

PRODUTIVIDADE TOTAL DOS FATORES E EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA: UMA ANÁLISE PARA A AGROPECUÁRIA NA AMAZÔNIA LEGAL

Janaína Alves de Lima¹

Cassiano Bragagnolo²

Resumo

A Amazônia legal é uma das últimas fronteiras agrícolas do país. O desflorestamento na Amazônia legal é impulsionado pelo aumento da produção agropecuária na região, resultando em altas emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, esse estudo teve como objetivo medir o crescimento da produtividade total dos fatores (PTF) na Amazônia legal. Utilizando dados dos Censos Agropecuários de 2006 e 2017, da Produção Agrícola Municipal (PAM), ambos divulgados pelo IBGE, e do Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) de 2022. Os resultados foram calculados e analisados por meio dos métodos de Malmquist GML (OH, 2010a, 2010b) e ML (CHUNG; FÄRE; GROSSKOPF, 1997), que consideram a presença de subprodutos, e GM (PASTOR; LOVELL, 2005b) e M (FÄRE et al., 1994a), que não consideram presença desses subprodutos. Os resultados apontaram que o crescimento da PTF e da eficiência técnica contabilizados por meio dos modelos que levam em consideração a existência de emissões no setor são sensivelmente inferiores aos valores dos modelos que não levam em consideração a existência destes subprodutos. Ainda, a comparação dos resultados para os métodos GML x ML e GM x M permitiu identificar os municípios considerados “verdes”, quando há crescimento com diminuição das emissões ou “amarelos” quando há ênfase no crescimento econômico em detrimento das questões ambientais.

Palavras-chave: Amazônia legal; Desflorestamento; PTF

Abstract

The legal Amazon is one of the country's last agricultural frontiers. Deforestation in the legal Amazon is driven by increased agricultural production in the region, resulting in high greenhouse gas emissions. In this context, this study aimed to measure total factor productivity (TFP) growth in the legal Amazon. Using data from the 2006 and 2017 Agricultural Censuses, the Municipal Agricultural Production (PAM), both released by IBGE, and the 2022 Greenhouse Gas Emissions and Removals Estimation System (SEEG). The results were calculated and analyzed using the Malmquist methods GML (OH, 2010a, 2010b) and ML (CHUNG; FÄRE; GROSSKOPF, 1997), which consider the presence of by-products, and GM (PASTOR; LOVELL, 2005b) and M (FÄRE et al., 1994a), which do not consider the presence of these by-products. The results showed that the growth of TFP and technical efficiency accounted for by the models that take into account the existence of emissions in the sector are significantly lower than the values of the models that do not take into account the existence of these by-products. In addition, the comparison of the results for the GML x ML and GM x M methods allowed the identification of municipalities considered "green", when there is growth with a decrease in emissions, or "yellow" when there is an emphasis on economic growth to the detriment of environmental issues.

Key words: Legal Amazonia; deforestation; TFP

Área: Meio ambiente, recursos naturais e sustentabilidade

Classificação JEL: Q10, Q53, O44

¹ Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar. E-mail: janainalima@estudante.ufscar.br

² Professor do Programa de Pós-Graduação em Economia do Departamento de Economia da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar. E-mail: cassiano@ufscar.br.

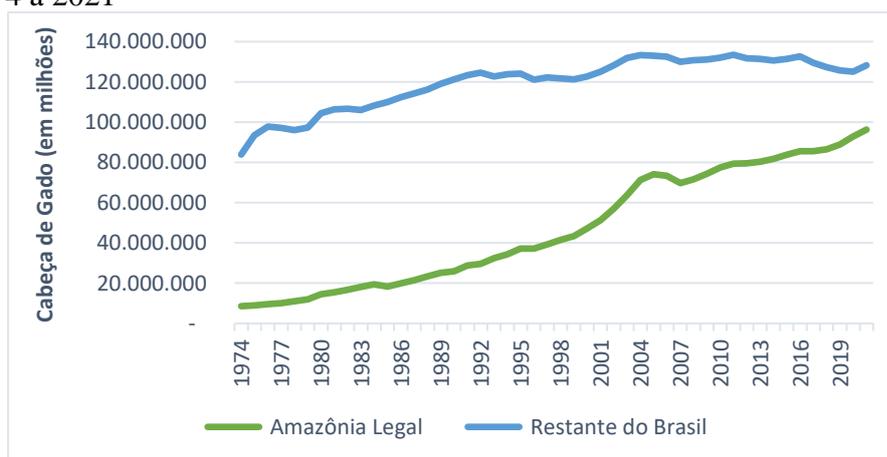
1. INTRODUÇÃO

Desde a segunda metade da década de 1980 embates sobre como tornar sustentável o desenvolvimento da Amazônia Legal vem sendo abordado. Em parte, esse embate aconteceu por algumas combinações, como pelas cobranças de lideranças e de ONG's nacionais e pelas cobranças da comunidade internacional, que na década de 1980 estudava as consequências das mudanças climáticas globais, quais eram seus efeitos e causas (ANDERSEN *et al.*, 2002; SERRA, M. A.; FERNANDEZ, 2004).

No Brasil, uma das maiores fontes de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEEs) é o desmatamento em larga escala associado a expansão da atividade agropecuária no território amazônico (NOBRE, 2001). Entre 90% e 99% do desmatamento tropical é impulsionado pela agropecuária (SEEG, 2023). A participação do setor agropecuário no PIB brasileiro é relevante, em 2020, esta participação foi de 26,6% (CEPEA, 2021). As emissões de CO₂ equivalente nesse setor, em 2020, totalizaram 579 milhões de toneladas e em 2021 as emissões foram as mais altas desde 1970, sendo 601 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, um aumento de 3,8% em relação a 2020. Apresentando o maior incremento percentual, de 4,1%, desde 2004 (SEEG, 2023).

De acordo com InfoAmazonia (2021) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021), o rebanho bovino na Amazônia Legal saltou de 8,5 milhões em 1974 para 93 milhões de cabeças em 2020, o que representa quase 43% do rebanho nacional. Entre 2004 e 2020, o rebanho aumentou 30% na Amazônia Legal, enquanto que nas outras regiões do Brasil encolheu 6%. Nessas duas décadas, a Amazônia brasileira perdeu 197 mil km² de florestas, principalmente pela abertura de áreas de pastagens. Segundo alguns autores a pecuária cresceu mais na Amazônia Legal do que no restante do país, devido aos preços da terra serem mais baixos e as pastagens serem mais produtivas do que outras regiões pecuaristas no país, tornando-a uma região mais lucrativa (ANDERSEN *et al.*, 2002; FEARNSSIDE, 2005; SERRA, M. A.; FERNANDEZ, 2004). Outras razões do crescimento da pecuária na Amazônia Legal, foram os subsídios concedidos, assim como os empréstimos. Entre os anos de 1989 e 2002, o banco da Amazônia emprestou U\$5,8 bilhões para a região, com exceção do Mato Grosso e Maranhão, sendo que cerca de 40% desse valor foram destinados à pecuária. Até mesmo a compra da terra para ocupação bovina e após revenda da terra é uma forma que os agricultores da região encontraram de lucrar, com objetivo de comprar a terra por um preço acessível e vender por preço maior. (ARIMA; BARRETO; BRITO, 2005; FEARNSSIDE, 2005; MARGULIS, 1990).

Figura 1. Número efetivo de cabeças de gado (milhões) para a Amazônia Legal e demais estados brasileiros para o período de 1974 a 2021



Fonte: Elaboração própria com base nos dados disponibilizados pelo IBGE (2021).

A conservação destas áreas com mata nativa pode ser alcançada por meio de uma produção agropecuária mais intensiva, diminuindo a demanda por novas áreas produtivas e o consequente desmatamento (NASCIMENTO *et al.*, 2019). Esta intensificação do uso da terra pode ocorrer por meio do ganho de produtividade advindo da introdução de tecnologias, geralmente como resultado de investimentos

em pesquisa e desenvolvimento (por exemplo, novas cultivares, melhores práticas agrícolas, melhores práticas gerenciais etc.) (BYERLEE; STEVENSON; VILLORIA, 2014).

Tendo em vista os aspectos potencialmente ruins da produção e a sua importância econômica, o objetivo desta pesquisa é medir o crescimento da Produtividade Total dos Fatores (PTF) na agropecuária da Amazônia Legal no período compreendido entre 2006 e 2017, com base em dados dos dois últimos censos agropecuários do IBGE (IBGE, 2009, 2019), de 2006 e 2017, da Produção Agrícola Municipal (PAM, 2022), também divulgada pelo IBGE, e do Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa – Estufa(SEEG, 2022), comparando as medidas de produtividade que levam em consideração a existência de subprodutos não desejáveis (no caso a emissões de gases de efeito estufa) com medidas que não levam em consideração a existência deste tipo de subproduto. Para tanto os métodos de Malmquist (FÄRE et al., 1994b) e de Malmquist generalizado (PASTOR; LOVELL, 2005) são usados para calcular as medidas de produtividade típicas e de Malmquist-Lundemberg, (CHUNG et al., 1997) e de Malmquist-Lundemberg generalizado (OH, 2010a, 2010b) são usados para calcular as medidas de produtividade ambientalmente sensíveis, ou seja, aquelas que consideram a geração de gases de efeito estufa no processo de produção.

Os cálculos das produtividades que consideram a geração de gases de efeito estufa no processo de produção está calcado na proposição de que parte do crescimento da produtividade medido por meio de medidas tradicionais da PTF se deve a não contabilização dos efeitos ambientais adversos causados pelo aumento da emissão de gases de efeito estufa que ocorreu simultaneamente a estes ganhos de produtividade nos cálculos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Breve histórico sobre a agropecuária e o desflorestamento na Amazônia Legal

A ocupação territorial e as atividades econômicas da Amazônia tiveram seu início em 1616 com a construção do Forte do presépio no delta do rio Amazonas, sendo um marco da colonização portuguesa na região norte do Brasil. As atividades trouxeram assentamentos agrícolas para a região, usando um número limitado de técnicas de produção, que se baseavam na extração de borracha e castanha, conhecida como castanha do Brasil, para exportação. O ciclo da borracha durou cerca de setenta anos, sendo este um período de considerável crescimento econômico, com aumento da renda regional per capita de seis vezes e crescimento populacional de 3,3% ao ano. Esse processo atraiu fluxos migratórios relevantes, principalmente da região nordeste, que tinha sua economia afetada por secas. A partir da década de 1960, a expansão da fronteira em direção à Amazônia tornou-se um objetivo da geopolítica de desenvolvimento brasileiro (ANDERSEN *et al.*, 2002). Alguns projetos foram fundamentais para possibilitar a expansão da região amazônica, como a construção de estradas que unificaram o território amazônico às demais regiões do país e a criação da SPVEA (Superintendência do Plano de Valorização Econômica da Amazônia), em 1953, que teria o desígnio de ser uma agência regional para acompanhar o desenvolvimento da região. Para que a agência pudesse acompanhar os trabalhos realizados no território amazônico, o governo brasileiro criou a definição política de “Amazônia Legal”, de forma que a definição não é uma determinação geográfica, mas geopolítica (SERRA, M. A.; FERNANDEZ, 2004). A Amazônia legal é composta por 772 municípios em nove estados (Amazonas, Acre, Amapá, Mato Grosso, Pará, Roraima, Rondônia, Tocantins e parte do Maranhão), se estendendo por cerca de 5 milhões de km², o que corresponde a aproximadamente 59% do território nacional (IBGE, 2021).

