

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

ELIZÂNGELA APARECIDA DOS SANTOS

**DEMANDA DE NITROGÊNIO E EFICIÊNCIA AGROAMBIENTAL NA
PRODUÇÃO BRASILEIRA DE CEREAIS**

VIÇOSA - MINAS GERAIS

2020

ELIZÂNGELA APARECIDA DOS SANTOS

**DEMANDA DE NITROGÊNIO E EFICIÊNCIA AGROAMBIENTAL NA
PRODUÇÃO BRASILEIRA DE CEREAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Dênis Antônio da Cunha

Coorientador: Guilherme Fonseca Travassos

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S237e
2020 Santos, Elizângela Aparecida dos, 1993-
Demanda de nitrogênio e eficiência agroambiental na
produção brasileira de cereais / Elizângela Aparecida dos Santos.
– Viçosa, MG, 2020.
84 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Dênis Antonio da Cunha.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.59-74.

1. Agricultura - Aspectos Ambientais. 2. Óxido Nitroso.
3. Emissão. 4. Nitrogênio. 5. Fertilizantes. 6. Eficiência de uso.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Economia
Rural. Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada.
II. Título.

CDD 22 ed. 333.7

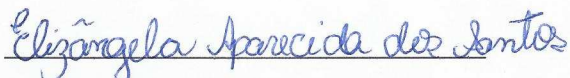
ELIZÂNGELA APARECIDA DOS SANTOS

**DEMANDA DE NITROGÊNIO E EFICIÊNCIA AGROAMBIENTAL NA
PRODUÇÃO BRASILEIRA DE CEREAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 07 de fevereiro de 2020.

Assentimento:



Elizângela Aparecida dos Santos

Autora



Dênis Antônio da Cunha

Orientador

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pelas orações e amor transmitidos.

Agradeço a todos os meus familiares, em especial, aos meus irmãos Edson e José Barbosa pela ajuda técnica durante a pesquisa.

Agradeço ao meu orientador pela orientação inegavelmente eficiente e segura, pela amizade e confiança.

Aos professores e funcionários do Departamento de Economia Rural, pelos esforços no interesse do crescimento acadêmico de seus alunos. Em especial aos professores Alexandre Coelho, Leonardo Cardoso e Guilherme Travassos pelas excelentes contribuições ao longo da pesquisa.

Agradeço aos meus amigos da pós-graduação pela prática da amizade desinteressada, sempre dispostos a ajudar. Em especial, a Roberta Salvini, Rosimere Fortini, Eliene Farias, Edi Reyna, Attawan Suela e Ana Beatriz Sette.

Agradeço à Universidade Federal de Viçosa pelo apoio sempre concedido.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Agradeço também à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

E, principalmente, a Deus, que me deu discernimento e sabedoria para concluir mais essa etapa.

“A vontade de Deus só me leva até aonde a misericórdia dele pode me proteger”.
Salmo 23.

RESUMO

SANTOS, Elizângela Aparecida dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Demanda de Nitrogênio e Eficiência Agroambiental na produção brasileira de cereais.** Orientador: Dênis Antônio da Cunha. Coorientador: Guilherme Fonseca Travassos.

As mudanças climáticas vêm se intensificando e, ao mesmo tempo, espera-se que até 2050 a população mundial atinja aproximadamente 10 bilhões de pessoas, aumentando assim a demanda por alimentos, fibras e energia. Para abastecer a população crescente é preciso aumentar a produtividade agrícola. Os cereais são o grupo alimentar de maior consumo e demanda futura. Dentre os nutrientes mais requeridos por este grupo, destaca-se o Nitrogênio, importante para o aumento das taxas de produtividade. O Nitrogênio chega até a cultura por meio da fixação biológica natural ou química, adubados organicamente ou adicionados pelos fertilizantes sintéticos nitrogenados. No Brasil a produção de cereais utiliza grandes quantidades de fertilizantes sintéticos. Entretanto, doses inadequadas podem levar à perda de eficiência de seu uso e a consequências econômicas e ambientais negativas. O uso excessivo de nitrogênio pode levar a perdas de produção, geração de custos desnecessários e prejuízos. Ademais, elevam-se as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), principalmente o Óxido Nitroso (N_2O). Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa foi analisar os principais fatores que explicam a demanda por fertilizantes nitrogenados sintéticos no Brasil, bem como a eficiência de seu uso na produção de cereais. Além disso, a pesquisa procurou relacionar o uso de fertilizantes com as emissões de N_2O . A demanda foi estimada pelo método de Mínimos Quadrados em Dois Estágios (MQ2E). Calculou-se a Eficiência de Uso de Nitrogênio (EUN) por meio de um índice agroambiental. As emissões de N_2O foram estimadas com base no uso de fertilizantes sintéticos aplicados na produção de cereal. Os principais resultados indicam que houve crescimento da produção brasileira de cereais em 56% e consumo de fertilizantes na produção cerealífera em 59% nos últimos 25 anos (1994 a 2018). A demanda de nitrogênio responde positivamente ao preço e produção de cereais e uso passado de fertilizantes. A EUN calculada apresentou valor médio de 53%, indicando uso excessivo de N. As emissões oriundas da fertilização nitrogenada cresceram 3,74% ao ano no período de análise. As taxas crescentes e/ou inadequadas de uso de fertilizantes se traduziram em ineficiência agroambiental, ou seja, em decréscimo da EUN e aumento das emissões de N_2O . Políticas públicas que garantissem mais assistência técnica agrícola e formas alternativas e racionais de uso de nitrogênio poderiam contribuir para otimizar as doses sintéticas aplicadas na produção, minimizando os efeitos ambientais, sem gerar prejuízos econômicos aos agricultores e climáticos à sociedade como um todo.

Palavras-chave: Nitrogênio. Demanda de fertilizante. Eficiência. Emissão de Óxido Nitroso.

ABSTRACT

SANTOS, Elizângela Aparecida dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2020. **Nitrogen demand and agro-environmental efficiency in the cereal production in Brazil.** Adviser: Dênis Antonio da Cunha. Co-adviser: Guilherme Fonseca Travassos.

Climate change is accelerating, and at the same time, it is expected that by 2050 the world population will have reached approximately 10 billion people, thus leading to increased demand for food, fiber, and energy. Higher crop productivity is necessary to supply the future growing population. Cereals are the food group with the highest consumption and potential demand. Among the nutrients most required by this group, Nitrogen (N) stands out, as it is one of the essential macrolelements for cereals and is responsible for increasing their productivity. It is through natural or chemical biological fixation that N reaches the crop, which is fertilized either organically or with the addition of synthetic N fertilizers. In Brazil, cereal production uses large amounts of synthetic fertilizers; however, such abundance can trigger a loss of efficiency in their use, as well as negative economic and environmental consequences. Excessive use of N can lead to waste of production, unnecessary expenses, and financial losses. Furthermore, greenhouse gas (GHG) emissions, especially nitrous oxide (N₂O), are rising. The aim of this study was to analyze not only the demand for synthetic N fertilizers but also the efficiency of their use in cereal production in Brazil. Additionally, the research sought to associate the use of fertilizers to N₂O emissions. Demand was estimated using the Two-Stage Least Squares method (2SLS). Nitrogen Use Efficiency (NUE) was calculated by using an agri-environmental indicator. N₂O emissions were determined based on the use of synthetic fertilizers applied to cereal production. The main results indicate a 56% increase in the cereal production and 59% fertilizer consumption in cereal production in Brazil in the last 25 years (1994 to 2018). The demand for synthetic fertilizers in Brazil responds positively to the price and production of cereals and previous use of fertilizers. The calculated NUE presented a 53% average, which reveals excessive use of N. Emissions from N fertilization grew by 3.74% per year in the period analyzed. The rising and inadequate rates of fertilizer use have resulted in low agro-environmental efficiency, i. e., a reduction in NUE and increased N₂O emissions. Public policies that would guarantee more agricultural technical assistance, in addition to alternative and rational forms of N use could contribute to optimizing the synthetic rates applied in production, minimizing the environmental effects, with no financial losses to farmers or harm to the climate or to the society as a whole.

Keywords: Nitrogen. Fertilizer demand. Efficiency. Nitrous Oxide Emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva de resposta esquemática demonstrando incrementos de produção para aumentos sucessivos na dose aplicada de nutriente.	19
Figura 2 - Evolução do consumo de fertilizantes nitrogenados aplicados na produção de cereais no Brasil e nas cinco macrorregiões.	30
Figura 3 - Evolução da área cultivada com os principais cereais no Brasil e nas cinco macrorregiões.	31
Figura 4 - Evolução da dose anual de N aplicada em áreas agrícolas de cereais das cinco macrorregiões brasileiras e no Brasil.	32
Figura 5 - Evolução da Produção de Cereais no Brasil e nas grandes regiões em toneladas.	33
Figura 6 - Participação dos estados brasileiros e das regiões na produção nacional de cereais na safra agrícola de 2018 (%).	34
Figura 7 - Evolução da EUN no Brasil e nas principais regiões selecionadas.	36
Figura 8 - Eficiência do Uso de Nitrogênio média 1994 - 2018 nos estados selecionados.	37
Figura 9 - Evolução das emissões de gases de efeito estufa provenientes da fertilização sintética de nitrogênio na produção de cereais no período de 1994 e 2018.	38
Figura 10 - Contribuição média percentual das regiões e dos estados do Brasil para a emissão de CO ₂ eq oriunda da fertilização nitrogenada para a produção de cereais no período 1994-2018 (%).	39
Figura 11 - Comportamento do Preço de Cereais e aplicação de fertilizantes nitrogenados 2014 – 2018.	44
Figura B1 - Produtividade Média das Unidades de Federação 1994 – 2018 (Ton/ha).	82
Figura C 1 – Evolução da EUN na produção de cereais, considerando a região Norte em %	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimaco Demanda de Nitrogênio MQ2E.....	35
Tabela A1 - Consumo de fertilizantes a base de nitrogênio (ton), consumo de fertilizantes nitrogenados destinados a produo de cereais (ton), área plantada com cereais (ha), uso de fertilizantes por unidade de área plantada de cereais (kg/ha) e produo total de cereais no Brasil, entre os anos de 1994 e 2018.....	75
Tabela A2 - Consumo de fertilizantes a base de nitrognio (ton), consumo de fertilizantes nitrogenados destinados a produo de cereais (ton), área plantada com cereais (ha), uso de fertilizantes por unidade de área plantada de cereais (kg/ha) e produo total de cereais na regio Norte, entre os anos de 1994 e 2018.....	76
Tabela A3 - Consumo de fertilizantes a base de nitrognio (ton), consumo de fertilizantes nitrogenados destinados a produo de cereais (ton), área plantada com cereais (ha), uso de fertilizantes por unidade de área plantada de cereais (kg/ha) e produo total de cereais na regio Nordeste, entre os anos de 1994 e 2018.....	77
Tabela A4 - Consumo de fertilizantes a base de nitrognio (ton), consumo de fertilizantes nitrogenados destinados a produo de cereais (ton), área plantada com cereais (ha), uso de fertilizantes por unidade de área plantada de cereais (kg/ha) e produo total de cereais na regio Sudeste, entre os anos de 1994 e 2018.....	78
Tabela A5 - Consumo de fertilizantes a base de nitrognio (ton), consumo de fertilizantes nitrogenados destinados a produo de cereais (ton), área plantada com cereais (ha), uso de fertilizantes por unidade de área plantada de cereais (kg/ha) e produo total de cereais na regio Sul, entre os anos de 1994 e 2018.....	79
Tabela A6 - Consumo de fertilizantes a base de nitrogênio (ton), consumo de fertilizantes nitrogenados destinados a produo de cereais (ton), área plantada com cereais (ha), uso de fertilizantes por unidade de área plantada de cereais (kg/ha) e produo total de cereais na regio Centro Oeste, entre os anos de 1994 e 2018.....	80
Tabela B1 - Produtividade dos cereais no Brasil e nas regies 1994 – 2018 (Ton/ha).	81
Tabela D1 - Estimaces de demanda.....	84

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. Considerações Iniciais	11
1.2. Problema e sua Importância.....	13
1.3. Objetivos	17
1.3.1. Objetivo Geral	17
1.3.2. Objetivos Específicos:.....	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1. Curvas de resposta	18
2.2. Demanda de Nitrogênio	20
3. METODOLOGIA.....	23
3.1 Estimação da Demanda de Fertilizantes	23
3.2 Procedimentos Econométricos para Estimação da Demanda	24
3.3. Eficiência do Uso do Nitrogênio (EUN).....	25
3.4 Emissão de Gases de Efeito Estufa.....	27
3.5. Fonte de Dados	29
4. RESULTADOS	30
4.1 Consumo de Fertilizantes Nitrogenados e Produção de Cereais	30
4.2 Demanda de Fertilizantes Nitrogenados	34
4.3 Eficiência do Uso do Nitrogênio (EUN).....	36
4.4 Emissão de Gases de Efeito Estufa.....	37
5. DISCUSSÃO	40
5.1 Produção de Cereais e Consumo de fertilizantes nitrogenados.	40
5.2 Demanda de Nitrogênio	42
5.3 Eficiência no Uso de Nitrogênio.....	45
5.4 Emissão de Óxido Nitroso	49
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS	59
APÊNDICES	75
APÊNDICE A.....	75
APÊNDICE B	81
APÊNDICE C	83
APÊNDICE D.....	84

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

As mudanças ambientais globais vêm se intensificando, sendo mais expressivas com relação ao clima (HUFFMAN *et al.*, 2018). Essas alterações afetam os sistemas naturais e humanos, com maior impacto nos países menos desenvolvidos (PARRY *et al.*, 2004) devido, principalmente, à forte dependência do setor agrícola e à vulnerabilidade socioeconômica. Outra mudança global também importante relaciona-se ao crescimento populacional e seus efeitos sobre a demanda de alimentos. Espera-se que até 2050 a população global se aproxime de 9,7 bilhões de pessoas (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU, 2019), com exigências contínuas de alimentos para a crescente demanda (ZHANG *et al.*, 2017; TILMAN *et al.*, 2011; BOUWMAN *et al.*, 2013; RAY *et al.*, 2013). Segundo a ONU (2015), a demanda mundial por alimentos deve aumentar em 70% até 2050. Esta elevação tende a ser assimétrica entre as regiões, sendo mais expressiva nos países em desenvolvimento, notadamente naqueles mais pobres (CRIST *et al.*, 2017). Nos países mais desenvolvidos, por exemplo, a demanda *per capita* de proteína animal já é bem mais elevada em relação aos países mais pobres, não havendo tanta margem para crescimento (TILMAN *et al.*, 2011).

Para atender à demanda mundial crescente por alimentos, fibras e energia é necessário que a taxa de produtividade agrícola aumente no mínimo 2,4% ao ano de 2008 até 2050, considerando a não expansão de terras (RAY *et al.*, 2013). Porém, as taxas globais para o milho, arroz, trigo e soja, por exemplo, estão abaixo dessa média¹ (RAY *et al.*, 2013). Não atingir esta meta poderá ocasionar insegurança quanto à disponibilidade de alimentos, bem como proporcionar aumento no número de pessoas subnutridas (RAY *et al.*, 2013; FAO, 2012). Cerca de 22% das crianças abaixo de cinco anos foram afetados pela desnutrição em 2017 mundialmente (FAO, 2018).

Aumentar o rendimento das culturas é a maneira mais viável para garantir o abastecimento de alimentos (RAY *et al.*, 2013; GODFRAY *et al.*, 2010; FOLEY *et al.*, 2011; PHALAN *et al.*, 2011; HULME *et al.*, 2013), visto que em muitos países, não há mais novas áreas para expansão agrícola, sendo que 90% das terras disponíveis para expansão agrícola estão na América Latina e África Subsaariana (SAATH; FACHINELLO, 2018; FAO, 2013). Porém, devido às restrições e conservações ambientais impostas no Brasil, por exemplo, o

¹ As taxas globais para o milho, arroz, trigo e soja, por exemplo, foram de 1,6%, 1,0%, 0,9% e 1,3% ao ano em 2012 (RAY *et al.*, 2013).

crescimento econômico via expansão de área pode ser restringido (DAUBERMANN *et al.*, 2014.; SAATH; FACHINELLO, 2018).

Os sistemas agrícolas mundiais estão se intensificando cada vez mais com o intuito de abastecer à crescente demanda por alimentos, combustíveis, fibras e insumos (AINSWORTH *et al.*, 2008). Tanto o aumento da produtividade por safra, bem como número maior de cultivos ao ano, promove produção mais intensa. Tal intensificação visa aumentar a produção por rendimento de área e é realizada com o uso de mais insumos industrializados (PIRES *et al.*, 2015). Em função disso, Lassaletta *et al.* (2016) afirmaram que é crescente o uso de agroquímicos, com destaque para os fertilizantes nitrogenados. Previsões para 2030 apontam aumentos na demanda global de fertilizantes químicos próximo de 69 milhões de toneladas, sendo que 67% desse valor corresponde ao uso dos fertilizantes a base de nitrogênio (PIRES *et al.*, 2015; TENKORANG; DEBOER, 2008). Ademais, a demanda global por fertilizantes químicos de nitrogênio na agricultura aumentou 34 % de 2002 a 2016 (FAO, 2018).

