

PRODUTIVIDADE TOTAL DOS FATORES E EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO NA AGRICULTURA BRASILEIRA: UMA MEDIDA DE PTF AMBIENTALMENTE SENSÍVEL

Cassiano Bragagnolo¹
Henrique Ryosuke Tateishi²

RESUMO

A atividade agropecuária foi responsável por 23% das emissões de gases de efeito no Brasil no período de 1990 a 2019. Dada a relevância do setor agrícola nas emissões de gases de efeito estufa, este artigo visa medir o crescimento da produtividade total dos fatores (PTF) na agricultura brasileira nas últimas décadas com base em dados dos censos agropecuários do IBGE de 2006 e 2017, da Produção Agrícola Municipal (PAM), também do IBGE e do Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa – SEEG (2021), comparando medidas de produtividade que levam em consideração a existência de subprodutos não desejáveis (no caso emissões de gases de efeito estufa) com medidas que não levam em consideração a existência deste tipo de subproduto. Para tanto, foram calculados e comparados os resultados de índices de Malmquist (Färe et al., 1994b) e de Malmquist generalizado (Pastor e Lovell, 2005), que não levam em consideração a existência de produtos indesejáveis e de Malmquist-Lundemberg (Chung et al, 1997) e Malmquist-Lundemberg generalizado (Oh, 2010a, 2010b), que levam em consideração a existência destes subprodutos. Os resultados apontaram que o crescimento da produtividade, da eficiência técnica e da mudança tecnológica 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.

Palavras-chave: índice de Malmquist; emissões de dióxido de carbono; PTF; agricultura brasileira

ABSTRACT

Agriculture was responsible for 23% of greenhouse gas emissions in Brazil from 1990 to 2019. Given the importance of the agricultural sector in Brazilian greenhouse gas emissions, this article aims to measure the growth of total factor productivity (TFP) in Brazilian agriculture in recent decades based on data from the 2006 and 2017 IBGE agricultural censuses, the Municipal Agricultural Production (PAM), also from IBGE and the Greenhouse Gas Emission and Removal Estimation System – SEEG (2021), comparing productivity measures that take into account the existence of undesirable by-products (in this case greenhouse gas emissions) with measures that do not take into account the existence of this type of by-product. Therefore, the results of Malmquist (Färe et al., 1994b) and generalized Malmquist (Pastor and Lovell, 2005) indexes, which do not consider the existence of undesirable products and Malmquist-Lundemberg, (Chung et al., 1997) and generalized Malmquist-Lundemberg (Oh, 2010a, 2010b), which consider the existence of these by-products., were calculated and compared. The results showed that the growth in productivity, technical efficiency and technological change accounted for through models that consider the existence of emissions in the sector is significantly lower than the values of models that do not consider the existence of these by-products.

Keywords: Malmquist index; carbon dioxide emissions; TFP; Brazilian agriculture

Área 11 - Economia Agrícola e do Meio Ambiente

Classificação JEL: Q10, Q53, O44

¹ Professor do Programa de Pós-Graduação em Economia do Departamento de Economia da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar. E-mail: cassiano@ufscar.br.

² Ex-aluno do Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar. Doutorando em Ciência Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental da Universidade de São Paulo – USP. E-mail: hrtateishi@usp.br.

1. INTRODUÇÃO

O setor agropecuário tem apresentado elevado crescimento econômico devido ao consistente crescimento de produtividade total dos fatores (PTF) nas últimas décadas (Bragagnolo et al., 2010; Gasques et al., 2014; Pereira et al., 2012). Bragagnolo *et al.* (2010) apontaram que, para o período compreendido entre 1975 e 2005, o produto cresceu 2,4% ao ano, enquanto, no mesmo período, o crescimento da produtividade total dos fatores (PTF) foi de 3,1% ao ano. Para o período mais recente, de 1995 a 2017, o crescimento da PTF continuou elevado, com valores da ordem de 3,0% ao ano (Bragagnolo et al., 2021), o que mostra a contribuição fundamental desta variável para os resultados econômicos da atividade. Este aumento na PTF se deu por meio do uso de diferentes técnicas e tecnologias que fizeram a agricultura aumentar a produção e a produtividade ao longo do tempo (Bragagnolo et al., 2010; Gasques et al., 2009 e Rada et al., 2019).

Algumas tecnologias podem gerar poluentes ou subprodutos não desejáveis do ponto de vista ambiental, de maneira que a existência de crescimento da PTF não significa, necessariamente, que este processo esteja vinculado ao uso de técnicas ambientalmente eficientes (Li e Ouyang, 2020). Assim, como decorrência deste crescimento vigoroso da produção e da produtividade pode ter ocorrido, paralelamente, um aumento das emissões de gases de efeito estufa pelas atividades agrícolas. Por outro lado, o aumento na produtividade acompanhado pela manutenção ou redução de subprodutos não desejáveis (como os gases de efeito estufa) indicaria uma maior eficiência ambiental no processo. De acordo com cálculos do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa – SEEG (2021), a agropecuária foi responsável por 23% das emissões brasileiras de gases de efeito estufa, medidas em carbono equivalente, na soma do período compreendido entre 1990 e 2019. A agropecuária foi o segundo setor a mais emitir este tipo de gases ficando atrás, somente, da mudança no uso da terra e florestas. Ainda de acordo com dados do SEEG (2021), o aumento anual da emissão de gases de efeito estufa, levando-se em consideração somente as atividades agrícolas, foi de 2,5% ao ano tomando-se como base, também, o período compreendido entre 1990 e 2019.

Dada a relevância do setor nas emissões brasileiras de gases de efeito estufa, cabe avaliar o quanto do crescimento econômico agrícola se deu às custas de um aumento na geração destes subprodutos indesejáveis. Assim, existe uma necessidade prática de incorporar os impactos ambientais na análise da produtividade da atividade agrícola, já que medidas adequadas da geração destes subprodutos indesejáveis podem contribuir para gerar um melhor resultado ambiental para a agricultura.

Apesar da relevância do tema, na realização desta pesquisa, não foram encontrados estudos dedicados a relacionar o crescimento da PTF da agricultura no Brasil com a variação das emissões de gases de efeito estufa do setor. Este artigo visa preencher esta lacuna.

Desta forma, este artigo tem como objetivo medir o crescimento da Produtividade Total dos Fatores (PTF) na agricultura brasileira no período compreendido entre 2006 e 2017, com base em dados dos dois últimos censos agropecuários do IBGE, de 2006 e 2017, da Produção Agrícola Municipal (PAM), também divulgada pelo IBGE, e do Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa – SEEG (2021), comparando-se 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 utilizar-se-á os métodos de Malmquist (Färe et al., 1994b) e de Malmquist generalizado (Pastor e Lovell, 2005) para calcular as medidas de produtividade típicas e de Malmquist-Lundemberg, (Chung et al., 1997) e de Malmquist-Lundemberg generalizado (Oh, 2010a, 2010b) para calcular as medidas de produtividade ambientalmente sensíveis, ou seja, aquelas que consideram a geração de gases de efeito estufa no processo de produção.

Nossa hipótese é de que parte do substancial crescimento da produtividade agrícola medida por estudos prévios se deu pelo fato de não terem sido contabilizados nos cálculos os efeitos ambientais adversos causados pelo aumento da emissão de gases de efeito estufa que ocorreu simultaneamente a estes ganhos de produtividade. Assim, acredita-se que caso estes subprodutos indesejáveis (ou emissões) tivessem sido contabilizados no cálculo do crescimento da PTF, ter-se-ia um cálculo ajustado com crescimentos inferiores aos contabilizados por meio das medidas típicas da PTF.

Além desta breve introdução, este artigo conta com mais quatro seções. Na segunda seção apresenta-

se uma revisão dos principais artigos que versam sobre a PTF agrícola no Brasil e sobre o cálculo de medidas de PTF ambientalmente sensíveis no mundo para diversos setores e países. Na terceira seção apresentam-se as metodologias utilizadas no estudo e a base de dados empregada nos cálculos. Na quarta seção são apresentados os resultados do estudo e a discussão. Por fim, na quinta e última seção são apresentadas as considerações finais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A PTF pode ser definida como a porção do produto não explicada pela quantidade de insumos empregados na produção, ou como uma medida da produção de um setor econômico ou economia em relação à quantidade de insumos e fatores de produção utilizados no processo.

Vários autores têm estudado o comportamento e os determinantes da PTF na agricultura brasileira nas últimas décadas. Os trabalhos disponíveis na literatura nacional têm utilizado os mais variados métodos de estimação, bem como diferentes bases de dados, períodos de análise e áreas de abrangência. Machado et al. (2020) apresentaram uma análise sistemática e fizeram uma descrição detalhada dos principais resultados de trabalhos que estimaram a PTF para o Brasil. A análise realizada pelos autores confirmou a tendência de crescimento da PTF da agricultura brasileira, apesar da variação entre os resultados das estimações.

O Quadro 1, adaptado de Bragagnolo et al. (2021), resume os resultados obtidos por estudos que calcularam o crescimento da PTF para a agropecuária brasileira, cujos períodos de análise, bases de dados e metodologias utilizadas diferem. Embora as estimativas apresentadas no Quadro 1 mostrem diferentes valores, percebe-se que, para a maior parte dos casos, mostram um crescimento constante e significativo da PTF. Desta forma, os estudos corroboram, em sua maioria, a ideia de que nas últimas décadas a agricultura brasileira tem apresentado um crescimento considerável da PTF.

