

# DINÂMICA E EXPANSÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR E OUTRAS CULTURAS AGRÍCOLAS NA PARAÍBA: UMA ANÁLISE DOS IMPACTOS DOS GASES DE EFEITO ESTUFA

*Dynamics and expansion of sugarcane and other agricultural crops in Paraíba: an analysis of the impacts of greenhouse gases*

**Wallysson Klebson Medeiros Silva**

Economista. Doutorando em Administração (UFPB). wallyssonk@gmail.com

**Raphael Abrahao**

Engenheiro agrícola. Professor do Departamento de Engenharia de Energias Renováveis da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Cidade Universitária - João Pessoa - PB - Brasil - CEP: 58051-970, Caixa Postal 5115 raphael@cear.ufpb.br

**Luiz Moreira Coelho Junior**

Economista. Professor do Departamento de Engenharia de Energias Renováveis da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). luiz@cear.ufpb.br

---

**Resumo:** Este artigo analisou a dinâmica e expansão de cana-de-açúcar, abacaxi, feijão, mandioca, milho e outras culturas na Paraíba, com enfoque nos impactos dos gases de efeito estufa, no período de 1990 a 2017. Aplicou-se o modelo shift-share para quantificar a produção agrícola do estado da Paraíba, observando os recortes geopolíticos. Também, efetuou-se uma regressão quantílica para verificar a influência da cana-de-açúcar nos valores dos gases de efeito estufa (CO<sub>2</sub>eq), entre 1990 a 2017. Os resultados mostraram que a decomposição do efeito área em efeitos escala e substituição das culturas da cana-de-açúcar e do abacaxi foram os que mais absorveram áreas, enquanto que o feijão foi o que mais cedeu áreas para as demais. Na decomposição nos efeitos área (EA), rendimento (ER) e localização geográfica (ELG), observou-se que, na Paraíba e nos dez municípios analisados, ocorreu uma expansão heterogênea, sendo os ganhos de produtividade explicados pelo EA e o ELG, pois o ER evidenciou o baixo dinamismo agrícola. A aplicação da regressão quantílica se mostrou significativa para um impacto positivo na área plantada e na quantidade produzida e negativa na área colhida da cana-de-açúcar.

**Palavras-Chave:** Bioenergia; Mudanças Climáticas; Shift-Share; Regressão quantílica.

**Abstract:** This article analyzed the dynamics and expansion of sugarcane, pineapple, beans, cassava, corn and other crops in Paraíba with a focus on the impacts of greenhouse gases, from 1990 to 2017. The shift-share model was applied to quantify the agricultural production of the state of Paraíba, observing the geopolitical cuts. Also, a quantile regression was performed to verify the influence of sugarcane on the values of greenhouse gases (CO<sub>2</sub>eq), between 1990 to 2017. The results showed that the decomposition of the area effect in scale effects and substitution of the sugarcane and pineapple crops were the ones that most absorbed areas, while beans were the ones that most yielded areas to the others. In the decomposition in the Area (EA), Yield (RE) and Geographic Location (ELG) effects, it was observed that in Paraíba and in the ten municipalities analyzed there was a heterogeneous expansion, with the productivity gains explained by the EA and the ELG, as the ER evidenced the low agricultural dynamism. The application of quantile regression proved to be significant for a positive impact on the planted area and quantity produced and negative on the harvested area.

**Keywords:** Bioenergy; Climate changes; Shift-Share; Quantile regression.

## 1 INTRODUÇÃO

Desde o período colonial no Brasil, a cana-de-açúcar tem sido uma das principais culturas agrícolas, redefinindo sua estrutura produtiva e industrial. Na década de 1970, diante das crises do petróleo, foi inserida nos Planos Nacionais de Desenvolvimento (PND's) a criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool). Este programa incentivou o desenvolvimento da cana-de-açúcar e intensificou a produção de álcool combustível (etanol) para substituir a gasolina, a fim de mitigar a dependência do petróleo importado. A partir do século XXI, o mundo vem apelando cada vez mais por uma energia sustentável, e, em resposta, o Brasil instituiu a **RenovaBio (Lei nº 13.576/2017)**, que é uma nova política para biocombustíveis, que vem colaborando para mitigação da redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e proporcionando segurança energética (ZUURBLER; VOOREN, 2008; PRADO JUNIOR, 2011; BRASIL, 2017; MORENO-PÉREZ et al., 2017).

Dentre os cultivos energéticos, a cana-de-açúcar é o mais eficiente, pois proporciona o melhor custo-benefício na geração, tendo a taxa mais alta de energia por volume, com potencial de mitigação das mudanças climáticas, por meio da substituição de combustíveis fósseis (OLIVEIRA et al., 2005; MACEDO et al., 2008; RENOUF et al., 2008; BÖRJESSON, 2009; JOHNSON et al., 2010; MANOCHIO et al., 2017). A expansão da cana-de-açúcar e suas amplas áreas cultiváveis faz do Brasil o maior produtor dessa *commodity*. Isto proporcionou, no início desta década, a retomada da produção de etanol em uma nova fase de expansão da cultura (GOLDEMBERG, 2007; NASS et al., 2007; FARGIONE et al., 2008).

Os cenários de políticas públicas e a própria dinâmica do mercado de produtos agrícolas ocasionam diversas mudanças na composição da produção. A cultura da cana-de-açúcar dinamiza a economia brasileira, com o aumento acentuado da expansão e das recentes transformações ocorridas no setor. Estes fatores têm sido objetos de debates, devido aos aspectos de área de abrangência, aos níveis tecnológico, econômico, ambiental e social. Em destaque, tem-se a mitigação de emissões de GEE, que proporciona benefícios socioeconômicos provenientes da industrialização, seja na multiplicidade de funções, na melhoria da qualidade do ar nos centros urbanos, na redução da dependência do petróleo e na distribuição de riqueza e de bem-estar (MORAES et al., 2015; SATOLO; BACCHI, 2013).

Em 2017, o Brasil produziu 758,5 milhões de toneladas (t) de cana-de-açúcar, sendo o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e açúcar e o segundo maior produtor de etanol. Da produção brasileira, a região Nordeste produziu 49,8 milhões t, enquanto o estado da Paraíba teve a cana-de-açúcar como a principal atividade agrícola, produzindo 5,2 milhões t, correspondendo a 4,1% do PIB, sendo o setor sucroalcooleiro o que mais emprega pessoas com baixa escolaridade no estado (IBGE, 2017).

Para a análise regional, frequentemente são utilizados indicadores para verificação da realidade socioeconômica de determinada localidade, bem como para testar e validar as teorias explicativas de determinados fenômenos econômicos que ocorrem na região. O *shift-share* é um método analítico que se baseia na análise de componentes de variação. O método busca decompor os componentes do crescimento em uma análise descritiva, verificando sua estrutura de produção. O crescimento das culturas demonstra-se por dois elementos: o estrutural, que está associado à composição setorial das atividades da região, e o diferencial, relacionado às vantagens locais comparativas (SANTOS; RATHMANN, 2009). A análise de regressão quantílica demonstra a estimação de funções quantílicas condicionais, isto é, modelos em que vários quantis da distribuição condicional da variável resposta são apresentados como funções de observações covariadas (KONKER; HALLOCK, 2001).

Mishra e Moss (2013) e Lin e Xu (2018) realizaram ensaios utilizando regressão quantílica para entender a produção agrícola. Mishra e Moss (2013) utilizaram essa regressão para explicar a heterogeneidade na avaliação de terras agrícolas e chegaram à conclusão de que a renda agrícola extra colabora para o aumento do valor das terras agrícolas, que variam entre os quantis. Lin e Xu (2018) empregaram a regressão quantílica para analisar as forças motrizes do CO<sub>2</sub> nos níveis de

emissão alto, médio e baixo na China. Os resultados mostraram que a diferença no investimento em processamento agrícola e nível de mecanização agrícola são alguns dos fatores que diferenciaram as forças motrizes do CO<sub>2</sub> de umas províncias quantílicas para outras.

Estudos recentes realizados no Brasil, que trouxeram uma discussão sobre a dinâmica da cana-de-açúcar utilizando o *shift-share*, foram: Alves et al. (2018), Caldarelli; Gilio (2018) e Defante et al. (2018). Alves et al. (2018) analisaram 35 culturas permanentes e 33 temporárias de 558 microrregiões brasileiras, no período de 1990 a 2016, e chegaram à conclusão de que apenas cana-de-açúcar e soja tiveram efeitos positivos de substituição. Caldarelli e Gilio (2018) perceberam, em São Paulo, no período de 2000 a 2015, que a área cultivada de cana-de-açúcar aumentou consideravelmente, em detrimento das áreas de pastagens e das culturas de arroz, feijão, milho, batata, mandioca e frutas. Defante et al. (2018) concluíram que, no Mato Grosso do Sul, a cana-de-açúcar gerou externalidades positivas na agropecuária estadual, forçando a evolução da produtividade, principalmente, na pecuária.