Os fertilizantes são usados na agricultura para fornecer nutrientes essenciais à produtividade das plantas. Os nitrogenados chegam à agricultura por meio dos fertilizantes sintetizados, fixados biologicamente pelas bactérias presentes principalmente nas leguminosas, por meio da deposição atmosférica ou por meio da matéria orgânica (BODIRSKY *et al.*, 2014). Entre os diferentes grupos de culturas agrícolas, os cereais são os que demandam a maior quantidade de fertilizantes nitrogenados. Os cereais são compostos principalmente pelas gramíneas, cuja produção comercial tem destino tanto na alimentação humana quanto animal. Os cereais são base da produção direta de muitos alimentos, bem como da produção indireta, dado que representam parte expressiva da alimentação animal. Segundo Pires *et al.* (2015), culturas como o arroz, trigo e milho são responsáveis por consumir mais da metade dos fertilizantes nitrogenados aplicados globalmente, além de contribuírem com cerca de um terço do total de proteínas consumidas no mundo. Além disso, quando comparados a outros grupos de vegetais, os cereais são mais responsivos² ao nitrogênio.

O nitrogênio é o nutriente requerido em maior quantidade pelas plantas, porém na maioria das vezes, observa-se baixa eficiência de sua utilização (ZHANG *et al.*, 2017; BELLIDO *et al.*, 2005; JU *et al.*, 2009). Quando usado em doses inadequadas, o nitrogênio aplicado poderá causar problemas ambientais e econômicos (VITOUSEK *et al.*, 2009; PIRES

² Plantas mais responsivas apresentam maior acúmulo de biomassa diante da oferta de um recurso (TAIZ; ZEIGER, 2006).

et al., 2015). Entre os impactos ambientais mais comuns, incluem-se a emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o óxido nitroso (N_2O), contaminação do solo e dos ecossistemas aquáticos por lixiviação, e ao esgotamento dos recursos naturais. Já os impactos econômicos envolvem altos custos de produção e também possível investimento no controle de pragas e doenças dada maior incidência em plantas com maior teor de nitrogênio (VAN RAIJ, 1991).

Referente ao N_2O , sabe-se que é o terceiro gás de efeito estufa mais abundante na atmosfera, atrás do dióxido de carbono (CO_2) e do metano (CH_4). Representou 9% das emissões brutas e 12% das emissões líquidas brasileira em 2016 (SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA - SEEG, 2018a). Além disso, o seu efeito de retenção de calor é 300 vezes maior que o CO_2 , o que faz permanecer na atmosfera por mais de 120 anos, contribuindo para o aquecimento global (BORTOLI *et al.*, 2012). Já nos processos de contaminação do solo, o nitrogênio pode alterar o crescimento das plantas, o que torna ambientes escassos ou com excesso em determinadas culturas, além do aumento do risco de erosão e desequilíbrio nos ecossistemas (CLARK; TILMAN, 2017).

1.2. Problema e sua Importância

Dadas as questões inerentes às mudanças ambientais globais, compreender a eficiência do uso do nitrogênio e os fatores condicionantes da demanda de fertilizantes nitrogenados são de suma importância. Aumentar a eficiência de insumos agrícolas pode reduzir os impactos ambientais negativos da agricultura (ROBERTSON; SWINTON, 2005; CLARK; TILMAN, 2017). E analisar o comportamento da demanda dos nitrogenados poderá ajudar na compreensão do processo de escolha do produto pelos produtores, ou seja, se estes são sensíveis aos preços dos cereais ou não. A eficiência no uso de nitrogênio (EUN) pode ser obtida e definida por diversas maneiras, a depender da finalidade (CASARIN, 2015). Além disso, a EUN nas culturas é proposta como um indicador de progresso em direção à meta de “Desenvolvimento Sustentável” (CASARIN, 2015; *SUSTAINABLE DEVELOPMENT SOLUTIONS NETWORK – SDSN*, 2015). A eficiência pode ser medida pelo Fator Parcial de Produtividade, Eficiência agrônômica, Balanços de Nutrientes, Eficiência de Recuperação etc. (CASARIN, 2015). Diferentes culturas possuem valores diferentes EUN. Ademais, melhorar a eficiência por meio da intensificação agrícola sustentável³ pode contribuir com menos emissões

³ Aumentar a produção agrícola por unidade de área, por meio do uso racional de insumos e técnicas agrícolas ambientalmente sustentáveis, tais como plantio direto, fixação biológica de nitrogênio, técnicas agroecológicas etc. (IFA, 2014).

de gases poluentes, bem como minimizar a degradação ambiental e até mesmo reduzir o custo de produção dos agricultores.

Os sistemas fisiológicos, morfológicos e bioquímicos afetam a EUN e a resposta à aplicação de N pelas culturas, pois estes estão relacionados à absorção, à assimilação a compostos orgânicos, à mobilização e à redistribuição do nutriente nos órgãos da planta (FAGERIA *et al.*, 2013; LEAL, 2019). Cultivares que absorvem mais este nutriente tendem a ser mais produtivos (NASCENTE *et al.*, 2016). Para elevar a produção de culturas agrícolas é necessário manejo adequado da fertilidade do solo, o que inclui a interação correta entre os nutrientes, uma vez que a melhoria do aproveitamento de um nutriente pode aumentar as perdas de outros (SILVA, 2016)⁴. Melhorar a EUN significa otimizar a produtividade e a lucratividade da agricultura, o que reduzirá os riscos relacionados a perdas de N para o meio ambiente e seus possíveis impactos ambientais e econômicos (INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION - IFA, 2014; SAMUEL; EBENEZER 2014).

Admitindo-se que a absorção dos nutrientes é contínua nas plantas com intensificações que dependem, entre outros fatores, do estágio fenológico⁵, clima e solo, além de eventuais estresses como doenças e pragas, a suplementação ideal passaria pelo fornecimento diário de quantidades mínimas, porém que garantissem eficiência ótima. Além de financeiramente impraticável, a adição diária de nitrogênio ainda dependeria do balanço dos demais nutrientes na planta. O rendimento de uma safra está condicionado ao nutriente que estiver abaixo do valor demandado, logo, aumentar a quantidade de outros não seria justificável, visto que este é limitante⁶ (WHITSON; WALSTER, 1912).

O Brasil é considerado o quarto maior consumidor de fertilizantes, com cerca de 6% da demanda global, atrás dos Estados Unidos, China e Índia (ATLAS DO AGRONEGÓCIO, 2018). O consumo brasileiro de fertilizantes nitrogenados na agricultura nos anos de 2002 a 2016 aumentou 138% (FAO, 2018). A adoção de insumos e os investimentos em pesquisas e tecnologias agrícolas, tornaram a agricultura brasileira destaque mundial na expansão da produção agrícola simultaneamente à preservação ambiental (EMBRAPA, 2018a).

⁴ Os nutrientes são absorvidos e utilizados em quantidades variadas. Elementos essenciais em quantidades adequadas podem não ser utilizados pela planta caso haja pelo menos um limitante (WHITSON; WALSTER, 1912).

⁵ Etapa de mudança e transformação no ciclo de uma cultura (BERLATO *et al.*, 1984).

⁶ Lei dos Mínimos - Liebig (WHITSON; WALSTER, 1912).

A produção de cereais no Brasil em 2018 foi cerca de 102 milhões de toneladas, representando em torno de 45% do total da produção brasileira da lavoura branca⁷. No ano de 2016, a exportação de cereais do Brasil foi de aproximadamente 28% do total produzido, sendo esta taxa superior à média mundial, que é de 14,5% (IBGE, 2018). Já com relação ao consumo alimentar, os dados da Pesquisa de Orçamento Familiares – POF (2009) do Brasil indicaram que a aquisição alimentar domiciliar *per capita* anual de cereais e leguminosas corresponderam, em média, a 31,4 kg em 2008. Ao considerar os derivados e processados de cereais, o conjunto em si torna-se superior aos demais grupos de aquisição de alimentos elencados na POF (POF-IBGE, 2009).

Diante das questões aqui abordadas, o presente estudo buscou analisar a demanda de fertilizantes nitrogenados (sintéticos), bem como a eficiência do uso de nitrogênio na produção brasileira de cereais. Logo, a identificação da eficiência do uso do nitrogênio e a demanda por esse macronutriente permitiu responder a questões de extrema importância no contexto das mudanças ambientais, tais como: a eficiência do uso de nitrogênio na produção cerealífera se distingue temporalmente entre as diferentes regiões brasileiras? E quais seriam os fatores que mais impactam na demanda por fertilizantes nitrogenados na produção de cereais no Brasil?

Essas são questões muito importantes no contexto atual de alterações ambientais e climáticas globais e para as quais o conhecimento no Brasil, a nível regional, ainda é bastante incipiente. O excesso e uso inadequado de nitrogênio corresponde a grande risco ao meio ambiente e à saúde (OENEMA *et al.*, 2015). Portanto, conhecer a eficiência do uso de nitrogênio tem o potencial de contribuir para ganhos econômicos e ambientais, já que possibilita identificar estratégias para obter mais produção com menos entrada de fertilizantes químicos.

Entre os impactos oriundos do uso ineficiente de fertilizantes nitrogenados vale destacar o surgimento das “zonas mortas”. As zonas mortas são áreas compostas por grande quantidade de água, como oceanos, lagos e rios em que não há presença de oxigênio suficiente para suportar vida marinha (SCIENTIFIC AMERICAN, 2012). Este processo é resultante em grande parte devido a eutrofização⁸. O nitrogênio e fósforo provindos das atividades agrícolas são os principais responsáveis por esse processo (MICROBIAL LIFE, 2018). A região na foz do Rio Mississippi, conhecida como Zona Morta do Golfo do México, é considerada a maior zona

⁷ Entende-se por lavoura branca as culturas não perenes Cereais, leguminosas e oleaginosas (IBGE, 2017).

⁸ Aumento excessivo de nutrientes químicos na água, levando a proliferação excessiva de águas, esgotando-se os níveis de oxigênio (SCIENTIFIC AMERICAN, 2012).

morta do mundo, dentre as mais de 400 existentes (MICROBIAL LIFE, 2018), com grande impacto na vida dos pescadores e da economia da região.

Em termos de saúde, o nitrato (NO_3^-)⁹ quando não absorvido pelas plantas e irrigado para o lençol freático e água superficiais que abastecem a população pode causar danos à saúde, principalmente de crianças. Segundo a Organização Mundial da Saúde – OMS (2017) o nível tolerável de nitrato na água para consumo é de 45mg/l de nitrato, porém nas áreas de monocultura de milho na França, por exemplo, foram encontrados cerca de 80mg/l de nitrato na água (AGIODA *et al.*, 1994; FRITZSONS, 1999).

O gerenciamento otimizado do nitrogênio é fundamental para melhorar a EUN e reduzir os impactos negativos ao meio ambiente e à saúde (CHEN *et al.*, 2015; DU *et al.*, 2019). Pesquisas anteriores descobriram que em determinados tipos de solos, o fertilizante sintético nitrogenado pode ser reduzido em até 50% das taxas aplicadas sem sacrificar produções agrícolas cerealíferas (QIAO *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2012; DU *et al.*, 2019). Numerosos estudos buscaram identificar práticas para melhorar a EUN, em busca de melhor sincronização entre oferta e demanda de nitrogênio pela planta, incluindo técnicas de colheita, taxa de aplicação ideal, tempo e método (SAHAR *et al.*, 2012; SUN *et al.*, 2012; MAHJOURIMAJD *et al.*, 2016; DU *et al.*, 2019).

Mundialmente são diversos os estudos de EUN (FERNANDES *et al.*, 2005; MOSIER, *et al.*, 2005; LADHA *et al.*, 2005; DOBERMANN, 2005; 2007; JOHNSTON; POULTON, 2009; FIXEN *et al.*, 2014; DU *et al.*, 2019; TÔSTO *et al.*, 2019), os quais se diferenciam entre culturas, estudos de campo e metodologia. No caso do Brasil, diversos estudos analisaram a eficiência do uso de nitrogênio, porém em análises de culturas e regiões específicas a nível técnico (FAGERIA; BALIGAR, 2005; FAGERIA; BARBOSA FILHO, 2006; FAGERIA; BALIGAR, 2007; SILVA *et al.*, 2014a; SILVA *et al.*, 2014b; ARENHARDT *et al.*, 2015). Pires *et al.* (2015) calcularam a EUN para o Brasil como um todo, mas desconsiderando as heterogeneidades locais. É importante destacar que as produções estaduais diferem entre si, devido aos tipos de solos que retêm quantidades distintas de nitrogênio, assim como diferentes culturas demandam aplicações distintas de fertilizantes. Ademais, a adoção de práticas agrícolas para minimizar o uso de aplicações de nitrogênio devem ser diferenciadas, uma vez que as características de clima e produção agrícola se distinguem regionalmente

⁹ Um dos compostos químicos a base de Nitrogênio usado na agricultura.

Portanto, estudar a demanda de nitrogênio e mensurar a eficiência de modo desagregado poderá contribuir com políticas bem delineadas de intensificação agrícola sustentável e de “*climate smart agriculture*”¹⁰, para assim reduzir, ou pelo menos amenizar, os futuros impactos ambientais da agricultura. Analisar a evolução temporal e espacial da eficiência e do uso de nitrogênio, bem como seus efeitos em termos de emissões de GEE permitirá a melhor compreensão de implicações ambientais, contribuindo com ações voltadas às assimetrias regionais. Identificar estratégias e práticas agrícolas para otimizar a eficiência no uso de nitrogênio proporcionará menor consumo dos fertilizantes nitrogenados, tornando a produção mais sustentável, econômica e ambientalmente.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Compreender os principais fatores que explicam a demanda por fertilizante nitrogenado sintético no Brasil e analisar a eficiência do uso desses fertilizantes na produção de cereais.

1.3.2. Objetivos Específicos:

- i. Analisar a demanda de fertilizantes nitrogenados, identificando seus principais determinantes.
- ii. Analisar espacial e temporalmente o uso de nitrogênio nos estados e nas regiões brasileiras, indicando sua relação com produção e área plantada;
- iii. Estimar e analisar a EUN nos estados e nas regiões brasileiras; e
- iv. Identificar possíveis efeitos ambientais, em termos de emissões de gases de efeito estufa (GEE), resultantes do uso de nitrogênio.

¹⁰ Abordagem para o desenvolvimento de estratégias agrícolas para garantir a segurança alimentar sustentável sob as mudanças climáticas (FAO, 2010).

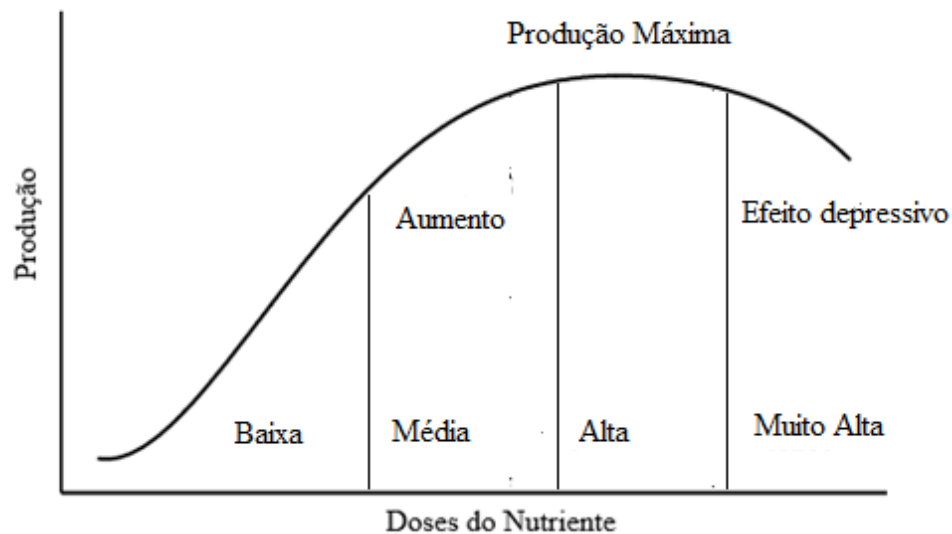
2. REFERENCIAL TEÓRICO

A eficiência no uso de nitrogênio (EUN) na produção agrícola pode ser definida sob diferentes pontos de vista, com destaque para aspectos agronômicos, ambientais e econômicos (PIRES *et al.*, 2015). A eficiência agronômica pode ser definida como o rendimento de grãos por unidade de fertilizante aplicado (LADHA *et al.*, 2005). A (in)eficiência ambiental, por sua vez, diz respeito aos impactos negativos para o meio natural resultantes de seu uso (PIRES *et al.*, 2015). Por fim, do ponto de vista econômico, a eficiência do uso do nitrogênio é caracterizada pela maximização da renda líquida do produtor por unidade de nitrogênio aplicado. Deve-se enfatizar, entretanto, que as duas primeiras só podem existir a partir da suposição de que o agricultor, via processo de maximização de benefícios, tenha utilizado o referido insumo. Nesse sentido, esta seção apresenta os aspectos teóricos que norteiam a resposta do uso de insumos na produção agrícola e a análise da demanda de fertilizantes nitrogenados, a partir do modelo de escolha de insumos da Teoria da Produção.