De acordo com Souza et al. (2020), o índice de produtividade de Malmquist tem sido a metodologia mais utilizada para avaliar a mudança de produtividade tanto quando se usa uma base de dados com estrutura de painel quanto com estrutura de séries temporais. Considerando-se os estudos que empregam o método para a agricultura brasileira em específico e não para um painel de países destacam-se Abreu et al. (2012), Pereira e Silveira (2016), Pereira et al. (2002), Souza et al. (2020) e Vicente (2004). Pereira et al. (2002) analisaram o progresso tecnológico e o crescimento da PTF do setor agrícola brasileiro para o período entre 1970 e 1996. Vicente (2004) calculou a PTF, mudanças tecnológicas e de eficiência na agricultura brasileira de 1970 a 1995 para as Unidades da Federação. Abreu et al. (2012) avaliaram onze propriedades rurais com produção pecuária na região do Pantanal para o período compreendido entre 2004 e 2008. Pereira e Silveira (2016) avaliaram dezessete usinas de cana-de-açúcar na região Centro-Sul no período entre 2001 e 2008. Souza et al. (2020), por sua vez, avaliaram o progresso técnico na agricultura brasileira como um todo no período compreendido entre 1976 e 2016.

Quadro 1 – Resultados das estimativas da produtividade total dos fatores (PTF) agrícola para o Brasil – autores selecionados

Autores	Local/Região	Período	Crescimento da PTF (% a.a.)	Método
Bonelli e Fonseca (1998)	Brasil	1975-1996	0,85	Método de contabilidade do crescimento para os setores econômicos brasileiros de 1985 a 1996.
Fulginiti e Perrin (1998)	Painel de países	1961-1985	-0,03	Função paramétrica de meta-produção e um índice não paramétrico de Malmquist para 18 países em desenvolvimento no período 1961-1985.
Pereira et al. (2002)	Brasil e UFs	1970-1980 1970-1996	3,22* 1,90*	Índice de Malmquist calculado por meio do Censo Agropecuário para o período de 1970 a 1996.
Avila e Evenson (2010)	Painel de países	1961-1980 1981-2001 1961-2001	0,49 3,22 1,86	Método de contabilidade de crescimento para países selecionados de 1961 a 2001.
Bravo-Ortega e Lederman (2004)	Painel de países	1960-2000	1,93	Modelo de fronteira estocástica com função de produção translog para um painel de países para o período entre 1960 a 2000.
Vicente (2004)	Brasil e UFs	1970-1995	1,62	Índice de Malmquist calculado por meio de dados do Censo Agropecuário e preços da FGV e IEA.
Fuglie (2008)	Painel de países	1970-1979 1980-1989 1990-1999 2000-2006	-0,54 3,13 3,00 3,66	Função de produção Cobb-Douglas estimada para dados em painel para diversos países de 1970 a 2006.
Gasques et al. (2009)	Brasil e UFs	1975-2008 2000-2008	3,66 4,98	Índice de Törnqvist para as UFs brasileiras no período de 1975 a 2008.
Mendes et al. (2009)	Brasil e UFs	1985-1994 1995-2004 1985-2004	1,00 1,06 1,03	Modelo de dados em painel com efeitos fixos e uma função de produção Cobb-Douglas com retornos constantes de escala para as UFs brasileiras de 1985 a 2004.
Bragagnolo et al. (2010)	Brasil, UFs e municípios	1975-1985 1985-1995 1995-2006 1975-2006	1,6 2,2 5,8 3,2	Modelo de fronteira estocástica com função translog para os municípios brasileiros de 1975 a 2006 calculado por meio de dados do Censo agropecuário.
Ludena (2010)	Painel de países	1961-1970 1971-1980 1981-1990 1991-2000 2001-2007 1961-2007	-0,60 1,50 3,40 2,40 2,80 1,80	Índice de Malmquist calculado com dados da FAO para o período 1961 a 2007.
Rada e Buccola (2012)	Brasil e microrregiões do IBGE	1985-2006	2,62	Fronteira de distância de insumos agrícolas com função Cobb-Douglas generalizada para 558 microrregiões brasileiras de 1985 a 2006.
Gasques et al. (2014; 2016)	Brasil e UFs	1975-1979 1980-1979 1990-1999 2000-2009 2010-2014 1975-2014	3,18 2,28 2,98 3,96 4,03 3,53	Índice de Törnqvist para UFs brasileiras para o período de 1975 a 2014.

Helfand et al. (2015)	Brasil e regiões	1985-2006	1,74	Modelo de fronteira estocástica com função de produção o Brasil no período de 1985 a 2006, calculado de acordo com a escala de área.
Ferreira et al. (2016)	Painel de países	1961-2010	0,08	Modelo de fronteira estocástica calculado por meio de dados da <i>Penn World Table</i> para países da América latina no período 1961 a 2010.
IFRI (2018)	Painel de países em desenvolvimento	1991-2000 2001-2010 2011-2014	1,4 3,1 0,6	Índice de Törnqvist para um painel de países em desenvolvimento para o período de 1991 a 2014.
Santos e Spolador (2018)	Brasil	1981-2013	2,10	Resíduo de Solow calculado por meio de dados do Ministério de Minas e Energia e da Pnad para o período 1981 a 2013
Lázari e Magalhães (2019)	Região Sudeste	1985-2006	3,12	Modelo de fronteira estocástica com função de produção translog para o Sudeste do Brasil no período de 1985 a 2006, calculado de acordo com a escala de área.
Bragagnolo et al. (2021)	Regiões Sudeste, Sul e Centro-oeste	1995-2006 2006-2017 1995-2017	2,33 3,73 3,03	Modelo de fronteira estocástica com função translog para municípios brasileiros selecionados de 1995 a 2017 calculado por meio de dados do Censo agropecuário.

* Média aritmética do crescimento anual dos estados

Fonte: adaptado de Bragagnolo et al. (2021).

Vários autores têm procurado incluir subprodutos indesejáveis, insumos indesejáveis ou o setor de energia nas medidas tradicionais da PTF para calcular uma medida de PTF “verde” ou cujo resultado seja “ambientalmente sensível” (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 amplamente e, em sua maior parte, abordam os setores industriais da China. Chung et al. (1997) e Hailu e Veeman (2001) levam em consideração insumos de energia e vários poluentes ambientais para estimar a PTF "ambientalmente sensível" dos setores industriais sueco e canadense, respectivamente. Kumar (2006) faz uma medida da PTF "ambientalmente sensível" de países em desenvolvimento e desenvolvidos, incorporando insumos de energia e emissões de CO₂ na estrutura do cálculo. 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 "ambientalmente sensível" para setores industriais da China. Li e Lin (2016), Song et al. (2017) e Wang e Feng (2015) exploram a PTF "ambientalmente sensível" das economias regionais da China. Tian e Lin (2017) fazem o cálculo de uma PTF "ambientalmente sensível" para as exportações industriais da China. Por fim, Liu e Feng (2019) realizaram uma medida da PTF "ambientalmente sensível" para o setor agrícola chinês.

3. METODOLOGIA E BASE DE DADOS

3.1. Metodologia

O índice de Malmquist foi originalmente introduzido por Caves et al. (1982a, 1982b), recebendo este nome devido ao trabalho pioneiro de Malmquist (1953), que propôs a construção de índices com base em funções de distância. De acordo com Färe et al. (1994a, 1994b), as funções de distância podem ser

definidas como representações de funções de tecnologia de múltiplos produtos e/ou múltiplos insumos. Assim, o índice de Malmquist pode ser calculado por meio de um modelo de programação linear do tipo análise envoltória de dados (DEA). A função distância de Shephard, utilizada por Malmquist (1953), pode ser definida de acordo com a expressão (1) (Färe et al., 1989, 1994a, 1994b).

$$D_0^t(x^{t+1}, y^{t+1}) = \inf\{\theta: (x^{t+1}, y^{t+1}/\theta) \in S^t\} \quad (1)$$

De acordo com Färe et al. (1994b), a função distância mede a mudança proporcional máxima do produto necessária para tornar o par ordenado de produtos e fatores de produção (x^{t+1}, y^{t+1}) viável em relação à tecnologia disponível em t . Färe et al. (1989, 1994a, 1994b) definem a mudança no índice de produtividade de Malmquist baseada no produto como a média geométrica de dois índices de produtividade de Malmquist conforme definido por Caves et al. (1982a, 1982b) e que é representado pelas expressões (2) e (3). As expressões (4) e (5) apresentam a estimativa para a mudança na eficiência técnica (EC) e para a mudança tecnológica (TC)

$$M^{t,t+1}(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = \left[\left(\frac{D_0^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^t(x^t, y^t)} \right) \left(\frac{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^{t+1}(x^t, y^t)} \right) \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$M^{t,t+1}(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = EC_M^{t,t+1} \times TC_M^{t,t+1} \quad (3)$$

$$EC_M^{t,t+1} = \frac{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^t(x^t, y^t)} \quad (4)$$

$$TC_M^{t,t+1} = \left[\left(\frac{D_0^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \right) \left(\frac{D_0^t(x^t, y^t)}{D_0^{t+1}(x^t, y^t)} \right) \right]^{1/2} \quad (5)$$

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 $t+1$.

