do tempo; vi) Axioma da Adição, implica que a produtividade total de uma economia ou setor deve ser a soma das produtividades individuais das empresas ou unidades de produção; vii) Axioma da Parcialidade, em que as medidas de produtividade devem ser capazes de distinguir entre diferentes fontes de variação na produtividade, como mudanças na eficiência técnica, mudanças na escala de produção ou inovações tecnológicas.

Esses axiomas são essenciais para garantir que as medidas de produtividade sejam consistentes, lógicas e úteis para a análise prática. Eles são particularmente relevantes em abordagens que buscam medir produtividade em contextos complexos, como com a inclusão de externalidades ambientais ou mudanças tecnológicas.

O ESPI proposto pelo documento interno da OCDE (Cobourn; Anton, 2024) considera os axiomas. Ele é baseado em uma fórmula que compara a produtividade de diferentes países ou períodos de tempo, utilizando tanto outputs desejáveis quanto outputs negativos, caracterizados como externalidades ambientais negativas e inputs. O índice inclui um parâmetro, denotado por α , que reflete as preferências dos tomadores de decisão em relação à importância de reduzir os outputs negativos. O parâmetro pode variar entre 0, ignorando totalmente os impactos ambientais, e 1, focando totalmente na minimização dos impactos ambientais.

A determinação do índice segue O'Donnell (2022). Define-se um índice comparando a PTF do país i no período t com a do país k no período s como:

$$ESPI(x_{ks}g_{ks}b_{ks}x_{it}g_{it}b_{it}) = \frac{GI(g_{ks}, g_{it})^{1-\alpha} BI(b_{ks}, b_{it})^{\alpha}}{XI(x_{ks}, x_{it})}$$

onde g_{it} e g_{ks} são vetores de produtos desejáveis; x_{it} e x_{ks} são vetores de entradas; e $GI(\cdot)$ e $XI(\cdot)$ representam índices de saídas e entradas desejáveis, respectivamente. $BI(b_{ks}, b_{it})$ compara os volumes de bad outputs produzidas pelo país i no período t com os da empresa k no período s , onde b_{it} e b_{ks} são vetores de bad outputs. Na maioria das vezes, esses bad outputs

² Os axiomas são matematicamente definidos no Quadro A1 na seção Anexo I.

não são comercializados e, para fins desta análise, refletem externalidades ambientais negativas.

O parâmetro $\alpha \in [0,1]$ mede até que ponto os tomadores de decisão consideram bad outputs. Em um extremo, um valor de $\alpha=0$ corresponde a um tomador de decisão que ignora bad outputs. No outro extremo, um valor de $\alpha=1$ corresponde a um tomador de decisão que ignora good outputs, de modo que o índice se torna uma medida de mudança nos aspectos da produção que o tomador de decisão deseja minimizar, ou seja, o uso de insumos e a produção de bad outputs (Cobourn; Anton, 2024).

Os índices $GI(\cdot)$ e $XI(\cdot)$ satisfazem os axiomas de proporcionalidade, transitividade, monotonicidade fraca, homogeneidade tipo I, homogeneidade tipo II, e Inversão tempo-espaço, o que permite comparações confiáveis da mudança de produtividade entre países e ao longo do tempo, segundo O'Donnell (2022) (Cobourn; Anton, 2024).

3.2 Variáveis Ambientais

A produção agropecuária ambientalmente sustentável deve levar em consideração a minimização do uso de insumos e danos ambientais. Não obstante, o objetivo dos índices de sustentabilidade é medir a produtividade de tal forma que, se os insumos e a produção ou good outputs permanecerem inalterados, as medidas de produtividade aumentarão à medida que os resultados bad outputs caírem. Os índices apresentados na seção anterior procuram relacionar a quantidade de produto, também mensurado na forma de PIB ou de externalidades negativas, como emissões de GEE, com quantidades de insumos, mensurados na forma de capital, trabalho, terra e também recursos naturais, como qualidade da água e do ar. Portanto, as externalidades ambientais são utilizadas tanto como insumos quanto produtos nas diversas abordagens. Ressalta-se que os bad outputs geram externalidades. Mas a tecnologia modelada só abarca as quantidades físicas dos bad outputs, não as externalidades geradas que são medidas em bem-estar. A seguir são apresentados as externalidades ambientais utilizadas pela bibliografia selecionada.