2.1. Curvas de resposta

As curvas de resposta da produção agrícola estabelecem a relação entre a produção vegetal e os nutrientes aplicados (VAN RAIJ, 1991). As curvas podem variar em suas formas e características, a depender do elemento e da espécie vegetal (SMITH, 1962; FERREIRA, 2015a). São essenciais para descrever os efeitos de nutrientes aplicados, possibilitando demonstrar se o fertilizante adicionado está proporcionando aumento da produção. Conceito essencial ligado às curvas de resposta foi estabelecido a mais de um século por Justus Von Liebig, conhecido como “Lei do Mínimo”, segundo a qual o crescimento das plantas é limitado por aquele nutriente que ocorre em menores proporções, sendo o limitador da produção (LIEBIG, 1840). Por outro lado, o excesso de um ou mais nutrientes provoca efeito depressivo. Assim, a curva esquemática de produção, em resposta à aplicação de um nutriente, representada por Van Raij (1991), apresenta o conceito de Liebig, complementada pela “Lei dos Incrementos Decrescentes” (MITSCHERLICH, 1909). Tal curva esquemática – ou teórica – indica que o nutriente produz, inicialmente, forte aumento na produção, atingindo o máximo com quantidade suficiente e reduzindo-a se o fornecimento for excessivo (Figura 1).

Figura 1 – Curva de resposta esquemática demonstrando incrementos de produção para aumentos sucessivos na dose aplicada de nutriente.



Fonte: Adaptado de Van Raij, 1991.

Esse comportamento explica porque a melhor resposta econômica (ótimo econômico) não necessariamente será a melhor resposta em produção (ótimo fisiológico). Isso pois, aproximando-se do ponto de máximo, cada unidade de produção exigirá quantidades cada vez maiores de nutrientes, tornando inviável economicamente atingi-lo. A determinação da quantidade ideal de nutriente a ser fornecido, portanto, dependerá daquele já disponível no ambiente (fertilidade do solo) e da cultura.

De acordo com Van Raij (1991), o desenvolvimento matemático considerado é estabelecido pela equação:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = k(A - y) \quad (1)$$

em que y é a produção, x a quantidade de nutriente, A é a produção máxima e k uma constante.

Ao integrar a equação e desenvolvendo-a, chega-se a equação de Mitscherlich:

$$\log(A - y) = \log A^{-cx} \quad (2)$$

em que c é o coeficiente de eficácia, variando de acordo com condições experimentais.

Na prática da adubação, porém, ocorrem geralmente os efeitos depressivos de doses elevadas e, com isso, a equação (2) pode então ser desenvolvida em um trinômio de segundo grau:

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x - \alpha_2 x^2 \quad (3)$$

Em geral, as respostas ao uso de nitrogênio variam de ano para ano, em razões de fatores imprevisíveis, principalmente relacionados ao clima e uso anterior do solo (VAN RAIJ, 1991). E em muitos casos, quanto maior for o conteúdo total do nutriente limitante na planta, menor é a fração que se aproveita de um incremento em sua disponibilidade a fim de prover produção agrícola vegetal. Logo, os retornos obtidos por razão da fertilização serão decrescentes (FERREIRA, 2015a). A adubação nitrogenada deve ser feita com parcimônia, já que doses baixas podem limitar a produção e doses excessivas podem reduzi-la (VAN RAIJ, 1991).

2.2. Demanda de Nitrogênio

Considerando o enfoque da Teoria da Produção, pode-se afirmar que um dos critérios que norteiam a tomada de decisão dos agricultores é a maximização do lucro. Assumindo mercado competitivo, no qual a função de produção já esteja definida, a quantidade ótima a ser produzida é a que garante o maior lucro possível. Sendo assim, a função de demanda derivada de nitrogênio pode ser formulada assumindo que os agricultores maximizam os lucros em condições competitivas (ACHEAMPONG; DICKS, 2012). A função de demanda de um insumo depende do preço esperado do produto, preço próprio e de outros fatores, como preços de insumos complementares e, ou, substitutos. A formulação de maximização do lucro que destaca a determinação da demanda de fatores, bem como o nível de produção, pode ser expressa pela seguinte função Lagrangeana (BEATTIE; TAYLOR, 1985):

$$L\pi = \sum_{j=1}^m p_j y_j - \sum_{i=1}^n r_i x_i + \lambda F(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m) \quad (4)$$

em que $L\pi$ é a função de lucro lagrangeano, p é o preço de cada um dos j produtos ($j = 1, \dots, m$), representados nesta pesquisa pelos diferentes tipos de cereais, y é a produção total de cada cereal j , x_i representa cada um dos insumos ($i = 1, \dots, n$) e r_i é o preço do insumo i . λ corresponde ao multiplicador do Lagrange e $F(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m)$ representa a função de produção dependente da quantidade de insumos x_i e do produto produzido y_j .

De acordo com Acheampong e Dicks (2012), a solução simultânea das condições de primeira ordem da equação (4) resulta na demanda incondicional de fatores (5) e equações de oferta de produto (6).

$$x_i^* = x_i^*(r_1, \dots, r_n, p_1, \dots, p_m) \text{ para } i = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$y_j^* = y_j^*(r_1, \dots, r_n, p_1, \dots, p_m) \text{ para } j = 1, \dots, m \quad (6)$$

$$\lambda^* = \lambda^*(r_1, \dots, r_n, p_1, \dots, p_m) \quad (7)$$

Dado que o desenvolvimento anterior é genérico, a formulação específica para uma safra de cereal e fertilizante seria expressa sob a hipótese de maximização do lucro, para um agricultor competitivo de produto múltiplo como:

$$\begin{aligned} \max_x E(\pi) &= pE(y) - \sum_{i=1} r_i x_i - b & (8) \\ \text{s. t. } E(y) &= F(x_i) \\ x_i &\geq 0 \end{aligned}$$

em que $E(y)$ é o rendimento esperado por área do cereal, p é preço do cereal, r_i é preço do fertilizante i , b é o custo fixo, x_i é o tipo de fertilizante i e $E(\pi)$ é o lucro esperado da produção de cereal. O $E(y)$ (rendimento esperado) é igual á função de produção total colhida $F(x_i)$, com x_i não negativo. As derivadas parciais da função lucro em (8) em relação às quantidades de insumos, x_i e definidas igual a zero em (9) são resolvidas simultaneamente para obter as funções de demanda derivadas na equação (10).

$$\begin{aligned} \frac{\partial E(\pi)}{\partial x_i} &= \frac{\partial pE(y)}{\partial x_i} - \frac{\partial \sum r_i x_i}{\partial x_i} - \frac{\partial b}{\partial x_i} \\ \frac{\partial E(\pi)}{\partial x_i} &= \frac{\partial p}{\partial x_i} E(y) + p \frac{\partial E(y)}{\partial x_i} - \frac{\partial r_i}{\partial x_i} x_i - r_i \frac{\partial x_i}{\partial x_i} - 0 \end{aligned}$$

No mercado competitivo $\frac{\partial p}{\partial x_i} = 0$ e $\frac{\partial r_i}{\partial x_i} = 0$, logo:

$$\frac{\partial E(\pi)}{\partial x_i} = p \frac{\partial E(y)}{\partial x_i} - r_i = 0 \quad (9)$$

$$p \frac{\partial E(y)}{\partial x_i} = r_i$$

O que implica $\frac{\partial E(y)}{\partial x_i} = \frac{r_i}{p}$ nível de maximização de lucro de x_i é obtido

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(x_i)}{\partial x_i} &= \frac{r_i}{p} \\ x^* &= x^*(p, r_i) \end{aligned} \quad (10)$$

Dessa forma, a demanda derivada por determinado fertilizante nitrogenado será função positiva dos preços do produto e função negativa do seu próprio preço. Para ser consistente com a teoria econômica, a função de demanda para um insumo normal deve ser não crescente em seu próprio preço, não decrescente no produto e homogêneo de grau zero nos preços. Além disso, espera-se que a quantidade demandada por certo fertilizante seja positivamente relacionada com o preço de fertilizantes substitutos e negativamente com os preços de outros insumos e, ou, fertilizantes complementares (ACHEAMPONG; DICKS 2012).

Por se tratar de nutrientes essenciais ao crescimento e desenvolvimento das plantas, os fertilizantes nitrogenados não possuem substitutos. Existem, contudo, fontes alternativas não industrializadas, como a adubação orgânica proveniente, por exemplo, do esterco bovino, suíno e de aves. A suplementação total das fontes de nitrogênio por meio da adubação orgânica não é prática viável nos plantios comerciais de cereais, dada a quantidade requerida, além de elevado custo de transporte. Destaca-se a aquisição de nitrogênio por meio da simbiose com bactérias fixadoras do N₂ atmosférico. Em culturas como a soja, a fixação biológica de nitrogênio praticamente responde pela nutrição adequada sem adubação complementar. Contudo, em outros cereais, apesar de constatada a simbiose, não se observa a mesma eficiência, sendo a adubação industrial a principal fonte de nitrogênio (YAN *et al.*, 2019).

Além do nitrogênio, entre os macronutrientes requeridos em maior quantidade pelos cereais, destacam-se fósforo e potássio, sendo bastante comum a comercialização de formulações do tipo N-P-K. (ACHEAMPONG; DICKS 2012). A quantidade aplicada bem como a proporção de cada elemento dependerá da produção agrícola e da necessidade da cultura, disponível em publicações específicas (COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS – CFSEMG, 1999).

Os fertilizantes nitrogenados disponíveis para comercialização se diferenciam de acordo com o percentual de N. De acordo com Barbosa Filho e Silva (2001), a uréia e o sulfato de amônio são duas fontes com pouca e diferente eficiência de utilização pelas culturas, raramente superior a 50%; porém, são as mais utilizadas na agricultura brasileira, possivelmente devido ao menor custo e à disponibilidade no mercado. Não há restrição em adquirir tais produtos, podendo o agricultor demandar a quantidade que julgar necessária, exceto em situações em que há uma regulamentação para uso de recurso, como exemplo, linha de financiamento ou crédito agrícola bancário, devendo haver relação entre quantidade demandada e área a ser cultivada.

3. METODOLOGIA

Nessa seção são descritas, inicialmente, o modelo e a estimação de demanda para o Brasil. Em seguida, são apresentadas as técnicas que foram utilizadas para estimar a eficiência do uso de nitrogênio (EUN), bem como o impacto ambiental oriundo do uso de fertilizantes nos estados e regiões brasileiras no período de 1994 - 2018.

3.1 Estimação da Demanda de Fertilizantes

A partir da definição teórica da demanda de insumos apresentada na equação (10) do modelo teórico, pode-se afirmar que:

$$N = F(P_N, P_C, P_P, P_K) \quad (11)$$

em que N é a quantidade demandada de fertilizante nitrogenado (x^* na equação 10), que é função do preço do nitrogênio (P_N), preço dos cereais (P_C) e do preço dos insumos complementares fósforo e potássio (P_P e P_K , respectivamente).

Além das variáveis presentes na equação 11, o modelo de previsão de demanda proposto pela FAO (2000) e Tenkorang e DeBoer (2008) estabelece que haja correlação entre o uso presente de nitrogênio e a produção de cereais. Isso porque a quantidade de insumo que o produtor consumir será em resposta do quanto ele deseja ou espera produzir.

Deve-se destacar que as decisões dos produtores também são afetadas pelas condições econômicas às quais estão submetidos. Com isso, diferentes regiões apresentam variação em suas respectivas rendas agrícolas. Logo, espera-se que regiões com níveis mais elevados de PIB agrícola tenham produtores com melhores condições financeiras de demandar insumos para a produção.

Dessa forma, a demanda de fertilizantes representada em (11) é reescrita como:

$$Q_N^D = F(P_N, P_C, P_P, P_K, Y, F_{t-1}, PIB_A) \quad (12)$$

em que Q_N^D refere-se à quantidade demandada de fertilizante nitrogenado, em função de P_N preço próprio, P_C preço do cereal, P_P preço do fertilizante a base de fósforo, P_K preço do fertilizante a base de potássio, Y produção de cereal, F_{t-1} quantidade de fertilizante nitrogenado usado no passado e PIB_A renda do agricultor medida em PIB agrícola.

Por fim, a equação de demanda de nitrogênio inicialmente é reescrita a partir das especificidades representadas na equação (12):

$$\ln N_{it} = \alpha_{0it} + \alpha_{1it} \ln P_{Nit} + \alpha_{2it} \ln P_{Cit} + \alpha_{3it} \ln P_{Pit} + \alpha_{4it} \ln P_{Kit} + \alpha_{5it} \ln N_{it-1} + \alpha_{6it} \ln y_{it} + \alpha_{7it} \ln PIB_{Ait} + \varepsilon_{it} \quad (13)$$

em que P_N é o preço do fertilizante nitrogenado, P_C é um índice de preços dos cereais, P_P é preço do fósforo, P_K é o preço do potássio, N_{t-1} são os fertilizantes nitrogenados utilizados no ano $t-1$, y_t a produção de cereais no ano t , em toneladas, PIB_A se refere ao PIB agrícola e ε_{it} é o termo de erro.

O coeficiente α_1 é a mudança no nível de fertilizante nitrogenado com respeito à mudança no preço desse fertilizante; α_2 é mudança na quantidade de fertilizantes com relação ao preço médio dos cereais; os coeficientes α_3 e α_4 representam a mudança no uso de nitrogênio com relação a uma mudança nos preços dos insumos complementares, fósforo e potássio, respectivamente; α_5 captura os efeitos do uso passado de nitrogênio; o coeficiente α_6 diz respeito à mudança no uso de nitrogênio em relação a uma mudança na produção agrícola de cereais e α_7 refere-se à variação na quantidade demandada de fertilizante nitrogenado com relação a uma variação no PIB agrícola.

Para a criação do índice de preços de cereais, foi seguido o modelo apresentado por Ferreira (2015b), em que:

$$Ipc = \frac{\sum_{j=1}^n q_{ij} p_{ij}}{\sum q_{ij} \bar{p}_j} \quad (14)$$

em que i são os estados; j são os 7 produtos cereais considerados (Arroz, Aveia, Centeio, Cevada, Milho, Sorgo e Trigo), q_{ij} é a quantidade produzido do produto j no estado i , p_{ij} é o preço do produto j no estado i e \bar{p}_j é o preço médio do produto j no Brasil.

As variáveis preços de cereais, preços dos fertilizantes e PIB agrícola foram deflacionadas, utilizando o Índice Geral de Preços Disponibilidade Interna (IGP-DI), que foi escolhido com base na literatura especializada (PROFETA; BRAGA, 2011). As variáveis obtidas referentes a todos os 26 estados do Brasil e o Distrito Federal, ao longo do período de 2014 – 2018¹¹ formaram um painel de dados. Os preços dos fertilizantes N, P e K utilizados foram, respectivamente, Sulfato de Amônia, Superfosfato simples e Cloreto de Potássio.

3.2 Procedimentos Econométricos para Estimação da Demanda

A estimação de equações de demanda está suscetível a diferentes problemas, entre eles a endogeneidade. A endogeneidade ocorre em situações em que uma variável explicativa é correlacionada com o erro, sendo suas principais fontes variáveis omitidas, erro de mensuração e simultaneidade (WOOLDRIDGE, 2011). A equação (13) sofre do viés de simultaneidade, pois o produto y (produção de cereais) é função da quantidade utilizada de nitrogênio, do preço

¹¹ Devido a disponibilidade de dados referentes a Preços, para estimação de demanda foi considerado um período de tempo menor (2014-2018)

dos cereais e do preço do nitrogênio. Portanto, foi preciso utilizar uma técnica de equação simultânea. Logo, na presença de simultaneidade, os modelos podem ser estimados pelo método de mínimos quadrados ordinários (MQO), pelo método dos mínimos quadrados indiretos (MQI) ou pelos métodos de mínimos quadrados em dois estágios (MQ2E) ou em três estágios (MQ3E) com a utilização de variáveis instrumentais. Cada um desses métodos possui particularidades. Utiliza-se o MQO somente quando as equações do sistema formarem um modelo recursivo; com relação ao MQI, usa-se caso as equações forem exatamente identificadas; já o MQ2E e MQ3E quando o sistema apresentar equações superidentificadas, que em caso de simultaneidade e superidentificação do sistema, podem gerar estimadores eficientes e consistentes (PROFETA; BRAGA, 2011).