Mudando um pouco essa perspectiva, a técnica de *shift-share* foi usada nesta pesquisa com a regressão quantílica, no intuito de averiguar os fatores que impactaram as culturas agrícolas na Paraíba, visando a uma melhor compreensão de seus padrões regionais. O'leary e Webber (2015) utilizaram ambos os métodos para entender o crescimento da produtividade regional europeia, o que permitiu uma maior exploração dos diferentes efeitos intra e intersetoriais das regiões.

A crescente demanda nacional por etanol e seus derivados, somada ao crescente interesse pelo aumento de fontes de energias renováveis, capazes de minimizar a emissão de gases de efeito estufa estimulou a expansão da cana-de-açúcar. Este artigo avaliou a dinâmica e a tendência de expansão das principais culturas agrícolas, no estado da Paraíba, sob uma análise dos impactos dos gases de efeito estufa.

## 2 GASES DE EFEITO ESTUFA E SEU IMPACTO NA AGRICULTURA

O avanço industrial observado a partir do século XX intensificou a emissão de gases poluentes, que estariam gerando o chamado efeito estufa, responsável por evitar que a energia calorífica regressasse para fora da atmosfera. O resultado disso é o aquecimento global. Esse processo vem sendo intensificado, e seus efeitos podem se revelar irreversíveis, devido à intensificação da queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra (LAL, 2004; IPCC, 2014).

As evidências das mudanças climáticas, somadas ao progressivo aumento de gases como metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), dentre outros, na atmosfera terrestre, variam conforme a economia do país, o preço do combustível e diversos outros fatores. No Brasil, por exemplo, a queima direta de combustíveis fósseis é a principal fonte de CO<sub>2</sub>. Dentre outras atividades, a agropecuária colaborou significativamente com as emissões de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> (BRASIL, 2016).

O aumento acentuado do uso do solo na agricultura tem colaborado para a aceleração da emissão de gases de efeito estufa e, conseqüentemente, na busca de possíveis estratégias para sua mitigação. Suas origens remontam à Segunda Guerra Mundial, quando começaram a ser introduzidos mecanismos desenvolvimentistas na agricultura, com objetivo de acompanhar o grande crescimento populacional e, assim, suprir a demanda por alimentos da população mundial. Entre 1961 e 2005, a população mundial aumentou 111% (de 3,08 para 6,51 bilhões), enquanto a produção agrícola cresceu 162% (de 1,8 para 4,8 bilhões de toneladas nos últimos anos). Embora a produção agrícola tenha aumentado, os ganhos observados desde 1961 foram amplamente intensivos, impulsionados por aumento do uso de pesticidas e fertilizantes, melhor acesso à irrigação e mecanização (CARVALHO et al., 2009; BURNEY; DAVIS; LOBELL, 2010).

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) estima um aumento de, aproximadamente, 60% na demanda global por alimentos. Em contrapartida, a agricultura vem emitindo bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub>eq/ano, sendo a aplicação por fertilizantes responsáveis

por, em média, 13% das emissões. Deste modo, um dos desafios da agricultura para as próximas décadas será expandir a área de cultivo em cerca de 20%, produzir mais e, ao mesmo tempo, mitigar suas emissões de gases de efeito estufa (FAO, 2011; FAO, 2014).

A pressão para o aumento na produção agrícola contribuiu para o surgimento da Revolução Verde, baseada no uso intensivo de insumos químicos, acarretando uma modernização agrícola e, como consequência, o aumento dos impactos ambientais ocasionados pelo uso intensivo de fertilizantes comerciais (SHIVA, 2016; WEIL; BRADY, 2016). Nesse contexto, com o aumento da preocupação relacionada às mudanças climáticas, oriunda, principalmente, da emissão de gases de efeito estufa, torna-se necessário compreender esses impactos para aplicar de maneira correta medidas de mitigação e sequestro de carbono, com o objetivo de minimizar as emissões de gases de efeito estufa. O IPCC aponta três categorias que são consideradas oportunidades de diminuição de GEE na agricultura: 1) diminuição das emissões, 2) promoção do sequestro de carbono e 3) impedimento de emissões (IPCC, 2014).

Féres et al. (2009) averiguaram que, para a região Nordeste, as alterações do clima farão com que a produtividade de diversas culturas, como feijão, soja, algodão, cana-de-açúcar, tenham quedas de produção. Pinto e Assad (2008) ressaltam que 95% das perdas poderão ocorrer devido às inundações e secas. Tais acontecimentos tendem a acontecer com mais frequências, devido às mudanças climáticas. Marengo e Valverde (2007) reforçam que as tendências para o Nordeste serão de diminuição de chuvas e elevação de temperatura, para o final do século XXI.

Ao analisarem o efeito estufa em produções nacionais do trigo, soja e milho, os autores Siqueira et al. (1994) empregaram modelos de simulação de crescimento de cultura, com base em dados climáticos de 1951 a 1980, e concluíram que vem ocorrendo decréscimo nas produções de milho e trigo e ampliação na produção de soja. Já Nobre e Assad (2005), em seu estudo, obteve como resultado que arroz, café, feijão, milho e soja sofrerão redução em sua produção no Brasil, destacando que a soja deve ser a cultura com maior prejuízo, podendo chegar a 60% na produção e na área plantada.

Pinto e Assad (2008) destacam que a ausência de políticas públicas voltadas a medidas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas, fará com que a produção agrícola sofra prejuízos bastante significativos. Sobre isto, o Relatório Stern é uma das investigações mais utilizadas, pois constatou que os custos totais vão ser semelhantes a um prejuízo de, no mínimo, 5% do PIB global por ano, até 2050 (STERN, 2006).

Dessa maneira, a importância da agricultura se impõe através de um processo de adequação às mudanças climáticas como uma resposta da sociedade aos desafios que o aquecimento global estabeleceu. Para isso, dispõe-se o fato de que há uma necessidade de ampliação de demanda de produção por produtos agrícolas para satisfazer as necessidades atuais e futuras, sem prejudicar a sustentabilidade ambiental.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Objeto de estudo e análise de dados

O estado da Paraíba possui uma área de 56.468,435 km<sup>2</sup>, com densidade demográfica de 66,70 hab/km<sup>2</sup>, situado no extremo leste da região Nordeste do Brasil. Encontra-se entre os paralelos 6°02'12" e 8°19'18"S e os meridianos de 34°45'54" e 38°45'45"W. O estado possui quatro mesorregiões, 23 microrregiões e 223 municípios, com população estimada de 3.996.496 habitantes. O clima é caracterizado por tropical quente-úmido (As'), semiárido (BSh) e quente semiúmido (Aw') (IBGE, 2018).

Foram avaliadas as principais culturas agrícolas temporárias do estado da Paraíba (cana-de-açúcar, abacaxi, feijão, mandioca, milho e outras culturas) disponíveis no Sistema de Recuperação Automática (SIDRA) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no período

de 1990 a 2017. As variáveis em análise foram quantidade produzida (t), área colhida (ha), área plantada (ha) e rendimento médio (kg/ha) (IBGE, 2017).

Os dados de emissão de gases de efeito estufa foram extraídos do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), em toneladas (t). Os gases de efeito estufa em CO<sub>2</sub> equivalente foram calculados conforme o *Global Warming Potential* (GWP), de acordo com o *Assessment Report* do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (AR-2, AR-4 e AR-5), no período de 1990 a 2017 (SEEG, 2020).

Avaliou-se a conjuntura da produção das principais culturas temporárias do estado da Paraíba, com base na área colhida de 2017, para os anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2017. Para isso, foi utilizada a Taxa Geométrica de Crescimento (TGC), como mostrado na equação 1.

$$TGC(\%) = \left[ \sqrt[\Delta t]{\frac{V_f}{V_o}} - 1 \right] * 100 \quad (1)$$

em que  $V_f$  é a produção das culturas referente ao ano final, em  $t$ ;  $V_o$  refere-se aos valores da produção do ano inicial;  $\Delta t$  é a variação temporal da produção (expressa em anos). Também, avaliou-se a conjuntura das emissões de CO<sub>2</sub>eq na agricultura paraibana, por tipo de cultura, para os anos de 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014 e 2016.

A análise dos efeitos explicativos do modelo *shift-share* foi realizada da seguinte forma: para o efeito escala e substituição, empregou-se no estado da Paraíba e na mesorregião com maior representatividade da cana-de-açúcar; para o efeito área, rendimento e localização geográfica, investigaram-se o estado da Paraíba e os dez maiores municípios do estado produtores da cultura canavieira de 2017. Os subperíodos analisados foram três: 1990-2017, 2000-2017 e 2010-2017.

### 3.2 Método *shift-share*

O método *shift-share* tem como finalidade mostrar o comportamento da atividade agrícola através da decomposição dos fatores responsáveis pela variação da produção. Consideraram-se três efeitos explicativos: efeito área (EA); efeito rendimento (ER), e efeito localização geográfica (ELG).

O EA mostra as mudanças ocorridas na produção, devido às alterações na área cultivada. Assim, a adição na produção é dada pela inclusão de novas áreas, apresentando uma utilização extensiva no solo. O ER indica a variação na produção, em decorrência das modificações de produtividade, dados inalteráveis os outros efeitos. Essas transformações retratam as mudanças tecnológicas pela aplicação de novos insumos, técnicas de produção e progresso do capital humano. O ELG retrata as mudanças percebidas na produção, devido às vantagens locacionais, isto é, decorrentes da modificação na localização das culturas entre os municípios estudados, mantendo-se os demais componentes constantes (ALVES et al., 2018).