Os estudos analisam as emissões de GEE de diferentes formas, variando os gases considerados, as fontes de emissão e sua classificação como insumo ou produto nos modelos de produtividade. Entre os gases analisados estão SO_2 , CO_2 , N_2O , CH_4 , HFC, PFC, SF_6 , PF_3 e CO_2 equivalente. Como insumos, são considerados os custos de emissão de carbono. Como bad outputs, as emissões decorrem do processo produtivo, incluindo fontes difusas como fertilizantes, pesticidas, diesel agrícola e eletricidade para irrigação. Além disso, os estudos consideram os sumidouros de carbono agrícola, processos que removem CO_2 da atmosfera e o armazenam no solo e na vegetação.

Dentre a literatura selecionada, diferentes abordagens levaram em consideração as emissões. Chen e Liu (2012) que utilizaram variáveis como emissões de nitrogênio total (TN), fósforo total (TP) e demanda química de oxigênio para medir a intensidade de poluentes agrícolas. Falavigna et al. (2013) incorporaram bad outputs (como amônia gerada por fertilizantes nitrogenados) por meio da Função de Distância Direcional de Saída (DODF). Turčeková et al. (2015) avaliaram a eficiência ambiental agrícola nos países da União Europeia, minimizando emissões de CO_2 equivalente enquanto maximizavam a produção agrícola. Xie et al. (2018) modelaram as emissões de carbono e a poluição agrícola de fontes difusas como bad outputs, minimizando-as enquanto maximizavam a produção de grãos na China. Zhang (2022) incorporou emissões e sumidouros de carbono na Produtividade Total dos Fatores Verdes (GTFP), ajustando a medição da produtividade para refletir a absorção de CO_2 pelo ecossistema agrícola.

Considerando a poluição por nutrientes de fertilizantes, pesticidas e resíduos, Zheng (2023) mensurou resíduos agrícolas (palha de arroz, trigo, milho, feijão e batatas) como bad outputs, considerando seus impactos em Demanda Química de Oxigênio (DQO), Nitrogênio

Total (TN) e Fósforo Total (TP), que resultam da decomposição dos resíduos no solo, contribuindo para a poluição ambiental. Yi-Xuan Lu et al. (2023) converteram emissões de nitrogênio e fósforo em custos de uso pagos por tonelada de poluentes, refletindo o impacto ambiental da produção agrícola. Jamalimoghaddam et al. (2023) modelaram o excesso de fertilizantes nitrogenados e perda de água subterrânea como indicadores de sustentabilidade ambiental, incluindo emissões de N_2O como bad outputs.

Peng et al. (2020) consideraram variáveis como controle da poluição ambiental, uso de fertilizantes, filmes plásticos e pesticidas como inputs ambientais na produtividade da terra cultivada. Chen, Wang e Qin (2020) utilizaram a pegada hídrica como métrica para avaliar a eficiência da irrigação e o impacto ambiental do uso da água. Oskam (1991) ajustou medidas de produtividade agrícola subtraindo impactos ambientais mensurados por preços sombra de diferentes poluentes, oferecendo uma avaliação mais realista da produtividade. Staniszewski (2018) utilizou o Balanço Bruto de Nutrientes (GNB) como indicador da qualidade do solo, avaliando desequilíbrios de nitrogênio e fósforo.

Alguns estudos utilizam o conceito de Intensificação Sustentável (SI) para tratar das externalidades ambientais nos indicadores de eficiência produtiva na agricultura. A SI aborda o aumento da produtividade de recursos no setor agrícola sem prejudicar o meio ambiente. Essa definição abrange a produção de resultados agrícolas com o uso de menos recursos, procurando minimizar os impactos ambientais negativos.

No artigo de Staniszewski et al. (2023), a intensificação sustentável (SI) é utilizada como um conjunto de variáveis ambientais que incluem o uso eficiente de recursos, como água, terra e energia, além de fatores como a redução de emissões de gases de efeito estufa e poluentes relacionados à agricultura. Essas variáveis foram utilizadas no Índice de Produtividade Total dos Fatores Metafronteira Malmquist-Luenberger (MML), que mede a eficiência produtiva considerando a expansão de outputs desejáveis (produção agrícola) e a redução de outputs indesejáveis (poluição e uso excessivo de recursos naturais), e foram tratadas como proxies para medir os impactos ambientais e sociais da agricultura sustentável.

Já Baráth e Fertő (2024) aplicaram o conceito de ecologização como variável contínua, modelando o impacto de práticas ecológicas na produtividade agrícola por meio da Fronteira de Produção Estocástica e uma função dose-resposta procurando captar como diferentes níveis de práticas ecológicas afetam a produtividade total dos fatores (TFP) das fazendas.