Para correção da endogeneidade entre a variável y_t e N_t , utilizou-se o modelo de MQ2E com o uso de variáveis instrumentais. As variáveis instrumentais consideradas foram referentes ao Preço dos cereais defasado em um ano e a Produção de cereais defasada em um ano. A escolha dessas variáveis se deve ao fato de que o produtor muitas vezes toma a decisão de quanto produzir mediante ao que ocorreu no passado. Ou seja, se o preço do cereal no ano passado e se a produção no ano passado foram bons, a expectativa do produtor será em produzir mais no presente, o que demandará mais insumos.

Sendo assim a equação 13 foi reestimada num primeiro e segundo estágio, onde:

1º Estágio:

$$\ln y_{it} = \alpha_{0it} + \alpha_{1it} \ln P_{Cit-1} + \alpha_{2it} \ln y_{it-1} + \varepsilon_{it} \quad (15)$$

2º Estágio:

$$\ln N_{it} = \alpha_{0it} + \alpha_{1it} \ln P_{Nit} + \alpha_{2it} \ln P_{Cit} + \alpha_{3it} \ln P_{Pit} + \alpha_{4it} \ln P_{Kit} + \alpha_{5it} \ln N_{it-1} + \alpha_{6it} \ln y_{it} + \alpha_{7it} \ln PIB_{Ait} + \varepsilon_{it} \quad (16)$$

3.3. Eficiência do Uso do Nitrogênio (EUN)

O indicador de EUN considerado nesta pesquisa, proposto por Oenema *et al.* (2015), baseia-se no princípio do balanço de nutrientes, isto é, utiliza dados de entrada e saída de nitrogênio para definir a eficiência. Sendo assim, a EUN foi calculada como:

$$EUN = \frac{N_s}{N_E} \quad (17)$$

em que N_s se refere às saídas de nitrogênio e N_E às entradas.

Considerando um sistema de produção de cereais, o total de entrada correspondeu ao total de fertilizantes sintéticos aplicado na produção de cereais, e o total de saída correspondeu

ao total de nitrogênio presente no produto colhido, menos o nitrogênio proveniente de outras fontes naturais.

O indicador de EUN então foi adaptado de acordo com a metodologia proposta por Raun e Johnson (1999):

$$EUN = \left[\frac{N_G - N_R}{N_C} \right] \times 100 \quad (18)$$

em que N_C é aplicação de fertilizantes nitrogenados para a produção de cereais, N_G é a remoção de nitrogênio do grão de cereal e N_R é o nitrogênio removida por cereais provenientes da fertilização natural do solo.

A aplicação de fertilizantes nitrogenados (N_C) correspondeu à quantidade aplicada em toneladas para cada cultura de cereais em cada estado e região. A remoção do nitrogênio do grão (N_G) em g/kg foi calculada pelo produto entre a quantidade produzida de cada cereal com a concentração de nitrogênio na cultura. Os valores de concentração de nitrogênio são diferenciados para cada cultura de cereal. As culturas consideradas neste estudo foram: arroz, aveia, centeio, cevada, milho, sorgo e trigo, e apresentam os seguintes valores de concentração respectivamente: 12,3 g/kg; 19,3 g/kg; 22,1 g/kg; 20,2 g/kg; 12,6 g/kg; 19,2 g/kg; 21,3 g/kg. (TKACHUK, 1977; PIRES *et al.*, 2015). Já o nitrogênio proveniente da fertilização natural (N_R), foi considerado de acordo com a literatura que corresponde em média, a 50% da quantidade de nitrogênio retomado no grão (N_G) (FREEMAN; RAUN, 2005; COELHO *et al.*, 1991; LARA CABEZAS *et al.*, 2005).

A EUN, quando medida pelo balanço de nutrientes, conforme no presente estudo, corresponde a um indicador de eficiência agroambiental, a qual desempenha papel fundamental para análise de gestão de política (OENEMA *et al.*, 2015). Isto porque parte do nitrogênio aplicado e não absorvido pelo grão tenderá a se tornar perda para o ambiente. Segundo Casarin (2015), se: i) $EUN > 1$: N está sendo mais removido que aplicado, com possíveis efeitos ambientais de esgotamento da fertilidade do solo; ii) $EUN < 1$: N está sendo mais aplicado do que removido, indicando que o N não removido pode estar armazenado no solo e, ou, fluindo pelo ambiente; e iii) $EUN = 1$: a quantidade de nutriente aplicada é igual à removida, sendo que em nenhum sistema biológico tal situação ocorrerá. Analisar a EUN por si só para fins conclusivos não seria interessante, visto que os valores podem estar negligenciados (CASARIN, 2015). É necessário assim, cautela, uma vez que análise conjunta com ganhos de produtividade, produção, rotação de cultura, entre outros podem ser mais eficazes (OENEMA *et al.*, 2015).

Considerou-se neste estudo a EUN agroambiental, baseada no balanço de nutrientes de saída/entrada, que para sistemas de produção agrícola, depende do tipo de cultura, capacidade de remoção do N no grão e a fertilização nitrogenada no solo. Este índice agroambiental fornece informações úteis sobre a utilização relativa do fertilizante nitrogenado sintético adicional aplicado, ou seja, se a aplicação excessiva está se transformando em perdas para o meio ambiente (OENEMA, *et al.*, 2015).

3.4 Emissão de Gases de Efeito Estufa

O uso inadequado e, ou, excessivo de nitrogênio pode gerar impactos adversos ao meio ambiente, entre os quais destaca-se a liberação de óxido nitroso (N₂O), que é um dos gases de efeito estufa (GEE) (DE KLEIN *et al.*, 2006)¹². Em se tratando de cereais, as emissões de N₂O resultantes do uso de fertilizantes nitrogenados foram calculadas seguindo a metodologia proposta por De Klein *et al.* (2006), na qual as emissões de N₂O ocorrem de modo direto e indireto como mostra a equação (19):

$$N_2O_{entradaN} = N_2O_{diretaN} + N_2O_{indiretaN} \quad (19)$$

As emissões por via direta são aquelas resultantes das entradas de nitrogênio antropogênicas e, ou, mineralização do nitrogênio (DE KLEIN *et al.*, 2006). O excesso de N aumenta as taxas de nitrificação e desnitrificação, contribuindo com a produção de N₂O. Constituem-se como fontes de nitrogênio os fertilizantes sintéticos nitrogenados, os fertilizantes orgânicos aplicados, os resíduos de outras culturas, a matéria orgânica perdida no solo devido à mudança de uso da terra, drenagem e manejo de solos orgânicos. Já as emissões indiretas são aquelas resultantes da volatilização de nitrogênio com o NH₃ e óxidos de nitrogênio (NO_x) e via lixiviação, ou seja, deposição destes gases e seus produtos de NH₄⁺ e NO₃⁻ nos solos e na água. As principais fontes de nitrogênio com NH₃ e NO_x incluem combustão de combustíveis fósseis, queima de biomassa e processos na indústria química. Já o processo de lixiviação e escoamento ocorre devido aos resíduos de colheita e de fertilizantes inorgânicos e orgânicos (DE KLEIN *et al.*, 2006).

A equação 19 foi então adaptada, seguindo a metodologia publicada pelo Programa Brasileiro GHG Protocol (2010), com base na sugestão do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) e Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTI):

¹² O N₂O é produzido naturalmente nos solos por meio dos processos de nitrificação e desnitrificação. A nitrificação ocorre com a oxidação microbiana aeróbica de amônia a nitrato. Já a desnitrificação é um processo em que há redução microbiana anaeróbica de nitrato para o nitrogênio gasoso (N₂) (DE KLEIN *et al.*, 2006).

$$E_{N_2O} = N_{FERT} \times FE \quad (20)$$

em que E_{N_2O} são as emissões de N_2O resultantes da utilização do fertilizante nitrogenado sintéticos, N_{FERT} é a quantidade de nitrogênio aplicado como fertilizante sintético, FE é o fator de emissão. O fator de emissão levou em consideração as emissões direta e indireta das aplicações de fertilizantes sintéticos nitrogenados na produção de cereais.

Remanejando a equação 20, as emissões via direta e indireta de N_2O foram calculadas como:

$$N_2O_{ED} = N_{FERT} \times FE_1 \times 1,571 \times 310 \quad (21)$$

$$N_2O_{EI} = N_{FERT} \times FE_2 \times 1,571 \times 310 \quad (22)$$

em que FE_1 é o fator de emissão direta de N_2O , que correspondeu a 1% do total de fertilizante nitrogenado aplicado na produção de cereais (DE KLEIN *et al.*, 2006). FE_2 refere-se ao fator de emissão indireta de N_2O , constituindo cerca de 0,4% do fertilizante nitrogenado aplicado (CRUTZEN *et al.*, 2008). Os valores de 1,571 e 310 adicionados referem-se ao fator de conversão de N_2O-N para N_2O e de N_2O em CO_2 , respectivamente, analisando o potencial de aquecimento global do N_2O ao longo do tempo (DE KLEIN *et al.*, 2006; FORSTER *et al.*, 2007; PIRES *et al.*, 2015).

A variável quantidade de fertilizantes nitrogenados sintéticos utilizado na produção de cereais presente tanto na estimação da demanda quanto no cálculo de eficiência de uso de nitrogênio e emissão de gases de efeito estufa foi estimada por meio de pesos. Estes pesos representam a parcela da área plantada de cada cereal em relação à área plantada com todas as culturas temporárias em cada ano e em cada estado. Posteriormente, cada peso foi multiplicado pela quantidade de nitrogênio entregue ao produtor (variável disponibilizada). Julgou-se necessário este cálculo como forma de estimação mais próxima ao verdadeiro valor de nutriente adicionado em cada cultura, a qual é desconhecida no período. Além disso, tal estimação é importante, visto que muitos estados podem demandar mais ou menos fertilizantes mediante à área destinada a cada cultura produzida. A equação (23) demonstra como os pesos foram estimados.

$$p_{t,n} = \sum_{i=1}^7 \frac{AP_{i,t,n}}{AT_{t,n}} \times 100 \quad (23)$$

em que p corresponde ao peso do estado n no ano t . AP se refere à área planta de cada cereal i no estado n no ano t . AT se refere a área total plantada com toda lavoura temporária.

A quantidade de fertilizante utilizado na produção de cereais (N_c) foi então obtida pelo produto entre cada peso pela quantidade de fertilizantes entregue ao produtor (Q_N)¹³.

$$N_{C\ t,n} = p_{t,n} \times Q_{N\ t,n} \quad (24)$$

3.5. Fonte de Dados

Os dados utilizados neste estudo foram provenientes de diferentes bases de dados secundários, conforme descrição a seguir:

- i. Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA): Quantidade produzida de cereais, área produzida de cereais e PIB Agrícola estadual.
- ii. Anuário Estatístico do Setor de fertilizantes 1994 – 2018, da Associação Nacional para difusão de Adubos – ANDA: Quantidade de fertilizantes N, P, K entregues ao consumidor.
- iii. Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB): Preços dos insumos N, P e K e dos cereais¹⁴;

¹³ A variável referente à quantidade de fertilizantes entregue ao produtor (Q_N) está disponível no Anuário Estatístico do Setor de fertilizantes 1994 – 2018, da Associação Nacional para difusão de Adubos – ANDA.

¹⁴ Os preços dos cereais disponibilizados pela CONAB foram utilizados para criar um índice agregado (P_C na equação 13).

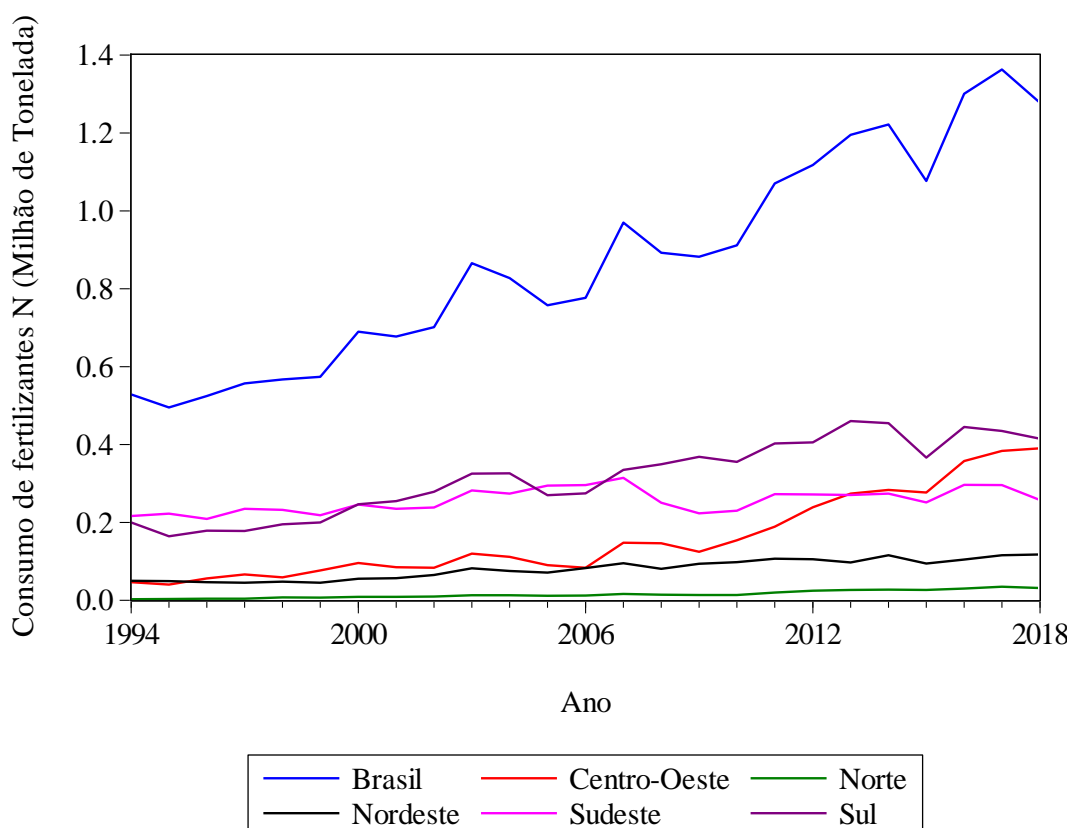
4. RESULTADOS

Nessa seção é apresentada, inicialmente, análise exploratória com levantamento de dados secundários sobre o consumo dos fertilizantes nitrogenados e sua relação com área e produção de cereais no Brasil e nas principais regiões geográficas. Posteriormente são apresentados os resultados referentes às estimações da demanda por nitrogênio, bem como a eficiência do uso de nitrogênio (EUN) e às emissões de Óxido Nitroso (N₂O) relacionadas ao uso dos fertilizantes nitrogenados.¹⁵

4.1 Consumo de Fertilizantes Nitrogenados e Produção de Cereais

No período avaliado, de 1994 a 2018, o consumo de fertilizantes nitrogenados na produção de cereais foi crescente, com aumento de 59% no Brasil. O detalhamento por regiões aponta crescimento de 92% para o Norte e 56% no Nordeste. Em se tratando do Sudeste, o aumento foi de 16% no consumo e para o Sul e o Centro-Oeste foi de 52% e 88%, respectivamente (Figura 2).

Figura 2 - Evolução do consumo de fertilizantes nitrogenados aplicados na produção de cereais no Brasil e nas cinco macrorregiões.