Também se empregou o modelo desenvolvido por Zockun (1978), o qual presume que a área cultivada da cultura num dado período, dentro do sistema de produção, pode ser transformada por dois efeitos: o efeito escala, que é a variação da área total das culturas analisadas, e o efeito substituição, associado à variação da participação de cada cultura dentro do sistema de produção. O efeito substituição, quando positivo, aponta que houve expansão da cultura, adquirindo área de outra cultura e somando na sua. Quando negativo, o efeito mostra que a área de uma cultura passou para outra dentro do sistema.

#### 3.2.1 Variáveis utilizadas no modelo *shift-share*

Para facilitar a leitura, dispõe-se da notação usada no modelo de “*shift-share*” das culturas temporárias no estado da Paraíba. O subíndice “*c*” aponta a cultura verificada e varia de 1 a *n*. O

subíndice “ $m$ ” representa o local de análise, variando de 1 a  $k$ . O subíndice “ $t$ ” estabelece o período. O período inicial é simbolizado por “ $i$ ” e o período final por “ $f$ ”. As variáveis utilizadas são:

$Q_{ct}$  é a parcela produzida da  $c$ -ésima cultura no estado, no período  $t$ ;

$A_{cmt}$  caracteriza como a área total cultivada com a  $c$ -ésima cultura, no  $m$ -ésima local, no período  $t$ ;

$A_{ct}$  é a área total cultivada com a  $c$ -ésima cultura no estado, no período  $t$ ;

$A_{mt}$  é a área total cultivada das culturas, em hectares, na  $m$ -ésima localidade do estado, no período  $t$ ;

$A_t$  equivale à área total cultivada com as culturas, em hectares, no estado, no período  $t$ ;

$R_{cmt}$  é o rendimento da  $c$ -ésima cultura, na  $m$ -ésima localidade do estado, no período  $t$ ;

$\gamma_{cmt}$  é a proporção da área total cultivada com a  $c$ -ésima cultura na  $m$ -ésima localidade, na área cultivada da  $c$ -ésima cultura no estado ( $A_{cmt}/A_{ct}$ ), no período  $t$ ;

$\lambda$  é o coeficiente que determina a modificação na área total cultivada das culturas entre os períodos inicial e final ( $A_{cmt}/A_{ct}$ ).

### 3.2.2 Decomposição da variação da produção nos efeitos área, rendimento e localização geográfica

A descrição do modelo segue os procedimentos adotados por Igreja et al. (1987), com adaptações. A quantidade produzida no estado da Paraíba e nos dez municípios com maior produção de 2017 da  $c$ -ésima cultura de cana-de-açúcar, no período  $t$ , está representada na equação 2.

$$Q_{ct} = \sum_{m=1}^k (A_{cmt} R_{cmt}) \quad (2)$$

Logo, no período inicial  $i$ , utiliza-se a equação 3.

$$Q_{ci} = \sum_{m=1}^k (A_{cmi} R_{cmi}) = \sum_{m=1}^k \gamma_{cmi} A_{ci} R_{cmi} \quad (3)$$

Para o período final  $f$ , usa-se a equação 4.

$$Q_{cf} = \sum_{m=1}^k (A_{cmf} R_{cmf}) = \sum_{m=1}^k \gamma_{cmf} A_{cf} R_{cmf} \quad (4)$$

Se, no período analisado, somente a área cultivada for modificada, a produção final ( $Q_{cf}^A$ ) será:

$$Q_{cf}^A = \sum_{m=1}^k (\gamma_{cmi} A_{cf} R_{cmi}) \quad (5)$$

Contudo, se a área e o rendimento variarem, ficando constantes a localização geográfica e a composição da produção, o valor produzido no período  $f$  ( $Q_{cf}^{AR}$ ) poderá ser representado pela equação 6.

$$Q_{cf}^{AR} = \sum_{m=1}^k (\gamma_{cmi} A_{cf} R_{cmf}) \quad (6)$$

Mas, se ocorrer uma variação na localização geográfica, com a área e com o rendimento, a produção final será descrita pela equação 7.

$$Q_{cf}^{ARL} = \sum_{m=1}^k (\gamma_{cmf} A_{cf} R_{cmf}) = Q_{cf} \quad (7)$$

A mudança total da quantidade produzida da  $c$ -ésima cultura do período inicial “ $i$ ” para o período final “ $f$ ” ( $Q_{cf} - Q_{ci}$ ) é caracterizada pela equação 8.

$$Q_{cf} - Q_{ci} = \sum_{m=1}^k \gamma_{cmf} A_{cf} R_{cmf} - \sum_{m=1}^k \gamma_{cmi} A_{ci} R_{cmi} \quad (8)$$

Esta também pode ser descrita conforme mostrado na equação 9

$$Q_{cf} - Q_{ci} = (Q_{cf}^A - Q_{ci}) + (Q_{cf}^{AR} - Q_{cf}^A) + (Q_{cf} - Q_{cf}^{AR}) \quad (9)$$

em que:

$Q_{cf} - Q_{ci}$  é a variação total da produção da  $c$ -ésima cultura, entre os períodos inicial e final;

$Q_{cf}^A - Q_{ci}$  é a variação total da quantidade produzida da  $c$ -ésima cultura, entre “ $i$ ” e “ $f$ ”, alterando apenas a área cultivada, sendo chamada de efeito área;

$Q_{cf}^{AR} - Q_{cf}^A$  é a variação total da produção da  $c$ -ésima cultura, entre “ $i$ ” e “ $f$ ”, quando ocorre variação no rendimento e as outras variáveis se conservam constantes, sendo denominada de efeito rendimento;

$Q_{cf} - Q_{cf}^{AR}$  é a variação total da quantidade produzida da  $c$ -ésima cultura, entre os períodos “ $i$ ” e “ $f$ ”, ocorrida pela mudança da localização geográfica, mantendo constantes as outras variáveis, sendo nomeada como efeito localização geográfica.

Com a finalidade de apresentar os resultados na forma de taxas anuais de crescimento da produção, foi empregada a metodologia proposta por Igreja (1987). Deste modo, dividem-se ambos os lados da equação (9) por  $(Q_{cf} - Q_{ci})$  e se tem a identidade apresentada na equação 10.

$$\frac{(Q_{cf}^A - Q_{ci})}{(Q_{cf} - Q_{ci})} + \frac{(Q_{cf}^{AR} - Q_{cf}^A)}{(Q_{cf} - Q_{ci})} + \frac{(Q_{cf} - Q_{cf}^{AR})}{(Q_{cf} - Q_{ci})} \quad (10)$$

Multiplicando-se ambos os lados da identidade (10), obtém-se a equação 11

$$r = \left( \sqrt[f]{\frac{Q_f}{V_o}} - 1 \right) * 100 \quad (11)$$

em que:  $f$  é a quantidade de anos do período da análise e  $r$  é a taxa anual média de variação da produção da  $c$ -ésima cultura, em porcentagem, para, assim, obter a equação 12

$$r = \frac{(Q_{cf}^A - Q_{ci})}{(Q_{cf} - Q_{ci})} r + \frac{(Q_{cf}^{AR} - Q_{cf}^A)}{(Q_{cf} - Q_{ci})} r + \frac{(Q_{cf} - Q_{cf}^{AR})}{(Q_{cf} - Q_{ci})} r \quad (12)$$

em que são apresentadas em porcentagem as seguintes equações:

$\frac{(Q_{cf}^A - Q_{ci})}{(Q_{cf} - Q_{ci})}$  é o efeito área, representado em taxa de crescimento ao ano;

$\frac{(Q_{cf}^{AR} - Q_{cf}^A)}{(Q_{cf} - Q_{ci})}$  é o efeito rendimento, explícito em taxa de crescimento ao ano;

$\frac{(Q_{cf} - Q_{cf}^{AR})}{(Q_{cf} - Q_{ci})}$  é o efeito localização geográfica, expresso em taxa de crescimento ao ano.

### 3.2.3 Decomposição do efeito área em escala e substituição

O coeficiente  $\lambda$  é o que mensura a modificação do tamanho do sistema, enquanto a variação da área ocupada do sistema pode ser decomposta no efeito escala e no efeito substituição, conforme as equações 13 e 14.

$$(\lambda A_{ci} - A_{ci}) \text{ é o efeito escala (EE);} \quad (13)$$

$$(A_{cf} - \lambda A_{ci}) \text{ é o efeito substituição (ES).} \quad (14)$$

A soma da equação 13 e 14, resulta a equação 15, isto é:

$$(A_{cf} - A_{ci}) = (\lambda A_{ci} - A_{ci}) + (A_{cf} - \lambda A_{ci}) \quad (15)$$

Averigua-se, dentro do sistema de produção, o efeito escala, uma vez que o somatório do efeito substituição é nulo, como apresentado na equação 16.

$$\sum_{c=1}^n (A_{cf} - \lambda A_{ci}) = 0 \quad (16)$$

O pressuposto do modelo é que as culturas que concedem área o fizeram de maneira proporcional para todas aquelas que expandiram área. Assim, determina-se a parcela de áreas transferidas (efeito substituição negativo) para as culturas que tiveram efeito substituição positivo.