4. Discussão - Considerações sobre as distintas abordagens metodológicas

As metodologias apresentadas abordam o cálculo da PTF ambiental de forma distinta. Sua escolha depende das informações disponíveis sobre o tema analisado, que perpassam a disponibilidade, tamanho e estrutura dos dados; a possibilidade de especificar uma função de produção e a relação técnica entre os inputs, outputs e externalidades ambientais; a flexibilidade de interpretação dos resultados; a forma de modelar a externalidade ambiental; e por fim, a presença de ruído nos dados.

Segundo o manual “Agricultural Total Factor Productivity and the Environment” da OCDE de Bureau e Anton (2022), os índices de Laspeyres, Paasche, Fisher e Törnqvist são os mais utilizados. Eles seguem uma abordagem axiomática, sendo compostos por fórmulas matemáticas com algumas propriedades desejáveis. Os índices de Laspeyres e Paasche agregam quantidades usando preços base versus preços do período atual, respectivamente. O índice de Fisher toma a média geométrica dos índices de Laspeyres e Paasche, enquanto o índice de Törnqvist pondera essa média geométrica pelas parcelas de componentes de quantidade individuais, ou seja, ele leva em consideração o peso relativo de cada componente na composição total de quantidades, tanto no período base quanto no período atual, ao calcular a média geométrica (Bureau; Anton, 2022).

Ainda de acordo com Bureau e Anton (2022), a PTF ambiental é mensurada sobretudo pela teoria econômica dos números índices, a qual parte de uma representação rigorosa do comportamento do produtor. Essa teoria favorece o uso de índices de Fisher ou Törnqvist que são consistentes com as representações gerais da tecnologia. Eles são chamados de índices "superlativos", pois podem ser derivados de formas "flexíveis" gerais. Segundo o manual *Agricultural Total Factor Productivity and the Environment* da OCDE, especialistas que avaliaram procedimentos para medir a PTF recomendam o uso de índices de Fisher ou Törnqvist.

Outra forma de mensuração, através da função de distância, possibilita uma estrutura mais geral, pois resume toda a tecnologia por um único parâmetro, que mede a expansão radial das saídas possíveis sob as restrições da tecnologia, para um determinado conjunto de entradas. As funções de distância permitem medir a distância de uma determinada unidade de produção ou país da fronteira tecnológica. Os índices de Malmquist, que são baseados em funções de distância, fornecem uma estrutura muito geral. Não há, por exemplo, nenhuma suposição necessária sobre retornos de escala. Teoricamente, não há necessidade de dados sobre preços, embora, na prática, se quisermos prescindir deles, tenhamos de estimar a função de distância, o que levanta outros problemas e constitui claramente um obstáculo a uma utilização rotineira desta abordagem por parte das agências de estatística (Bureau; Anton, 2022).

O índice de Malmquist é particularmente adequado para a inclusão de bens não mercantis, como a poluição, nos índices de produtividade. Se os preços estão disponíveis e os produtores são considerados racionais, a abordagem de Malmquist também se resume aos índices de Fisher e Törnqvist, que fornecem mais justificativas para o uso empírico deste último (Bureau; Anton, 2022).

Essas abordagens não paramétricas não impõem uma forma funcional específica à fronteira de produção, o que permite que variáveis ambientais, como emissões de poluentes ou degradação de recursos naturais, sejam incorporados sem a necessidade de especificar como eles afetam a produção. Tanto o DEA quanto o Índice de Malmquist podem incorporar múltiplos inputs e outputs (incluindo outputs indesejados), sendo úteis para medir a eficiência ambiental de maneira multidimensional. Contudo tais abordagens apresentam algumas ressalvas, como a sensibilidade ao ruído nos dados e ausência de erros estocásticos. Abordagens paramétricas são úteis quando existem suposições fortes sobre a relação técnica entre inputs, outputs e fatores ambientais, e sendo ela possível de ser explicitamente modelada na função de produção.

A estrutura de dados também é relevante para determinar a escolha do método. Abordagens não paramétricas podem ser utilizadas em conjunto menores de dados, e dados heterogêneos, ao passo que abordagens paramétricas são adequadas para análises que envolvem dados suficientes para estimar parâmetros da função de produção, ou seja, pequenas amostras podem não ser suficientes.

Se houver variabilidade elevada ou erros de medição nas variáveis ambientais, como emissões de poluentes, isso pode distorcer as estimativas de produtividade e eficiência. Diferente de abordagens paramétricas, o DEA e o Malmquist não permitem separar o impacto de ineficiências técnicas de choques aleatórios, o que pode ser uma desvantagem na presença de variáveis ambientais que possam ser altamente voláteis ou incertas (Shaik; Perrin, 1999; Lahouel *et al.*, 2021).