A construção de estradas, por meio de incentivos fiscais, foi o tipo de intervenção que mais gerou transformação na Amazônia Legal. Ao todo foram construídas na região nas décadas de 1950 e 1960 cerca de 60.000 km de estradas, acelerando o processo migratório nas áreas mais acessíveis, principalmente por meio de pessoas que vinham do centro-sul e do nordeste do país. A construção da BR Belém-Brasília e da BR 364 (Brasília-Porto Velho), em 1958, possibilitou grande aumento desse processo migratório. De 1950 a 1960 a população regional cresceu cerca de 400%. Pela primeira vez na história do país os assentamentos na Amazônia foram libertados da dependência dos rios (ANDERSEN *et al.*, 2002).

As políticas governamentais e o Banco de Crédito da Amazônia tiveram papel determinante neste processo de construção de estradas. Uma série de atos legislativos e decretos foram promulgados em 1966

e 1967 com a finalidade de desenvolver e ocupar a região amazônica e integrá-la ao restante do Brasil. Esse plano ficou conhecido como “Operação Amazônia” que oferecia crédito barato, subsídios fiscais, isenção de impostos e concessão de terras a empresários que estivessem dispostos a investir em atividades agrícolas na região. O plano baseava-se na criação de polos de desenvolvimento, sendo criada a Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM) para administrar o sistema de incentivos fiscais e de crédito e trazer investimentos privados para esses polos, e a implantação da Zona Franca de Manaus, ambas deveriam ser integradas as principais estradas e garantir que as indústrias, serviços e comércios progredissem em torno dos setores que foram favorecidos por essas políticas governamentais (ANDERSEN *et al.*, 2002).

Figura 2. Mapa de localização dos estados que compõem a Amazônia Legal



Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia – IBGE (2021).

Na década de 1970, a Amazônia Legal emergiu como uma importante fronteira econômica (ANDERSEN *et al.*, 2002). Nesta década, aconteceu a construção das grandes estradas como a Transamazônica, a estrada Cuiabá-Santarém e a estrada Porto Velho. A renda regional per capita mais do que triplicou e a população cresceu a uma taxa espantosa de 5% ao ano. De 1970 a 1980, as taxas de crescimento do PIB foram em média de 18% ao ano em termos reais (ANDERSEN *et al.*, 2002).

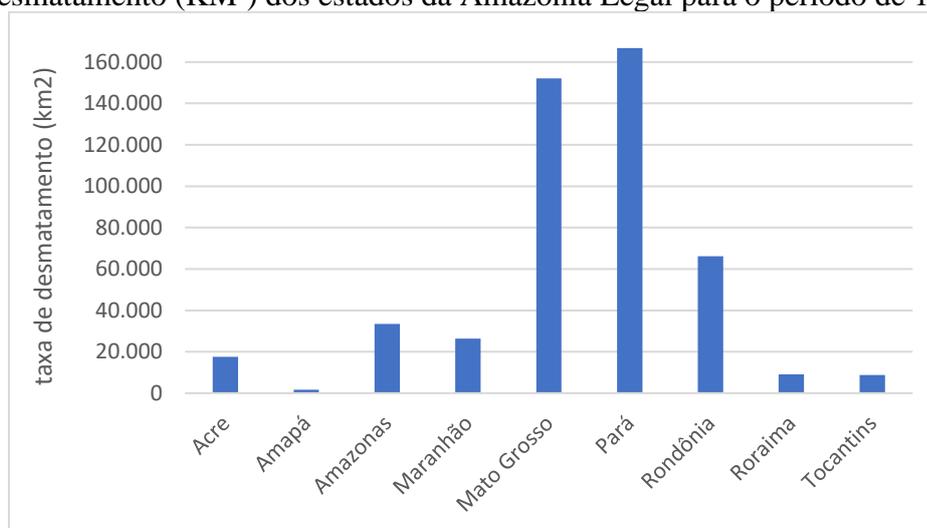
Os incentivos realizados pelas políticas públicas para promover o desenvolvimento da Amazônia Legal ao mesmo tempo que proporcionaram desenvolvimento e crescimento econômico para a região, proporcionaram também exploração dos recursos naturais e desigualdades sociais devido ao enorme aumento da população na região e a baixa infraestrutura municipal (FEARNSIDE, 2001b; HALL, 1987; MARGULIS, 1990; SERRA, M. A.; FERNANDEZ, 2004). Segundo Fearnside (2005), os incentivos fiscais foram um forte impulsionador do desmatamento nas décadas de 1970 e 1980 na Amazônia Legal.

No final da década de 1980 e início da década de 1990, estimulados pelos embates e cobranças nacionais e internacionais sobre as mudanças climáticas globais, o governo brasileiro começa a criar e planejar vários programas para conter o desmatamento e tornar o desenvolvimento sustentável do ponto de vista da conservação da Amazônia Legal. Um exemplo desta nova visão, foi o caso do programa “Nossa Natureza”, inaugurado em 1988, que favoreceu as comunidades e governos locais que não tinham recebido qualquer apoio do governo federal (ANDERSEN *et al.*, 2002; SERRA, M. A.; FERNANDEZ, 2004). Outro caso foi o Plano Nacional de Florestas no Estado de Rondônia (PLANAFORO), criado em 1990 com financiamento do Banco Mundial, para mitigar as consequências do desmatamento de programas de desenvolvimento anteriores em Rondônia. A criação do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), uma nova agência ambiental brasileira à época, também ocorreu neste contexto e formulou uma política ambiental capaz de exigir regulamentação tanto para o desmatamento quanto para a exploração econômica de áreas florestais em propriedades privadas (ANDERSEN *et al.*, 2002). Aconteceu também a criação do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) que além dos representantes dos ministérios incluiu ONG’S, permitindo assim incluir as opiniões da sociedade civil no processo de tomada de decisão. Outro órgão criado neste período foi a Secretaria para a Amazônia que foi criada dentro do Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos

e da Amazônia Legal (MMA), substituindo a antiga SEMA, com o propósito de reformular a política ambiental então vigente (SERRA, M. A.; FERNANDEZ, 2004).

Esses programas e ações para mitigar o desmatamento e proporcionar desenvolvimento sustentável contribuíram para a criação de metodologias inovadoras de monitoramento e controle de desmatamento e queimadas (ANDERSEN *et al.*, 2002). Um desses projetos que utiliza satélites LANDSAT é o Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia (PRODES), criado em 1988, que realiza o monitoramento por satélite do desflorestamento por corte raso na Amazônia Legal e fornece as taxas anuais de desmatamento na região (INPE, 2022). O monitoramento realizado pelo INPE indicou que o desmatamento estava concentrado em poucas regiões, com 76% dos novos desmatamentos ocorrendo na região que passou a ser denominada de Arco do Desmatamento¹. Em 1998, quase 80% do desmatamento concentrava-se apenas nos estados do Pará, Mato Grosso e Rondônia (ANDERSEN *et al.*, 2002; MARGULIS, 2003).

Figura 3. Taxa de desmatamento (KM²) dos estados da Amazônia Legal para o período de 1988 a 2022



Fonte: Elaboração própria com base em dados do desmatamento disponibilizados pelo INPE (2022)

Entre 1988 a 1991, a série PRODES registrou uma queda na taxa de desmatamento, ocasionada pela recessão econômica e pela hiperinflação que dominou a economia do Brasil principalmente na década de 1980. Fazendo com que o governo não conseguisse destinar fundos para a construção de estradas e projetos de assentamento. Neste mesmo cenário, os proprietários de fazendas também não conseguiram ampliar seus investimentos. Já em 1995 a taxa de desmatamento sofreu uma alta bastante relevante, no mesmo momento em que a economia do Brasil se recuperava por meio do Plano Real, que motivou uma maior disponibilidade de capital e por consequência um aumento de crédito agrícola. Em 1996 e 1997 o Plano Real reduziu a taxa de inflação de forma drástica, o que ocasionou uma queda de 50% no valor da terra, em relação a 1995, tornando o mercado imobiliário menos promissor por quatro anos (FEARNSIDE, 2005).

De 2004 para 2008 houve uma queda na taxa de desmatamento de 27.772 km² para 12.911 km² (-53%) de acordo com os dados do programa PRODES. No entanto, foi identificado um aumento de 11% na perda florestal entre 2007 e 2008 (de 11.633 km² para 12.911 km²), impulsionada principalmente por grandes e médias fazendas de bovino (FEARNSIDE, 2022; WEST; FEARNSIDE, 2021).

Em 2007, outros dois acontecimentos contribuíram com a redução do desmatamento. O primeiro foi o cenário econômico originado pelas forças do mercado principalmente pela queda nos preços dos principais produtos de exportação da região, a soja e a carne bovina. Neste período houve aumento de 80% no valor da moeda brasileira em comparação com o dólar norte-americano, o que tornou as exportações menos rentáveis para a agropecuária, que tinha suas despesas pagas em reais e recebiam seus lucros sobre as exportações em dólares (FEARNSIDE, 2022). O segundo acontecimento está relacionado a iniciativas

¹ Região onde a fronteira agrícola avança em direção à floresta e também onde encontram-se os maiores índices de desmatamento da Amazônia. São 500 mil km² de terras que vão do leste e sul do Pará em direção oeste, passando por Mato Grosso, Rondônia e Acre (IPAM, 2023).

da agroindústria, que realizou duas ações para diminuir a taxa de desmatamento, em complemento as medidas já realizadas pelo governo e impulsionada pela pressão de organizadores ambientais internacionais e de consumidores ambientalmente conscientes. A primeira ação foi a “moratória da soja”, em 2006, que excluía de compra pelas indústrias toda a soja plantada em área desmatada após esta data. Esta primeira ação serviu de modelo para uma segunda ação moratória do setor de carne bovina e do couro, que ficou conhecida como a “moratória da carne” de 2009, realizada pelos quatro maiores frigoríficos da época (MACEDO *et al.*, 2012).