### 3.3 Regressão quantílica

Para estabelecer o grau de relação entre os gases de efeito estufa e a cultura da cana-de-açúcar, foi utilizado o método de regressão quantílica no software Stata®, versão 15.0. A área de estudo abrangeu o estado da Paraíba, no período de 1990 a 2017. Segundo Canarella e Pollard (2004), a finalidade desta técnica é predizer e realizar inferências sobre a função condicional quantílica. Ao contrário do método clássico linear, que se fundamenta na minimização das somas dos quadrados dos resíduos, a quantílica apresenta um mecanismo para estimar modelos para funções condicionais médias e para a função condicional mediana, possibilitando uma análise estatística mais completa.

A variável dependente foi o log dos gases de efeito estufa ( $\log CO_{2eq}$ ), enquanto as variáveis explicativas foram: quantidade produzida em toneladas de cana-de-açúcar, área plantada e colhida em hectares de cana-de-açúcar. A equação que descreve o modelo é apresentada na equação 17.

$$\log CO_{2eq_i} = \alpha_0 + \beta_1 plantacao_i + \beta_2 colheita_i + \beta_3 producao_i + \varepsilon_i \quad (17)$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Evolução da produção das culturas temporárias e das emissões de $CO_{2eq}$ na agricultura do estado da Paraíba

A Tabela 1 apresenta a evolução da produção das principais culturas agrícolas da Paraíba, para os anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2017, em mil toneladas ( $10^3 t$ ). Em termos absolutos, a produção das principais culturas da Paraíba apresentou uma variação cíclica no período de 1990 a 2017. A atividade agrícola paraibana se caracterizou pela baixa diversificação, tendo a cana-de-açúcar, o abacaxi, a mandioca, o milho e o feijão ocupado 99% das culturas temporárias produzidas na Paraíba, com base em 2017.

Entre 1990 e 2017, a produção das principais culturas paraibanas apresentou queda de 1,68% a.a, decrescendo de 9178,70  $10^3 t$  (1990) para 5812,03  $10^3 t$  (2017). A cana-de-açúcar se manteve como a cultura mais produzida no estado da Paraíba, com uma produção superior a todas as outras culturas, em todos os períodos analisados. Esse número expressivo decorreu de uma conjunção de fatores, podendo ser enfatizados: ampliação da demanda e do preço do produto no mercado internacional, efeito da abertura do mercado europeu para o açúcar procedente do Brasil, diminuição da produção indiana, aumento do preço do petróleo e procura e produção de energia renovável em todo o mundo (MARTINELLI; FILOSO, 2008; BORDONAL et al., 2018).

**Tabela 1** – Evolução da produção das principais culturas da Paraíba para os anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2017, em mil toneladas ( $10^3$  t)

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2017
Cana-de-açúcar	8282,78	6522,24	3986,82	4975,80	5646,15	6801,98	5197,15
Abacaxi	284,17	235,76	268,08	325,61	273,91	290,77	363,33
Mandioca	386,34	442,45	263,55	269,10	228,13	131,07	146,17
Milho	46,31	154,05	125,24	61,39	11,51	10,93	26,24
Feijão	47,89	87,82	91,66	53,21	10,18	7,02	20,53
Outras Culturas	131,21	165,40	118,47	112,84	86,27	52,55	58,61
<b>Total</b>	<b>9178,70</b>	<b>7607,72</b>	<b>4853,82</b>	<b>5797,95</b>	<b>6256,15</b>	<b>7294,32</b>	<b>5812,03</b>

Fonte: IBGE (2017).

No período estudado, a única cultura que apresentou crescimento foi o abacaxi (0,91% a.a.), enquanto as outras culturas apresentaram decréscimo (cana-de-açúcar -1,71% a.a.; mandioca -3,54% a.a.; milho -2,08% a.a.; feijão -3,09% a.a.; outras culturas -2,94% a.a.). Observou-se uma pequena diversificação na produção agrícola paraibana, dentro de uma conjuntura mais ampla, pautada pela industrialização do país. Assim, o decréscimo na produção pode ser explicado pela forte oscilação da sua produção, especialmente devido aos anos de precipitação reduzida que afetaram a Paraíba, no decorrer do período em análise (ARIAS; CABALLERO, 2015; MARENGO; TORRES; ALVES, 2016).

Entre os efeitos mais debatidos da atividade econômica sobre o meio-ambiente e que tem tomado novas dimensões, estão as mudanças climáticas, ocasionadas pela acumulação excessiva de gases de efeito estufa na atmosfera. De acordo com o IPCC (2014), as emissões antropogênicas globais de gases de efeito estufa na agricultura representam 14% do total de emissões, número que vem aumentando gradativamente, devido, sobretudo, à expansão da produção agrícola, à ampliação de renda, população e consumo de produtos agrícolas diversos, em países em desenvolvimento. Para que ocorra uma mitigação desses gases, torna-se necessário evitar e reduzir as emissões e promover programas para sequestro de carbono.

A Tabela 2 apresenta as emissões de  $\text{CO}_2\text{eq}$  ( $10^3$  t) na agricultura do estado da Paraíba, para os anos de 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014 e 2016. As emissões totais cresceram 0,93% a.a., no período analisado, representando um aumento de 15,83%, entre 2000 e 2016. A cana-de-açúcar foi o principal responsável pelas emissões de gases de efeito estufa. Em 2000, a cana-de-açúcar foi responsável por 60% das emissões na agricultura paraibana; em 2016, chegou a 90%, ou seja, um aumento de 30%, em 16 anos, e um incremento de 3,50% a.a.

**Tabela 2** – Emissões de  $\text{CO}_2\text{eq}$  ( $10^3$  t) na agricultura do estado da Paraíba, por tipo de cultura, para os anos de 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014 e 2016

	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2012	2014	2016
Cana-de-açúcar	49,40	61,76	78,85	75,07	78,02	69,95	72,67	83,77	85,60
Mandioca	8,93	7,35	8,77	9,16	10,15	7,73	5,35	4,58	4,98
Feijão	9,84	5,54	6,66	10,86	8,10	1,09	0,34	1,92	1,00
Milho	6,33	4,64	3,68	7,92	6,02	0,58	0,33	1,43	0,64
Outras Culturas	7,76	5,89	8,14	7,64	7,67	5,00	4,31	4,98	3,06
<b>Total</b>	<b>82,26</b>	<b>85,18</b>	<b>106,10</b>	<b>110,65</b>	<b>109,96</b>	<b>84,35</b>	<b>83,00</b>	<b>96,68</b>	<b>95,28</b>

Fonte: Elaborado pelos autores, a partir do SEEG (2020).

As outras culturas analisadas tiveram uma redução significativa, como o feijão (-13,32% a.a.), a mandioca (-3,58% a.a.), o milho (-13,34% a.a.) e outras culturas (-5,65% a.a.).

O mecanismo de emissão de CO<sub>2</sub> do solo para a atmosfera abrange a propagação de gases de efeito estufa, que é controlada, essencialmente, pela interação entre o espaço poroso e o conteúdo de umidade do solo. Assim, o acúmulo de carbono no solo, em sistemas agrícolas, é uma estratégia para balancear os aumentos atmosféricos de CO<sub>2</sub> (DOSSOU-YOVO et al., 2016).

## 4.2 Expansão e substituição das principais culturas agrícolas

A Tabela 3 apresenta a decomposição da variação da área em hectares, da cana-de-açúcar no estado da Paraíba e da mesorregião Mata Paraibana, em diferentes períodos. No subperíodo que corresponde de 1990 a 2017, não ocorreram taxas anuais de crescimento positivas. As culturas que obtiveram os maiores decréscimos de produção foram o feijão e o milho. De 2000 a 2017, as culturas que apresentaram variações positivas foram: abacaxi (1910 ha) e cana-de-açúcar (4214 ha). Considerando o mesmo período de análise, tiveram queda de produção as culturas de feijão, mandioca, milho e outras culturas. A absorção de área de outras culturas, por parte do abacaxi e da cana-de-açúcar, respondeu por 3,47% e 11,18%, respectivamente, da expansão de área destas culturas, enquanto, no subperíodo 2010 a 2017, apenas o abacaxi (2837 ha) apresentou uma variação positiva. Observou-se, também, um declínio na área total de plantação no estado da Paraíba, em todos os subperíodos analisados.

O efeito escala observado na Tabela 3 mostra que todas as culturas obtiveram uma escala negativa de expansão, nos períodos observados, ou seja, nenhuma cultura incorporou áreas que, antes, não estivessem sendo usadas para cultivo.

Nos períodos analisados no estado da Paraíba, o efeito substituição mostrou-se positivo apenas para a cana-de-açúcar (45926,11 ha; 47132,50 ha), entre 1990-2017 e 2000-2017, ou seja, houve um acréscimo em sua área. No período de 2010-2017, conseguiram expansão na área as culturas do abacaxi, feijão e milho. A cultura mais substituída, e que passou sua área para outras culturas, foi o feijão (-24995,35 ha; -24103,11 ha), nos períodos de 1990-2017 e 2000-2017, e a mandioca (-5019,08 ha), entre 2010-2017.