O Índice de Malmquist mede mudanças na fronteira de produção de um período para outro, mas não distingue adequadamente as tecnologias que afetam tanto a produtividade quanto a sustentabilidade ambiental. Ele simplesmente ajusta a fronteira com base nos dados observados e assume que todas as inovações são igualmente adotadas por todas as unidades produtivas. Isso faz com que inovações que reduzem externalidades possam não ser

incorporadas corretamente, especialmente se apenas um subconjunto de unidades de produção as adota, levando a uma subestimação do impacto das inovações tecnológicas que são implementadas progressivamente (Shaik; Perrin, 1999; Balk, 2001).

As distintas metodologias respeitam de forma diferente os axiomas elencados por O'Donnell (2022) como relevantes para a correta comparação de indicadores entre países ao longo do tempo. Tais axiomas fornecem uma estrutura teórica para garantir que as medidas de produtividade atendam a certas propriedades desejáveis. As metodologias tradicionais, apresentadas aqui, amplamente utilizadas por economistas e agências estatísticas, frequentemente produzem números inconsistentes com a teoria de mensuração.

O'Donnell (2022) argumenta que os índices de produtividade devem ser construídos de maneira a aumentar conforme os outputs indesejados diminuem, mantendo constantes os inputs e outputs bons. Não obstante, o uso de pesos e a integração de abordagens estatísticas, como métodos bayesianos, seriam úteis na construção de índices mais robustos. Contudo, a escolha de pesos ou parâmetros, como os que medem a contribuição dos outputs ruins é uma questão de gosto político ou preferências sociais e que a estimativa desses parâmetros deveria ser feita com cautela.

Ainda segundo O'Donnell (2022) os índices de produtividade de Malmquist, exceto em casos especiais, como homoteticidade e retornos constantes de escala, não são capazes de satisfazer o axioma de transitividade e também enfrentam problemas em satisfazer o axioma de proporcionalidade, que afirma que a relação entre os índices de produtividade deve refletir proporcionalmente as variações nos insumos e produtos. Em relação aos índices de Fisher e Törnqvist, há violação dos axiomas de transitividade e proporcionalidade, cruciais para comparações consistentes entre diferentes períodos e países, fornecendo resultados inconsistentes, via atribuição de valores diferentes a cenários com volumes de produção idênticos, comprometendo a interpretação correta do indicador.

Em resumo, as abordagens não paramétricas oferecem uma maneira flexível e adaptável de incorporar variáveis ambientais ao cálculo da PTF ambiental, mas também têm limitações, como a sensibilidade ao ruído nos dados, a ausência de tratamento para erros estocásticos e, dependendo da forma que for estruturada, compatibilidade parcial com os axiomas de O'Donnell (2022). As abordagens paramétricas são mais eficientes quando se tem uma forma funcional clara das relações entre inputs, outputs e externalidades ambientais.

A partir da avaliação das distintas abordagens, verifica-se ainda a necessidade da ampliação da discussão sobre como a sustentabilidade é abordada e como trabalhar as especificidades produtivas regionais, no contexto da elaboração de indicadores utilizados para comparar o desempenho entre os países. De forma sucinta, há algumas características que demarcam as especificidades do clima temperado e tropical, que acabam por influenciar o desempenho da agricultura nessas regiões, e não obstante, por consequência afetam também o meio ambiente, como exemplo a possibilidade de dupla ou tripla safra. Essas especificidades dificultam a análise comparativa e a elaboração de indicadores de sustentabilidade “universais”, que objetivam classificar regiões e países.

Nas regiões temperadas, a variação climática anual é relativamente estável, com estações do ano bem definidas. A variação pluviométrica anual é consideravelmente mais uniforme. Há um fotoperíodo mais longo e as temperaturas noturnas são mais amenas. As condições de solo são mais favoráveis, sobretudo pelo fato de haver menor compactação, dado o repouso no período do inverno. As dificuldades residem na temperatura baixa do solo e na presença moderada de fungos e infestação de ervas daninhas. A agricultura tropical, em contrapartida, apresenta variação climática e pluviométrica menos previsível, dias mais curtos durante o fotoperíodo, temperaturas noturnas mais elevadas e condições de solo mais adversas.

Há um considerável período de semeadura, vários meses. A maior biodiversidade no solo contribui para a maior infestação de pragas e insetos (Pasterniani, 1990; Gomes, 2011).

Portanto, essas distintas características evidenciam a heterogeneidade produtiva na agricultura, que por sua vez implica na utilização de diferentes fatores produtivos com diferentes impactos ambientais, elevando a complexidade da elaboração de indicadores, como a PTF. Desta forma, a mensuração da PTF com parâmetros ambientais, como indicador de sustentabilidade deverá necessariamente considerar essas distinções, quando o indicador for utilizado para comparar diferentes regiões e sobretudo países.