Pastor e Lovell (2005) propuseram uma mudança no cálculo do índice de Malmquist, o qual chamaram de índice de Malmquist global (GM), baseado em uma tecnologia de produção global e não em uma tecnologia de produção contemporânea, como no índice de Malmquist tradicional. Uma tecnologia de referência contemporânea, com retornos constantes de escala (c), pode ser definida como $T_c^t = \{(x^t, y^t) | x^t\}$. Uma tecnologia de referência global, por sua vez, pode ser definida como $T_c^G = \text{conv}\{T_c^1 \cup \dots \cup T_c^T\}$. Os autores definem a função de distância com retornos constantes a escala (CRS) conforme a expressão (6).

$$D^G(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = \min\{\theta > 0 | (x, y)/\theta \in T_c^G\} \quad (6)$$

De acordo com Pastor e Lovell (2005), 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 representada de acordo com as expressões (7) e (8). As expressões (9) e (10) 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.

$$GM^{t,t+1}(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = \frac{D^G(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^G(x^t, y^t)} \quad (7)$$

$$GM^{t,t+1}(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = EC_{GM}^{t,t+1} \times \frac{BPG_{t+1}^{t,t+1}}{BPG_t^{t,t+1}} = EC_{GM}^{t,t+1} \times TC_{GM}^{t,t+1} \quad (8)$$

$$EC_{GM}^{t,t+1} = \frac{D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^t(x^t, y^t)} \quad (9)$$

$$BPC_{GM}^{t,t+1} = \left(\frac{D^G(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \right) \left(\frac{D^t(x^t, y^t)}{D^G(x^t, y^t)} \right) \quad (10)$$

Chung et al. (1997) desenvolveram o índice de produtividade de Malmquist-Luenberger (ML) para incluir na produtividade calculada através do índice de Malmquist tradicional os subprodutos indesejáveis, que muitas vezes são gerados ao mesmo tempo que os produtos desejáveis durante o processo de produção. Para tanto, os autores passam a usar uma função de distância direcional (DDF) do produto ao invés da distância de Shephard. O modelo com subprodutos indesejáveis é calculado assumindo-se retornos constantes de escala (CRS). Formalmente, de acordo com Chung et al. (1997), a DDF é definida de acordo

com a expressão (11).

$$\bar{D}_0(x, y^{t+1}) = \sup\{\beta: (y, b) + \beta g \in P(x)\} \quad (11)$$

Na qual g é o vetor de “direções” em que os produtos são elencados. Nesse caso, $g = (y - b)$, ou seja, os produtos (y) geram aumentos na distância e os subprodutos ambientalmente nocivos (b) geram decréscimos na distância.

De acordo com Chung et al. (1997), a função de Shephard é um caso especial da DDF. A relação entre os dois tipos de distância é apresentada por meio da expressão (12).

$$D_0(x, y, b) = \frac{1}{1 + \bar{D}_0(x, y, b; y, b)} \quad (12)$$

O índice de produtividade Malmquist-Luenberger (ML) orientado para a produção, com a inclusão de produtos indesejáveis, bem como, a mudança na eficiência técnica (EC) e a mudança tecnológica (TC) para este modelo, são apresentadas nas expressões (13), (14), (15) e (16).

$$ML^{t,t+1}(x^t, y^t, b^t, x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) = \left[\left(\frac{1 + \bar{D}_0^t(x^t, y^t, b^t, -b^t)}{1 + \bar{D}_0^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, -b^{t+1})} \right) \right]^{1/2} \quad (13)$$

$$ML^{t,t+1}(x^t, y^t, b^t, x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) = EC_{ML}^{t,t+1} \times TC_{ML}^{t,t+1} \quad (14)$$

$$EC_{ML}^{t,t+1} = \frac{1 + \bar{D}_0^t(x^t, y^t, b^t, -b^t)}{1 + \bar{D}_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, -b^{t+1})} \quad (15)$$

$$TC_{ML}^{t,t+1} = \left[\left(\frac{1 + \bar{D}_0^{t+1}(x^t, y^t, b^t, -b^t)}{1 + \bar{D}_0^t(x^t, y^t, b^t, -b^t)} \right) \left(\frac{1 + \bar{D}_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, -b^{t+1})}{1 + \bar{D}_0^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, -b^{t+1})} \right) \right]^{1/2} \quad (16)$$

Na qual $ML^{t,t+1}$ representa a variação no índice de produtividade Malmquist-Luenberger do período t para $t+1$. O índice $EC_{ML}^{t,t+1}$ representa a mudança na eficiência técnica do período t para $t+1$ para o índice de Malmquist-Luenberger. Caso $EC_{ML}^{t,t+1} > (<)1$ ocorreu ganho (perda) de eficiência, indicando a diferença em relação à fronteira tecnológica de referência. O índice $TC_{ML}^{t,t+1}$ representa a mudança tecnológica para o índice de Malmquist-Luenberger do período t para $t+1$. Se uma fronteira tecnológica de referência contemporânea muda na direção de mais (menos) produto desejável e menos (mais) produto indesejável, então $TC_{ML}^{t,t+1} > (<)1$. A mudança no índice de produtividade, por sua vez, é determinada pelo efeito simultâneo destas duas mudanças.

Oh (2010b) propôs outra alteração no cálculo do índice de Malmquist (1953): o índice de produtividade Global Malmquist-Luenberger (GML). 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. O índice GML incorpora as heterogeneidades *ex-ante* entre os grupos no cálculo do crescimento da produtividade do índice ML (Oh, 2010a, 2010b). O índice GML , a mudança na eficiência técnica (EC) e a mudança tecnológica (BPC) para o modelo proposto por Oh (2010a, 2010b) são definidas de acordo com as expressões (17), (18), (19) e (20).

$$GML^{t,t+1}(x^t, y^t, b^t, x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) = \frac{1 + D^G(x^t, y^t, b^t)}{1 + D^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \quad (17)$$

$$GML^{t,t+1}(x^t, y^t, b^t, x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) = \frac{TE^{t+1}}{TE^t} \times \frac{BPG_{t+1}^{t,t+1}}{BPG_t^{t,t+1}} = EC_{GML}^{t,t+1} \times TC_{GML}^{t,t+1} \quad (18)$$

$$EC_{GML}^{t,t+1} = \frac{1 + D^t(x^t, y^t, b^t)}{1 + D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \quad (19)$$

$$BPC_{GML}^{t,t+1} = \frac{(1 + D^G(x^t, y^t, b^t)) / (1 + D^t(x^t, y^t, b^t))}{(1 + D^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})) / (1 + D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}))} \quad (20)$$

Na qual a função de distância direcional $D^G(x, y, b) = \max\{\beta|y + \beta y, b - \beta b\} \in P^G(x)$, é definida no conjunto de tecnologia global P^G . TE^{t+1} é a eficiência técnica e $EC_{GML}^{t,t+1}$ é a mudança de eficiência. A expressão $BPG^{t,t+1}$ 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, $BPC_{GML}^{t,t+1}$, é o intervalo com relação à melhor prática entre os dois períodos, ou seja, a expressão (20) mede a mudança tecnológica entre os dois períodos de tempo. De acordo com Oh (2010b), se uma atividade de produção gera mais (ou menos) produtos desejáveis e menos (ou mais) subprodutos indesejáveis, então o valor de $GML^{t,t+1}$ pode ser maior (ou menor) do que 1, indicando ganho (ou perda) de produtividade.

Oh (2010b) classifica os países de sua amostra de acordo com um código de cores: 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 (Oh, 2010b) e o local é classificado 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”. Seguindo a lógica proposta por Oh (2010b), neste estudo os municípios analisados foram classificados em dois grupos: um grupo como o primeiro descrito, que convencionou-se chamar de municípios “verdes” e um segundo grupo como o descrito posteriormente, que convencionou-se chamar de municípios “amarelos”.

Por fim, as análises para comparação entre as produtividades ambientalmente sensíveis e as produtividades típicas foram feitas comparando-se entre si as metodologias que incorporam a heterogeneidade e que, portanto, usam como referência a tecnologia global, ou seja, GML com GM , e comparando entre si as que não incorporam a heterogeneidade e que, portanto, usam como referência a tecnologia contemporânea, ou seja ML com M .

3.2. Base de dados

Os índices de produtividade foram calculados para as lavouras temporárias e permanentes, não incluindo, portanto, a atividade pecuária. As fontes de dados utilizadas foram pesquisas divulgadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e os dados sobre emissões, que foram retirados do Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa – SEEG (2021), divulgados pelo Observatório do Clima. As pesquisas divulgadas pelo IBGE que foram utilizadas neste estudo são a Produção Agrícola Municipal (PAM) e os Censos Agropecuários do ano de 2006 e de 2017 (IBGE, 2009, 2019, 2021). Mais especificamente, os dados utilizados para o capital e para a mão-de-obra foram obtidos a partir dos Censos Agropecuários, enquanto os dados para o Valor Bruto da Produção (VBP) e para a área plantada foram retirados da Produção Agrícola Municipal (PAM).

A *proxy* para o capital utilizada neste estudo foi o número total de tratores. Para a mão-de-obra utilizou-se o pessoal ocupado em estabelecimentos agropecuários com e sem laço de parentesco com o produtor. Os valores para o VBP referem-se aos valores da produção das lavouras temporárias e permanentes divulgados pela PAM/IBGE e foram deflacionados pelo IGP-DI (2019=100), divulgado pela Fundação Getúlio Vargas (FGV). Para o fator terra, utilizou-se como *proxy* a área plantada com lavouras temporárias e permanentes divulgada pela PAM/IBGE. Para contabilizar as informações acerca dos gases de efeito estufa emitidos pela atividade agrícola foram contabilizadas as emissões exclusivamente e diretamente provenientes desta atividade por meio dos dados do SEEG para os anos de 2006 e 2007.