A variação da área da mesorregião da Mata Paraibana apresentou, no subperíodo de 1990-2017, uma totalidade de taxa anual decrescente, enquanto, em 2000-2017, apenas a cana-de-açúcar obteve efeito positivo. Em 2010-2017, apresentaram crescimento na produção as culturas abacaxi, mandioca, milho e outras. Percebeu-se que, durante todos os subperíodos, ocorreu uma redução no total da variação, ou seja, houve diminuição da área plantada nas culturas.

No efeito escala e substituição, em nenhum subperíodo ocorreu escala no sistema de produção; porém, houve substituição nas culturas, no subperíodo que corresponde a 1990-2017: as culturas abacaxi, cana-de-açúcar e mandioca substituíram outras: principalmente feijão (2737,94 ha) e milho (2620,63 ha). Em relação ao sistema entre 2000-2017, a única cultura que incrementou sua área foi a cana-de-açúcar (9070,83 ha). Todas as outras culturas transferiram área, com destaque para a mandioca (4425,59 ha). Entre 2010-2017, houve o retorno das áreas cedidas para cana-de-açúcar, observadas em 2000-2017. Assim, a cana-de-açúcar perdeu 4398,81 hectares de área. Com exceção do feijão, as outras culturas obtiveram expansão de área, neste período de análise (2010-2017).

Ao estudar as fontes de crescimento no estado de São Paulo, durante o período de 2000 a 2015, Caldarelli e Gilio (2018) observaram que a cana-de-açúcar obteve uma alta taxa de crescimento da produção. O efeito substituição foi o principal responsável por tal resultado, uma vez que os efeitos de escala foram negativos em alguns subperíodos e inferiores em outros. As culturas que mais cederam área foram: arroz, feijão, milho e hortaliças. Defante et al. (2018) também constataram uma predominância no efeito substituição, no Mato Grosso do Sul, pois outras culturas agrícolas, como a soja e a pastagem, foram substituídas pela cana-de-açúcar, o que contribuiu para a expansão desta.

**Tabela 3** – Decomposição da variação da área (efeitos escala e substituição), em ha, da cana-de-açúcar no estado da Paraíba e da mesorregião Mata Paraibana, nos períodos de 1990-2017, 2000-2017, 2010-2017

Culturas	Paraíba			Mata Paraibana			
	Varição Total	Efeito Escala	Efeito Substituição	Varição Total	Efeito Escala	Efeito Substituição	
1990-2017	Abacaxi	-582,00	-8644,37	8062,37	-2758,00	-3223,14	465,14
	Cana-de-açúcar	-630,25	-108951,11	45926,11	-34633,00	-39006,17	4373,17
	Feijão	-2523,80	-227384,65	-24995,35	-4646,00	-1908,05	-2737,94
	Mandioca	-371,61	-35779,85	-1381,15	-1597,00	-2804,29	1207,29
	Milho	-2141,08	-202931,24	-11176,76	-4394,00	-1773,37	-2620,63
	Outras culturas	-856,69	-69233,78	-16435,22	-2171,00	-1483,97	-687,03
	Total	-6529,25	-6529,25	-	-50198,99	-50198,99	-
2000-2017	Abacaxi	1910,00	-4716,40	6626,40	-1965,00	-477,86	-1487,13
	Cana-de-açúcar	4214,00	-42918,50	47132,50	4761,00	-4309,83	9070,83
	Feijão	-1150,67	-90963,89	-24103,11	-1368,00	-144,03	-1223,97
	Mandioca	-172,80	-15109,45	-2170,55	-5046,00	-620,41	-4425,59
	Milho	-910,30	-80936,12	-10093,88	-238,00	-79,01	-158,99
	Outras	-461,39	-28747,62	-17391,37	-2005,00	-229,86	-1775,14
	Total	-263391,97	-263391,98	-0,01	-5861,01	-5861,00	0,01
2010-2017	Abacaxi	2837,00	-1905,72	4742,72	1094,00	-1102,51	2196,51
	Cana-de-açúcar	-264,22	-25348,98	-1073,02	-23696,00	-19297,19	-4398,81
	Feijão	-207,18	-21083,40	365,40	-920,00	-411,39	-508,60
	Mandioca	-103,03	-5283,92	-5019,08	224,00	-1214,66	1438,66
	Milho	-144,44	-20267,96	5823,96	648,00	-118,83	766,83
	Outras	-102,61	-5421,20	-4839,98	77,00	-428,42	505,42
	Total	-79311,18	-79311,18	-	-22573,01	-22573,00	0,01

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos com a utilização do modelo *shift-share* para os dez municípios com maior área plantada de cana-de-açúcar do estado da Paraíba, com base em 2017. Observou-se que os dez municípios analisados obtiveram uma expansão da área colhida com cana-de-açúcar, em todos os subperíodos analisados. Juntos, os municípios incorporaram 79.480 ha das 97.269 ha plantadas de cana-de-açúcar do estado da Paraíba, ou seja, 81,71% do total.

A década de 1990 foi marcada pela desregulamentação do setor sucroalcooleiro, que contribuiu para impulsionar a produção, aumentar a competitividade e as exportações com a abertura econômica e a imposição de modernização das unidades produtivas (MARTINS et al., 2017). Muitas das empresas produtoras de açúcar e álcool no estado da Paraíba não se adaptaram à redução do protecionismo estatal, o que aumentou os problemas de endividamento e resultou em falência. Em decorrência disso, foram evidenciados os resultados modestos no subperíodo 1990-2017, cujo maior resultado foi 2,40% do ER, em Juripiranga. O ER zero (Mamanguape e Mataraca) ou negativo (Cruz do Espírito Santo, Rio Tinto, Santa Rita) retrata a questão tecnológica e ratifica a desorganização setorial resultante da desregulamentação.

**Tabela 4** – Taxa de crescimento da produção efeito área (EA), efeito rendimento (ER) e efeito localização geográfica (ELG), em %, dos dez municípios com maior produção da cana-de-açúcar do estado da Paraíba, entre 1990 a 2017

Municípios	1990-2017			2000-2017			2010-2017		
	EA	ER	ELG	EA	ER	ELG	EA	ER	ELG
Cruz do Espírito Santo	0,79	-0,11	0,32	0,50	0,30	0,20	0,59	-	0,40
Itapororoca	0,15	0,23	0,61	-	7,29	-6,29	0,21	0,30	0,48
Juripiranga	-1,70	2,40	0,30	0,16	0,25	0,59	-0,40	1,93	-0,53
Mamanguape	0,73	0	0,27	-4,46	-	5,46	4,15	-7,37	4,22
Marcação	-	-	-	0,44	-0,52	1,08	-0,40	1,93	-0,53
Mataraca	0,76	0	0,24	0,44	0,09	0,48	0,06	0,83	0,11
Pedras de Fogo	0,64	0,20	0,16	0,46	-0,46	0,99	0,66	-0,13	0,47
Rio Tinto	0,26	-0,07	0,82	0,39	0,09	0,53	0,72	-0,34	0,62
Santa Rita	1,10	-0,30	0,21	0,40	0,50	0,10	0,14	0,63	0,22
Sapé	0,20	0,13	0,67	0,46	-	0,54	-	0,93	0,06
Paraíba	1,02	-0,02	-	-0,04	-0,23	1,28	0,21	-0,13	0,92

Nota: O município de Marcação não possui resultados no subperíodo 1990-2017, pois foi criado em 1994 pela Lei Estadual nº 5.913. Sendo assim, não possui dados no período que antecede esta data.

Marengo, Torres e Alves (2016) apontam que, entre 1997 e 1998, ocorreu uma profunda seca no Nordeste brasileiro, que afetou 57% de sua produção agrícola e acarretou um dano de 5% do PIB de toda a região Nordeste. A recuperação ocorreu entre 2005 e 2010, com a expansão da agroindústria sucroalcooleira – o Brasil quase dobrou a produção canavieira, com um aumento de 5% na área plantada. Essa conjuntura pode ser evidenciada na Tabela 4, em que se vê, no subperíodo 2000-2017 e 2010-2017, que os resultados mais expressivos foram obtidos pelo município de Mamanguape, com 5,46% e 4,22% no ELG no subperíodo de 2000-2017 e 2010-2017, respectivamente. Itapororoca também obteve destaque, com 7,29% no ER. No que se refere aos efeitos negativos, o município de Marcação foi o que apresentou os piores resultados (-0,40% no EA e -0,53% no ELG, no subperíodo de 2010-2017, e -0,52%, no subperíodo 2000-2017, para o ER). Os municípios de Cruz do Espírito Santo, Mataraca, Santa Rita e Sapé apresentaram uma taxa de crescimento positiva em todos os efeitos da produção.