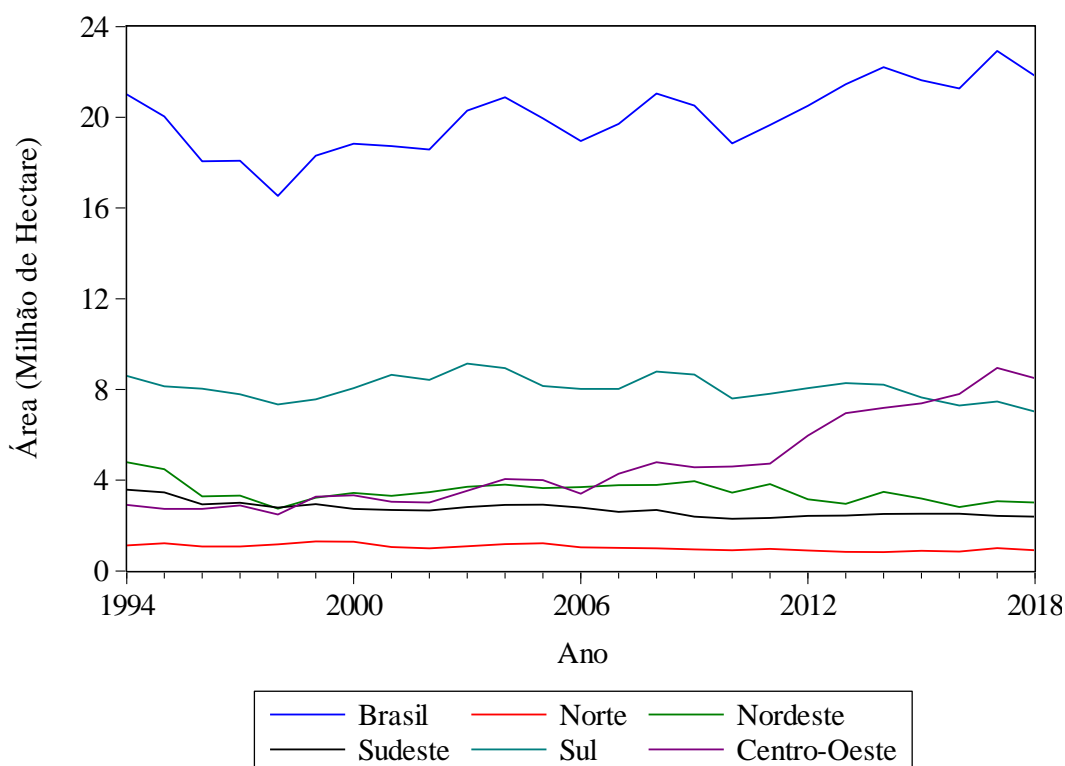


¹⁵ Mais detalhes a nível regional e estadual estão contidos na seção Apêndice A e B, ao final da dissertação.

Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA), com dados trabalhados pela autora.

Com relação à área cultivada com os principais cereais¹⁶, para o Brasil a expansão foi de 4% no período 1994 - 2018. Por outro lado, para as regiões Norte, Nordeste, Sudeste e Sul houve redução na área plantada correspondendo a 24%, 59%, 50% e 22%, respectivamente. A região Centro-Oeste foi a única que apresentou ganhos de área cultivada, equivalente a 66% (Figura 3).

Figura 3- Evolução da área cultivada com os principais cereais no Brasil e nas cinco macrorregiões.

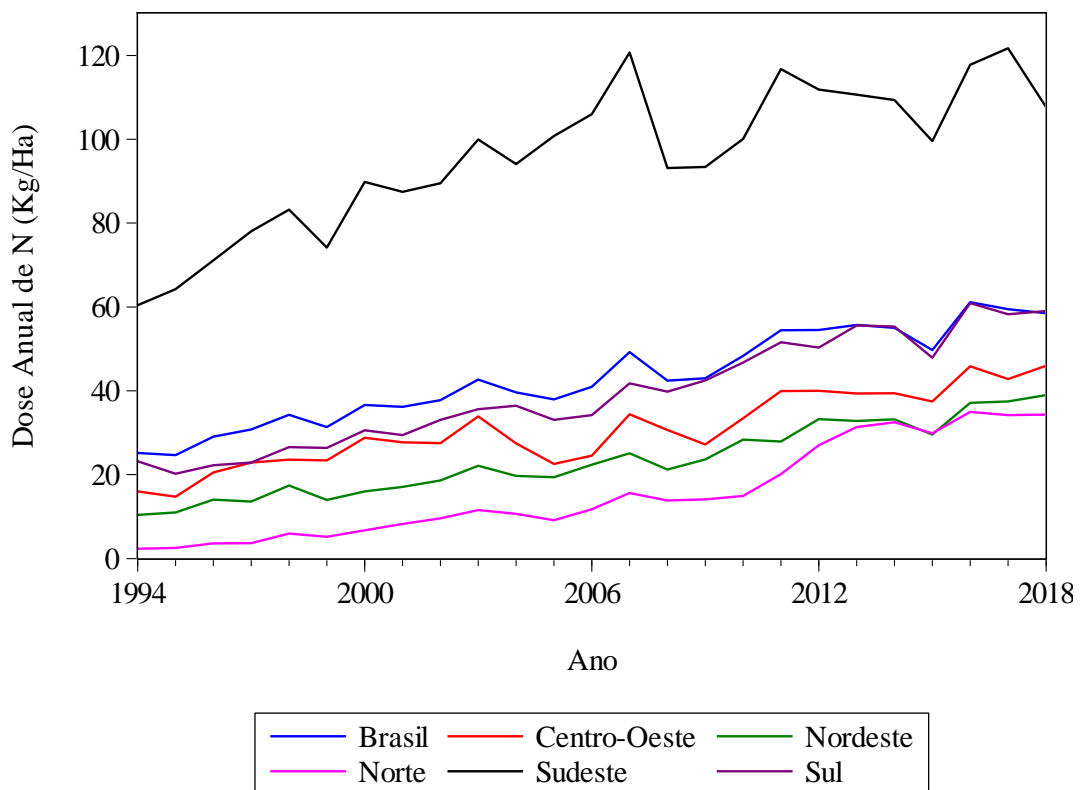


Fonte: IBGE

Ao mesmo tempo, a dose anual de nitrogênio (Kg/ha) aplicada à estas culturas no Brasil aumentou em 57% para o mesmo período. Para a região Norte, o aumento do uso de fertilizantes por área plantada foi de 93% e para o Nordeste foi de 73%. No que tange ao Sudeste, Sul e Centro-Oeste, estes aumentos foram de 73%, 44% e 61%, respectivamente (Figura 4).

¹⁶ Arroz, aveia, centeio, cevada, milho, sorgo e trigo.

Figura 4 - Evolução da dose anual de N aplicada em áreas agrícolas de cereais das cinco macrorregiões brasileiras e no Brasil.

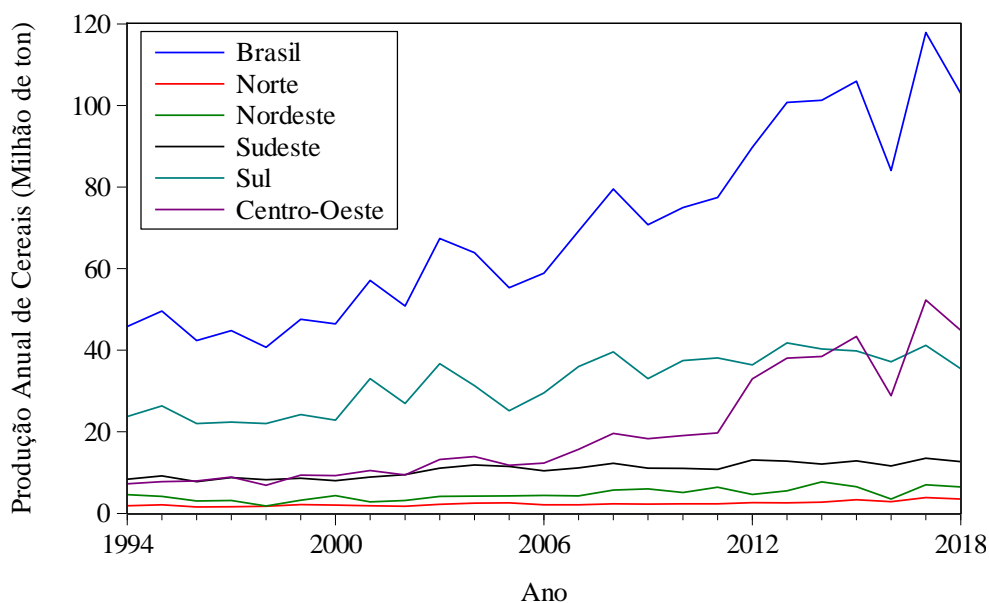


Fonte: IBGE e ANDA, com dados trabalhados pela autora.

A produção dos cereais no Brasil respondeu a esse aumento no uso de fertilizantes, contudo, não ultrapassou 56% de aumento no mesmo período. Na região Norte, houve aumento de 47%, 29% para o Nordeste e 34% para o Sudeste. Para o Sul e Centro-Oeste os aumentos foram, respectivamente, de 33% e 84% (Figura 5). A evolução da produção de cereais de 1994 a 2018 aponta a região Norte como a que menos produziu em 2018¹⁷.

¹⁷ A economia dessa região baseia-se no extrativismo vegetal e mineral, além da soja como principal cultura agrícola, e pecuária (FERREIRA; BOTELHO, 2014).

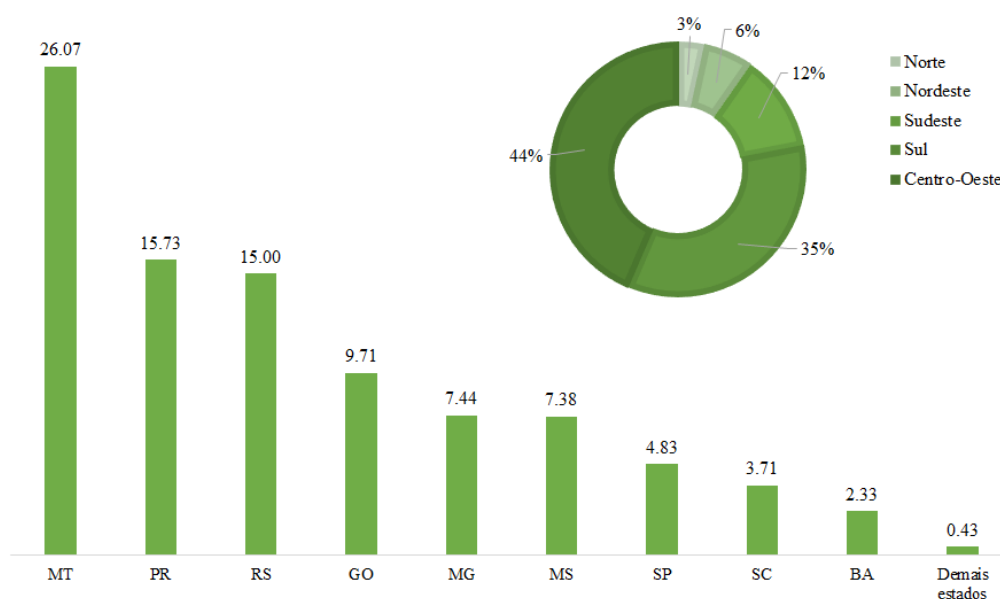
Figura 5 - Evolução da Produção de Cereais no Brasil e nas grandes regiões em toneladas.



Fonte: IBGE e ANDA, com dados trabalhados pela autora.

A Figura 6 apresenta a participação das grandes regiões e unidades da federação na produção de cereais em 2018. Observa-se que em 2018 a contribuição das regiões Centro-Oeste e Sul foi de 44% e 35%, respectivamente, sendo consideradas as maiores produtoras; para o Sudeste e Nordeste, os valores são 12% e 6%, respectivamente. Mesmo com aumento crescente nos últimos anos, a região Norte não apresentou participação expressiva na produção de cereais do país em 2018, correspondendo apenas a 3%. Com relação aos estados, os que tiveram maior participação na produção de cereais do país foram Mato Grosso e Paraná, com valores de 26,07% e 15,73%, respectivamente. Esses valores estão associados à expansão ocorrida de terras agrícolas no Mato Grosso e ganhos de produtividade no Paraná.

Figura 6 - Participação dos estados brasileiros e das regiões na produção nacional de cereais na safra agrícola de 2018 (%).



Fonte: IBGE e ANDA, com dados trabalhados pela autora.

A taxa geométrica de crescimento demonstra o avanço na produtividade em todo o país. Os valores ao ano foram de 3,27% para o Brasil, 3,58% para o Norte, 3,47% para o Sudeste, 3,44% para o Nordeste, 3,18% para o Centro-Oeste e 2,55% para o Sul. A produtividade média dos cereais no Brasil foi de 3,44 ton/ha e para as regiões Norte, Nordeste, Sudeste, Sul e Centro-Oeste esses valores foram de 2,36 ton/ha, 1,35 ton/ha, 4,04 ton/ha, 4,0 ton/ha e 3,89 ton/ha, respectivamente. Mais detalhes podem ser verificados no Apêndice B (Tabela B1 e Figura B1).

4.2 Demanda de Fertilizantes Nitrogenados

Na Tabela 1 são apresentados os resultados referentes à estimação do modelo MQ2E para demanda de fertilizantes. Anterior ao processo de estimação de MQ2E foram realizadas estimações por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), Efeitos Fixos e Efeitos Aleatórios, tais resultados podem ser observados no Apêndice D (Tabela D1). Adotou-se o Teste de Sargan para validade dos instrumentos, confirmando a hipótese nula. Para a confirmação da não presença da endogeneidade nas variáveis foi utilizado o teste de Hausman, confirmando a hipótese que as variáveis eram exógenas.

Tabela 1 - Estimação demanda de nitrogênio MQ2E.

Variável	Coefficiente
<i>LnPn</i>	-0,25857 (0.23804)
<i>LnPc</i>	0,26738** (0.11891)
<i>LnPp</i>	-0,15744 (0.13489)
<i>LnPk</i>	0,00780 (0.26087)
<i>lnN_{t-1}</i>	0,93443*** (0.03216)
<i>lny_t</i>	0,08120*** (0.03057)
<i>lnPIBA</i>	0,00546 (0.02974)
<i>Constante</i>	2,37917 (1.91912)
<hr/> Teste de Sargan: 0,84 Teste de Hausman: 0.19 <hr/> ***p<1%, **p<5% Erros padrão entre parênteses <hr/>	

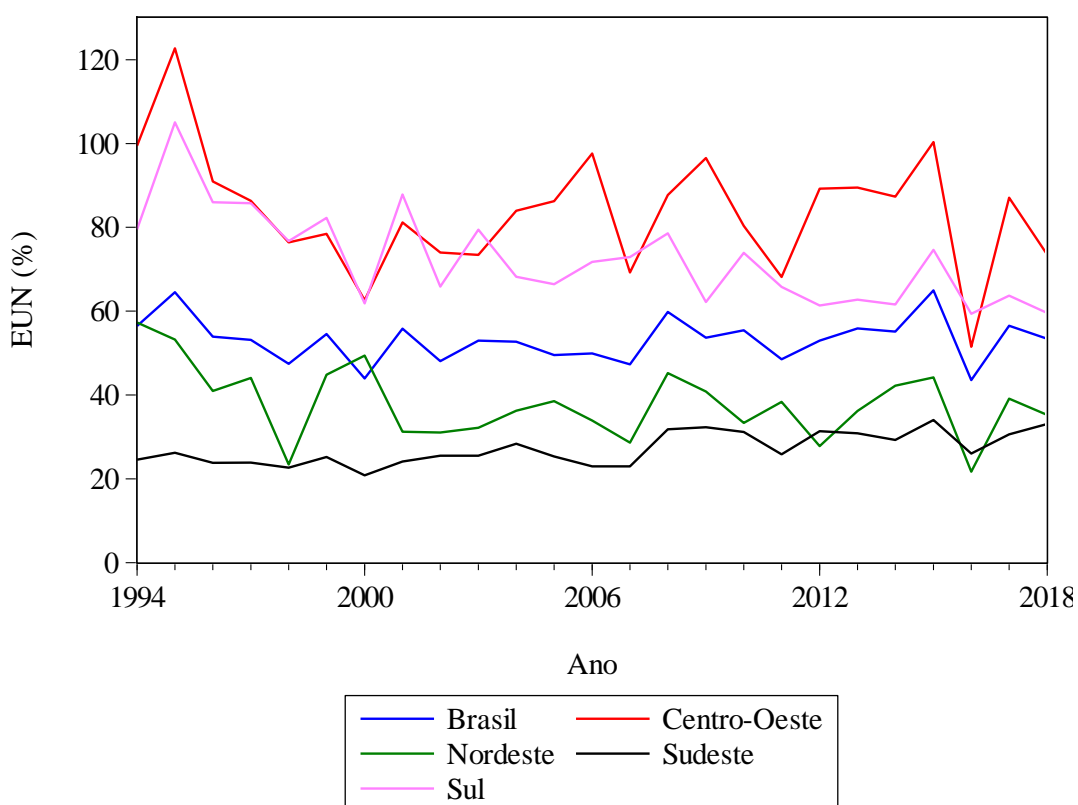
Fonte: Resultados da pesquisa.

Os resultados indicam que os coeficientes estimados para as variáveis *Produção de cereais* (y_t), *Índice de preços de cereais* (P_C) e *Quantidade demandada de nitrogênio defasada em um ano* (N_{t-1}) foram estatisticamente significativos. Os coeficientes dessas variáveis apresentaram os sinais esperados, indicando efeito positivo sobre a demanda de nitrogênio. Os valores demonstram que o aumento de 1% na quantidade da produção de cereais afetaria a quantidade consumida de fertilizantes em 0,08%; o aumento de 1% no preço esperado dos cereais, por sua vez, levaria à elevação de 0,26% na quantidade demandada do insumo; e para a quantidade defasada de nitrogênio, a variação de 1% varia a quantidade consumida de fertilizantes em 0,93% positivamente. Como as equações foram estimadas como lineares nos logaritmos, os coeficientes podem ser interpretados como elasticidades. Logo, os resultados indicaram que a quantidade demandada de nitrogênio é inelástica a estas variáveis.