Diante dessas ações realizadas pelo governo, pelo Banco do Brasil, pela agroindústria e pelo cenário econômico que pressionava as commodities de 2008 a 2012, a taxa de desmatamento continuou diminuindo e alcançou seu menor valor, analisado pela série PRODES, em 2012 (4.571 km²). No entanto, nesse mesmo ano o preço da soja voltou a subir, alcançando o nível de 2004 e houve uma importante mudança política por meio da Lei nº 12.651 de 25 de maio de 2012 (BRASIL, 2012), o Código Florestal Brasileiro, que permitiu remover restrições e perdoar as derrubadas ilegais realizadas até 2008, tornando mais fácil a obtenção da permissão oficial para desmatar legalmente e da expectativa, por meio dos empresários, fazendeiros e grileiros de futuras absolvições (FEARNSIDE, 2022). Esses fatores, em conjunto com uma série de decisões políticas, ocasionaram novamente o aumento do desmatamento nos anos subsequentes.

Entre os anos de 2012 e 2015 o desmatamento aumentou de 4.571 km² para 6.207 km², assim como o crédito rural que nesse mesmo período passou de R\$ 14,7 bilhões para R\$ 22,4 bilhões (WEST; FEARNSIDE, 2021), que levou a uma redução da ajuda financeira que o Brasil recebe de outros países com a condição de manter à redução do desmatamento na Amazônia Legal. Como à redução do desmatamento não ocorreu, em 2015 e 2016, o governo norueguês decidiu cortar pela metade o financiamento do Fundo Amazônia na região em 2017. Até 2016, o fundo desempenhou um papel central na promoção de projetos de conservação, reflorestamento, monitoramento e prevenção do desmatamento e uso sustentável dos recursos florestais na Amazônia Legal, arrecadando um total de R\$ 1,2 bilhão em 2016 (DE AREA LEÃO PEREIRA *et al.*, 2019; WEST; FEARNSIDE, 2021).

Em 2019, houve corte de orçamento no MMA e um corte de 95% do orçamento da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) e 24% do orçamento da fiscalização e controle realizada pelo IBAMA (DE AREA LEÃO PEREIRA *et al.*, 2020). Com a fiscalização da Amazônia Legal sendo enfraquecida, o aumento do desmatamento voltou a ser mais intenso no período de 2019 a 2022. O sistema PRODES registrou um desmatamento de 7.536 Km² em 2018 e de 11.568 Km² em 2022, um aumento de 54%.

2.2 Evolução da Produtividade Total dos Fatores na agricultura brasileira

Para (BARROS, 1999) o conceito da PTF é relativamente simples por representar a variação na parte do crescimento do produto que não é explicada pela variação na quantidade dos insumos, de forma que alterações no produto de uma economia podem ser atribuídas a duas fontes principais: variações nas quantidades dos fatores ou nas mudanças da PTF.

Embora seja um conceito simples, a mensuração da PTF exige cuidado e atenção para relacionar a teoria econômica junto ao processo de alocação mais eficiente dos recursos e ao do avanço tecnológico aplicado na produção agropecuária. Segundo (GRILICHES, 1963), para mensurar a produtividade agrícola é importante reconhecer as mudanças que aperfeiçoaram os insumos ao longo dos anos. Como as mudanças nos tratores que os tornaram mais versáteis, a aprimoração dos fertilizantes e o aumento no nível de educação dos trabalhadores agrícolas.

Nas últimas décadas diversos autores têm analisado o comportamento e os determinantes da PTF na agricultura brasileira, utilizando os mais variados métodos para estimação, assim como diferentes bases de dados. Esses estudos confirmam a tendência de crescimento da PTF da agricultura brasileira. O expressivo crescimento da produção da agropecuária no Brasil é resultado dos avanços da tecnologia empregada desde 1970. Essa época de modernização na agropecuária brasileira, possibilitou o maior uso de máquinas, e compostos químicos – como defensivos agrícolas, adubos, fertilizantes, possibilitando o crescimento da produtividade e o uso mais eficiente dos insumos, confirmando, em boa parte, que o uso da PTF na agropecuária brasileira nas últimas décadas tem apresentado considerável crescimento (BRAGAGNOLO; TATEISHI, 2021; GASQUES; VILLA VERDE, 1990).

Vários estudos de PTF têm levado em consideração a existência de subprodutos indesejáveis,

insumos indesejáveis ou o setor de energia nas medidas apresentadas (Emrouznejad e Yang, 2018; Li et al., 2017; Shen, Boussemart e Leleu, 2017; Shi e Li, 2019; Song et al., 2012; Sueyoshi, Yuan e Goto, 2017; Zhou et al., 2008). As abordagens usadas variam bastante. Dentre estes estudos destacam-se os de Chung et al. (1997), Hailu e Veeman (2001), Kumar (2006), Mahlberg et al. (2011), Chen e Golley (2014), Li e Lin (2015), Li et al. (2017), Yang et al. (2017), Zhang et al. (2011), Li e Lin (2016), Song et al. (2017), Wang e Feng (2015), Tian e Lin (2017), Liu e Feng (2019) e (BRAGAGNOLO; TATEISHI, 2021).

Chung et al. (1997) e Hailu e Veeman (2001) levam em consideração insumos de energia e vários poluentes ambientais para estimar uma PTF que leva em consideração subprodutos indesejáveis para os setores industriais sueco e canadense, respectivamente. Kumar (2006) faz uma medida de PTF de países em desenvolvimento e desenvolvidos, incorporando insumos de energia e emissões de CO₂ na estrutura do cálculo do índice. Mahlberg et al. (2011) examina as forças motrizes das mudanças “verdes” da PTF levando em consideração os gases de efeito estufa. Chen e Golley (2014), Li e Lin (2015), Li et al. (2017), Yang et al. (2017) e Zhang et al. (2011) medem a PTF levando em consideração os subprodutos indesejáveis para setores industriais da China. Li e Lin (2016), Song et al. (2017) e Wang e Feng (2015) estudam a PTF que leva em consideração os subprodutos indesejáveis das economias regionais da China. Tian e Lin (2017) fazem o cálculo de uma que leva em consideração os subprodutos indesejáveis para as exportações industriais da China. Liu e Feng (2019) realizaram uma medida da PTF que leva em consideração os subprodutos indesejáveis para o setor agrícola chinês. Por fim, Bragagnolo e Tateishi (2021) estimam a PTF municipal descontada das emissões de gases de efeito estufa para a agricultura brasileira. A Tabela 1 sintetiza o setor e o local destes estudos seguindo o exposto no estudo de Bragagnolo e Tateishi (2021).

Tabela 1. Trabalhos selecionados que incluem a geração de subprodutos indesejáveis no cálculo da PTF

Autores	Setor	Local/Região
Chung <i>et al.</i> (1997) Hailu e Veeman (2001)	Industrial	Suécia e Canadá
Kumar (2006)	Toda economia	41 países em desenvolvimento e desenvolvidos
Mahlberg <i>et al.</i> (2011)	Toda economia	14 países da União Europeia
Chen e Golley (2014), Li e Lin (2015), Li <i>et al.</i> (2017), Yang <i>et al.</i> (2017) e Zhang <i>et al.</i> (2011)	Industrial	China
Li e Lin (2016), Song <i>et al.</i> (2017) e Wang e Feng (2015)	Industrial	Regiões da China
Tian e Lin (2017)	Exportações industriais	China
Liu e Feng (2019)	Agrícola	China
Bragagnolo e Tateishi (2021)	Agrícola	Municípios brasileiros

Fonte: Elaboração própria com base em Bragagnolo e Tateishi (2021).

3. METODOLOGIA E BASE DE DADOS

3.1. Metodologia

O índice de Malmquist, que tem como objetivo medir a variação da produtividade ao longo do tempo, ficou mais conhecido por meio dos trabalhos de Caves *et al* (CAVES; CHRISTENSEN; DIEWERT, 1982a, 1982b) que foi inspirado no trabalho de Malmquist (1953), criador do índice. Posteriormente, segundo Coelli *et al* (1998) o índice passou a ser usado para o cálculo de Produtividade Total de Fatores - PTF, a partir do conceito de função distância, onde se comparam medidas em dois períodos de tempo, período inicial (t) e o período final ($t + 1$), calculando-se a eficiência a partir de uma determinada tecnologia empregada, sendo ela orientada pelo insumo ou pelo produto. Esses autores explicam que a orientação pelo produto calcula o quanto o produto pode ser proporcionalmente aumentado mantendo-se a quantidade de insumos utilizado constante, enquanto a orientação pelo insumo mostra o quanto os insumos podem ser proporcionalmente reduzidos sem que ocorra redução do produto.

Segundo Färe *et al* (FÄRE *et al.*, 1994a, 1994b) as funções de distância podem ser definidas como interpretações de funções de tecnologia de múltiplos produtos e/ou múltiplos insumos. Desta forma, o índice de Malmquist pode ser calculado através de um modelo de programação linear do tipo Análise Envoltória de Dados - DEA, sendo desta forma conhecido como índice de Malmquist-DEA. Por meio deste modelo é possível a construção da fronteira de produção num dado período e para períodos distintos. O modelo baseia-se no cálculo da razão entre as distâncias à fronteira construída dos dois pontos de produção para uma mesma unidade analisada, assim a função distância mede a mudança proporcional máxima do produto, que é necessária para tornar o par ordenado de produtos e fatores de produção viável em relação à tecnologia disponível. A função é definida de acordo com a expressão (1).

$$\begin{aligned}
M^{t,t+1}(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) &= \left[\left(\frac{D_0^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^t(x^t, y^t)} \right) \right] \left[\left(\frac{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^{t+1}(x^t, y^t)} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \\
M^{t,t+1}(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) &= EC_M^{t,t+1} \times TC_M^{t,t+1} \\
EC_M^{t,t+1} &= \frac{D_0^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^t(x^t, y^t)} \\
TC_M^{t,t+1} &= \left[\left(\frac{D_0^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \right) \right] \left[\left(\frac{D_0^t(x^t, y^t)}{D_0^{t+1}(x^t, y^t)} \right) \right]^{\frac{1}{2}}
\end{aligned} \tag{1}$$

Na qual $M^{t,t+1}$ representa o índice de produtividade de Malmquist para o crescimento no período t para $t+1$, $EC_M^{t,t+1}$ é a mudança na eficiência técnica do período t para $t+1$ para o índice de Malmquist e $TC_M^{t,t+1}$ é a mudança tecnológica para o índice de Malmquist do período t para $t+1$.