O surgimento no mercado de cultivares mais adaptados e tecnologicamente mais avançados na década de 2000 refletiu profundamente nos valores do ER, nos outros subperíodos analisados, que obtiveram um incremento no efeito, na maioria dos municípios. O subperíodo 1990-2017 apresentou oscilações resultantes de variações na área e no rendimento, sendo que a localização geográfica apresentou resultados positivos em sua totalidade. No EA, apenas Juripiranga (-1,70%) apresentou um resultado negativo, enquanto, no ER, enquanto, no ER, foram os municípios de Cruz do Espírito Santo (-0,11%), Rio Tinto (-0,07%) e Santa Rita (-0,30%) que apresentaram resultado negativo, como mostrado na Tabela 4.

Foi possível apontar a predominância do efeito localização geográfica nos dez municípios estudados, o que indica uma contínua expansão canavieira e evidencia uma vantagem comparativa desses municípios. Este aspecto foi fortalecido pelos resultados alcançados para estados tradicionalmente agrícolas, principalmente os mais próximos da área costeira brasileira, devido às condições edafoclimáticas. Hofsetz e Silva (2012) reiteram que o Brasil possui potencial de extensão agrícola, e, com a demanda do mercado internacional de biocombustíveis, a propensão é de aumento de áreas canavieiras em todo o país.

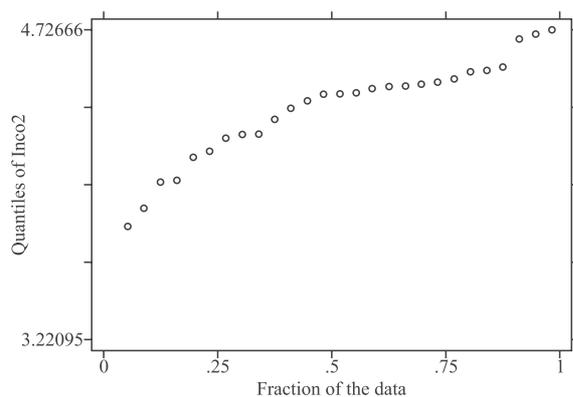
Nesse cenário, questões ambientais, como a diminuição das emissões de gases de efeito estufa, e políticas, como a redução da dependência do petróleo originário de regiões politicamente inconstantes, crescem em importância e aumentam a demanda por biocombustíveis, alterando, portanto, a dinâmica da utilização da terra (AZAR; LARSON, 2000). Desse modo, políticas governamentais influenciam diretamente na dinâmica e na expansão da cana-de-açúcar, que poderia ser impulsionada por uma política industrial e tecnológica setorial, deliberada localmente, para elaborar uma estrutura de estímulos, que possibilitará a integração entre os agentes desenvolvedores de tecnologia e o setor produtivo.

### 4.3 Emissão dos gases de efeito estufa na cultura de cana-de-açúcar

Com objetivo de resumir graficamente os quantis da variável dependente, gerou-se uma figura que mostra os valores de cada percentil. Assim, verifica-se, na Figura 1, o comportamento da distribuição da variável log de CO<sub>2</sub>eq. Essa informação é essencial, uma vez que permite distinguir se a variável tem um comportamento assimétrico nos quantis/percentis, o que justificaria a utilização da regressão quantílica.

Portanto, averiguou-se, por meio da Figura 1, um comportamento razoavelmente assimétrico para a direita da variável, o que retrata o indicativo favorável à estimação de um modelo de regressão quantílica. Detalhadamente, identificaram-se os valores dos quartis da variável logCO<sub>2</sub>eq, que são iguais a  $q_{0,25} = 4,17$ ,  $q_{0,5} = 4,41$ ,  $q_{0,75} = 4,48$  e  $q_{0,9} = 4,68$ .

**Figura 1** – Quantis estimados da variável dependente logCO<sub>2</sub>eq no estado da Paraíba de 1990 a 2017



Diante disto, estimou-se uma regressão quantílica na mediana. Essa regressão analisa a relação dos regressores  $x$  em distintos pontos da distribuição condicional de  $y$ , o que possibilita averiguar se seus efeitos são semelhantes nos vários níveis da variável de interesse.

A Tabela 5 mostra os detalhes da estimação do modelo da Equação 17, cujas variáveis utilizadas foram: logCO<sub>2</sub>eq (variável dependente) e área plantada, área colhida e produção (variáveis independentes), no período entre 1990 a 2017. De acordo com a Tabela 5, todas as variáveis foram estatisticamente diferentes de zero, a 95% de confiança. Assim, tem-se

que o impacto da quantidade de área plantada de cana-de-açúcar no log dos gases de efeito estufa (logCO<sub>2</sub>eq) é negativo e significativo no quantil 50 (mediana de 4,41). O fato de existir tal área causa uma diminuição de -0,00000940 no log de CO<sub>2</sub>eq.

**Tabela 5** – Parâmetros estimados pela análise de regressão quantílica para mediana de logCO<sub>2</sub>eq sobre a área plantada e colhida em hectares e a quantidade produzida em tonelada de cana-de-açúcar no estado da Paraíba, de 1990 a 2017

	Coefficientes	Erro-padrão	T	P>t	Intervalo de Confiança 95%	
Área plantada	-0,00000940	0,00000300	-3,13	0,01	-0,0000156	-0,00000320
Área colhida	0,00000815	0,00000328	2,49	0,02	0,00000139	0,0000149
Produção	0,000000191	0,00000001.13	16,84	0,00	0,000000167	0,000000214

Notas: Median regression Number of obs = 28; Raw sum of deviations 6,17 (about 4,41); Min sum of deviations 0,84 Pseudo R2 = 0,86

No que se refere à área colhida, nota-se que ocorre um aumento no log dos gases de efeito estufa, sugerindo que a existência de tal área aumenta em  $8.15e-06$  o log de  $CO_2eq$ . Os achados também apontam que a produção da cana-de-açúcar colabora para o aumento de  $1.91e-07$  no log $CO_2eq$ . O pseudo do Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) apresentou o valor de 86,44%. Assim, a variabilidade da variável dependente foi explicada pelas três variáveis explicativas.

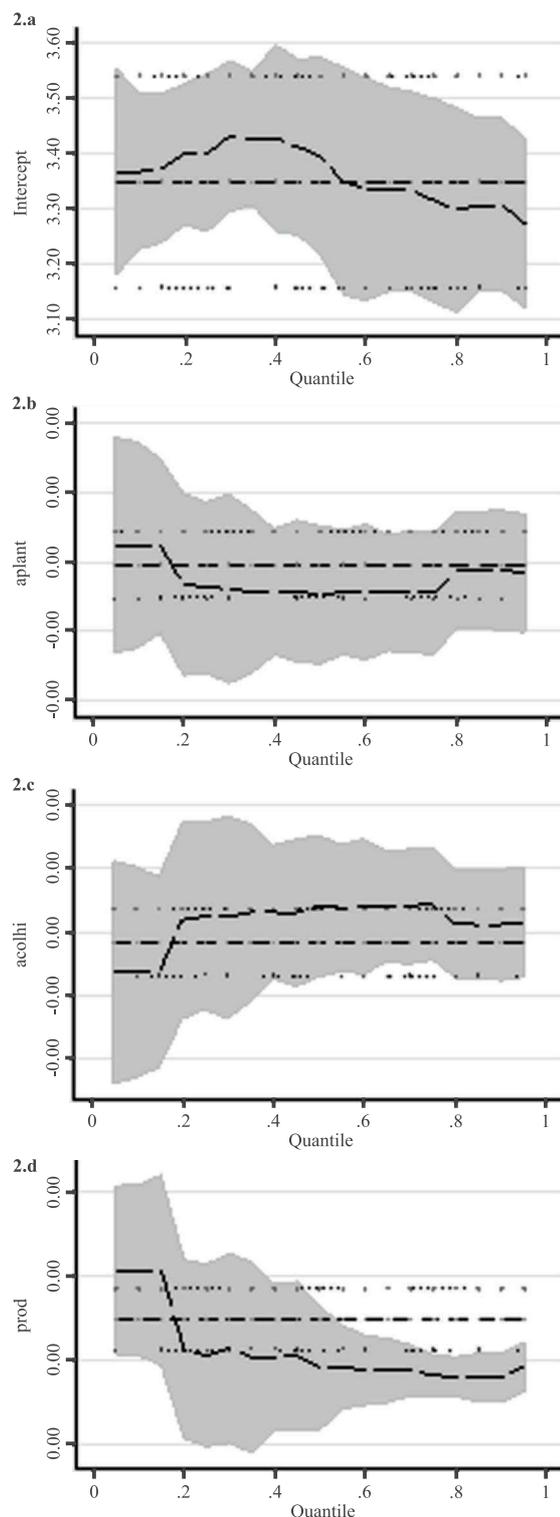
Posteriormente, na literatura, diversos artigos empregam a técnica de Mínimo Quadrado Ordinário (OLS), método esse que pode não representar corretamente a realidade, nos casos em que a variável dependente varia entre valores superiores e inferiores e, assim, pode não ser homogêneo entre diferentes percentis das variáveis dependentes (REHMAN; JING-DONG, 2017; XU; LIN, 2017). De tal modo, estimar OLS pode não refletir e representar a heterogeneidade nos valores estimados. Portanto, a regressão quantílica estima a relação em qualquer ponto, condicionada à distribuição da variável dependente (SHAWTARI et al., 2016).