5. Considerações finais

A crescente demanda por uma agricultura sustentável tem estimulado o desenvolvimento de metodologias que integram externalidades ambientais ao cálculo da Produtividade Total dos Fatores (PTF). Este estudo revisou a literatura sobre o tema, evidenciando a evolução das abordagens que buscam conciliar a eficiência produtiva com a sustentabilidade ambiental. A incorporação de externalidades negativas, como emissões de gases de efeito estufa e geração de resíduos, tornou-se essencial para refletir o real desempenho das atividades agrícolas.

Ao longo dos anos, o volume de publicações sobre PTF ambiental aumentou significativamente, com destaque para estudos realizados na China, que se concentra como um dos principais focos da análise. Contudo, a literatura internacional ainda carece de um consenso sobre um índice universalmente aceito que seja capaz de comparar, de forma robusta, a produtividade agrícola sustentável entre países. A OCDE e outros organismos internacionais continuam a trabalhar na construção de indicadores que possam integrar a sustentabilidade de maneira consistente e comparável.

As metodologias analisadas, que incluem tanto métodos paramétricos quanto não paramétricos, apresentam vantagens e limitações. Abordagens como a Análise Envoltória de Dados (DEA) e o Índice de Malmquist são amplamente utilizadas por sua flexibilidade, permitindo o uso de múltiplos insumos e outputs, inclusive os "*bad outputs*". No entanto, essas metodologias apresentam desafios para capturar mudanças tecnológicas e inovações que reduzem externalidades ambientais, sobretudo devido à sua dependência de dados observados e estáticos. Isso pode resultar em subestimações da eficiência de práticas agrícolas inovadoras.

Os avanços recentes em metodologias, como o Environmentally Sustainable Productivity Index (ESPI), buscam preencher essa lacuna, oferecendo uma forma mais robusta de medir a produtividade levando em consideração as externalidades ambientais. O ESPI, ao respeitar os axiomas propostos por O'Donnell (2022), oferece uma ferramenta mais precisa para comparações intertemporais e internacionais.

Por fim, este estudo contribui para o estado da arte ao apresentar uma revisão sistemática das principais metodologias utilizadas para calcular a PTF ambiental na agricultura. O desafio de equilibrar a produtividade com a preservação ambiental é urgente e os avanços metodológicos analisados aqui mostram o esforço que vem sendo feito para capturar de forma mais precisa essa relação.

Referências

- BALDONI, Edoardo; CODERONI, Silvia; ESPOSTI, Roberto. The complex farm-level relationship between environmental performance and productivity: The case of carbon footprint of Lombardy farms. *Environmental science & policy*, v. 89, p. 73-82, 2018.
- BALK, Bert M. Scale efficiency and productivity change. *Journal of productivity analysis*, v. 15, p. 159-183, 2001.
- BAO, Bingfei et al. The evolution and influencing factors of Total factor productivity of grain production environment: evidence from Poyang Lake Basin, China. *Land*, v. 10, n. 6, p. 606, 2021.