4.3 Eficiência do Uso do Nitrogênio (EUN)

A EUN na produção de cereais no Brasil¹⁸ atingiu o valor médio de 53% e a TGC da EUN foi de -0,23% ao ano no período de 1994 a 2018 (Figura 7). O Nordeste apresentou valor de EUN média de 38%, com taxa de decréscimo de 2,01% ao ano; o Sudeste atingiu valor de 27% na EUN média, com TGC anual de 1,25%; Sul e Centro-Oeste obtiveram EUN média de 73% e 84% e TGC de -1,20% e -1,25%, respectivamente.

Figura 7 - Evolução da EUN no Brasil e nas principais regiões selecionadas.



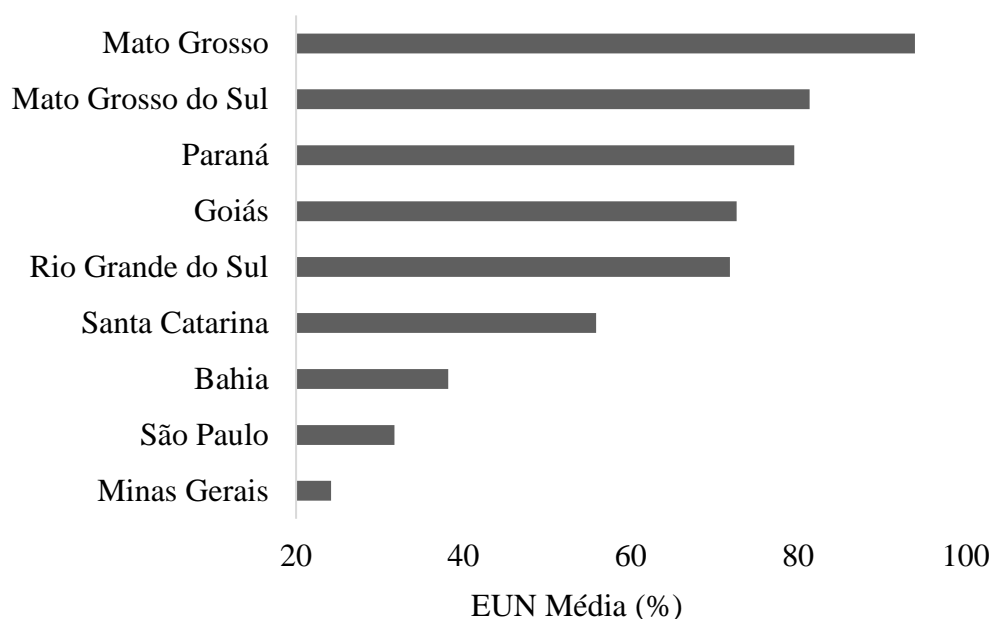
Fonte: Resultados da Pesquisa.

A eficiência no uso do nitrogênio (EUN) média variou nos estados selecionados¹⁹, com valor mínimo de 24% para Minas Gerais e ao máximo de 94% para o Mato Grosso (Figura 8).

¹⁸ Para evolução da EUN os resultados e discussão para a região Norte foram negligenciados no estudo, visto que a participação desta região na produção nacional de cereais é extremamente baixa, o que resultou em *outliers*, que poderia gerar interpretações inconsistentes e equivocadas. Os resultados referentes a esta região podem ser analisados na seção Apêndice C (Figura C1).

¹⁹ Para apresentação dos resultados e discussão referentes a EUN a nível estadual, foram considerados os estados com participação na produção de cereais nacional em 2018 superior a 2%, devido à presença de *outliers*.

Figura 8 - Eficiência do Uso de Nitrogênio média 1994 - 2018 nos estados selecionados.

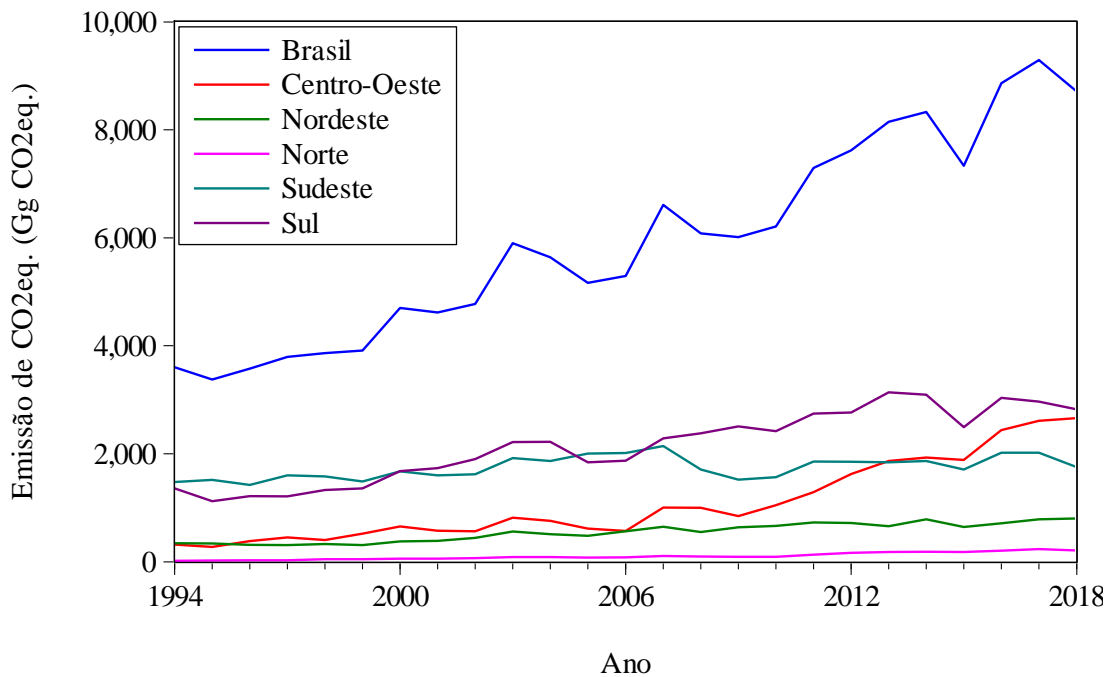


Fonte: Resultado da Pesquisa.

4.4 Emissão de Gases de Efeito Estufa

Observou-se crescimento contínuo das emissões provenientes do uso de fertilizantes nitrogenados em todas as regiões do país. De 1994 a 2018, as emissões cresceram, em média, em 59% no país (Figura 9). Para as regiões, esse crescimento foi de 92% no Norte, 88% no Centro-Oeste, 58% no Nordeste, 52% no Sul, 16% no Sudeste. O crescimento geométrico anual foi de 10,9% no Norte, 9,27% para o Centro-Oeste, 3,63% para o Nordeste, 3,09% para o Sul e 0,73% para o Sudeste. Para o Brasil, a TGC foi de 3,74% ao ano.

Figura 9 - Evolução das emissões de gases de efeito estufa provenientes da fertilização sintética de nitrogênio na produção de cereais no período de 1994 e 2018.



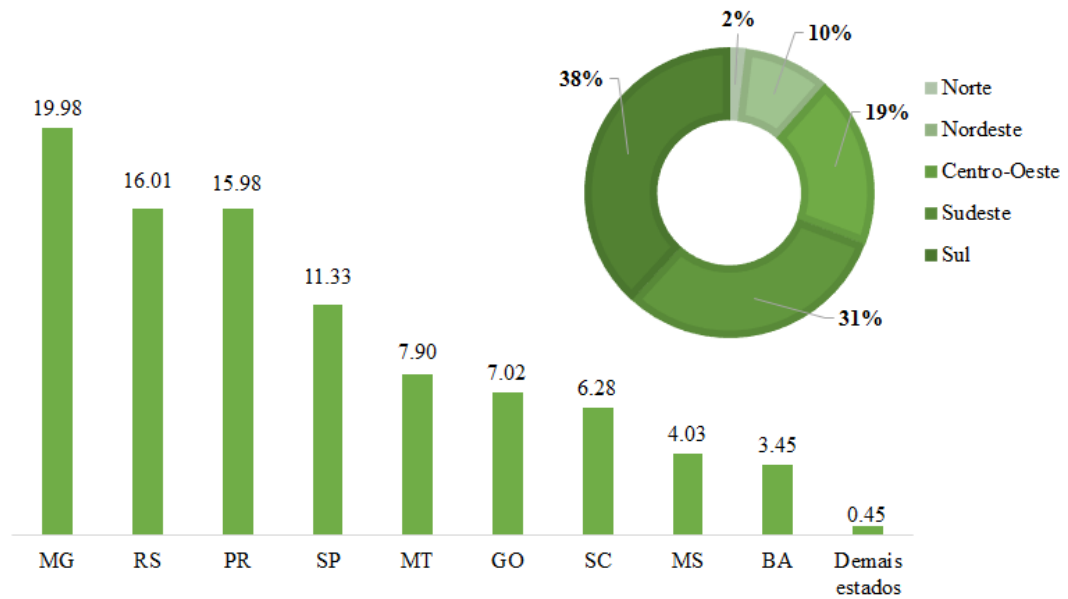
Fonte: Resultados da Pesquisa

Nota: As emissões de N₂O foram convertidas para Gg²⁰ CO_{2eq}.

Em termos de participação, a Figura 10 apresenta a contribuição percentual das diferentes regiões e estados do Brasil para a emissão de CO_{2eq} média no período, oriunda da fertilização nitrogenada para a produção de cereais. Nota-se maior contribuição da região Sul, seguida das regiões Sudeste e Centro-Oeste. Os estados que mais emitiram, em média, foram Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Paraná, com contribuição superior a 15% das emissões totais.

²⁰ 1 unidade de Gg equivale a 1000 toneladas.

Figura 10 - Contribuição média percentual das regiões e dos estados do Brasil para a emissão de CO₂eq oriunda da fertilização nitrogenada para a produção de cereais no período 1994-2018 (%).



Fonte: Resultados da Pesquisa.

5. DISCUSSÃO

5.1 Produção de Cereais e Consumo de fertilizantes nitrogenados

No que tange aos resultados referentes à produção de cereais no Brasil, notou-se que nos últimos 25 anos (1994 a 2018), o aumento guarda relação direta à prática de aplicações crescentes de fertilizantes a base de nitrogênio e, ou, produtividade, visto que área destinada ao plantio destas culturas se manteve constante no período. Esse resultado se traduz em elevada intensificação na produção agrícola de cereais.

A intensificação agrícola pode ser definida tecnicamente como o aumento na produção por unidade de insumos, como mão de obra, terra, tempo, fertilizantes, sementes, alimentos ou dinheiro. A intensificação ocorre quando há aumento no volume total da produção agrícola, que resulta de uma maior produtividade dos insumos, ou a produção agrícola é mantida enquanto certos insumos são diminuídos (FAO, 2004). O aumento da produtividade agrícola por hectare pode levar à redução da demanda por áreas de cultivo, poupando potencialmente essas terras para outros usos (BORLAUG, 2007).

Por outro lado, a intensificação agrícola nem sempre é acompanhada por declínios nas áreas cultiváveis (RUDEL *et al.*, 2009), e isso é definido particularmente pela demanda do bem: se a produção for relativamente elástica, ou seja, o aumento da oferta não resulte em um grande declínio de preços, permanecerá o incentivo geral para maior produção usando mais terras (ANGELSEN; KAIMOWITZ, 2001). Além disso, a intensificação agrícola sem balanço nutricional²¹ pode gerar uso ineficiente dos insumos, permitindo a adaptação de hospedeiros e pragas não tradicionais em culturas agrícolas (GAZZONI, 2017), o que gera danos ambientais e econômicos.

Com a crescente demanda por alimentos e energia, a expansão e a intensificação das terras representam as principais estratégias para aumentar a produção agrícola, mas também são os principais fatores do declínio da biodiversidade (ZABEL *et al.*, 2019). Os impactos ambientais e as compensações desses caminhos alternativos de expansão ainda não são claros (GODFRAY *et al.*, 2010; TILMAN *et al.*, 2011). Devido a esse conflito, Zabel *et al* (2019) analisaram as consequências da obtenção de ganhos globais iguais na produção até 2030 na expansão e na intensificação de áreas agrícolas. Os autores concluíram que tanto a expansão de áreas quanto a intensificação levariam a preços menores. Entretanto, ganhos de produtividade

²¹ Concentração desnecessária de Nitrogênio.

são mais desejados. No Brasil isso poderia ser obtido com recuperação de pastagens degradadas, sem necessidade de abertura de novas áreas ou perdas de biodiversidade.

As etapas de intensificação de uso da terra convencional não fornecem uma indicação estatisticamente significativa de que a produção e a riqueza de espécies podem ser aumentadas ao mesmo tempo, sendo as espécies vegetais mais afetadas que os animais (BECKMANN *et al.*, 2019). Logo, a intensificação agrícola quando não sustentável poderá gerar danos negativos à todo o ecossistema, comprometendo a produção e, conseqüentemente, a segurança alimentar (FISCHER *et al.*, 2017; SEPPELT *et al.*, 2017; BOMMARCO *et al.*, 2018).

Os resultados desta pesquisa demonstram que na maioria das regiões do Brasil a intensificação agrícola também ocorreu devido ao uso crescente de fertilizantes nitrogenados. A região Sudeste foi a que obteve a maior média de uso de fertilizantes nitrogenados por hectare, mesmo com redução de área e sendo a segunda com menor área utilizada para produção de cereais, sugerindo uso superior às outras regiões do país e à média brasileira. A redução da área na região Sudeste pode ser, em partes, devido à competição de área por outras culturas, como a cana de açúcar, sendo esta região considerada em 2018 a maior produtora, representando cerca de 68% da produção nacional (IBGE, 2018). Por outro lado, a região Centro-Oeste foi a única que apresentou expansão da área utilizada para a produção de cereais no período de 1994 a 2018 e, conseqüentemente, a que obteve a maior produção no ano de 2018. No entanto, a região que mais produziu no período de 1994 a 2018 foi o Sul, representando, em média, 32,1 milhões de toneladas. A partir de 2011, o aumento no uso de fertilizantes nitrogenados se deu também pela expansão do cultivo duplo do milho (PIRES *et al.*, 2015; JANKOWSKI *et al.*, 2018), devido ao aumento da necessidade de nutrientes.

A expansão da área destinada a produção de cereais, principalmente a produção do milho e arroz, no Centro Oeste, com destaque para Mato Grosso, vem ocorrendo ao longo das últimas décadas devido ao uso intensivo de conhecimento e tecnologia (FREITAS; MACIENTE, 2016). A expansão da fronteira agrícola se deu pela agregação do bioma cerrado na produção e pela proximidade da região amazônica (VIEIRA FILHO, 2016). Vale ressaltar que o crescimento médio anual da área agrícola no Brasil para todas as culturas foi de 2,05% ao ano, porém para a cultura da soja este valor foi de 5,68% no período de 2008 a 2013 (FREITAS; MENDONÇA, 2016). Assim, é notório que esta expansão foi devida principalmente à produção da soja e não necessariamente à produção somente de cereais.

O crescimento na produção de cereais também foi devido a expansão de terras agrícolas em áreas dos estados de Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, região conhecida como MATOPIBA. Esta região contribui com cerca de 10% na produção de grãos do Brasil (MIRANDA, 2015). A produção de milho é a segunda cultura de maior representatividade nessa região, concentrada principalmente no estado da Bahia e Maranhão (FILHO *et al.*, 2016). Segundo Buainain *et al.* (2017), entre o período de 1990 a 2012, a área plantada total com lavouras temporárias nesta região aumentou 105%, porém para a cultura do milho o crescimento foi de 27%, valor pequeno, se comparado ao crescimento da área plantada com soja (600%). Assim como no MATOPIBA, na região SEALBA (Sergipe, Alagoas, Bahia), mesmo a soja sendo a cultura de destaque, o cultivo de milho se beneficiou com potencial de expansão devido, principalmente, à possibilidade de rotação de culturas, sendo sucessão de milho/braquiária com soja (RAMACIOTI, 2018). Isso aumentou a produtividade de ambas culturas (EMBRAPA, 2018b) devido à sinergia da rotação com leguminosa (ARAUJO-FILHO, 2005).