O índice de Malmquist Global (GM) foi desenvolvido por Pastor e Lovell (2005b) e é baseado em uma tecnologia de produção global e não na tecnologia atual, diferenciando-se desta forma do índice de Malmquist tradicional. Seguindo a proposta desses autores, o índice de Malmquist Global $GM^{t,t+1}(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1})$ para um produto com a tecnologia T_C^G do período t para $t+1$ pode ser representado de acordo com as duas primeiras equações na expressão (2). As duas equações seguintes na expressão (2) correspondem à mudança na eficiência ($EC_{GM}^{t,t+1}$) do período t para $t+1$ e à mudança tecnológica ($BPC_{GM}^{t,t+1}$) do período t para $t+1$, respectivamente.

$$\begin{aligned}
GM^{t,t+1}(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) &= \frac{D^G(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^G(x^t, y^t)} \\
GM^{t,t+1}(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) &= EC_{GM}^{t,t+1} \times \frac{BPG_{t+1}^{t,t+1}}{BPG_t^{t,t+1}} = EC_{GM}^{t,t+1} \times TC_{GM}^{t,t+1} \\
EC_{GM}^{t,t+1} &= \frac{D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^t(x^t, y^t)} \\
BPC_{GM}^{t,t+1} &= \left(\frac{D^G(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \right) \left(\frac{D^t(x^t, y^t)}{D^G(x^t, y^t)} \right)
\end{aligned} \tag{2}$$

O índice de produtividade de Malmquist-Luenberger (ML), que foi desenvolvido por Chung *et al* (1997), apresenta como objetivo incluir na produtividade já calculada através do índice de Malmquist tradicional os subprodutos indesejáveis gerados nos processos produtivos. As expressões (3) e (4) apresentam este índice.

$$\begin{aligned}
& ML^{t,t+1} (x^t, y^t, b^t, x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) \\
&= \left[\left(\frac{1 + \vec{D}_0^t(x^t, y^t, b^t, -b^t)}{1 + \vec{D}_0^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, -b^{t+1})} \right) \right. \\
&\quad \left. \times \left(\frac{1 + \vec{D}_0^t(x^t, y^t, b^t, -b^t)}{1 + \vec{D}_0^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, -b^{t+1})} \right) \right]^{1/2} \\
&= ML^{t,t+1} (x^t, y^t, b^t, x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) = EC_{ML}^{t,t+1} \times TC_{ML}^{t,t+1} \\
& EC_{ML}^{t,t+1} = \frac{1 + \vec{D}_0^t(x^t, y^t, b^t, -b^t)}{1 + \vec{D}_0^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, -b^{t+1})}
\end{aligned} \tag{3}$$

$$TC_{ML}^{t,t+1} = \left[\left(\frac{1 + \vec{D}_0^{t+1}(x^t, y^t, b^t, -b^t)}{1 + \vec{D}_0^t(x^t, y^t, b^t, -b^t)} \right) \left(\frac{1 + \vec{D}_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, -b^{t+1})}{1 + \vec{D}_0^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, -b^{t+1})} \right) \right]^{1/2} \tag{4}$$

A expressão $ML^{t,t+1}$ representa a variação no índice de produtividade Malmquist-Luenberger do período t para $t+1$.

(OH, 2010b) propôs uma alteração nos modelos apresentados anteriormente, o índice de produtividade Global Malmquist-Luenberger (GML) que também busca identificar os subprodutos indesejáveis, mas agora no contexto de uma tecnologia de produção global. Assim como no índice GM , para definir o índice GML , consideram-se duas tecnologias de referência: a tecnologia de referência contemporânea e a tecnologia de referência global. Na tecnologia de referência contemporânea o conjunto de produção é construído exclusivamente em um único período t . A tecnologia de referência global, por sua vez, incorpora informações para todos os períodos ($t = 1, \dots, T$) disponíveis na amostra de dados em painel para o problema em questão. Neste modelo o índice GML incorpora as heterogeneidades *ex-ante* entre os grupos no cálculo do crescimento da produtividade do índice. De acordo com Oh (2010a, 2010b), se uma atividade de produção gera mais (ou menos) produtos desejáveis e menos (ou mais) subprodutos indesejáveis, o resultado poderá ser o valor maior (ou menor) do que 1, mostrando ganho (ou perda) de produtividade. A expressão (5) apresenta o cálculo do modelo GML .

$$\begin{aligned}
& GML^{t,t+1} (x^t, y^t, b^t, x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) = \frac{1 + D^G(x^t, y^t, b^t)}{1 + D^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \\
& GML^{t,t+1} (x^t, y^t, b^t, x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) = \frac{TE^{t+1}}{TE^t} \times \frac{BPG_{t+1}^{t,t+1}}{BPG_t^{t,t+1}} = EC_{GML}^{t,t+1} \times TC_{GML}^{t,t+1} \\
& EC_{GML}^{t,t+1} = \frac{1 + D^t(x^t, y^t, b^t)}{1 + D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \\
& BPG_{GML}^{t,t+1} = \frac{(1 + D^G(x^t, y^t, b^t))/(1 + D^t(x^t, y^t, b^t))}{(1 + D^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}))/ (1 + D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}))}
\end{aligned} \tag{5}$$

Na qual TE^{t+1} é a eficiência técnica e $EC_{GML}^{t,t+1}$ é a mudança de eficiência. A expressão $BPG_{GML}^{t,t+1}$ é o intervalo para a melhor prática entre uma fronteira de tecnologia contemporânea e uma fronteira de tecnologia global ao longo do tempo na direção (ys, bs). Portanto, $BPG_{GML}^{t,t+1}$, é o intervalo com relação à melhor prática entre os dois períodos, ou seja, a mudança tecnológica entre os dois períodos.

Oh (2010a, 2010b) propôs uma classificação usando código de cores de acordo com os índices de produtividade, em que: i) se um local apresenta índices de crescimento da produtividade ambientalmente

sensíveis (*GML* ou *ML*) maiores do que os índices de crescimento da produtividade típicos (*GM* ou *M*), o crescimento econômico ocorre simultaneamente à diminuição das emissões e a localidade é classificada como “verde”; ii) se, por outro lado, o índice de crescimento da produtividade ambientalmente sensível de um país for menor do que o índice de crescimento da produtividade típica, existe uma ênfase no crescimento econômico em detrimento das questões ambientais e o país é classificado como “amarelo”.

A partir dos modelos propostos pretende-se medir e analisar o crescimento da PTF na agricultura da Amazônia Legal, no período entre 1995 a 2017 e calcular as medidas de produtividade ambientalmente sensíveis, ou seja, aquelas que consideram a geração de gases de efeito estufa no processo de produção na região da Amazônia Legal, aplicando, após cálculo e análise, a lógica de classificação por cores descrita por Oh (2010a, 2010b) classificando os municípios como “verdes” ou “amarelos”.

3.2. Base de dados

Os dados que compõem a base empregada no estudo referem-se aos Censos Agropecuários do IBGE de 2006 e 2017 e aos dados da Produção Agrícola - PAM, ambos divulgados pelo IBGE (IBGE, 2009, 2019, 2022) assim como os dados do Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa – SEEG (SEEG, 2022) para os mesmos anos.

Como *proxy* para o produto agropecuário utilizou-se o Produto Interno Bruto - (PIB) agropecuário. Entretanto no ano de 2006 houve uma quebra severa na safra agropecuária que diminuiu consideravelmente o PIB agropecuário, principalmente para o estado do Mato Grosso que teve seu PIB agropecuário reduzido pela metade. Desta forma, para não gerar um viés na estimação este estudo utilizou os dados do PIB agropecuário ref. ao ano de 2005. Para a variável trabalho, utilizou-se como *proxy* o pessoal ocupado com e sem laço de parentesco com o produtor. Para a variável capital as *proxies* usadas foram o número de tratores para a agricultura e o número de cabeças de gado para a pecuária, os dados destas variáveis foram retirados dos Censos Agropecuários. As *proxies* empregadas para a variável terra foram a área plantada em hectares para a lavoura (temporária e permanente) com os dados obtidos pela PAM e para a pecuária a área em hectares utilizada como pastagem.

Para o subproduto ou produto indesejável gerado no processo de produção agrícola na Amazônia Legal, neste caso os gases de efeito estufa equivalente, foram utilizados dados do SEEG, para mesmos anos das demais variáveis, ou seja, 2006 e 2017. A utilização desta informação tem o intuito de contabilizar as emissões das atividades da agropecuária nos municípios da Amazônia Legal.

Para se ter um retrato mais rico e preciso da variabilidade tecnológica empregada na produção agropecuária da Amazônia Legal, foi utilizado dados dos municípios ao invés de dados estaduais agregados. Alguns dos 772 municípios que compõem a Amazônia Legal foram eliminados da base de dados devido à indisponibilidade de ao menos uma das informações necessárias para o cálculo do modelo proposto para um dos anos. Assim, a amostra final utilizada neste estudo contém dados para 647 municípios da região e dados para os anos de 2006 e 2017, totalizando um painel com 1.294 observações válidas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estatísticas descritivas das variáveis são apresentadas na Tabela 2. Pode-se observar que as médias foram superiores às medianas, o que indica uma distribuição nos valores das variáveis com distribuição assimétrica para a direita e que a maior parte dos municípios analisados se encontram na cauda esquerda da distribuição.

Na tabela 3 são apresentados os valores das variáveis para cada município que compõem a amostra somadas para cada estado para o ano de 2006 e a taxa de crescimento por estado ref. as mesmas variáveis para o período entre 2006 e 2017, com exceção ao PIB agropecuário que foram utilizados os dados de 2005 e 2017, como mencionado no capítulo ref. a base de dados.