Foram utilizadas observações em nível municipal para todos estados brasileiros e foram eliminados da amostra os municípios em que ao menos uma das informações necessárias para o cálculo do modelo proposto para um dos anos não estava disponível. Desta forma, a amostra final utilizada no estudo é composta por dados de 3.959 municípios para os anos de 2006 e 2017, o que totaliza uma base de dados com 7.918 informações. Optou-se por utilizar uma amostra composta por municípios ao invés de dados estaduais mais agregados para se ter um retrato mais rico e preciso da variabilidade tecnológica empregada na produção na agricultura brasileira.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como parte do estudo empírico, a Tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis utilizadas no cálculo dos quatro modelos propostos. Os modelos *GM* e *M* foram calculados com base nas variáveis VBP, para o produto, e capital, terra e trabalho para os insumos. Para os modelos *GML* e *ML*, além das mesmas variáveis já descritas, inclui-se a variável emissões para o produto indesejável. Para todas as variáveis apresentadas na Tabela 1, as médias foram superiores às medianas. Isto indica que a distribuição dos valores das variáveis é assimétrica para a direita e que a maior parte dos municípios analisados se encontram na cauda esquerda da distribuição.

Tabela 1. Estatísticas descritivas das variáveis de insumos e produtos dos municípios utilizados neste estudo

	média	desvio padrão	mediana	máximo	mínimo
VBP (milhares de reais)	61.030	142.535	20.535	3.674.832	6
Emissões (toneladas de CO ₂ eq.)	27.881	53.237	11.835	1.020.174	68
Capital (núm. de tratores)	291	834	115	44.832	3
Terra (hectares)	15.277	41.587	5.240	1.205.669	4
Trabalho (unidades)	3.052	3.168	2.026	40.690	23

Fonte: Resultados da pesquisa.

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 Unidade da Federação das mesmas variáveis para o período entre 2006 e 2017 são apresentados na Tabela 2. O valor total do VBP nos municípios que compõem a amostra no ano de 2006 foi de R\$ 180,7 bilhões. A taxa de crescimento do VBP variou bastante entre os estados analisados. As duas maiores taxas de crescimento no período ocorreram nos estados do Tocantins e do Piauí, que se encontram no Bioma cerrado, na região que ficou conhecida pelo acrônimo Matopiba e que consiste na nova fronteira agrícola do Brasil. O maior crescimento das emissões de gases de efeito estufa, por sua vez, se deu em um estado tradicional na produção: o Mato Grosso com 6,1% ao ano. O crescimento da soma das emissões dos municípios que compõem as amostras analisadas foi positiva para a maioria dos estados. As exceções foram os estados de Alagoas e Pernambuco, ambos com decréscimo de -0,8% nas emissões. A taxa de crescimento do capital foi negativa para o Brasil como um todo, de -1,5% ao ano. Porém, estados como Roraima (9,4% ao ano), Amazonas (8,6% ao ano), Acre (6,4% ao ano) e Amapá (6,2% o ano) apresentaram um crescimento expressivo desta variável. A taxa de crescimento da área plantada foi positiva para o Brasil como um todo, totalizando 2,3% ao ano. Os resultados para os estados, porém, foram bastante variados. O maior crescimento na área plantada para os municípios amostrados ocorreu no estado do Amapá (+16,7% na área plantada), que é um estado cuja área e quantidade de municípios observados são pouco representativos para a média amostral dada a pequena área plantada em relação aos demais. O maior decréscimo ocorreu no Rio de Janeiro, com uma queda de -6,7% ao ano. Quanto ao trabalho, também houve queda no valor total dos municípios amostrados para o Brasil como um todo (-0,8% ao ano), mas no que tange os estados, as variações foram de 2,8% ao ano a 3,0% ao ano, com exceção do Amapá (12,7%) e Roraima (6,8%).

Tabela 2. Valor total para o ano inicial de 2006 e taxas de crescimento dos produtos e insumos nas Unidades da Federação e no Brasil.

UF	VBP (R\$ milhões)		Emissões (mil ton. CO2 eq.)		Capital (mil tratores)		Terra (mil hectares)		Trabalho (mil pessoas)	
	valor	cresc.	valor	cresc.	valor	cresc.	valor	cresc.	valor	cresc.
AC	233	3,6%	623	0,7%	1	6,4%	94	-3,8%	58	2,8%
AL	1.723	-1,0%	779	-0,8%	4	-4,8%	463	-2,1%	298	-3,0%
AP	36	9,0%	35	5,4%	0	6,2%	4	16,7%	4	12,7%
AM	654	5,8%	303	2,0%	1	8,6%	115	-4,0%	119	1,9%
BA	13.360	1,9%	4.058	1,2%	48	-2,5%	4.243	-1,2%	1.918	-1,0%
CE	2.238	-0,3%	821	0,4%	6	-3,5%	1.120	-1,7%	698	-2,0%
ES	5.758	0,1%	1.092	1,7%	21	1,4%	735	-2,5%	302	1,0%
GO	7.714	8,3%	6.853	3,6%	90	-4,6%	2.813	4,3%	347	1,1%
MA	2.123	6,2%	1.973	2,4%	8	1,6%	1.238	2,1%	658	-2,9%
MG	24.319	2,9%	11.937	2,0%	166	-0,5%	4.407	1,2%	1.723	-0,3%
MS	5.662	10,2%	7.890	3,1%	57	-1,1%	2.966	5,0%	204	1,6%
MT	17.008	9,9%	10.166	6,1%	60	1,2%	7.982	6,2%	332	1,6%
PA	4.097	6,8%	5.171	1,7%	13	3,6%	1.137	2,1%	633	1,4%
PB	1.026	-1,7%	307	0,3%	2	-0,9%	284	-4,8%	212	-1,4%
PE	3.075	-0,8%	1.033	-0,8%	7	-1,8%	782	-3,3%	647	-1,7%
PI	960	12,4%	554	4,6%	3	0,6%	719	4,5%	388	-2,0%
PR	23.421	5,0%	7.392	3,4%	168	-0,7%	8.615	1,3%	1.028	-2,5%
RJ	1.227	-0,2%	810	0,3%	16	-4,8%	225	-6,7%	140	0,0%
RN	870	0,8%	298	0,8%	4	-2,4%	273	-3,1%	125	-0,8%
RO	1.368	9,1%	3.331	1,9%	10	1,9%	604	1,2%	278	-0,2%
RR	291	5,4%	291	0,7%	1	9,4%	62	-0,7%	29	6,8%
RS	20.348	4,8%	12.124	2,7%	196	0,0%	6.523	1,3%	1.016	-2,0%
SC	6.629	2,4%	2.403	2,2%	95	-1,0%	1.369	-1,2%	453	-1,2%
SE	879	0,9%	379	2,9%	4	-0,8%	299	-1,7%	191	-1,1%
SP	34.703	2,5%	11.153	0,4%	254	-5,5%	5.300	2,3%	697	-0,9%
TO	955	11,1%	2.248	5,1%	13	0,8%	441	6,6%	134	1,4%
BR	180.678	4,8%	94.023	2,8%	1.248	-1,5%	52.811	2,3%	12.630	-0,8%

Fonte: Resultados da pesquisa.

As Tabelas 3 e 4 apresentam os índices para o crescimento da produtividade, a mudança na eficiência técnica e a mudança tecnológica para a agricultura nos estados brasileiros, calculadas pelas médias ponderadas pelo produto e pelas médias simples, respectivamente, para os índices *GML* (Oh, 2010a, 2010b), *ML* (Chung et al., 1997), *GM* (Pastor e Lovell, 2005) e *M* (Färe et al., 1994b) para o período compreendido entre 2006 e 2017.

Por um lado, pode-se verificar na Tabela 3 e na Tabela 4, o crescimento da produtividade foi positivo, ou seja, apresentou valores para o índice maiores do que um, para quase todos os estados. As exceções ao crescimento da produtividade foram Amapá, Paraíba e Pernambuco nos modelos *GM* e *M* quando se considera a média simples (Tabela 4). Adicionalmente, no que tange ao Amapá, quando se considera a média ponderada dos municípios para os modelos *GM* e *M*, o crescimento não foi positivo. Por outro lado, nos modelos que levam em consideração as emissões do setor, os modelos *GML* e *ML*, além de apresentarem resultados bastante inferiores para o crescimento da produtividade, apresentaram resultados negativos para oito estados quando calculados por meio da média simples e quatro estados quando calculados pela média ponderada. Quando se considera a média ponderada dos resultados dos municípios (Tabela 3), o maior ganho de produtividade se deu no Amazonas para todos os modelos. Quando se

considera a média simples das produtividades dos municípios usados no cálculo (Tabela 4), a maior variação na produtividade ocorreu no Rio de Janeiro para os modelos *GML* e *ML* e para o Amazonas nos modelos *GM* e *M*. A menor variação de produtividade para a média ponderada e para a média simples (Tabelas 3 e 4) se deu no Espírito Santo, para os modelos *GML* e *ML*, e no Amapá, para os modelos *GM* e *M*.

Os resultados para a mudança na eficiência técnica (*EC*) variam bastante quando se compara os modelos que levam em consideração as emissões (*GML* e *ML*) e os modelos que não levam em consideração as emissões (*GM* e *M*). Enquanto nos modelos *GML* e *ML* a maior parte dos estados e o Brasil apresentam crescimento negativo para esta variável, determinado por um valor do um índice inferior a um, nos modelos *GM* e *M* a maior parte dos estados e o Brasil apresentam valores negativos para esta variável.