- BARÁTH, Lajos; FERTŐ, Imre. The relationship between the ecologisation of farms and total factor productivity: A continuous treatment analysis. *Journal of Agricultural Economics*, v. 75, n. 1, p. 404-424, 2024.
- BARNES, Andrew P. Publicly-funded UK agricultural R&D and ‘social’ total factor productivity. *Agricultural Economics*, v. 27, n. 1, p. 65-74, 2002.
- BRAGAGNOLO, C.; TATEISHI, H. R. Produtividade Total dos Fatores e Emissões de Dióxido de Carbono na Agricultura Brasileira: Uma Medida de PTF Ambientalmente Sensível. ANPEC, 2021.
- BUREAU, Jean Christophe; ANTÓN, Jesús. *Agricultural Total Factor Productivity and the environment: A guide to emerging best practices in measurement*. 2022.
- CHAMBERS, Robert G.; KARAGIANNIS, Giannis; TZOUVELEKAS, Vangelis. Productivity accounting for separable technologies. *Journal of Productivity Analysis*, v. 41, p. 41-50, 2014.
- CHEN, Yi; LIU, Huijun. Empirical Study on China’s Agricultural Productivity under the Binding of Environment. In: *Advances in Computer Science and Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 755-760.
- CHEN, Yufeng; MIAO, Jiafeng; ZHU, Zhitao. Measuring green total factor productivity of China’s agricultural sector: A three-stage SBM-DEA model with non-point source pollution and CO₂ emissions. *Journal of Cleaner Production*, v. 318, p. 128543, 2021.
- CHUNG, Yangho H.; FÄRE, Rolf; GROSSKOPF, Shawna. Productivity and undesirable outputs: a directional distance function approach. *Journal of Environmental Management*, v. 51, n. 3, p. 229-240, 1997.
- CLARKE, M.; OXMAN, A. D. *Cochrane Reviewers’ Handbook 4.1.4* [updated October 2001], The Cochrane Library, Oxford, 2001.
- COBOURN, K; ANTON, J. (2024) OECD. Measuring the environmentally sustainable productivity performance of agriculture. Document submitted to the 56th Session of the Joint Working Party on Agriculture and the Environment. Trade and Agriculture Directorate, Environment Directorate. Paris, França. Abril, 2024.
- DAKPO, K. Hervé; JEANNEAUX, Philippe; LATRUFFE, Laure. Pollution-adjusted productivity changes: extending the Färe–Primont index with an illustration with French Suckler cow farms. *Environmental Modeling & Assessment*, v. 24, p. 625-639, 2019.
- EHUI, Simeon K.; SPENCER, Dunstan SC. Measuring the sustainability and economic viability of tropical farming systems: a model from sub-Saharan Africa. *Agricultural Economics*, v. 9, n. 4, p. 279-296, 1993.
- FALAVIGNA, Greta; MANELLO, Alessandro; PAVONE, Sara. Environmental efficiency, productivity and public funds: The case of the Italian agricultural industry. *Agricultural Systems*, v. 121, p. 73-80, 2013.
- FENG, Lin; LEI, Guoping; NIE, Ying. Exploring the eco-efficiency of cultivated land utilization and its influencing factors in black soil region of Northeast China under the goal of reducing non-point pollution and net carbon emission. *Environmental Earth Sciences*, v. 82, n. 4, p. 94, 2023.
- GAITÁN-CREMASCHI, Daniel et al. Benchmarking the sustainability performance of the Brazilian non-GM and GM soybean meal chains: An indicator-based approach. *Food Policy*, v. 55, p. 22-32, 2015.
- GALDEANO-GOMEZ, Emilio. Productivity effects of environmental performance: evidence from TFP analysis on marketing cooperatives. *Applied Economics*, v. 40, n. 14, p. 1873-1888, 2008.

- GALVÃO, Maria Cristiane Barbosa; RICARTE, Ivan Luiz Marques. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. *Logeion: Filosofia da informação*, v. 6, n. 1, p. 57-73, 2019.
- HAILU, A.; VEEMAN, T. S. Non-parametric productivity analysis with undesirable outputs: An application to the Canadian pulp and paper industry. *American Journal of Agricultural Economics*, v. 83, n. 3, p. 605–616, 2001.
- HAMID, Salman; WANG, Ke. Environmental total factor productivity of agriculture in South Asia: a generalized decomposition of Luenberger-Hicks-Moorsteen productivity indicator. *Journal of Cleaner Production*, v. 351, p. 131483, 2022.
- HOANG, Viet-Ngu; COELLI, Tim. Measurement of agricultural total factor productivity growth incorporating environmental factors: A nutrients balance approach. *Journal of Environmental Economics and Management*, v. 62, n. 3, p. 462-474, 2011.
- HOANG, Viet-Ngu; WILSON, Clevo. Accounting for nutrient pollution in measuring agricultural total factor productivity: A study of OECD economies. In: *New Directions in Productivity Measurement and Efficiency Analysis*. Edward Elgar Publishing, 2017. p. 120-150.
- HONG, Chen; HAOKUN, Wang; SHUAI, Qin. Study on green efficiency of grain water resources in Heilongjiang province from the perspective of water footprint: based on three-stage SBM-Malmquist index analysis method. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, v. 29, n. 12, p. 2790-2804, 2020.
- HOU, B., WANG, B., DU, M., & ZHANG, N. Does the SO₂ emissions trading scheme encourage green total factor productivity? An empirical assessment on China's cities. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, p. 6375-6388, 2020.
- HU, Siying; LU, Shangkun; ZHOU, Huiqiu. Public investment, environmental regulation, and the sustainable development of agriculture in China based on the decomposition of green total factor productivity. *Sustainability*, v. 15, n. 2, p. 1123, 2023.
- HUANG, W. H. et al. Does the agricultural environment regulation promote the improvement of wheaten GTFP?. *Resour. Environ. Yangtze Basin*, v. 30, n. 2, p. 459-471, 2021.
- JAMALIMOGHADDAM, Elham et al. Investigating the environmental and economic sustainability of crop subsector. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, v. 7, n. 4, p. 765-784, 2023.
- JINTAO, Zhan; YUJIAO, Xu; JIHONG, Ge. Change in agricultural green productivity in China considering the cost of carbon emissions. *Resources Science*, v. 41, n. 5, p. 884-896, 2019.
- KUMAR, S. Environmentally sensitive productivity growth: A global analysis using Malmquist-Luenberger index. *Ecological Economics*, v. 56, n. 2, p. 280-293, 2006.
- LAHOUEL, Bechir, et al. "A non-parametric decomposition of the environmental performance-income relationship: Evidence from a non-linear model." *Annals of Operations Research* (2021): 1-34.
- Le, T. L., Lee, P. P., Peng, K. C., & Chung, R. H. Evaluation of total factor productivity and environmental efficiency of agriculture in nine East Asian countries. *Agricultural Economics/Zemědělská Ekonomika*, v. 65, n. 6, 2019.
- LI, Qiang et al. The effect of agricultural environmental total factor productivity on urban-rural income gap: Integrated view from China. *Sustainability*, v. 12, n. 8, p. 3327, 2020.
- LU, Yi-Xuan et al. Green Total factor efficiency in vegetable production: a comprehensive ecological analysis of China's practices. *Agriculture*, v. 13, n. 10, p. 2021, 2023.
- LUCENA, João Paulo Oliveira; DE MEDEIROS JUNIOR, Josué Vitor; DE OLIVEIRA, Mariane Araújo. Governança de projetos na administração pública: uma revisão sistemática da literatura internacional. *Gestão e Projetos: GeP*, v. 12, n. 2, p. 85-109, 2021.