Em se tratando de produtividade de cereais, os resultados demonstraram crescimento no Brasil, principalmente a partir de 2006. Este crescimento é devido às pesquisas agropecuárias aplicadas, uso de fertilizantes melhores, tecnologias e inovações nas práticas de gestão e variedades de cultivares (VIEIRA FILHO, 2016). Diversos estudos apontam para o crescimento da produtividade ao longo do tempo (GASQUES *et al.*, 2012; VIEIRA FILHO *et al.*, 2012; FORNAZIER; VIEIRA FILHO, 2016). Os estados do Sul, em média, foram os mais produtivos, devido principalmente ao crescimento médio da produção de todos os cereais. Tal região é caracterizado por climas subtropicais, desempenhando papel fundamental na produção de milho e de cereais de inverno, como trigo e arroz (CASTRO, 2014).

Os valores apresentados nesta pesquisa evidenciam que o Brasil se encontra entre os maiores produtores de cereais no mundo, juntamente com a China, Estados Unidos e Índia (FAO, 2017). Ao mesmo tempo, os resultados demonstram o aumento expressivo do consumo de fertilizantes nitrogenados para a produção dessas culturas, tornando-se o quinto país que mais consome fertilizantes nitrogenados no mundo (IFA, 2012; INÁCIO, 2013), mesmo com áreas agrícolas em potencial de expansão.

5.2 Demanda de Nitrogênio

A relação positiva da quantidade demandada de nitrogênio com a de produção de cereais sugere que, no Brasil, os agricultores tendem a consumir quantidades crescentes de fertilizantes nitrogenados sintéticos na esperança de obterem produções cada vez mais elevadas. Resultados

semelhantes são encontrados na literatura (TENKORANG; DEBOER, 2008; ACHEAMPONG; DICKS, 2012; STEINER, 2014; PIRES *et al.*, 2015). A elasticidade do uso de fertilizantes em relação à produção de cereais menor que uma unidade demonstra que as quantidades de fertilizantes são inelásticas à produção cerealífera.

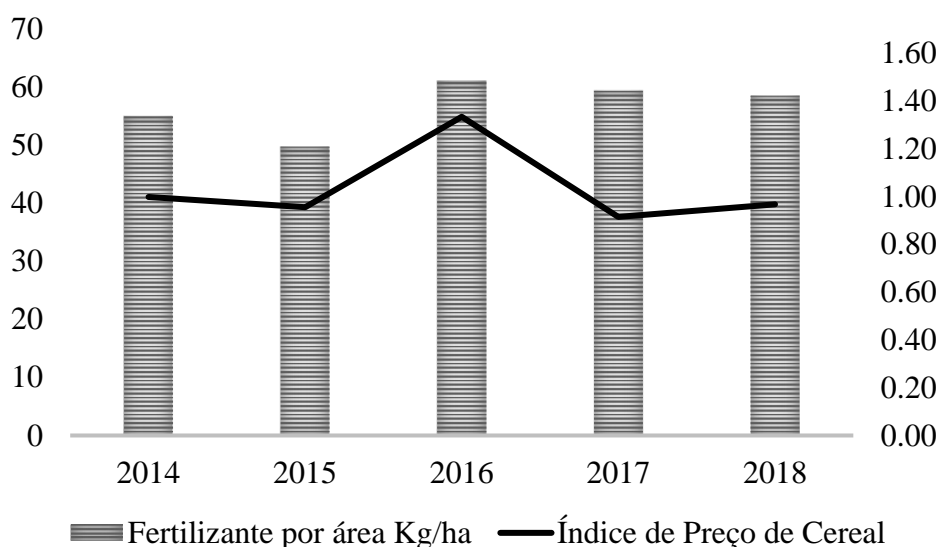
A nível global, os resultados encontrados por outros autores demonstram elasticidades de uso que variaram de 0,15, para África Subsaariana a 1,19, para a América do Norte (TENKORANG; DEBOER, 2008). Para o Brasil, Pires *et al.* (2015) encontraram valores próximos a 0,65, com base em um modelo causal de projeção de longo prazo. Não somente em relação ao uso na produção de cereais, mas também em relação a toda a produção agropecuária, Profeta e Braga (2011) encontraram valores de elasticidades superiores à unidade para a demanda de fertilizantes nitrogenados.

A aplicação inadequada de fertilizantes, tanto em maior quanto em menor quantidade, prejudica o processo de assimilação das plantas, afetando a produção de cereais. Por outro lado, na esperança de obter crescimento da produção, o agricultor adiciona ainda mais nutrientes, ignorando a “Lei dos Incrementos Decrescentes”. Sabe-se que, como na maioria dos processos produtivos, a utilização de determinado insumo está submetida à referida “lei” (HOLMES; ALDRICH, 1957), sendo que a produção agrícola tende a cair, caso haja adição crescente e excessiva de apenas um insumo. Além disso, a maioria dos produtores não conseguem prever o rendimento da colheita, devido a variáveis não controláveis e, principalmente por isso, a adição de insumos sempre será a máxima julgada por eles.

Para a variável preço de cereais observou-se relação positiva com a demanda de fertilizantes, o que está em linha com outros resultados da literatura (GUNJAL *et al.*, 1980; BURRELL, 1989; DENBALY; VROOMEN; 1993; MERGOS; STOFOROS, 1997; NICOLELLA *et al.*, 2005; ACHEAMPONG; DICKS, 2012; LEONARD, 2014). Isso demonstra que os produtores levam em consideração o preço de cereais na hora de consumir fertilizantes, o que certamente está associado ao retorno econômico esperado. Em geral, quando o preço do cereal aumenta muito, os agricultores mudam de rotação cereal-leguminosa para cultivo contínuo de cereal, o que possibilita a obtenção de retornos de curto prazo. Porém, com a mudança para cultivo contínuo, há redução na produtividade do cereal, e os produtores, ao mesmo tempo, aumentam a aplicação de nitrogênio (CAI *et al.*, 2014).

A Figura 11 apresenta o comportamento do preço dos cereais ao longo dos anos e o comportamento do uso de fertilizantes por área (kg/ha) para o mesmo período.

Figura 11 - Comportamento do Preço de Cereais e aplicação de fertilizantes nitrogenados 2014 – 2018.



Fonte: Dados da Pesquisa.

Observa-se na Figura 11 que em momentos de queda de preços de cereais, o uso de fertilizantes na produção também declina, o que pode ser explicado com a utilização da área para outras culturas que demandam menos (ou não demandam) nitrogênio, como a soja, por exemplo. Já em momentos de valorização de preços dos cereais, há maior uso de nitrogênio na produção, na esperança de se ter ganhos elevados de produtividade.

Vale ainda ressaltar que em muitas regiões o preço do fertilizante nitrogenado é relativamente mais barato em comparação ao preço das culturas, o que leva os produtores a aplicar mais fertilizantes do que o necessário (GOOD; BEATTY; 2011; CAI *et al.*, 2014). Logo, enquanto o mercado de cereais continuar se valorizando, maior será o estímulo para produzir mais e, conseqüentemente, maior demanda de insumos e a possibilidade de seu uso ineficiente. Por exemplo, Cai *et al.* (2014) simularam o aumento de 50% no preço do fertilizante nitrogenado e, ao mesmo tempo, no preço do milho, e observaram que a alteração no preço do cereal tem impacto maior na aplicação de nitrogênio do que a alta no preço do fertilizante. Com relação à importância da variável quantidade de fertilizante defasada observada nesta pesquisa, isso pode ser explicado pela inércia dos produtores com relação ao uso passado do nitrogênio. Muitos agricultores tendem a manter-se na mesma trajetória de uso de fertilizantes, na esperança de se ter ganhos iguais ou superiores. Soma-se a isso o fato de a maioria dos agricultores não possuir acesso à informação e à tecnologia. Resultados semelhantes foram obtidos por Leonard (2014), segundo o qual a elasticidade de uso passado na região oeste do

Paquistão foi de 0,74. Além disso, países com alto consumo de fertilizantes podem continuar a consumir mais e as taxas de consumo em áreas de baixo uso de fertilizantes tendem a mudar apenas lentamente ao longo do tempo (TENKORANG; DEBOER, 2008). Vale ressaltar que existem ocasiões em que o produtor investe em adubação no solo num determinado ano com receio de que no próximo ano não tenha recursos financeiros para adquirir tais insumos. Dessa maneira, poderá haver nutrientes estocados no solo em períodos de escassez financeira. Concomitantemente, como o Brasil ainda possui áreas disponíveis, espera-se o crescimento no uso de fertilizantes para abastecer a necessidade de nutrientes no solo.

A não significância da variável preço do fertilizante²² pode ser explicada, pelo menos parcialmente, devido, ao fato de o produtor dar mais importância ao preço do cereal e não ao preço do insumo da hora da aquisição, como previamente mencionado nas simulações de Cai *et al.* (2014). Acontece que muitos produtores conseguem transferir o valor do custo do insumo no valor de venda do produto, sendo este o de maior relevância. Tal resultado é bastante comum na literatura, como demonstrado nos estudos de Gunjal *et al.* (1980); Nicolella *et al.* (2005); Acheampong e Dicks (2012) e Leonard (2014). Em questão de política, isso implica que impostos ou taxas com objetivos de reduzir a demanda por fertilizantes nitrogenados (para reduzir emissões de GEE, por exemplo) podem não ser eficientes, pois seria preciso um imposto muito alto para se obter uma grande redução no uso de fertilizantes nitrogenados (MERGOS; STOFOROS, 1997; STEINER, 2014; MEIKLE, 2018). Além disso, como a agricultura brasileira é uma dependente química de nutrientes tal mecanismo inviabilizaria a produção, comprometendo o abastecimento de alimentos.

5.3 Eficiência no Uso de Nitrogênio

A intensificação do uso da terra ocorrida na produção de cereais, devido ao uso crescente de fertilizantes nitrogenados resultaram em decréscimo da EUN agroambiental no Brasil e nas regiões. A EUN média para a produção de cereais do Brasil calculada foi de 53%, valor superior ao calculado por PIRES *et al.*, 2015, e inferior ao de Casarin (2015).

Em nível de produção agrícola total (cereais, leguminosas e oleaginosas), a EUN mundial encontrada varia em torno de 42%-47%, tendo o Brasil alcançado EUN na agricultura em 2010 de 50% (ZHANG *et al.*, 2015a; MUELLER *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2017). Em 2010, a EUN calculada na produção agrícola para União Européia foi maior que 50% (WESTHOEK *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2015a; OENEMA *et al.*, 2015). Segundo Oenema

²²Em todos as estimações não houve variação de significância, conforme mostra a Tabela D1 do Apêndice D.

et al. (2015), valores desejáveis de EUN devem variar entre 50 – 90%, indicando uso satisfatório de N, porém, a definição de valores alvo, envolve o tipo de sistema agrícola, solo e clima. Para a América Latina, a EUN média mínima desejável é de 60% (TÔSTO *et al.*, 2019), porém os valores aqui encontrados foram inferiores. Vale ressaltar que, ao agregar outras culturas aos cereais, como leguminosas, valores de EUN tendem a variar, uma vez que a capacidade de assimilação de nitrogênio pelas leguminosas é superior aos cereais (RAUN; JOHNSON, 1999).

Valores de EUN baixos e decrescentes, como identificados nesta pesquisa, além de indicar uso ineficiente deste recurso, aponta para altas perdas de nitrogênio, uma vez que parte do nitrogênio não removido flui para o ambiente (SUTTON *et al.*, 2011; OENEMA *et al.*, 2015). Aplicações excessivas de fertilizantes nitrogenados levam a problemas ambientais, como eutrofização das águas, perda da biodiversidade, aquecimento global e esgotamento estratosférico do ozônio (SUTTON *et al.*, 2011; RUTTING, *et al.*, 2018). Por outro lado, o acesso limitado ao nitrogênio, ou EUN muito alta, leva a rendimentos reduzidos e suprimentos insuficientes aos alimentos, apontando esgotamento de recursos, ou seja, depleção do nitrogênio do solo, levando à degradação, erosão e pobreza de nutrientes (SANCHEZ, 2002; OENEMA *et al.*, 2015; RUTTING *et al.*, 2018).

Valores de EUN decrescentes, associados ao aumento no consumo de fertilizantes destinados à produção de cereais, significam perdas de nutrientes para o ambiente, visto que as saídas de N nas culturas estão sendo menores que as entradas desse macronutriente. Pelo fato de a produção agrícola operar em um sistema aberto, as perdas são inevitáveis, impossibilitando um valor de EUN ideal (ROBERTSON *et al.*, 2013; PIRES *et al.*, 2015). A liberação excessiva de nitrogênio nos ecossistemas costeiros e de água doce pode causar proliferação de algas tóxicas, afetando a saúde decorrente do consumo de peixes e aumento do nível de nitrato na água potável, tendo efeitos adversos no trato digestivo humano (BRENDER, 2016; REIS *et al.*, 2016). Ademais, o nitrogênio em excesso gera deseconomia na produção, uma vez que afeta os rendimentos e o solo (RAZA *et al.*, 2018).

Em áreas de elevada rentabilidade, geralmente há aplicações excessivas de fertilizantes sintéticos nitrogenados (SUTTON *et al.*, 2011). Por outro lado, como em áreas rurais muito pobres e logística ineficiente (a África, por exemplo) a renda do agricultor é baixa, a aplicação de adubos nitrogenados não é favorecida, o que resulta em mineração do solo (SANCHEZ, 2002; OENEMA *et al.*, 2015). Logo, ao analisar os resultados a nível regional, podemos

perceber que tanto a aplicação excessiva quanto a ausência de fertilização sintética resultaram em ineficiência do uso. Pode-se exemplificar essa afirmação com os resultados do Nordeste, que consumiu no período, em média, 23 kg/ha de fertilizante, em comparação aos do Sudeste, que utilizou aproximadamente 96 kg/ha (Ver Apêndice A, Tabelas A3 e A4). Ambas regiões obtiveram os menores valores de EUN média. Essa amplitude de valores de adição de N produzindo igual (in)eficiência de uso pode significar a degradação dos solos na região do Nordeste, por meio da mineração do nitrogênio e, perdas excessivas para o ambiente, incluindo emissão de gases poluentes, no Sudeste (SHARPLEY *et al.*, 2002; MOSS, 2007).

Em relação às regiões Sul e Centro-Oeste, que apresentaram os maiores valores de EUN média, o resultado pode ser explicado, em partes, pelas excelentes produtividades alcançadas no período. Apesar de os valores da produtividade média do Sudeste estarem próximos daqueles do Sul e Centro-Oeste, esta região não obteve valores de EUN melhores, devido aos elevados valores de dose anual de nitrogênio por área e a baixa participação na produção nacional de cereais (não ultrapassando a 12% na safra de 2018).

Os fatores terra e clima também influenciam diretamente a EUN, via produção e produtividade. Mesmo o Brasil tendo condições naturais boas durante todo o ano, as condições edafoclimáticas são bastante variáveis entre as regiões estudadas e, inclusive, com variações intrarregional ao longo das estações. O solo é o maior provedor de nutrientes para as plantas, sendo a água o principal veículo, notadamente para elementos mais móveis no solo, como o nitrogênio. São recursos naturais essenciais para produção de sistemas alimentares. O ciclo natural dos nutrientes ocorre desde o solo, até as plantas e animais, retornando ao solo, por meio da decomposição da biomassa (PARIKH; JAMES, 2012), sendo importante para manter os nutrientes essenciais necessários para as plantas no solo. Além do nitrogênio, diversos elementos são considerados essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas, entre eles carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O), (provindos do ar) e fósforo (F) e potássio (K) da fertilização natural ou adicionada (TROEH; THOMPSON 1993; PARIKH; JAMES, 2012). Na ausência de qualquer um desses elementos, haverá limitação na fotossíntese, conseqüentemente alocação de matéria seca tendo a planta não completado o seu ciclo.

As diferentes condições edafoclimáticas mencionadas tornam algumas regiões mais aptas para produção de cereais. No Nordeste, se destaca apenas a produção de milho, devido ao clima quente e temperado (IBGE, 2018), baixa precipitação média anual (~930 mm/a.a) e solos com características de baixa disponibilidade de nutrientes (IBGE, 2010). No Centro-Oeste e

Sudeste, o clima predominante é o tropical e quente, com precipitação média de ~1500 mm/a.a. e, assim, a produção de milho e arroz se destaca nessas regiões. Já a região Sul apresenta clima subtropical, com média pluviométrica anual entre 1300 mm e 2000 mm, destacando-se na produção de trigo, arroz e milho (IBGE, 2018).

Ao nível de estado, alguns destaques positivos nos valores de EUN são consequência do avanço tecnológico na agricultura nos últimos anos. O avanço da fronteira agrícola para os estados da região Nordeste explica o bom desempenho de alguns estados. As regiões conhecidas por MATOPIBA e SEALBA possuem bom desempenho agrícola em função da expansão dos plantios de soja (PROCÓPIO *et al.*, 2018), levando a necessidade de outros cereais em rotação e, conseqüentemente, investimento em fertilização nitrogenada biológica. Também o Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul e Goiás obtiveram valores de EUN e de produtividade média superiores ao do país em 2018. Em experimentos controlados foram encontrados valores de EUN próximos a 30% para produção de milho no Mato Grosso do Sul, com redução entre 9% a 22% devido ao aumento da dose de aplicação de fertilizante nitrogenado (LIANG; MACKENZIE, 1994). Em contrapartida, no estado do Mato Grosso foram encontrados valores de 73% para EUN no milho (JANKOWSKI *et al.*, 2018).