Tabela 3. Índice de crescimento da produtividade, mudança na eficiência técnica e mudança tecnológica para a agricultura nos estados brasileiros calculadas pelas *médias ponderadas pelo produto* para os índices *GML* (Oh, 2010a, 2010b), *ML* (Chung et al., 1997), *GM* (Pastor e Lovell, 2005) e *M* (Färe et al., 1994b) – 2006 a 2017

UF	<i>GML</i>			<i>ML</i>			<i>GM</i>			<i>M</i>		
	Prod.	<i>EC</i>	<i>BPC</i>	Prod.	<i>EC</i>	<i>BPC</i>	Prod.	<i>EC</i>	<i>TC</i>	Prod.	<i>EC</i>	<i>TC</i>
AC	1,0009	0,9979	1,0030	1,0012	0,9979	1,0033	1,2258	1,0903	1,1181	1,2859	1,0903	1,1698
AL	1,0104	1,0529	0,9875	1,0427	1,0529	1,0051	1,7052	1,7547	0,9632	1,6958	1,7547	0,9486
AP	1,0044	0,9745	1,0361	0,9945	0,9745	1,0235	0,7830	0,6983	1,1934	0,7476	0,6983	1,1275
AM	1,3861	1,3540	1,0248	1,5024	1,3540	1,0874	4,8099	4,4017	1,1076	4,7530	4,4017	1,1190
BA	1,1118	0,9594	1,1819	1,1535	0,9594	1,2116	1,6879	1,7753	0,9921	1,6808	1,7753	0,9937
CE	1,0294	0,9847	1,0511	1,0553	0,9847	1,0717	1,6785	1,6858	1,0451	1,6590	1,6858	1,0269
DF	1,0082	0,9872	1,0214	1,0103	0,9872	1,0234	1,5364	1,0651	1,4424	1,6310	1,0651	1,5313
ES	0,9644	0,9014	1,0784	0,9590	0,9014	1,0667	1,2135	1,0498	1,1651	1,2385	1,0498	1,1967
GO	1,0522	0,9987	1,0544	1,0924	0,9987	1,0955	2,0521	1,8171	1,1413	2,0638	1,8171	1,1505
MA	1,1805	1,1037	1,0544	1,2199	1,1037	1,0984	2,5851	2,8649	0,9418	2,4946	2,8649	0,9050
MG	1,0008	0,9554	1,0501	1,0173	0,9554	1,0670	1,4725	1,0996	1,3375	1,4850	1,0996	1,3430
MS	1,0456	1,0024	1,0440	1,0967	1,0024	1,0953	2,3018	2,3001	1,0073	2,2833	2,3001	1,0046
MT	1,1593	1,0876	1,0684	1,1683	1,0876	1,0794	2,1524	2,4109	0,9002	2,1079	2,4109	0,8836
PA	1,0750	1,0482	1,0255	1,1398	1,0482	1,0723	2,0778	1,8723	1,0958	2,1027	1,8723	1,1023
PB	0,9973	0,9711	1,0496	0,9794	0,9711	1,0063	1,2288	1,1861	1,0323	1,1976	1,1861	0,9868
PE	1,0691	0,9987	1,0668	1,0799	0,9987	1,0770	1,2055	1,0711	1,1568	1,2060	1,0711	1,1398
PI	1,2272	1,1823	1,0369	1,3094	1,1823	1,1049	3,0651	3,7639	0,8315	3,0334	3,7639	0,8215
PR	1,0077	0,9689	1,0427	1,0509	0,9689	1,0872	1,7255	1,4014	1,2471	1,7628	1,4014	1,2773
RJ	1,1611	1,0990	1,0531	1,2181	1,0990	1,0890	1,9322	1,6070	1,2140	1,9787	1,6070	1,2390
RN	1,0184	0,9842	1,0372	1,0197	0,9842	1,0370	2,1349	2,0869	0,9884	2,1937	2,0869	1,0106
RO	1,0077	1,0039	1,0038	1,0195	1,0039	1,0155	2,5132	2,3083	1,1068	2,5683	2,3083	1,1240
RR	0,9870	0,9767	1,0102	1,0010	0,9767	1,0243	1,3054	1,1773	1,1182	1,3515	1,1773	1,1325
RS	1,0000	0,9686	1,0388	1,0233	0,9686	1,0594	1,7825	1,3877	1,2987	1,8176	1,3877	1,3215
SC	1,0058	0,9796	1,0269	1,0117	0,9796	1,0296	1,5994	1,2355	1,3024	1,6207	1,2355	1,3124
SE	0,9969	0,9758	1,0222	0,9966	0,9758	1,0214	2,2376	2,0154	1,1101	2,2323	2,0154	1,1249
SP	1,0063	0,9092	1,1209	1,0457	0,9092	1,1593	1,3908	1,0716	1,3247	1,4123	1,0716	1,3393
TO	1,0168	0,9931	1,0251	1,0211	0,9931	1,0288	2,3317	2,1378	1,0795	2,4137	2,1378	1,1251
BR	1,0490	0,9895	1,0662	1,0786	0,9895	1,0940	1,8159	1,6526	1,1639	1,8237	1,6526	1,1723

Fonte: resultados da pesquisa.

Com relação à mudança tecnológica (*TC*), é possível perceber que os resultados foram maiores do que um (Tabela 3), o que indica um crescimento no valor da variável para todos os estados (exceto Alagoas) para o modelo *GML*, e um crescimento para todos os estados e para o Brasil no modelo *ML*. Concernente aos modelos *GM* e *M*, os valores para a variável não foram maiores do que um para, apenas, 6 estados. Ainda no que tange à mudança tecnológica, na Tabela 4, os resultados para o Brasil como um todo e para cada um dos estados foram positivos para os quatro modelos. Assim, pode-se afirmar que de maneira geral houve mudança tecnológica positiva na agricultura brasileira no período.

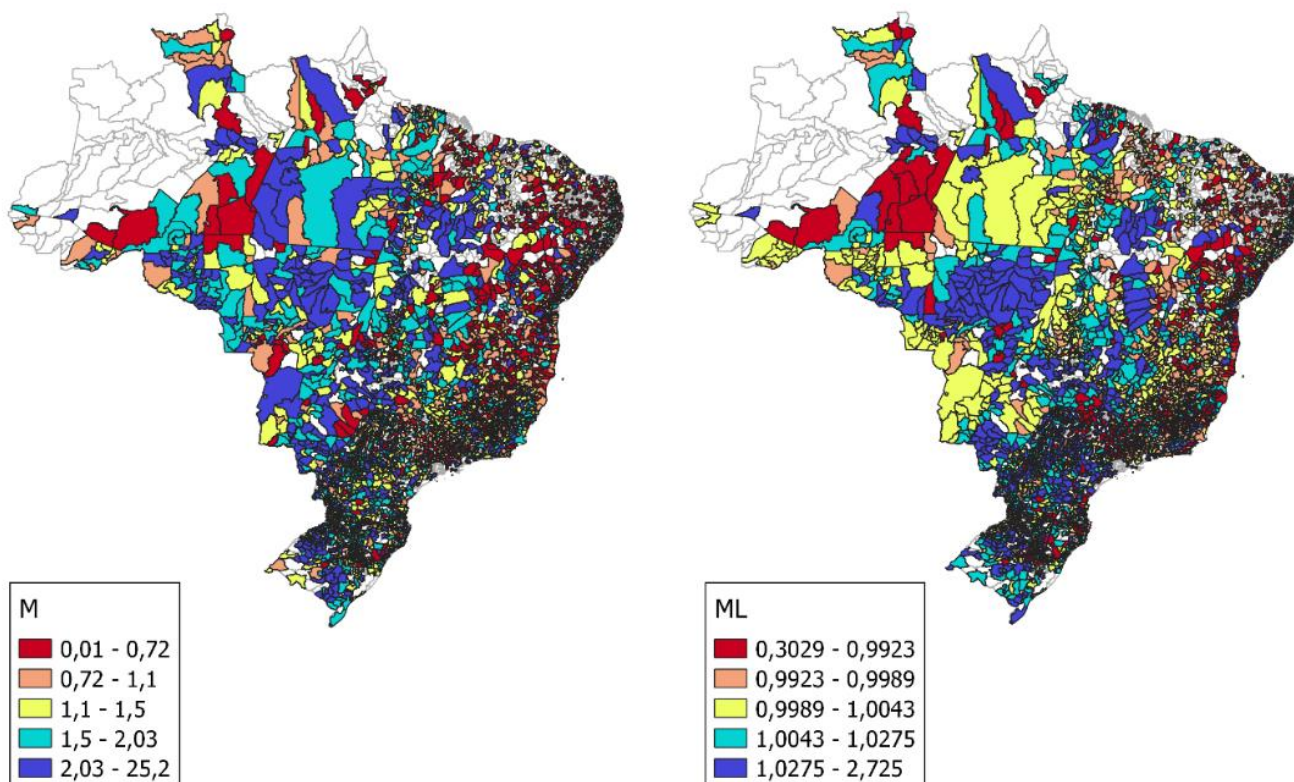
Tabela 4. Índice de crescimento da produtividade, mudança na eficiência técnica e mudança tecnológica para a agricultura nos estados brasileiros calculadas pelas *médias simples* para os índices *GML* (Oh, 2010a, 2010b), *ML* (Chung et al., 1997), *GM* (Pastor e Lovell, 2005) e *M* (Färe et al., 1994b) – 2006 a 2017