Sendo assim, verificaram-se também as estimativas para diferentes quantis, em conjunto com estimativas de OLS e mediana com *bootstrap*, com objetivo de compará-las. Notou-se, no entanto, que há pouca discrepância entre os parâmetros estimados. Observou-se que a única diferença entre as variáveis é o sinal negativo do OLS na área colhida, enquanto nos quantis e no bootstrap o sinal foi positivo.

Desta forma, o impacto do log $CO_2eq$  foi positivo e significativo para todos os quantis analisados. Além disso, as variáveis explanatórias, com exceção da área colhida, não mudam o sinal de relação e significância, seja por OLS, seja para a regressão nos diferentes quantis.

A Figura 2 mostra os resultados da regressão quantílica, tal como estimada por OLS. As linhas horizontais representam as estimativas pontuais do OLS e os intervalos de confiança (não variando por quantil), enquanto as partes sombreadas são o intervalo de confiança do coeficiente da regressão quantílica.

**Figura 2** – Estimativas da regressão quantílica e OLS da área colhida e plantada / Quantidade produzida da cana-de-açúcar e sua relação com o log $CO_2eq$  no estado da Paraíba de 1990 a 2017



A Figura 2.a mostra o intercepto da estimação, enquanto que a Figura 2.b apresenta a relação entre o log $CO_2eq$  e a área plantada, cujos resultados corroboram que os coeficientes têm comportamentos variados entre cres-

cente e decrescente, ao longo dos quantis. O coeficiente do quantil 0,2 é o que mais se aproxima do coeficiente da regressão OLS.

O terceiro gráfico (2.c) da figura apresenta a relação entre o  $\log\text{CO}_2\text{eq}$  com a área colhida. Os achados mostram que os coeficientes da regressão quantílica aumentam ao longo dos quantis; porém, a queda acentua-se no penúltimo quantil, quando se estabiliza posteriormente. O coeficiente do quantil 0,2 foi o que mais se aproximou do coeficiente OLS.

O quarto gráfico (2.d) apresenta a relação entre o  $\log\text{CO}_2\text{eq}$  com a produção. Os coeficientes dos quantis apresentam comportamentos semelhantes entre si, com uma leve evolução decrescente, ao longo dos quantis. O coeficiente do quantil 0,2, como nos anteriores, foi o que mais se aproximou do coeficiente OLS.

De maneira geral, a Figura 2 mostra como os efeitos das variáveis independentes variam sobre os quantis da variável dependente e como a magnitude dos efeitos em vários quantis pouco difere do coeficiente OLS, mesmo em termos dos intervalos de confiança em torno de cada coeficiente.

Diante desse panorama, destaca-se que, usualmente, no Brasil, utilizam-se dois sistemas de colheita da cultura da cana-de-açúcar: o sistema manual, caracterizado pela queima prévia do canavial e o sistema mecanizado, que se distingue pelo não envolvimento do processo de queima e pela grande quantidade de resíduos vegetais remanescentes na superfície do solo (THORBURN et al., 2001).

Autores como Andrea e Merlet (2001) e Cançado et al. (2006) sugerem cessar a queima da cana-de-açúcar antes do corte, para facilitar a colheita manual. No estado da Paraíba, no entanto, há uma preponderância do sistema manual, queimando a área de plantação poucos dias antes da colheita, para a extrair folhas e insetos e para favorecer o corte manual. O uso do sistema manual contribui para emissões de gases poluentes e particulados, provenientes da queima da cana-de-açúcar. Ressalta-se que a substituição da colheita manual para a mecânica vem reestruturando as formas de reorganização de trabalho, principalmente por meio de políticas de capacitação de mão de obra. Conforme o IBGE (2019), a mão de obra no campo vem diminuindo por conta da mecanização; no entanto, aumentou-se o número de estabelecimentos com tratores, caminhões, motocicletas e aviões e outros tipos de máquinas nas lavouras.

Além das queimadas, o uso de defensivos agrícolas, fertilizantes comerciais e o diesel colabora direta e indiretamente na emissão de gases de efeito estufa (REICOSKY; ARHER, 2007). A utilização do sistema manual e a preponderância do uso da queima no estado colaboraram para esse aumento expressivo do  $\text{CO}_2\text{eq}$  emitido no estado. Vasconcelos et al. (2018) ressaltam que os gases de efeito de estufa podem ser mitigados, melhorando ou gerindo adequadamente diferentes sistemas de produção.

Torna-se necessária, no estado da Paraíba, a criação de uma lei, como a do estado de São Paulo (Lei 11.241/2002), que ordena o fim da utilização do fogo como método despalhador e simplificador na cultura canavieira. Essa lei contribuiu para a redução expressiva do uso de gases de efeito estufa e potencializou o sequestro de carbono no solo em sistemas agrícolas (DOSSOU-YOVO et al., 2016).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desse artigo foi analisar a dinâmica e a expansão de cana-de-açúcar, abacaxi, feijão, mandioca, milho e outras culturas na Paraíba, com enfoque nos impactos dos gases de efeito estufa, no período de 1990 a 2017. A importância desse estudo se dá devido à escassez de pesquisas utilizando dois métodos quantitativos para análise regional. Tal panorama empírico servirá aos pesquisadores e profissionais do setor de serviços como uma fonte de ricos *insights* para novas pesquisas e para as empresas que trabalham no setor agrário.

Em suma, os resultados alcançados demonstraram que a atividade agrícola paraibana caracteriza-se pela baixa diversificação agrícola, com a cana-de-açúcar, o abacaxi, a mandioca, o milho e o feijão ocupando 99% da produção paraibana. Foi verificado um forte declínio da produção agrícola da quase totalidade dos produtos, quando se consideram os dois anos extremos da série (1990-2017).

Nos subperíodos analisados: 1990-2017, 2000-2017, 2010-2017, a agricultura do estado da Paraíba foi afetada por uma diminuição da dimensão de seu sistema produtivo, determinada pelo efeito escala negativo.

A expansão da área de cana-de-açúcar implicou na substituição de outros produtos, dentro do sistema composto por todas as culturas temporárias, do estado da Paraíba e da mesorregião da Mata Paraibana. Porém, os resultados não possibilitam designar essas substituições apenas à expansão da cana-de-açúcar. Isso porque ocorreu efeito substituição também na cultura do abacaxi. O feijão foi a cultura que mais cedeu área para esses outros cultivos.

Ao analisar os dez municípios com maior área plantada no estado da Paraíba, fica claro que o crescimento da produção canavieira está estável. O processo de expansão do cultivo de cana-de-açúcar aconteceu de maneira heterogênea, entre os municípios analisados.

A aplicação da regressão quantílica mostrou-se significativa para um impacto positivo na área plantada, a quantidade produzida e o negativo na área colhida no quantil 50 (mediana de 4.41), com pseudo  $R^2$  de 86,44%. Além disso, as variáveis explanatórias, com exceção da área colhida, não mudam o sinal de relação e significância, seja por OLS, seja para a regressão nos diferentes quantis. Para que haja diminuição nas emissões dos gases de efeito estufa, é necessário que o estado da Paraíba atue por meio de políticas públicas que fomentem a eliminação da queima da cana antes do corte.

A política governamental RenovaBio deve incentivar o aumento no número de área plantada de cana-de-açúcar, para a produção do etanol e biodiesel, além de impulsionar um novo ciclo de expansão da cana-de-açúcar e contribuir para redução das emissões de gases de efeito estufa.

A produção agrícola da Paraíba passa por transformações, e novas mudanças deverão ocorrer nos próximos anos, demandando incentivos do governo que levem em conta as características de cada localidade.

Torna-se necessária uma política de capacitação de mão de obra para diminuir o impacto social da troca da mecanização manual para mecânica e, conseqüentemente, colaborar para a melhoria da condição de vida dos trabalhadores. Também se torna necessária a criação de uma lei que ordene o fim do uso de fogo como método despalhador e simplificador na cultura canavieira.

Essa pesquisa contribuiu para a identificação das potencialidades e das fragilidades do setor agrícola, com ênfase no setor sucroalcooleiro paraibano, sendo uma ferramenta auxiliar para implementação de políticas públicas específicas.

## REFERÊNCIAS

ALVES, A.; RIBEIRO, E.; TOM, L. **Modifications in land use for agriculture in Brazil: an analysis of microregions in 1990 and 2016**. Conference, July 28-August 2, 2018, Vancouver, British Columbia. International Association of Agricultural Economists (IAAE), 2018.

ANDREA, M. O.; MERLET, P.: Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 15, p. 955-966, 2001.

ARIAS, D.; CABALLERO, J. **Paraíba state, Brazil: Agricultural sector risk assessment**. Washington: World Bank Group, 2015.