Tabela 2. Estatísticas descritivas das variáveis de insumos e produtos dos municípios utilizados neste estudo

	Média	Desvio Padrão	Mediana	Máximo	Mínimo
PIB agro (milhares de reais)	47.993	82.847	23.034	881.385	559
Emissões (toneladas de CO2 eq.)	272.452	345.684	155.819	4.485.537	1.437
Trabalho (unidade)	3.790	3.955	2.653	48.246	95
Capital (núm. de tratores)	219.8	371.445	88.0	4.380	3
Capital (núm. de cabeça de gado)	180.183	620.901	76.724	11.986.664	309
Terra agricultura (hectares)	24.914	78.107	4.532	1.205.669	7
Terra pecuária (hectares)	83.478	115.650	49.990	1.400.233	7

Fonte: Resultados da pesquisa.

Para o ano de 2005 o PIB agropecuário apresentou um valor total de 26,3 bilhões e em 2017 de 35,8 bilhões, com um crescimento de 40% para o período. Amapá foi o estado com maior crescimento, sendo 4,4%, seguido pelos estados de Tocantins com 2,2% e Roraima com 2,1%. Ao observar os dados municipais, seis municípios do estado do Mato Grosso possuem os maiores PIB agropecuários no censo de 2017. São eles: os municípios de Sapezal com R\$ 769.611 milhões, Sorriso com R\$ 744.887 milhões, Campo Novo do Parecis com R\$ 672.878 milhões, Campo Verde com R\$ 612.649 milhões; Diamantino com R\$ 597.988 milhões e Nova Monte Verde com R\$ 462.003 milhões.

Tabela 3. Valor total para o ano inicial de 2006 e taxas de crescimento dos produtos e insumos nos estados da Amazônia Legal para o ano de 2017

UF	PIB agro (R\$ milhões)		Emissões (mil ton. CO2 eq.)		Trabalho (mil pessoas)		Capital agrícola (mil tratores)		Capital pecuária (mil cabeças de Gado)		Terra Lavoura (mil hectares)		Terra Pastagem (mil hectares)	
	valor	cresc.	valor	cresc.	valor	cresc.	valor	cresc.	valor	cresc.	valor	cresc.	valor	cresc.
AC	505	0,0	4.815	-0,4	67	-0,1	1	3,2	1.589	1,1	103	0,2	965	0,1
AM	1.041	0,1	2.506	1,7	130	0,0	1	2,8	1.006	3,8	122	-0,4	737	0,9
AP	116	4,4	224	16,4	6	6,0	0	35,5	25	69,3	6	35,7	72	11,8
MA	3.450	0,5	13.428	1,9	614	-0,2	5	4,6	5.144	5,1	1.194	1,4	5.112	0,6
MT	11.756	0,0	59.440	-0,3	356	0,4	42	1,0	20.655	2,2	7.751	0,3	22.053	-0,2
PA	6.157	0,4	37.450	0,1	732	0,0	9	3,0	13.600	0,8	1.209	2,1	10.625	-0,1
RO	1.931	0,7	23.995	-0,4	278	-0,1	6	2,4	8.543	1,6	604	1,3	4.845	0,2
RR	142	2,1	1.303	1,5	29	0,8	0	4,7	525	4,4	62	0,3	717	0,1
TO	1.235	2,2	17.023	1,6	174	0,9	10	1,9	6.518	1,8	600	1,6	8.027	0,1
Total	26.333	0,4	160.184	0,2	2.385	0,1	74	1,8	57.605	2,0	11.651	0,8	53.153	0,0

Fonte: Resultados da pesquisa.

Em relação às variáveis para o capital (representada pelas *proxies* número de tratores para a agricultura e número de cabeças de gado para a pecuária), o estado que apresentou maior crescimento, no período de 2006 para 2017, para a *variável* tratores foi o estado do Amapá com 35,5%, seguido de Roraima com um crescimento de 4,7% e Maranhão com 4,6%. Estes estados também apresentaram o maior crescimento para o número de cabeças de gado, com 69,3% para o estado do Amapá, 5,1% para o Maranhão e 4,4% para Roraima. Para a *proxy* trabalho, o estado do Amapá apresentou o maior percentual de crescimento, com 6%, no período como um todo. Já os estados do Acre, Maranhão e Rondônia apresentaram crescimento negativo. Sobre a variável terra utilizada na agricultura, o estado do Amapá alcançou o maior crescimento com 35,7% para terra utilizada na lavoura, no período estudado de 2006 para 2017, seguido do estado do Pará com um crescimento de 2,1%. Para a terra utilizada na pecuária novamente

o estado do Amapá apresentou o maior crescimento com 11,8% seguido do estado do Amazonas com 0,9%. Em termos de quantidade de hectares de pastagem e de terra para lavoura, o estado do Mato Grosso desponta de forma considerável em relação aos demais estados para ambas as atividades.

No período analisado, 2006 e 2017, considerando a variável para as emissões (CO₂ equivalente), o estado com maior emissão de GEEs foi o Amapá com um crescimento de 16,4% no ano de 2017 em relação ao ano de 2006. Em relação aos municípios que figuram entre os dez que mais emitiram GEEs no ano de 2006, seis municípios pertencem ao estado do Mato Grosso, três pertencem ao estado do Pará e um ao estado de Rondônia. Já no ano de 2017, dos dez municípios que mais emitiram GEEs, cinco pertencem ao Mato Grosso, quatro pertencem ao Pará e um pertence à Rondônia. Os municípios com maior emissão de CO₂ equivalente para o ano de 2006 foram São Félix do Xingu, município localizado no estado do Pará e o município de Cáceres do estado do Mato Grosso. Para o ano de 2017 foram dois municípios do estado do Mato Grosso, São Félix do Araguaia e novamente o município de Cáceres, conforme pode-se observar na Tabela 4.

Tabela 4. Municípios com maior valor de emissão de CO₂ eq. em 2006 e 2017 (mil toneladas de CO₂ equivalente)

Município	UF	2006	diferença	Município	UF	2017	diferença
São Félix do Xingu	PA	3.334.661	58,9%	São Félix do Araguaia	MT	4.485.537	49,7%
Cáceres	MT	1.964.200		Cáceres	MT	2.229.637	
Total		5.298.861				6.715.174	

Fonte: Resultados da pesquisa.

As Tabelas 5 e 6 apresentam os resultados para os índices de crescimento da produtividade, de mudança na eficiência técnica e de mudança tecnológica para a agropecuária na Amazônia Legal, apresentando, respectivamente, a média ponderada e a média simples dos resultados municipais. Para os modelos GM (PASTOR; LOVELL, 2005b) e M (FÄRE *et al.*, 1994b) os cálculos foram realizados com base na variável PIB agropecuário, para o produto e trabalho, capital (considerando às proxies tratores e cabeças de gado) e terra (considerando as proxies lavoura e pastagem) para os insumos. Para os modelos GML (OH, 2010a, 2010b) e ML (CHUNG; FÄRE; GROSSKOPF, 1997), além das variáveis usadas no modelo GM e M, incorpora-se também a variável emissões como subproduto.

A partir da análise dos índices pode-se concluir que houve crescimento positivo para a PTF na Amazônia Legal, isto é, o valor calculado por meio dos índices de produtividade para todos os modelos é maior do que um. Ao examinar os índices em nível de agregação estadual, constata-se que alguns estados foram exceção ao crescimento positivo. Pela média ponderada e simples o estado do Acre, do Amapá, do Maranhão e de Roraima apresentaram crescimento negativo para os modelos GML e ML, e o estado do Acre para os modelos GM e M. Percebe-se também que os modelos que levam em consideração as emissões (modelos GML e ML) apresentaram índices de crescimento inferiores aos modelos que não consideram as emissões. O estado com o maior ganho de produtividade no período foi o Amazonas, para os quatro modelos calculados.

Em relação aos índices para a mudança na eficiência técnica (EC), os modelos que levam em consideração as emissões obtiveram o menor ganho de eficiência em relação aos que não consideram. Para a média ponderada e para média simples o estado do Amazonas obteve o maior ganho de eficiência em ambos os modelos, com uma diferença considerável em relação ao estado de Rondônia que obteve a segunda maior eficiência também para ambos os modelos.

Com relação aos resultados para os índices de mudança tecnológica (TC e BPC) obteve-se resultados diversos. Tanto para a média ponderada quanto para a simples, o estado do Acre obteve o maior ganho em relação a mudança tecnológica, seguido do estado de Rondônia nos modelos GM e M. Entretanto, nos modelos GML e ML foi o estado do Amazonas que obteve o maior ganho para as duas médias.

Tabela 5. Índice de crescimento da produtividade, mudança na eficiência técnica e mudança tecnológica para a agropecuária na Amazônia Legal calculadas pelas médias ponderadas pelo produto para os índices GML (OH, 2010a, 2010b), ML (CHUNG; FÄRE; GROSSKOPF, 1997), GM (PASTOR; LOVELL, 2005b) e M (FÄRE *et al.*, 1994b) – 2006 a 2017

UF	GML			ML			GM			M		
	Prod.	EC	BPC	Prod.	EC	BPC	Prod.	EC	TC	Prod.	EC	TC
AC	0,9968	0,9764	1,0222	0,9942	0,9764	1,0188	0,9460	0,8056	1,2067	0,8965	0,8056	1,1386
AM	1,2699	1,2440	1,0317	1,3332	1,2440	1,0647	2,9247	2,9386	1,0178	3,0500	2,9386	1,0291
AP	0,8916	0,8839	1,0076	0,9080	0,8839	1,0296	1,2702	1,1601	1,0522	1,3210	1,1601	1,1074
MA	0,9888	0,9791	1,0137	0,9829	0,9791	1,0024	1,1756	1,1165	1,0561	1,1642	1,1165	1,0170
MT	1,0297	1,0266	1,0051	1,0182	1,0266	0,9918	1,2832	1,3208	0,9957	1,3230	1,3208	0,9926
PA	1,0246	1,0110	1,0255	1,0460	1,0110	1,0269	1,6714	1,6033	1,0427	1,6281	1,6033	0,9849
RO	1,0069	0,9977	1,0096	1,0062	0,9977	1,0081	1,9676	1,7316	1,1423	1,9465	1,7316	1,1175
RR	0,9946	0,9783	1,0188	0,9886	0,9783	1,0071	1,2975	1,1769	1,0821	1,2660	1,1769	1,0600
TO	1,0088	1,0034	1,0082	1,0065	1,0034	1,0006	1,7495	1,7019	1,0339	1,7463	1,7019	1,0129
Total	1,0235	1,0112	1,0158	1,0315	1,0112	1,0167	1,5873	1,5061	1,0700	1,5935	1,5061	1,0511

Fonte: Resultados da pesquisa.