UF	<i>GML</i>			<i>ML</i>			<i>GM</i>			<i>M</i>		
	Prod.	<i>EC</i>	<i>BPC</i>	Prod.	<i>EC</i>	<i>BPC</i>	Prod.	<i>EC</i>	<i>TC</i>	Prod.	<i>EC</i>	<i>TC</i>
AC	1,0009	0,9980	1,0029	1,0011	0,9980	1,0032	1,2443	1,1111	1,1142	1,3055	1,1111	1,1650
AL	1,0021	1,0021	1,0073	1,0089	1,0021	1,0103	1,8522	1,6838	1,0742	1,8238	1,6838	1,0611
AP	1,0035	0,9546	1,0593	0,9852	0,9546	1,0364	0,7907	0,7076	1,2276	0,7675	0,7076	1,1778
AM	1,0565	1,0320	1,0246	1,0844	1,0320	1,0409	2,4669	2,0946	1,1814	2,4583	2,0946	1,1781
BA	0,9956	0,9689	1,0302	0,9919	0,9689	1,0239	1,0109	0,9130	1,1365	1,0213	0,9130	1,1466
CE	1,0051	0,9873	1,0205	1,0122	0,9873	1,0254	1,1579	1,1945	1,0307	1,1607	1,1945	1,0209
DF	1,0082	0,9872	1,0214	1,0103	0,9872	1,0234	1,5364	1,0651	1,4424	1,6310	1,0651	1,5313
ES	0,9788	0,9300	1,0596	0,9771	0,9300	1,0538	1,2232	1,0595	1,1566	1,2418	1,0595	1,1821
GO	1,0102	0,9961	1,0151	1,0199	0,9961	1,0247	1,6535	1,3189	1,2552	1,6918	1,3189	1,2777
MA	1,0087	0,9999	1,0081	1,0127	0,9999	1,0121	1,2864	1,2169	1,1195	1,2546	1,2169	1,0902
MG	0,9977	0,9797	1,0196	0,9986	0,9797	1,0202	1,1384	0,8914	1,2682	1,1486	0,8914	1,2801
MS	1,0169	1,0018	1,0156	1,0375	1,0018	1,0361	2,1629	1,8377	1,2160	2,1934	1,8377	1,2350
MT	1,0456	1,0201	1,0259	1,0626	1,0201	1,0427	1,9162	1,7659	1,1338	1,9141	1,7659	1,1378
PA	1,0268	1,0100	1,0168	1,0483	1,0100	1,0322	1,8812	1,6035	1,1580	1,9032	1,6035	1,1750
PB	0,9911	0,9821	1,0156	0,9893	0,9821	1,0092	0,8722	0,7673	1,1590	0,8856	0,7673	1,1645
PE	1,0007	0,9839	1,0169	0,9960	0,9839	1,0113	0,9348	0,8437	1,1201	0,9383	0,8437	1,1051
PI	1,0176	1,0115	1,0066	1,0270	1,0115	1,0148	1,7749	1,8778	1,0628	1,8068	1,8778	1,0557
PR	1,0041	0,9759	1,0305	1,0299	0,9759	1,0565	1,6532	1,3382	1,2416	1,7022	1,3382	1,2821
RJ	1,0879	1,0545	1,0295	1,1319	1,0545	1,0577	2,0118	1,6225	1,2512	2,0878	1,6225	1,2883
RN	1,0037	0,9877	1,0169	1,0046	0,9877	1,0172	1,2656	1,1380	1,1439	1,2787	1,1380	1,1652
RO	1,0035	1,0012	1,0023	1,0079	1,0012	1,0067	2,1800	1,9380	1,1395	2,2359	1,9380	1,1679
RR	0,9734	0,9625	1,0111	0,9792	0,9625	1,0172	1,3213	1,1327	1,1593	1,3254	1,1327	1,1416
RS	0,9961	0,9758	1,0235	1,0059	0,9758	1,0319	1,6349	1,2549	1,3047	1,6808	1,2549	1,3377
SC	0,9985	0,9827	1,0177	1,0003	0,9827	1,0179	1,5614	1,2044	1,3009	1,5631	1,2044	1,2993
SE	0,9961	0,9785	1,0185	0,9960	0,9785	1,0179	1,7984	1,5894	1,1476	1,8280	1,5894	1,1784
SP	1,0182	0,9554	1,0748	1,0485	0,9554	1,1035	1,5246	1,1827	1,3218	1,5618	1,1827	1,3459
TO	1,0043	1,0003	1,0043	1,0072	1,0003	1,0069	2,0196	1,6479	1,2455	2,0340	1,6479	1,2570
BR	1,0064	0,9825	1,0270	1,0165	0,9825	1,0356	1,4743	1,2267	1,2238	1,4963	1,2267	1,2390

Fonte: resultados da pesquisa.

A Figura 1 apresenta o crescimento da produtividade nos municípios que compõem a amostra avaliada para os modelos *M* (Färe et al., 1994b) e *ML* (Chung et al., 1997) e para o período compreendido entre 2006 e 2017. As faixas de valores para a estratificação foram definidas a partir dos quintis dos resultados do crescimento da produtividade.

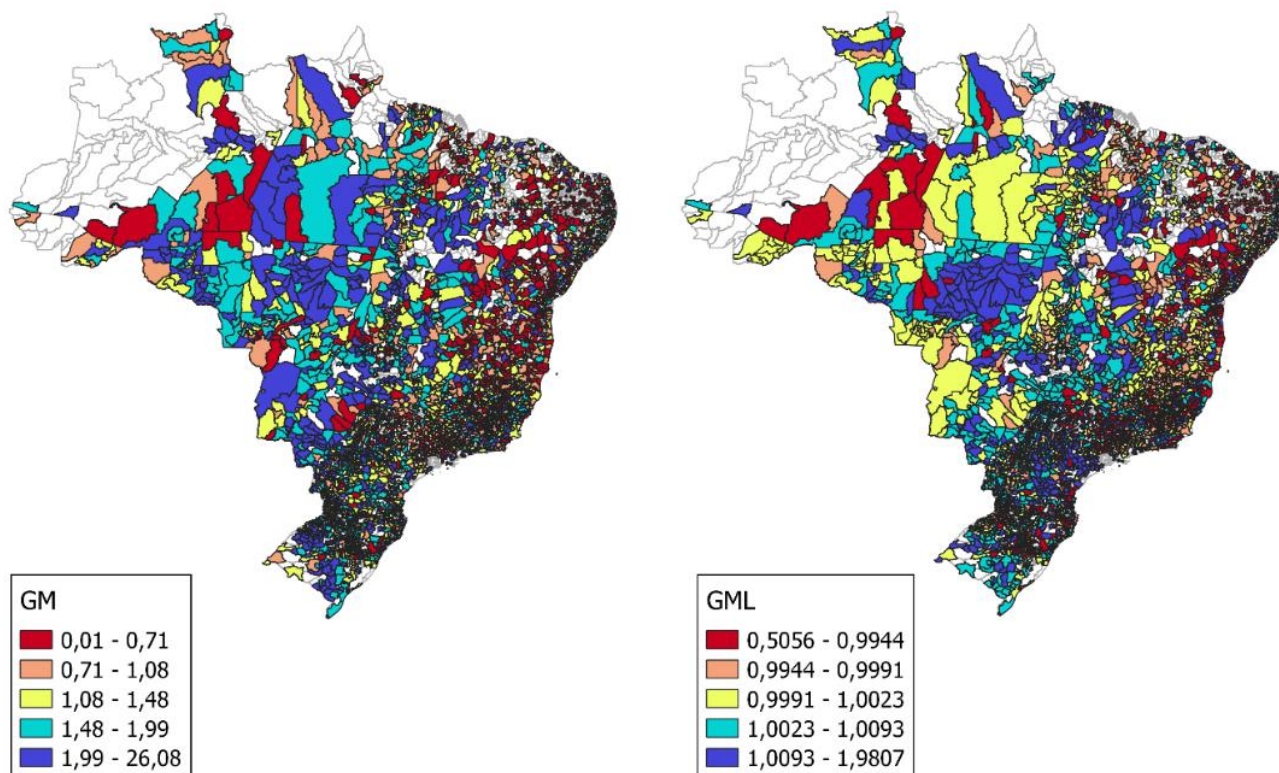
Figura 1. Distribuição espacial do crescimento da produtividade na amostra de municípios analisada para os índices *M* (Färe et al., 1994b) e *ML* (Chung et al., 1997) – 2006 a 2017



Fonte: resultados da pesquisa.

A Figura 2 apresenta o crescimento da produtividade nos municípios que compõem a amostra avaliada para os modelos *GM* (Pastor e Lovell, 2005) e *GML* (Oh, 2010b). A exemplo dos dois modelos anteriores, as faixas de valores para a estratificação dos modelos *GM* (Pastor e Lovell, 2005) e *GML* (Oh, 2010a, 2010b) também foram definidas a partir dos quintis dos resultados obtidos para o crescimento da produtividade.

Figura 2. Distribuição espacial do crescimento da produtividade na amostra de municípios analisada para os índices *GM* (Pastor e Lovell, 2005) e *GML* (Oh, 2010a, 2010b) – 2006 a 2017



Fonte: resultados da pesquisa.

A Tabela 5 apresenta as taxas de crescimento anuais para o produto, para a eficiência técnica e para a mudança tecnológica calculadas pelas médias simples e pelas médias ponderadas pelo produto para os municípios que compõem a amostra para todo o Brasil no período de 2006 a 2017, período este compreendido entre os dois últimos censos agropecuários divulgados pelo IBGE.

Conforme pode-se observar na Tabela 5 as estimativas de crescimento da produtividade para os modelos que levam em consideração as emissões (*GML* e *ML*) diferem bastante com relação aos resultados dos modelos que não levam em consideração estas variáveis (*GM* e *M*), tanto para o cálculo da média ponderada pelo produto quanto para a média simples. As taxas de crescimentos calculadas para os modelos que não levam em consideração as emissões variam de 5,13% a 3,29% ao ano, enquanto as taxas de crescimento anuais da produtividade para os modelos que levam em consideração as emissões é bem mais baixa, variando de 0,05% a 0,63% ao ano. Quando se compara a mudança das eficiências técnicas percebe-se que para os modelos que levam em consideração as emissões, estas são negativas, entre -0,09% e -0,15% ao ano, enquanto para os modelos que não levam em consideração as emissões, estas são positivas e variam de 4,28% a 1,72% ao ano. Com relação a mudança tecnológica, é possível observar uma variação de 1,27% a 1,80% ao ano nos modelos que não levam em consideração as emissões. Os modelos que levam em consideração as emissões do setor apresentaram mudanças tecnológicas menores, entre 0,22% e 0,75% ao ano.