- AZAR, C.; LARSON, E. C. Bioenergy and land-use competition in Northeast Brazil. **Energy for sustainable development**, v. 4, n. 3, p. 64-71, 2000.
- BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B.; OLIVEIRA, B. G.; LA SCALA, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 38, n. 2, p. 1-23, 2018.
- BÖRJESSON, P. Good or bad bioethanol from a greenhouse gas perspective – what determines this? **Applied Energy**, v. 86, p. 589–594, 2009.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 375**, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências.
- \_\_\_\_\_. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. **Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências**. Brasília, 2017.
- BURNEY, J. A.; DAVIS, S. J.; LOBELL, D. B. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. **PNAS**, v. 107, p. 12052-12057, 2010.
- CALDARELLI, C. E.; GILIO, L. Expansion of the sugarcane industry and its effects on land use in São Paulo: Analysis from 2000 through 2015. **Land Use Policy**, v. 76, p. 264-274.
- CANARELLA, G.; POLLARD, S. Parameter heterogeneity in the neoclassical growth model: a quantile regression approach. **Journal of Economic Development**, v. 29, n. 1, p. 1-32, 2004.
- CANÇADO, J. et al. The Impact of Sugar Cane–Burning Emissions on the Respiratory System of Children and the Elderly. **Environmental Health Perspectives**, v. 5, n. 114, p. 725–729, 2006.
- CARVALHO, J. L. N. et al. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil and Tillage Research**, v. 103, p. 342-349, 2009.
- DEFANTE, L. R.; VILPOUX, O. F.; SAUER, L. Rapid expansion of sugarcane crop for biofuels and influence on food production in the first producing region of Brazil. **Food Policy**, v. 79, p. 121-131.
- DOSSOU-YOVO, E. R. et al. Reducing soil CO<sub>2</sub> emission and improving upland rice yield with no-tillage, straw mulch and nitrogen fertilization in northern Benin. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 156, p. 44–53, 2016.
- FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Food for the cities**. FAO, 2011.
- \_\_\_\_\_. **Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sinks**. FAO, 2014.
- FARGIONE, J.; HILL, J.; TILMAN, D.; POLASKY, S. HAWTHORNE, P. Land clearing and the biofuel carbon debt. **Science**, v. 319, n. 5867, p. 1235-1238, 2008.
- FÉRES, J.; REIS E.; SPERANZA, J. Mudanças climáticas globais e seus impactos sobre os padrões de uso do solo no Brasil. In: XXXVII Encontro Nacional de Economia, 2009, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: UNILA, 2009.
- GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science**, v. 315, p. 808-810, 2007.
- HOFSETZ, K.; SILVA, M. Aparecida. Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption. **Biomass Bioenergy**, v. 46, p. 564-573, 2012.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 22 jan. 2021.

\_\_\_\_\_. Coordenação de Trabalho e Renda, Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio Contínua 2016. **Síntese Paraíba**. 2018. Disponível em: <[www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=pb](http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=pb)>. Acesso em: 22 jan. 2021.

\_\_\_\_\_. Censo Agro 2017: população ocupada nos estabelecimentos agropecuários cai 8,8%. **IBGE**. 2019. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/25789-censo-agro-2017-populacao-ocupada-nos-estabelecimentos-agropecuarios-cai-8-8>>. Acesso em: 28 jan. 2021.

IGREJA, A. C. M. **Evolução da pecuária bovina no estado de São Paulo no período 1969-84**. 1987. 197 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 151, 2014.

JOHNSON, J. M. F.; KARLEN, D. L.; ANDREWS, S. S. Conservation considerations for sustainable bioenergy feedstock production: If, what, where, and how much. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 65, n. 4, p. 88A-91A, 2010.

KOENKER, R.; HALLOCK, K. Quantile regression. **Journal of Economic Perspectives**, v. 15, n. 4, p. 143-156, 2001.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, v. 123, p. 1-22, 2004.

LIN, B.; XU, B. Factors affecting CO<sub>2</sub> emissions in China’s agriculture sector: A quantile regression. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 15-27, 2018.

MACEDO I. C.; SEABRA J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, v. 9, p. 582-595, 2008.

MANOCHIO, C. et al. Ethanol from biomass: A comparative overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 743-755, 2017.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theor Appl Climatol**, v. 129, n. 3-4, p. 1189-1200, 2016.

MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. **Revista Multiciência**, v. 8, p. 5-27, 2007.

MARTINELLI, L. A.; FILOSO, S. Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: environmental and social challenges. **Ecological Applications**, v. 18, n. 4, p. 885-898, 2008.

MARTINS, H. H. et al. Employment generation and structural decomposition effects of the sugar and alcohol industries in Brazil. **Espacios**, v. 38, n. 11, p. 16-24, 2017.

MISHRA, A. K.; MOSS, C. B. Modeling the effect of off-farm income on farmland values: A quantile regression approach. **Economic Modelling**, v. 32, p. 361-368, 2013.

- MORAES, M. A. F. D.; OLIVEIRA, F. C.; DIAZ-CHAVEZ, R. SocioEconomic impacts of Brazilian sugarcane industry. **Environment Development**, v. 16, p. 31-43, 2015.
- MORENO-PÉREZ, O. M.; MARCOSSI, G. P. C.; ORTIZ-MIRANDA, D. Taking stock of the evolution of the biodiesel industry in Brazil: Business concentration and structural traits. **Energy Policy**, v. 110, p. 525-533, 2017.
- NOBRE, C. A.; ASSAD, E. D. O aquecimento global e o impacto na Amazônia e na agricultura brasileira. **Revista do INPE**, v. 1, p. 9-13, 2005.
- NASS, L. L.; PEREIRA, A.; ELLIS, D. Biofuels in Brazil: an overview. **Crop science**, v. 47, n. 6, p. 2228-2237, 2007.
- O'LEARY, E.; WEBBER, D. J. The role of structural change in European regional productivity growth. **Regional Studies**, v. 49, n. 9, p. 1548-1560, 2015.
- OLIVEIRA, M. E. D.; VAUGHAN, B. E.; RYKIEL, E. J. Ethanol as fuel: energy, carbon dioxide balances, and ecological footprint. **BioScience**, v. 55, p. 593-602, 2005.
- PINTO, H. S.; ASSAD, E. D. **Aquecimento Global e a nova Geografia da Produção agrícola no Brasil**. São Paulo: Embrapa, 2008.
- PRADO JUNIOR, C. **Formação do Brasil Contemporâneo: colônia**. São Paulo: Companhia das letras, 2011.
- REHMAN, A.; JINGDONG, L. An econometric analysis of major Chinese food crops: An empirical study. **Cogent Economics & Finance**, v. 5, n. 1, p. 38-44, 2017.
- REICOSKY, D. C.; ARCHER, D. W. Moldboard plow tillage depth and short-term carbon dioxide release. **Soil & Tillage Research**, n. 94, p. 109-121, 2007.
- RENOUF, M. A.; WEGENER, M. K.; NIELSEN, L. K. An environmental lifecycle assessment comparing Australian sugarcane with US corn and UK sugar beet as producers of sugars for fermentation. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, p. 1144-1155, 2008.
- SANTOS, O. I. B.; RATHMANN, R. Identification and analysis of local and regional impacts from the introduction of biodiesel production in the state of Piauí. **Energy Policy**, v. 37, p. 4011-4020, 2009.
- SATOLO, L. F.; BACCHI, M. R. P. Impacts of the Recent Expansion of the Sugarcane Sector on Municipal per Capita Income in São Paulo State. **ISRN Economics**, v. 2013, p. 1-14, 2013.
- SEEG - SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. In: Tasso Azevedo (Org.). **Base de dados**. Brasília: Observatório do Clima, 2020. Disponível em: <<http://seeg.eco.br>>. Acesso em: 02 abr. 2020.
- SHAWTARI, F.; SALEM, M. A.; HUSSAIN, H. I.; ALAEDDIN, O. THABIT, O. B. Corporate governance characteristics and valuation: Inferences from quantile regression. **Journal of Economics, Finance and Administrative Science**, v. 21, n. 41, pp.81-88, 2016.
- SIQUEIRA, O. J. F.; FARIAS, J. R. B.; SANS, L. M. A. Potential effects of global climate change for brazilian agriculture and adaptative strategies for wheat, maize and soybean. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 2, p. 115-129, 1994.
- STERN, N. **The Economics of Climate Change: the Stern Review**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

THORBURN, P. J.; PROBERT, M. E.; ROBERTSON, F.A. Modeling decomposition of sugarcane surface residues with APSIM Residue. **Field Crops Research**, v. 70, p. 223-232, 2001.

VASCONCELOS, K.; FARINHA, M.; BERNARDO, L.; LAMPERTD, V. N.; GIANEZINI, M.; COSTAB, J. S.; SOARES FILHO, A.; GENRO, T. C. M.; RUVIARO, C. F. Livestock-derived greenhouse gas emissions in a diversified grazing system in the endangered Pampa biome, Southern Brazil. **Land Use Policy**, v. 75, p. 442-448, 2018.

XU, B.; LIN, B. Factors affecting CO<sub>2</sub> emissions in China's agriculture sector: Evidence from geographically weighted regression model. **Energy Policy**, v. 104, p. 404-414, 2017.

ZOCKUN, M. H. G. P. **A expansão da soja no Brasil: alguns aspectos da produção**. 1978. 228 f. Dissertação (Mestrado em Economia) - Faculdade de Economia e Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1978.

ZUURBLER, P.; VOOREN, J. V. **Sugarcane ethanol: Contributions to climate change mitigation and the environment**. The Netherlands: Wageningen Academic, 2008.