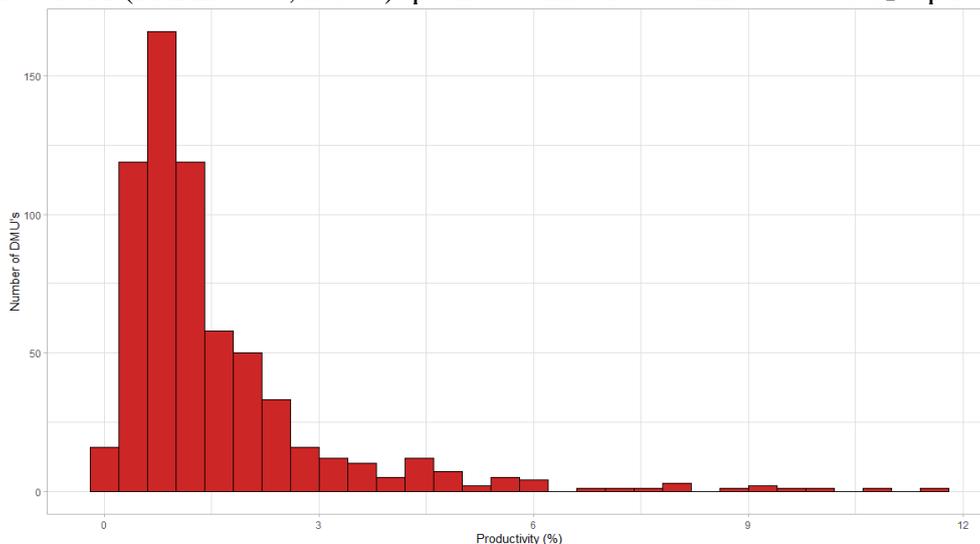
Tabela 6. Índice de crescimento da produtividade, mudança na eficiência técnica e mudança tecnológica para a agropecuária na Amazônia Legal calculadas pelas média simples pelo produto para os índices GML (OH, 2010a, 2010b), ML (CHUNG; FÄRE; GROSSKOPF, 1997), GM (PASTOR; LOVELL, 2005b) e M (FÄRE *et al.*, 1994b) – 2006 a 2017

UF	GML			ML			GM			M		
	Prod.	EC	BPC	Prod.	EC	BPC	Prod.	EC	TC	Prod.	EC	TC
AC	0,9965	0,9754	1,0230	0,9936	0,9754	1,0192	0,9409	0,7979	1,2136	0,8902	0,7979	1,1431
AM	1,2507	1,2303	1,0289	1,3156	1,2303	1,0627	2,9267	2,9493	1,0154	3,0783	2,9493	1,0352
AP	0,9454	0,9366	1,0087	0,9607	0,9366	1,0271	1,3642	1,2482	1,0415	1,4093	1,2482	1,0808
MA	0,9887	0,9791	1,0136	0,9828	0,9791	1,0023	1,1789	1,1199	1,0557	1,1674	1,1199	1,0164
MT	1,0299	1,0268	1,0051	1,0183	1,0268	0,9917	1,2836	1,3218	0,9952	1,3234	1,3218	0,9920
PA	1,0250	1,0117	1,0254	1,0470	1,0117	1,0271	1,6800	1,6113	1,0432	1,6388	1,6113	0,9888
RO	1,0069	0,9977	1,0096	1,0061	0,9977	1,0080	1,9729	1,7359	1,1428	1,9514	1,7359	1,1175
RR	0,9936	0,9766	1,0196	0,9867	0,9766	1,0066	1,2697	1,1486	1,0828	1,2371	1,1486	1,0599
TO	1,0089	1,0034	1,0082	1,0064	1,0034	1,0006	1,7527	1,7057	1,0334	1,7496	1,7057	1,0123
Total	1,0203	1,0115	1,0134	1,0226	1,0115	1,0079	1,5456	1,4936	1,0447	1,5465	1,4936	1,0182

Fonte: Resultados da pesquisa.

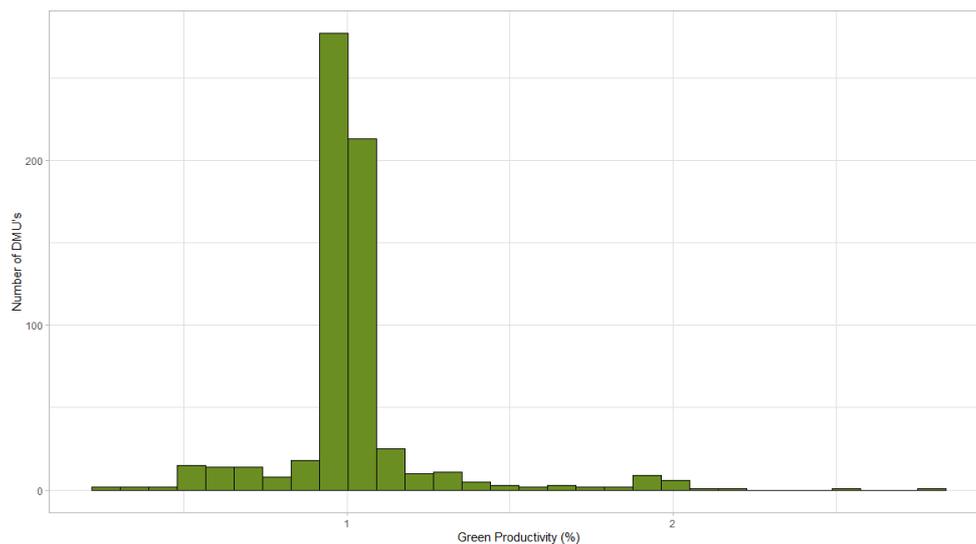
As Figuras 4 e 5 apresentam o crescimento da produtividade nos municípios que compõem a amostra avaliada para os modelos M (FÄRE *et al.*, 1994b) e ML (CHUNG; FÄRE; GROSSKOPF, 1997) para o período entre 2006 e 2017. As faixas de valores para a estratificação apresentada foram definidas a partir dos quintis dos resultados do crescimento da produtividade.

Figura 4. Crescimento da PTF nos municípios da Amazônia Legal para a série de tempo de 2006 e 2017 por meio do modelo M (FÄRE *et al.*, 1994b) que não considera as emissões de CO₂ equivalente



Fonte: Resultados da pesquisa.

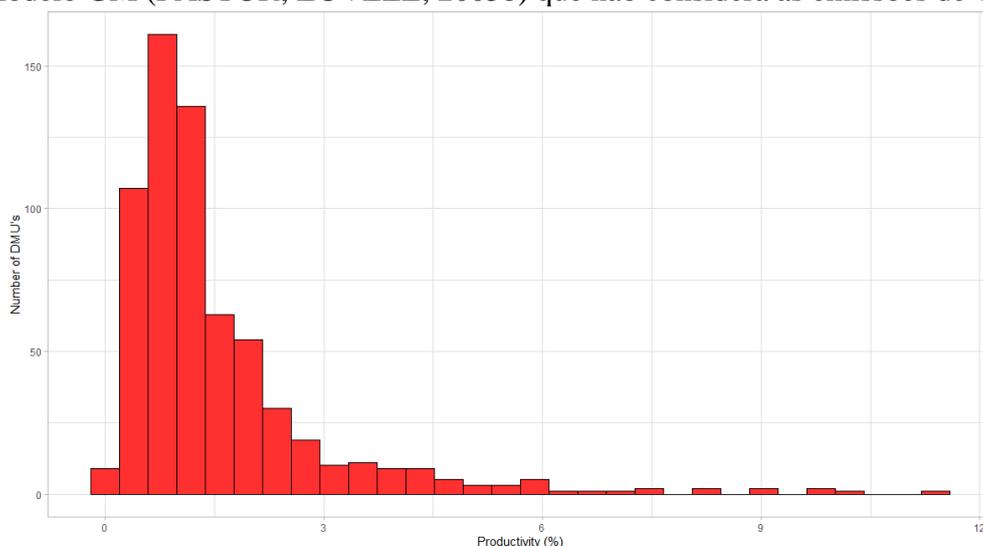
Figura 5. Crescimento da PTF nos municípios da Amazônia Legal para a série de tempo de 2006 e 2017 por meio do modelo ML (CHUNG; FÄRE; GROSSKOPF, 1997) que considera as emissões de CO₂ equivalente



Fonte: Resultados da pesquisa.

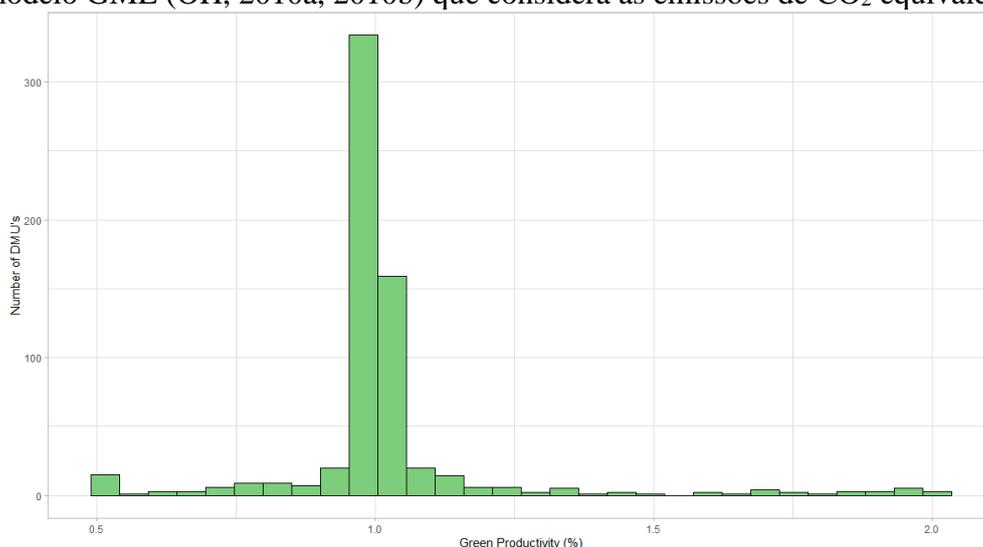
As Figuras 6 e 7 apresentam o crescimento da PTF nos municípios que compõem a amostra avaliada para os modelos GM (PASTOR; LOVELL, 2005b) e GML (OH, 2010a, 2010b) e para a série de tempo 2006 e 2017. Assim como as Figuras 4 e 5, as faixas de valores para a estratificação também foram definidas a partir dos quintis dos resultados obtidos para o crescimento da produtividade.