- MA, Yuan; BRÜMMER, Bernhard; YU, Xiaohua. Measuring and decomposing TFP incorporating environmental components: applications for rice farmers in Hubei Province, China. *Cogent Food & Agriculture*, v. 10, n. 1, p. 2302209, 2024.
- MAHLBERG, B.; LUPTACIK, M.; SAHOO, B. K. Examining the drivers of total factor productivity change with an illustrative example of 14 EU countries. *Ecological Economics*, v. 72, p. 60-69, 2011.
- MYEKI, L. W.; MATTHEWS, N.; BAHTA, Y. T. Decomposition of Green Agriculture Productivity for Policy in Africa: An Application of Global Malmquist–Luenberger Index. *Sustainability (Switzerland)*, v. 15, n. 2, p. 1-17, 2023.
- O'DONNELL, C. *Productivity and Efficiency Analysis*. Springer Singapore, Singapore, 2018. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2984-5>.
- OECD (2001), *Measuring Productivity - OECD Manual: Measurement of Aggregate and Industry Level Productivity Growth*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264194519-en>.
- OKOLI, Chitu. Guia para realizar uma revisão sistemática da literatura. Tradução de David Wesley Amado Duarte; Revisão técnica e introdução de João Mattar. *EaD em Foco*, 2019;9 (1): e748. DOI: <https://doi.org/10.18264/eadf.v9i1.748>
- OSKAM, Arie. Productivity measurement, incorporating environmental effects of agricultural production. *Agricultural Economics and Policy: International Challenges for the Nineties*, Elsevier, Amsterdam, p. 186-204, 1991.
- PENG, Jiachao et al. Total factor productivity of cultivated land use in China under environmental constraints: Temporal and spatial variations and their influencing factors. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, p. 18443-18462, 2020.
- PINTO, Nelson Guilherme Machado; CORONEL, Daniel Arruda; BENDER FILHO, Reisoli. Eficiência no Desenvolvimento Regional Resultante do Programa Bolsa Família. Aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA) nos Estados e Regiões Brasileiras de 2004 a 2010. *Desenvolvimento em Questão*, v. 13, n. 31, p. 143-172, 2015.
- SHAIK, Saleem; PERRIN, Richard K., "Non-parametric Environmental Adjusted Productivity [EAP] Measures: Nebraska Agriculture Sector" (1999). *Presentations, Working Papers, and Gray Literature: Agricultural Economics*. 29. Disponível em <https://digitalcommons.unl.edu/ageconworkpap/29>
- SHARMA, Sonali. Environmental efficiency in South Asian agriculture: a potential of reducing CO2 emissions and fertilizers usage. *Journal of Public Affairs*, v. 22, n. 1, p. e2327, 2022.
- SHEN, Zhiyang; KERSTENS, Kristiaan; BALEŽENTIS, Tomas. An environmental Luenberger–Hicks–Moorsteen total factor productivity indicator: empirical analysis considering undesirable outputs either as inputs or outputs, and attention for infeasibilities. *Annals of Operations Research*, p. 1-23, 2023.
- SIDDAWAY, Andy P.; WOOD, Alex M.; HEDGES, Larry V. How to do a systematic review: a best practice guide for conducting and reporting narrative reviews, meta-analyses, and meta-syntheses. *Annual review of psychology*, v. 70, p. 747-770, 2019.
- SPOLADOR, Humberto Francisco Silva; DANELON, André Felipe. New evidence of the driving forces behind Brazil's agricultural TFP growth—A stochastic frontier analysis with climatic variables and land suitability index. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, v. 68, n. 2, p. 366-385, 2024.
- STANISZEWSKI, Jakub. Attempting to measure sustainable intensification of agriculture in countries of the European Union. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, v. 19, n. 2, p. 949-957, 2018.