Tabela 5. Taxa de crescimento anual da produtividade, da eficiência técnica e da mudança tecnológica calculadas pela média ponderada pelo produto e média simples – Brasil – 2006 a 2017

Modelo	Taxa de crescimento	Média ponderada pelo produto	Média simples
<i>GML</i> Oh (2010a, 2010b)	Produtividade	0,40%	0,05%
	Eficiência técnica	-0,09%	-0,15%
	Mudança tecnológica	0,54%	0,22%
<i>ML</i> Chung et al. (1997)	Produtividade	0,63%	0,14%
	Eficiência técnica	-0,09%	-0,15%
	Mudança tecnológica	0,75%	0,29%
<i>GM</i> Pastor; Lovell (2005)	Produtividade	5,10%	3,29%
	Eficiência técnica	4,28%	1,72%
	Mudança tecnológica	1,27%	1,70%
<i>M</i> Färe; Grosskopf; Norris (1994)	Produtividade	5,13%	3,42%
	Eficiência técnica	4,28%	1,72%
	Mudança tecnológica	1,33%	1,80%

Fonte: resultados da pesquisa.

A Tabela 6 apresenta o número de municípios “verdes” e percentual de municípios “verdes” por Unidade da Federação comparando-se os resultados das produtividades nos modelos propostos.

Na Tabela 6, a Unidade da Federação que apresentou maior percentual de municípios classificados como “verdes” foi o Amapá, com 75%, tanto na comparação dos índices GML com GM quanto na comparação dos índices ML com M. Ainda conforme a Tabela 6, é possível verificar que o número de municípios avaliados para esta unidade da Federação foi muito pequeno. Também aparecem com 50% ou mais de seus municípios classificados como “verdes” os estados da Paraíba, da Bahia, de Pernambuco, de Minas Gerais, do Rio Grande do Norte e do Ceará. Apresentaram percentual abaixo de 25% de municípios classificados como “verdes” para os dois critérios de comparação de índices os estados do Acre, do Pará, de Tocantins, de Rondônia, do Rio Grande do Sul, de Santa Catarina, do Paraná, do Mato Grosso do Sul, do Mato Grosso e do Rio de Janeiro.

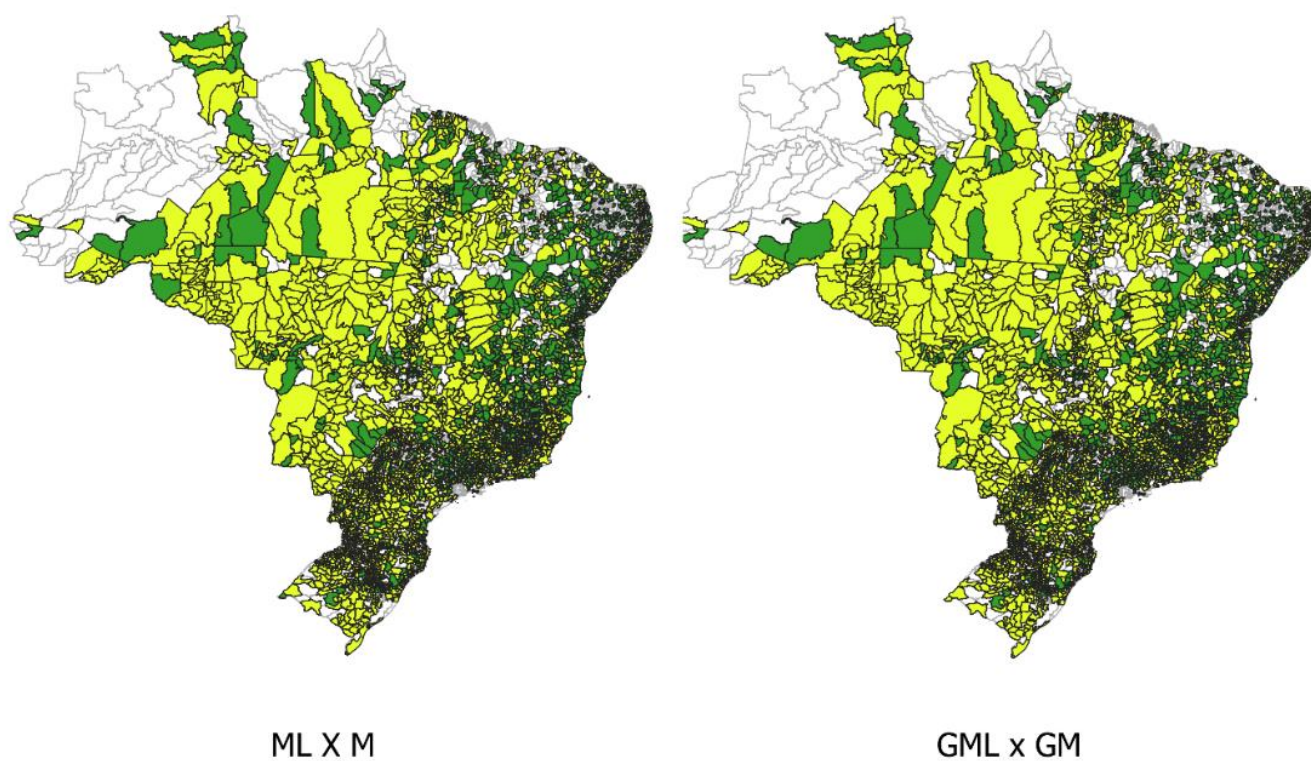
Tabela 6. Número de municípios “verdes” e percentual de municípios “verdes” por estado comparando-se os resultados das produtividades nos modelos *GML* (Oh, 2010a, 2010b) com *GM* (Pastor e Lovell, 2005) e *ML* (Chung et al., 1997) com *M* (Färe et al., 1994b)

UF	Quantidade de Municípios	Quantidades de municípios “verdes”	Percentual de municípios “verdes”	Quantidades de municípios “verdes”	Percentual de municípios “verdes”
		<i>GML vs. GM</i>	<i>GML vs. GM</i>	<i>ML vs. M</i>	<i>ML vs. M</i>
AC	12	2	16,7%	2	16,7%
AL	60	26	43,3%	26	43,3%
AP	4	3	75,0%	3	75,0%
AM	21	6	28,6%	6	28,6%
BA	316	204	64,6%	206	65,2%
CE	100	52	52,0%	50	50,0%
ES	72	24	33,3%	24	33,3%
GO	192	50	26,0%	51	26,6%
MA	132	62	47,0%	66	50,0%
MG	682	362	53,1%	353	51,8%
MS	75	10	13,3%	10	13,3%
MT	130	22	16,9%	22	16,9%
PA	105	24	22,9%	24	22,9%
PB	78	55	70,5%	55	70,5%
PE	102	63	61,8%	63	61,8%
PI	92	37	40,2%	34	37,0%
PR	360	51	14,2%	41	11,4%
RJ	66	19	28,8%	16	24,2%
RN	64	37	57,8%	37	57,8%
RO	52	2	3,8%	2	3,8%
RR	14	4	28,6%	5	35,7%
RS	400	67	16,8%	62	15,5%
SC	232	44	19,0%	43	18,5%
SE	51	22	43,1%	22	43,1%
SP	445	142	31,9%	140	31,5%
TO	102	20	19,6%	22	21,6%
BR	3959	1410	35,6%	1385	35,0%

Fonte: resultados da pesquisa.

A Figura 3 apresenta o mapeamento dos municípios “verdes” e “amarelos” que compõem a amostra. Os resultados apresentados no mapa à esquerda da Figura 3 foram obtidos comparando-se as produtividades dos modelos *ML* (Chung et al., 1997) e *M* (Färe et al., 1994b), já os resultados apresentados no mapa à direita da Figura 3 foram obtidos comparando-se as produtividades dos modelos *GML* (Oh, 2010a, 2010b) e *GM* (Pastor e Lovell, 2005).

Figura 3. Mapeamento dos municípios “verdes” e “amarelos” que compõem a amostra comparando-se os resultados das produtividades nos modelos *ML* (Chung et al., 1997) com *M* (Färe et al., 1994b) e *GML* (Oh, 2010a, 2010b) com *GM* (Pastor e Lovell, 2005)



Fonte: resultados da pesquisa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo calculou o crescimento da produtividade total dos fatores (PTF) na agricultura brasileira de 2006 a 2017 com base em dados dos dois últimos Censos Agropecuários e da Produção Agrícola Municipal (PAM) divulgados pelo IBGE, bem como do Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa – SEEG (2021), comparando medidas de produtividade que levam em consideração a existência de subprodutos não desejáveis (no caso as emissões de gases de efeito estufa) com medidas que não levam em consideração a existência deste tipo de subproduto. Para isso, os métodos de Malmquist – *M* – (Färe et al., 1994b) de Malmquist-Lundemberg – *ML* – (Chung et al., 1997), de Malmquist generalizado – *GM* – (Pastor e Lovell, 2005) e Malmquist-Lundemberg generalizado – *GML* – (Oh, 2010a, 2010b) foram empregados.

Os resultados apontaram que os índices calculados por meio de modelos ambientalmente sensíveis (*GML* e *ML*) apresentam um crescimento da produtividade e da eficiência técnica inferiores aos modelos típicos (*GM* e *M*). Além disso, a mudança tecnológica também foi menos elevada nos modelos cujos índices foram calculados por meio de modelos ambientalmente sensíveis.