Figura 6. Crescimento da PTF nos municípios da Amazônia Legal para a série de tempo de 2006 e 2017 por meio do modelo GM (PASTOR; LOVELL, 2005b) que não considera as emissões de CO₂ equivalente



Fonte: Resultados da pesquisa.

Figura 7. Crescimento da PTF nos municípios da Amazônia Legal para a série de tempo de 2006 e 2017 por meio do modelo GML (OH, 2010a, 2010b) que considera as emissões de CO₂ equivalente



Fonte: Resultados da pesquisa.

A tabela 7 apresenta o número de municípios e o percentual de municípios “verdes” para cada estado da Amazônia Brasileira, em relação aos resultados das produtividades nos modelos propostos. Conforme apresentado no capítulo de metodologia, se os resultados da produtividade para o índice GML ou ML for maior que o resultado do índice GM ou M há crescimento com diminuição das emissões, portanto, o município é “verde”, e para o índice GML ou ML se o município apresentar resultado menor que o índice GM ou M há ênfase no crescimento econômico em detrimento das questões ambientais, portanto, o município é classificado como “amarelo”.

Dessa forma, os resultados indicam que Roraima é o estado que apresentou o maior percentual de municípios “verdes”, com 64% para o resultado dos índices GML x GM, onde dos 14 municípios analisados 9 possuem classificação “verde”. Para a comparação dos índices ML x M o estado do Acre obteve o maior percentual de municípios “verdes”, com um percentual de 69%, sendo que dos 13 municípios 9 foram considerados “verdes”. Na análise integral, para a Amazônia Legal, a comparação dos índices GML x GM foi de 44%, sendo 286 municípios considerados “verdes” dos 647 municípios analisados, para a comparação dos índices ML x M percentual foi de 45% com 293 municípios classificados como “verdes”.

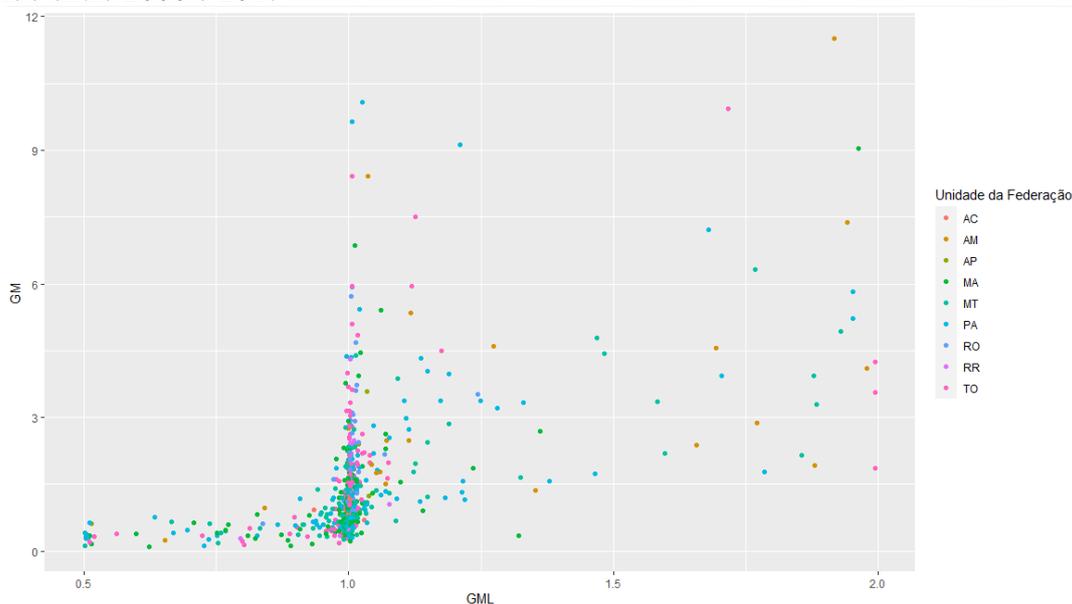
Tabela 7. Número de municípios “verdes” e percentual de municípios “verdes” por estado da Amazônia Legal comparando-se os resultados das produtividades para os índices GML (OH, 2010a, 2010b), GM (PASTOR; LOVELL, 2005b), ML (CHUNG; FÄRE; GROSSKOPF, 1997) com o índice M (FÄRE *et al.*, 1994b)

UF	Quantidade de Municípios	Quantidades de municípios “verdes” GML vs. GM	Percentual de municípios “verdes” GML vs. GM	Quantidades de municípios “verdes” ML vs. M	Percentual de municípios “verdes” ML vs. M
AC	13	8	62%	9	69%
AM	26	4	15%	4	15%
AP	7	3	43%	3	43%
MA	142	78	55%	75	53%
MT	140	72	51%	73	52%
PA	121	57	47%	62	51%
RO	52	10	19%	11	21%
RR	14	9	64%	9	64%
TO	132	45	34%	47	36%
Total	647	286	44%	293	45%

Fonte: Resultados da pesquisa.

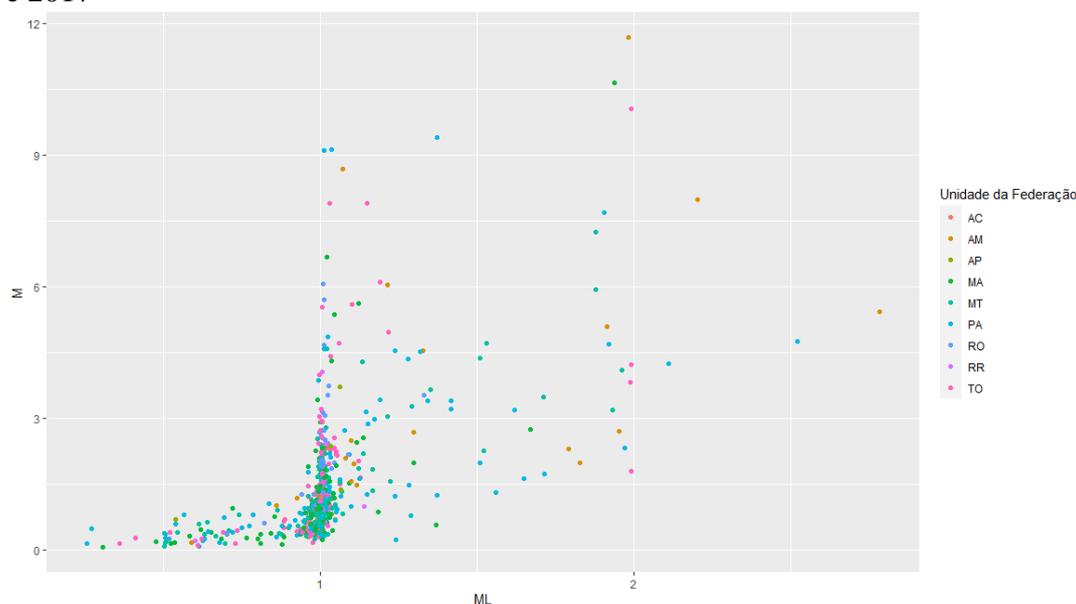
As Figuras 8 e 9 demonstram os resultados dos índices para os municípios da Amazônia Legal comparando os resultados das produtividades entre os índices GML (OH, 2010a, 2010b) com GM (PASTOR; LOVELL, 2005b) e ML (CHUNG; FÄRE; GROSSKOPF, 1997) com M (FÄRE *et al.*, 1994b).

Figura 8. Resultados das relações entre as produtividades calculadas por meio dos índices GML (OH, 2010a, 2010b) e GM (PASTOR; LOVELL, 2005b) para os municípios da Amazônia Legal no período compreendido entre 2006 e 2017



Fonte: Resultados da pesquisa.

Figura 9. Resultados das relações entre as produtividades calculadas por meio dos índices ML (CHUNG; FÄRE; GROSSKOPF, 1997) e M (FÄRE *et al.*, 1994b) para os municípios da Amazônia Legal no período entre 2006 e 2017



Fonte: Resultados da pesquisa.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção agropecuária brasileira é bastante relevante para a economia do país e parte do seu crescimento recente ocorre na região da Amazônia Legal. Na década de 1970 a expansão agropecuária foi realizada de forma mais extensiva, nessa região, ao mesmo tempo que houve uma crescente preocupação mundial em torno da degradação ambiental e suas consequências. Nesse contexto, este trabalho visou medir o crescimento da produtividade total dos fatores – PTF, nessa região, analisando as variáveis com base nos anos de 2005/06 e 2017, com dados dos dois últimos Censos Agropecuários e da Produção Agrícola – PAM, ambos divulgados pelo IBGE, bem como dados do Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa - SEEG para contabilizar as emissões de gases de efeito estufa na região.

Como resultado observou-se um crescimento da produção agropecuária no período analisado para todas as variáveis, sendo que as variáveis para o capital na agricultura e na pecuária, medidas por meio das *proxies* tratores e cabeça de gado respectivamente, apresentaram os crescimentos mais relevantes. Os resultados das medidas de PTF por meio de métodos que levam em consideração a presença de subproduto, ou produto indesejável, que no caso desse estudo é representado pela emissão de CO₂ equivalente, e que foram calculados pelos métodos GML (OH, 2010a, 2010b) e ML (CHUNG; FÄRE; GROSSKOPF, 1997), foram comparados com medidas de PTF que não consideram as emissões, calculadas pelos métodos GM (PASTOR; LOVELL, 2005b) e M (FÄRE *et al.*, 1994b). Os resultados indicam que os métodos GML e ML retratam um crescimento da produtividade, da eficiência técnica e da mudança tecnológica inferiores aos modelos típicos GM e M.