- STANISZEWSKI, Jakub; GUTH, Marta; SMĘDZIK-AMBROŻY, Katarzyna. Structural conditions of the sustainable intensification of agriculture in the regions of the European Union. *Journal of Cleaner Production*, v. 389, p. 136109, 2023.
- STANISZEWSKI, Jakub; KRYSZAK, Łukasz. Do structures matter in the process of sustainable intensification? A case study of agriculture in the European Union countries. *Agriculture*, v. 12, n. 3, p. 334, 2022.
- TRANFIELD, David; DENYER, David; SMART, Palminder. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, v. 14, n. 3, p. 207-222, 2003.
- TURČEKOVÁ, Natália et al. Agri-environmental performance of EU member states. *Agris on-line Papers in Economics and Informatics*, v. 7, n. 4, p. 199-208, 2015.
- VARIAN, H. R. *Microeconomia: uma abordagem moderna*. 9ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. 1.004p.
- WEN, Changcun et al. Spatio-temporal differentiation on China's green agricultural total factor productivity guided by digital technology and fuzzy systems. *Cogent Food & Agriculture*, v. 10, n. 1, p. 2311962, 2024.
- XIE, Hualin; ZHANG, Yanwei; CHOI, Yongrok. Measuring the cultivated land use efficiency of the main grain-producing areas in China under the constraints of carbon emissions and agricultural nonpoint source pollution. *Sustainability*, v. 10, n. 6, p. 1932, 2018.
- XU, X., ZHANG, L., CHEN, L., & LIU, C. The role of soil N₂O emissions in agricultural green total factor productivity: an empirical study from China around 2006 when agricultural tax was abolished. *Agriculture*, v. 10, n. 5, p. 150, 2020.
- YE, Deping et al. Spatial double dividend from China's main grain-producing areas policy: total factor productivity and the net carbon effect. *Humanities and Social Sciences Communications*, v. 10, n. 1, p. 1-22, 2023.
- YONGSHENG, Cheng; DEYUAN, Zhang; XIA, Wang. Agricultural Total Factor Productivity Based on Farmers' Perspective: An Example of CCR, BCC, SBM and Technology Optimization Malmquist-Luenberger Index. *Journal of Resources and Ecology*, v. 15, n. 2, p. 267-279, 2024.
- YU, Zhuohui; LIN, Qingning; HUANG, Changli. Re-measurement of agriculture green total factor productivity in China from a carbon sink perspective. *Agriculture*, v. 12, n. 12, p. 2025, 2022.
- ZAMBONI, A. B.; THOMMAZO, A. D.; HERNANDES, E. C. M.; FABBRI, S. C. P. F. (2010) *StArt Uma Ferramenta Computacional de Apoio à Revisão Sistemática*. In: Brazilian Conference on Software: Theory and Practice - Tools session. UFBA.
- ZHANG, C.; LIU, H.; BRESSERS, H. T. A.; BUCHANAN, K. S. Productivity growth and environmental regulations - accounting for undesirable outputs: Analysis of China's thirty provincial regions using the Malmquist-Luenberger index. *Ecological Economics*, v. 70, n. 12, p. 2369-2379, 2011.
- ZHANG, Na; SUN, Fangcheng; HU, Yuling. Carbon emission efficiency of land use in urban agglomerations of Yangtze River Economic Belt, China: Based on three-stage SBM-DEA model. *Ecological Indicators*, v. 160, p. 111922, 2024.
- ZHANG, Yanan et al. An empirical study on the growth of agricultural green total factor productivity in the huanghuai river economic zone by big data computing. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2022, n. 1, p. 1775027, 2022.
- ZHENG, Gantian et al. Can Rural Industrial Convergence Improve the Total Factor Productivity of Agricultural Environments: Evidence from China. *Sustainability*, v. 15, n. 23, p. 16432, 2023.