Para a amostra de municípios brasileiros usada no estudo, dos 3.959 municípios analisados, cerca de 35% puderam ser classificados como “verdes”, ou seja, apresentaram índices de crescimento da produtividade ambientalmente sensíveis (*GML* ou *ML*) maiores do que os índices de crescimento da produtividade típicos (*GM* ou *M*). No caso destes municípios “verdes” pode-se afirmar que o crescimento econômico ocorreu simultaneamente à diminuição das emissões, ao contrário da maioria dos municípios da

amostra que foram classificados como “amarelos”, no qual houve ênfase no crescimento econômico em detrimento do controle na emissão de gases de efeito estufa.

REFERÊNCIAS

- ABREU, U. G. P. DE; GOMES, E. G.; MELLO, J. C. C. B. S. DE; SANTOS, S. A.; CATTO, D. F. Heifer retention program in the pantanal: A study with data envelopment analysis (DEA) and malmquist index. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 41, n. 8, p. 1937–1943, 2012.
- AVILA, A. F. D.; EVENSON, R. E. Total Factor Productivity Growth in Agriculture. The Role of Technological Capital. In: J. Arrow, Kenneth; M. D. Intriligator (Orgs.); **Handbook of Agricultural Economics**. 1º ed, v. 4, p.3769–3822, 2010.
- BONELLI, R.; FONSECA, R. Ganhos de produtividade e eficiência: novos resultados para a economia brasileira. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, v. 28, n. 02, p. 273–314, 1998.
- BRAGAGNOLO, C.; SPOLADOR, H. F. S.; BARROS, G. S. C. Regional Brazilian Agriculture TFP Analysis: A Stochastic Frontier Analysis Approach. **Economia**, v. 11, n. 4, p. 217–242, 2010.
- BRAGAGNOLO, C.; SPOLADOR, H. F. S.; BARROS, G. S. C. Produtividade total dos fatores na agricultura brasileira: resultados atualizados a partir do censo 2017. **Revista de Política Agrícola**, v. 30, n. 3, 2021. No prelo.
- BRAVO-ORTEGA, C.; LEDERMAN, D. Agricultural productivity and its determinants: revisiting international experiences. **Estudios de economía**, v. 31, n. 2, p. 133–163, 2004.
- CAVES, D. W.; CHRISTENSEN, L. R.; DIEWERT, W. E. Multilateral Comparisons of Output, Input, and Productivity Using Superlative Index Numbers. **The Economic Journal**, v. 92, n. 365, p. 73, 1982a.
- CAVES, D. W.; CHRISTENSEN, L. R.; DIEWERT, W. E. The Economic Theory of Index Numbers and the Measurement of Input, Output, and Productivity. **Econometrica**, v. 50, n. 6, p. 1393, 1982b.
- 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**, v. 51, n. 3, p. 229–240, 1997.
- 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, 2018.
- FÄRE, R.; GROSSKOPF, S.; LINDGREN, BJORN; ROOS, P. Productivity Developments in Swedish Hospitals: A Malmquist Output Index Approach. In: A. Charnes; W. W. Cooper; A. Y. Lewin; et al. (Orgs.); **Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Applications**. 1º ed, p.253–272, 1994a. New York: Springer Science+Business Media.
- FÄRE, R.; GROSSKOPF, S.; LOVELL, C. A. K.; PASURKA, C. Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: A nonparametric approach. **Review of Economics and Statistics**, v. 71, n. 1, p. 90–98, 1989.
- FÄRE, R.; GROSSKOPF, S.; NORRIS, M. Productivity Growth , Technical Progress , and Efficiency Change in Industrialized Countries **The American Economic Review**, v. 84, n. 1, p. 66–83, 1994b.
- FERREIRA, C. B.; ARAUJO, J. A.; TABOSA, F. J. S.; DE LIMA, J. R. F. Produtividade agrícola nos países da américa latina. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 54, n. 3, p. 437–458, 2016.
- FUGLIE, K. O. Is a slowdown in agricultural productivity growth contributing to the rise in commodity prices? **Agricultural Economics**, v. 39, n. SUPPL. 1, p. 431–441, 2008.
- FULGINITI, L. E.; PERRIN, R. K. Agricultural productivity in developing countries. **Agricultural Economics**, v. 19, n. 1–2, p. 45–51, 1998.
- GASQUES, J. G.; BASTOS, E. T.; BACCHI, M. R. P. **Produtividade e fontes de crescimento da agricultura**. Brasília, 2009.
- GASQUES, J. G.; BASTOS, E. T.; VALDES, C.; BACCHI, M. R. P. Productivity in agriculture: results for Brazil and selected Brazilian states Abstract. **Revista de Política Agrícola**, v. 23, n. 3, p. 87–98, 2014.

GASQUES, J.G.; BACCHI, M. R. P.; RODRIGUES, L.; BASTOS, E. T.; VALDES, C. Produtividade da agricultura brasileira: a hipótese da desaceleração. In: J. E. R. Vieira Filho; José Garcia Gasques (Orgs.); **Agricultura, transformação produtiva e sustentabilidade**. p.142–163, 2016. Brasília: IPEA.

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.

HELFAND, S. M.; MAGALHÃES, M. M.; RADA, N. E. Brazil's Agricultural Total Factor Productivity Growth by Farm Size. **Inter-American Development Bank Working Paper**, v. 609, n. September, p. 71, 2015. Washington.

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

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo agropecuário 2017: resultados definitivos. , 2019. Rio de Janeiro: IBGE.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção Agrícola Municipal - PAM 2019.

INTERNATIONAL FOOD POLICY RESEARCH INSTITUTE – IFRI. Agricultural Total Factor Productivity (TFP), 1991-2014: 2018 Global Food Policy Report Annex Table 5. , 2018. Washington: Harvard Dataverse, V1, 208.

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

LÁZARI, N. C. DE; MAGALHÃES, M. M. DE. Crescimento da PTF segundo tamanho de estabelecimentos rurais na região Sudeste, de 1985 a 2006. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 57, n. 2, p. 198–214, 2019.

LI, K.; LIN, B. Measuring green productivity growth of Chinese industrial sectors during 1998-2011. **China Economic Review**, v. 36, p. 279–295, 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, 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, 2017. Elsevier Ltd.

LI, P.; OUYANG, Y. Technical Change and Green Productivity. **Environmental and Resource Economics**, v. 76, n. 2–3, p. 271–298, 2020. Springer Netherlands.

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, n. November 2018, p. 201–213, 2019.

LUDENA, C. E. Agricultural Productivity Growth, Efficiency Change and Technical Progress in Latin America and the Caribbean. **SSRN Electronic Journal**, v. 61, p. 38, 2010.

MACHADO, G. C.; BACHA, C. J. C.; JOHNSTON, F. L. Revisão sistemática dos trabalhos que calculam a PTF da agropecuária brasileira 1. **Revista de Política Agrícola**, v. 29, n. 1, p. 82–93, 2020.

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. Elsevier B.V.

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

MENDES, S. M.; TEIXEIRA, E. C.; SALVATO, M. A. Investimentos em infra-estrutura e produtividade total dos fatores na agricultura Brasileira: 1985-2004. **Revista Brasileira de Economia**, v. 63, n. 2, p. 91–102, 2009.

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

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

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

PEREIRA, C.; SILVEIRA, J. M. F. J. Análise Exploratória da Eficiência Produtiva das Usinas de Cana-de-açúcar na. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 54, n. 1, p. 147–166, 2016.

PEREIRA, M. F.; SILVEIRA, J. S. T. DA; LANZER, E. A.; SAMOHYL, R. W. Productivity growth and technological progress in the Brazilian agricultural sector. **Pesquisa Operacional**, v. 22, n. 2, p. 133–146, 2002.

PEREIRA, P. A. A.; MARTHA, G. B.; SANTANA, C. A.; ALVES, E. The development of Brazilian agriculture: future technological challenges and opportunities. **Agriculture & Food Security**, v. 1, n. 1, p. 4, 2012.

RADA, N. E.; BUCCOLA, S. T. Agricultural policy and productivity: Evidence from Brazilian censuses. **Agricultural Economics (United Kingdom)**, v. 43, n. 4, p. 355–367, 2012.

RADA, N.; HELFAND, S.; MAGALHÃES, M. Agricultural productivity growth in Brazil: Large and small farms excel. **Food Policy**, v. 84, p. 176–185, 2019.

SANTOS, P. F. A.; SPOLADOR, H. F. S. Produtividade setorial e mudança estrutural no Brasil: Uma análise para o período 1981 a 2013. **Revista Brasileira de Economia**, v. 72, n. 2, p. 217–248, 2018.

SEEG. Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Disponível em: <<http://seeg.eco.br>>. .

SHEN, Z.; BOUSSEMART, J. P.; LELEU, H. Aggregate green productivity growth in OECD's countries. **International Journal of Production Economics**, v. 189, n. February 2016, p. 30–39, 2017. Elsevier B.V.

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, 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**, v. 16, n. 7, p. 4465–4469, 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, 2017.

SOUZA, G. DA S. E.; GOMES, E. G.; ALVES, E. R. DE A.; GASQUES, J. G. Technological progress in the Brazilian agriculture. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 72, n. May, 2020.

SUEYOSHI, T.; YUAN, Y.; GOTO, M. A literature study for DEA applied to energy and environment. **Energy Economics**, v. 62, p. 104–124, 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, n. September, p. 394–402, 2017.

VICENTE, J. R. Mudança tecnológica, eficiência e produtividade total de fatores na agricultura brasileira, 1970-95. **Economia Aplicada**, v. 8, n. 4, p. 729–760, 2004.

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, 2015.

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, 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, 2011. Elsevier B.V.

ZHOU, P.; ANG, B. W.; POH, K. L. A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies. **European Journal of Operational Research**, v. 189, n. 1, p. 1–18, 2008.