Os resultados também demonstraram que pela comparação dos métodos GML x ML dos 647 municípios 286 podem ser considerados “verdes”, cerca de 44% e pela comparação dos métodos GM x M pode-se considerar 293 municípios “verdes”, cerca de 45%. Assim, dos municípios da Amazônia Legal para o período entre 2005/06 e 2017, o crescimento econômico ocorreu simultaneamente à diminuição das emissões para os municípios, considerados “verdes”, e para a maioria dos municípios, considerados “amarelos”, houve ênfase no crescimento econômico em detrimento do controle na emissão de gases de efeito estufa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSEN, L. E.; GRANGER, C. W. J.; REIS, E. J.; WEINHOLD, D.; WUNDER, S. **The Dynamics of Deforestation and Economic Growth in the Brazilian Amazon**. Cambridge University Press, 2002. 257 p.
- ARIMA, E.; BARRETO, P.; BRITO, M. **Pecuária na amazônia: tendências e implicações para a conservação ambiental**. Imazon, 2005. 71 p.
- BARROS, A. L. M. de. **Capital, produtividade e crescimento da agricultura: o Brasil de 1970 a 1995**. p. 1–149, 1999.
- 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.
- BRASIL. **Lei n. 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis n.ºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis n.ºs 4.771, de 15 de setembro de 1966**Camara dos Deputados2012. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2012/lei-12651-25-maio-2012-613076-normaatualizada-pl.pdf>>.
- BYERLEE, D.; STEVENSON, J.; VILLORIA, N. **Does intensification slow crop land expansion or encourage deforestation?**Global Food SecurityElsevier, 2014.
- CAVES, D. W.; CHRISTENSEN, L. R.; DIEWERT, W. E. **The Economic Theory of Index Numbers and the Measurement of Input, Output, and Productivity**.
- CAVES, D. W.; CHRISTENSEN, L. R.; DIEWERT, W. E. **Multilateral Comparisons of Output, Input, and Productivity Using Superlative Index Numbers**Journal. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/2232257>>.
- CEPEA. **Setor agropecuário aumenta participação no PIB brasileiro**. Disponível em: <www.faespsenar.com.br>.
- CHEN, S.; GOLLEY, J. “Green” productivity growth in China’s industrial economy. **Energy Economics**, v. 44, p. 89–98, 2014.
- CHUNG, Y. H.; FÄRE, R.; GROSSKOPF, S. **Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach**Journal of Environmental Management.
- COELLI, T.; RAO, D. S. P.; BATTESE, G. E. **An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis**. Springer US, 1998.
- DE AREA LEÃO PEREIRA, E. J.; DE SANTANA RIBEIRO, L. C.; DA SILVA FREITAS, L. F.; DE BARROS PEREIRA, H. B. Brazilian policy and agribusiness damage the Amazon rainforest. **Land Use Policy**, v. 92, n. January, p. 104491, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104491>>.
- DE AREA LEÃO PEREIRA, E. J.; SILVEIRA FERREIRA, P. J.; DE SANTANA RIBEIRO, L. C.; SABADINI CARVALHO, T.; DE BARROS PEREIRA, H. B. Policy in Brazil (2016–2019) threaten conservation of the Amazon rainforest. **Environmental Science and Policy**, v. 100, n. April, p. 8–12, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.06.001>>.
- EMROUZNEJAD, A.; YANG, G. liang. A survey and analysis of the first 40 years of scholarly literature in DEA: 1978–2016. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 61, p. 4–8, 1 mar. 2018.
- FARE, R.; GROSSKOPF, S.; LINDGREN, B.; ROOS, P. **3 PRODUCTIVITY DEVELOPMENTS IN SWEDISH HOSPITALS: A MALMQUIST OUTPUT INDEX APPROACH**. [s.l: s.n.].
- FÄRE, R.; GROSSKOPF, S.; NORRIS, M.; ZHANG, Z. **American Economic Association Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries**Source: The American Economic Review.
- FÄRE, R.; GROSSKOPF, S.; NORRIS, M.; ZHANG, Z. **Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries**.
- FEARNSIDE, P. M. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. v. b, 2001.
- FEARNSIDE, P. M. **Deforestation in Brazilian Amazonia: History, Rates, and Consequences**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.inpe.br>>.
- FEARNSIDE, P. M. **Destruição e Conservação da Floresta Amazônica**.

GASQUES, J. G.; VILLA VERDE, M. C. Crescimento da agricultura brasileira e política agrícola nos anos oitenta. **IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**, 1990.

GRILICHES, Z. As Fontes de Crescimento da Produtividade Medida: Agricultura dos Estados Unidos, 1940-60. **Journal of Political Economy**, v. 81 n., p. 331–346, 1963. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/pdf/1828822.pdf>>.

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.

HALL, A. Agrarian Crisis in Brazilian Amazonia: The Grande Carajas Programme. **The Journal of Development Studies**, v. 23, n. 4, p. 522–552, 1987.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2006**. Rio de Janeiro: IBGE, 2009a.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2006**. [s.l.: s.n.]

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Amazônia Legal**. Disponível em: <https://geoftp.ibge.gov.br/organizacao_do_territorio/estrutura_territorial/amazonia_legal/2021/Mapa_da_Amazonia_Legal_2021.pdf>.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal - PAM. 2022**.

INFOAMAZÔNIA. **Crescimento explosivo da boiada na Amazônia desafia corte nas emissões de metano pelo Brasil**. Disponível em: <<https://infoamazonia.org/2021/11/09/crescimento-explosivo-pecuaria-amazonia-corte-metano-cop26/>>. Acesso em: 6 abr. 2022.

INPE. PRODES - **Amazônia: Monitoramento do Desmatamento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite**. Coordenação-Geral de Observação da Terra -, p. 4–7, 2022. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>>.

IPAM, I. de P. A. da A. **Arco do desmatamento**. Disponível em: <<https://ipam.org.br/glossario/arco-do-desmatamento/>>. Acesso em: 12 jul. 2023.

KUMAR, S. Environmentally sensitive productivity growth: A global analysis using Malmquist-Luenberger index. **Ecological Economics**, v. 56, n. 2, p. 280–293, 15 fev. 2006.

LI, K.; LIN, B. Measuring green productivity growth of Chinese industrial sectors during 1998-2011. **China Economic Review**, v. 36, p. 279–295, 1 dez. 2015.

LI, K.; LIN, B. Impact of energy conservation policies on the green productivity in China’s manufacturing sector: Evidence from a three-stage DEA model. **Applied Energy**, v. 168, p. 351–363, 15 abr. 2016.

LI, L. bing; LIU, B. lian; LIU, W. lin; CHIU, Y. H. Efficiency evaluation of the regional high-tech industry in China: A new framework based on meta-frontier dynamic DEA analysis. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 60, p. 24–33, 1 dez. 2017.

LIU, Y.; FENG, C. What drives the fluctuations of “green” productivity in China’s agricultural sector? A weighted Russell directional distance approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 147, p. 201–213, 1 ago. 2019.

MACEDO, M. N.; DEFRIES, R. S.; MORTON, D. C.; STICKLER, C. M.; GALFORD, G. L.; SHIMABUKURO, Y. E. Decoupling of deforestation and soy production in the southern Amazon during the late 2000s. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 109, n. 4, p. 1341–1346, 2012.

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, 15 dez. 2011.

MALMQUIST, S. Index number and indifference surfaces. **Trabajos de Estadística**, v. 4, p. 209–242, 1953.

MARGULIS, S. O desempenho do governo brasileiro e do Banco Mundial em relação à questão ambiental do Projeto de Ferro Carajás. **IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**, 1990.

MARGULIS, S. **Causas econômicas do desmatamento da Amazônia**. [s.l.: s.n.]v. 1100 p.

NASCIMENTO, N.; WEST, T. A. P.; BÖRNER, J.; OMETTO, J. What drives intensification of land use at agricultural frontiers in the Brazilian amazon? Evidence from a decision game. **Forests**, v. 10, n. 6, 1 jun. 2019.

NOBRE, C. A. **Modelos e cenários para a Amazônia: o papel da ciência**. Disponível em: <https://cetesbhomolog2.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/05/impactos_ecossistemas_cnobre.pdf>. Acesso em: 1 dez. 2022.

OH, D. hyun. A metafrontier approach for measuring an environmentally sensitive productivity growth index. **Energy Economics**, v. 32, n. 1, p. 146–157, jan. 2010a.

OH, D. hyun. A global Malmquist-Luenberger productivity index. **Journal of Productivity Analysis**, v. 34, n. 3, p. 183–197, dez. 2010b.

PASTOR, J. T.; LOVELL, C. A. K. A global Malmquist productivity index. **Economics Letters**, v. 88, n. 2, p. 266–271, ago. 2005.

SEEG. **Emissões por setor - agropecuária**.

SEEG. Gases de efeito estufa. **Observatório do clima**, 2023.

SERRA, M. A.; FERNANDEZ, R. G. Perspectivas de desenvolvimento da Amazônia: motivos para o otimismo e para o pessimismo. **Economia e Sociedade**, v. 2, n. 2, p. 107–131, 2004.

SHEN, Z.; BOUSSEMART, J. P.; LELEU, H. Aggregate green productivity growth in OECD's countries. **International Journal of Production Economics**, v. 189, p. 30–39, 1 jul. 2017.

SHI, X.; LI, L. Green total factor productivity and its decomposition of Chinese manufacturing based on the MML index:2003–2015. **Journal of Cleaner Production**, v. 222, p. 998–1008, 10 jun. 2019.

SONG, M.; AN, Q.; ZHANG, W.; WANG, Z.; WU, J. **Environmental efficiency evaluation based on data envelopment analysis: A review***Renewable and Sustainable Energy Reviews*set. 2012.

SONG, M.; PENG, J.; WANG, J.; ZHAO, J. Environmental efficiency and economic growth of China: A Ray slack-based model analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 269, n. 1, p. 51–63, 16 ago. 2018.

SUEYOSHI, T.; YUAN, Y.; GOTO, M. A literature study for DEA applied to energy and environment. **Energy Economics**, v. 62, p. 104–124, 1 fev. 2017.

TIAN, P.; LIN, B. Promoting green productivity growth for China's industrial exports: Evidence from a hybrid input-output model. **Energy Policy**, v. 111, p. 394–402, 1 dez. 2017.

WANG, Z.; FENG, C. Sources of production inefficiency and productivity growth in China: A global data envelopment analysis. **Energy Economics**, v. 49, p. 380–389, 1 maio 2015.

WEST, T. A. P.; FEARNSIDE, P. M. Brazil's conservation reform and the reduction of deforestation in Amazonia. **Land Use Policy**, v. 100, 1 jan. 2021.

YANG, W.; SHI, J.; QIAO, H.; SHAO, Y.; WANG, S. Regional technical efficiency of Chinese Iron and steel industry based on bootstrap network data envelopment analysis. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 57, p. 14–24, 1 mar. 2017.

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, 15 out. 2011.

ZHOU, P.; ANG, B. W.; POH, K. L. **A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies***European Journal of Operational Research*16 ago. 2008.