Mesmo que os resultados para preço dos fertilizantes aqui encontrados não sejam significativos para explicar a demanda por esse elemento no Brasil, as alterações climáticas, preços dos cereais e políticas econômicas (THOMAZELLA, 2019), geram impacto na EUN. Cerca de 77% dos fertilizantes nitrogenados consumidos no Brasil são importados (ANDA, 2017; INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA – IEA, 2018), logo, as variações cambiais impactam diretamente o preço final pago pelos produtores (THOMAZELLA, 2019; BRAGA, 2014). A renda agrícola proveniente da venda dos cereais influencia na demanda pelos fertilizantes, tendo relação positiva. E as políticas econômicas, como subsídios, podem beneficiar a aquisição dos fertilizantes pelos produtores (INTERNATIONAL COFFEE COUNCIL – ICC, 2009 THOMAZELLA, 2019). Embora o aumento do preço não represente grande limitação à demanda, o preço mais baixo dos fertilizantes nitrogenados para os produtores, por outro lado, pode gerar aplicações excessivas em algumas regiões (PIRES *et al.*, 2015), o que se traduz em perdas de eficiência no uso.

O modo de aplicação de fertilizantes também pode interferir na EUN, uma vez que pode provocar salinização nas sementes (GITTI, 2014; DEBRUIN; BUTZEN, 2015). Aplicação tardia de nitrogênio pode gerar baixo desenvolvimento e baixa produtividade. Logo, aplicar o

fertilizante no momento em que a planta mais precisa na quantidade indicada é uma das maneiras viáveis de se conseguir EUN ideal (COELHO *et al.*, 2008; OLIVEIRA *et al.*, 2008; BROCH *et al.*, 2012). Por outro lado, o parcelamento da adubação nitrogenada torna onerosa a prática da fertilização pós-plantio (COSTA *et al.*, 2013). Alternativas como a fixação biológica de nitrogênio (FBN), que é tecnicamente bem empregada no Brasil na cultura da soja, pode ser excelente fonte de N para cereais, aumentando a EUN, uma vez que possibilita a menor aplicação de N na cultura de rotação. Em todo o mundo, a FBN é atualmente estimada em $17,2 \times 10^7$ ton ano⁻¹ de N aos solos, a partir do qual as culturas leguminosas adicionaram $21,5 \times 10^6$ toneladas, aproximadamente metade do FBN total (AZEEM *et al.*, 2019). A associação da FBN a fontes de carbono como biocarvão promoveu aumento de produtividade de cereais e maior EUN (AZEEM *et al.*, 2019).

5.4 Emissão de Óxido Nitroso

Devido ao uso crescente de nitrogênio nos últimos 25 anos na produção brasileira de cereais, parte das perdas desse macroelemento para o ambiente se traduziram em emissões de gases de efeito estufa, particularmente Óxido Nitroso (N₂O), convertido em CO_{2eq}. Os resultados desta pesquisa mostraram que as emissões do CO_{2eq} na atmosfera provenientes da fertilização nitrogenada sofreu aumento de 59% no período, tendo em 2018 valor próximo a 2,4 vezes se comparado em 1994. Os resultados demonstraram também que as emissões relacionadas à aplicação dos fertilizantes nitrogenados sintéticos na produção de cereal atingiram valores de cerca de 8,7 milhões de toneladas de CO_{2eq} em 2018. Valores calculados por Pires *et al.* 2015 revelaram emissão de cerca de 6,5 milhões de toneladas de CO_{2eq} em 2010. Dados apresentados pelo SEEG (2018a) enunciaram que em 2016 as emissões diretas²³ de CO_{2eq} provenientes das atividades agropecuárias totalizaram 499 MtCO_{2eq}, sendo 30% desse valor oriundo do cultivo de arroz e solos agrícolas (fertilizantes, dejetos de animais e manejo de organossolos).

Na atmosfera, cerca de 78% do ar corresponde a nitrogênio em sua forma inerte (N₂). Embora em abundância, ele se torna inacessível para a maioria dos organismos em sua forma de N₂. O nitrogênio é um dos macroelementos essenciais para a sobrevivência de todos os organismos vivos. É um nutriente necessário de diversas biomoléculas, incluindo proteína,

²³ Entende-se por emissões diretas: Agricultura e Pecuária. Emissões indiretas: Mudança de uso da terra, Energia na Agropecuária, Resíduos Agroindustriais, as quais corresponderam a 30% e 70% das emissões totais da Agropecuária, respectivamente (SEEG, 2018a).

DNA e clorofila (BERNHARD, 2010). Antes da invenção do processo de Haber – Bosche²⁴, quase todo o nitrogênio da atmosfera era gerado e processado por microrganismos (STEIN; KLOTZ, 2016), como as bactérias fixadoras. Esse processo é conhecido como fixação de nitrogênio, e pode ser realizado por grupo seletivo de bactérias²⁵ ou fixados abioticamente por raios ou combustão de fósseis (STEIN; KLOTZ, 2016). Os microrganismos fixadores capturam o nitrogênio atmosférico e o converte em amônia (NH₃), que pode ser absorvido pelos vegetais e usada para produzir moléculas orgânicas. Ao final do ciclo, a NH₃ é convertida por bactérias desnitrificantes, retornando à atmosfera em sua forma de N₂.

Acontece que a partir da introdução dos fertilizantes sintéticos nitrogenados no mercado, o ciclo descrito acima foi alterado, e então parte do nitrogênio passou a retornar à atmosfera em formato de óxido nítrico (NO), dando origem a chuvas ácidas ou emissões de óxido nitroso (N₂O), um dos gases de efeito estufa (ROCKSTROM *et al.*, 2009). O N₂O é dos principais gases de efeito estufa pois, apesar de sua baixa concentração na atmosfera, ele se destaca pelo longo tempo de permanência e pelo alto potencial de aquecimento global (PAG), sendo 310 vezes maior que o CO₂ (CORRÊA *et al.*, 2016).

O Brasil é considerado o sétimo maior emissor de GEE no mundo, contribuindo com 3,4% das emissões totais (SEEG, 2018b), ficando em terceiro lugar considerando apenas as emissões provenientes da agropecuária (SEEG, 2018a). A agricultura mundial contribui com cerca de 80% de N₂O adicionado à atmosfera anualmente pelas atividades humanas (HOUGHTON *et al.*, 2001; ROBERTSON, 2004; PIRES *et al.*, 2015).

O decréscimo da EUN e o crescimento das emissões no período avaliado é explicado, em partes, pela intensificação agrícola ocorrida no Brasil no período de 1994-2018. O uso crescente de fertilizantes sintéticos nitrogenados significou ineficiência do seu uso na produção agrícola de cereais, traduzindo-se em perdas ambientais e grande emissão de GEE para a atmosfera. No geral, há aumento das emissões de N₂O e NO, acompanhando as taxas de aplicação de fertilizantes nitrogenados em produções agrícolas (SMITH *et al.*, 1997; BOUWMAN *et al.*, 2002; ZHANG *et al.*, 2016). Isso ocorre porque as altas taxas de aplicação de nitrogênio estimulam o processo de nitrificação e, ou, desnitrificação.

Na China, por exemplo, ambas as emissões de N₂O e NO aumentaram linearmente com aplicação de fertilizante sintético nitrogenados, onde as emissões de N₂O anual na cultura de

²⁴ Procedimento industrial para obtenção de amoníaco a partir do Hidrogênio e Nitrogênio (RIBEIRO, 2013).

²⁵Bactérias Diazotróficas.

hortaliças correspondem a 5,07 kg N₂O-N ha⁻¹ (ZHANG *et al.*, 2016). Nos EUA foram identificadas respostas não lineares e exponencialmente crescentes de N₂O às taxas de aplicação de fertilizantes nitrogenados na rotação de milho-soja, sem ganhos econômicos no rendimento (HOBEN *et al.*, 2011). Por outro lado, a redução da aplicação do nitrogênio para um terço em cultivares do trigo na região norte da China permitiu queda anual de 38% nas emissões totais de N₂O (YAN *et al.*, 2018). Esses autores encontraram correlação significativa entre emissão de N₂O induzida pela fertilização nitrogenada e eficiência no uso de nitrogênio, indicando ainda potencial de mitigação de N₂O via aprimoramento da EUN (YAN *et al.*, 2018).

Com relação às regiões brasileiras, observou-se que o Sul foi a que mais contribuiu para as emissões de N₂O, emitindo cerca de 2,8 milhões de toneladas de CO₂eq. (34% das emissões totais do país) em 2018. Próximo a este valor destaca-se a região Sudeste com 31% das emissões totais do país. Porém, mesmo representando uma parcela relativamente baixa na produção nacional de cereais (12%), a região abriga os estados de São Paulo e Minas Gerais, considerados em 2017, juntamente com Pará e Mato Grosso do Sul, os maiores emissores de GEE's na soma dos setores da Agropecuária, Energia, Mudanças do Uso da Terra, Processos Industriais e Resíduos (SEEG, 2018b). A região Centro-Oeste, mesmo com produção superior ao Sudeste, apresentou cerca de 19% das emissões totais em 2018.

Os estados que mais emitiram CO₂eq proveniente do uso dos fertilizantes na produção de cereal em 2018 foram Minas Gerais e Rio Grande do Sul. Segundo o SEEG (2018a) estes dois estados juntamente com Mato Grosso, São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul e Pará, foram responsáveis por quase 70% das emissões nacionais diretas de CO₂eq do setor da agropecuária em 2016. De todas as emissões diretas da agropecuária em 2016, os fertilizantes sintéticos foram responsáveis por 15% de CO₂eq. em São Paulo, ocupando a segunda posição, atrás do setor de pecuária de corte (53%). Em Minas Gerais, as emissões de CO₂eq provenientes dos fertilizantes sintéticos corresponderam a 9% das emissões diretas da agropecuária e no Rio Grande do Sul e no Mato Grosso estes valores foram de 8% e 7%, respectivamente (SEEG, 2018a).

Estudos em campo mostraram que as altas taxas de aplicação e, ou, o uso não otimizado dos fertilizantes sintéticos nitrogenados são práticas promotoras do fluxo de N₂O nas principais produções agrícolas (JARECKI *et al.*, 2009; HOBEN *et al.*, 2011; LINQUIST *et al.*, 2012). *A priori*, emissões oriundas da fertilização nitrogenada constituem perdas financeiras. Na Europa, os danos causados devido à poluição do nitrogênio foram estimados em 70 a 320 bilhões de

euros, equivalente entre 1 a 4% da renda total (BRINK *et al.*, 2011; BODIRSKY *et al.*, 2012). Em nível global, equivale ao intervalo de 0,3% - 3% do PIB (SUTTON *et al.*, 2011; BODIRSKY *et al.*, 2014). Aumentos na EUN no Brasil poderiam gerar economia superior a 20 milhões de dólares em custos com fertilizantes nitrogenados (PIRES *et al.*, 2015). Logo, práticas que aumentem a EUN podem contribuir com reduções de emissões de GEE, bem como evitar perdas econômicas e geração de custos.

O grande desafio em sistemas de produção agrícola intensivos é integrar valores ideais de EUN e sustentabilidade com produção e produtividade expressivas em terras mínimas. O uso eficiente de formas alternativas de nitrogênio é a base para combinar impacto ambiental baixo com segurança alimentar futura (RUTTING *et al.*, 2018). Entre as formas alternativas de nitrogênio não sintético, o cultivo intercalado com leguminosas reduz a lixiviação do nitrogênio sob o plantio direto (CONSTANTIN *et al.*, 2015). O sistema de plantio direto na palha de leguminosa é de grande relevância na redução de aplicações de fertilizantes sintéticos, reduzindo as perdas, os gastos e gerando sustentabilidade agrícola (QUINKENSTEIN *et al.*, 2012; SILVA., 2016).

Estratégias para aplicação de fertilizantes nitrogenados sintéticos com orgânicos, mesmo que impossível em áreas extensas, visam gerenciar os nutrientes adequados no solo e culturas, evitando acúmulo indesejável de nitrogênio mineralizado (RUTTING *et al.*, 2018). Técnicas de aplicação de adubos e preparo do solo com culturas de cobertura devem ser realizadas para maior produtividade e sustentabilidade (MYRBECK *et al.*, 2012; SCHIPANSKI *et al.*, 2014; RUTTING *et al.*, 2018).

É importante ressaltar que não somente aumentar EUN poderia reduzir as emissões de GEE (ROBERTSON *et al.*, 2013; PIRES *et al.*, 2015). São necessárias políticas agrícolas específicas que visem a minimização das emissões de gases poluentes à atmosfera. Por exemplo, Mueller *et al.* (2017) concluíram que o nitrogênio perdido para o meio ambiente poderia ser mitigado em 41% se a alocação desse fertilizante entre as regiões fosse otimizada. Essa otimização poderia ser feita com política comercial internacional, retirando-se dos países com excesso de consumo e alocando-se aos locais com agricultores de baixa renda (MUELLER *et al.*, 2017). Além disso, para aqueles países onde a produção agrícola é considerada eficiente poderia haver maiores incentivos à exportação e produção (MUELLER *et al.*, 2017; ZHANG, 2017).

Minimizar o uso de fertilizantes sintéticos nitrogenados poderia ser a opção mais eficiente. Porém a agricultura brasileira ainda é uma grande dependente química de insumo, o que comprometeria as produções futuras de alimentos, fibras e combustíveis. A redução no consumo de fertilizantes nos países desenvolvidos foi bem sucedida devido à melhoria das tecnologias de produção agrícola, como inibidores de desnitrificação, fertilizantes de liberação lenta revestidos com polímeros e agricultura de precisão (FAO, 2004), porém tais medidas ainda são onerosas para o Brasil. Além disso, ainda que nesta pesquisa a demanda por nitrogênio não tenha sido estatisticamente relacionada ao preço do insumo, os mecanismos de preços podem ser eficientes desde que o produtor tenha alternativas para suprir a necessidade da produção por nitrogênio, como, por exemplo, estímulo ao investimento em fixação biológica de nitrogênio e diversificação de cultivos, baseando-se em assistência técnica agrícola adequada.

A assistência técnica eficiente no país torna-se a melhor alternativa no contexto atual, visto que permite a comunicação, capacitação e prestação de serviços direto ao produtor, preservando e recuperando os recursos naturais disponíveis sem impactar no valor bruto da produção. Entretanto, apenas 19% dos estabelecimentos rurais brasileiros receberam a assistência técnica agrícola adequada (IBGE, 2018), sendo o restante dependentes da opinião dos vendedores de insumos, consumindo ainda mais fertilizantes e exacerbando a pressão sobre os recursos naturais. A deficiência de assistência técnica é agravada pelo nível de capacitação baixo de muitos agricultores (IBGE, 2009), o que se reflete na não adoção de tecnologias, não utilização de práticas culturais de rotação adequadas e, conseqüentemente, perdas de produção e uso crescentes de insumos (CASTRO, 2015).

Comparado à colheita contínua, a rotação de cultura ajuda a manter ou melhorar a produtividade com menor aplicação de fertilizante nitrogenado (BERZSENYI *et al.*, 2000; MEYER-AURICH, 2006; CAI *et al.*, 2014), reduzindo as emissões, sem comprometer o retorno econômico aos produtores. Por exemplo, o cereal rotacional com soja apresenta maior rendimento em relação ao contínuo, com menos entrada de nitrogênio (CAI *et al.*, 2014). O uso de ferramenta de dosagem de cálculo adequada, de cultivares mais adaptados às condições locais de solo e clima, bem como o gerenciamento de irrigação, acompanhado com a fertirrigação²⁶, equilibram a aplicação de N com outras alterações nutricionais, aprimorando a

²⁶ Aplicação de fertilizante via água de irrigação. (ZHANG *et al.*, 2015b)

eficiência de uso (CASSMAN *et al.*, 2003; NEWELL PRICE, *et al.*, 2011; SNYDER *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2015b).

Por outro lado, alguns estudos revelam que a tributação de fertilizantes nitrogenados não seria uma boa opção para mitigar as emissões de GEE's (BODIRSKY, 2009; MEIKLE, 2018), diferentemente da taxação de carbono (KEOHANE; OLMSTEAD, 2016), relatando que poderia ter efeito contrário (BODIRSKY, 2009). Cai *et al.*, (2014) observaram que a alteração do preço de fertilizante nitrogenado em 50%, não teria efeito significativo nas decisões de plantio. Por outro lado, se o preço do milho pudesse ser reduzido em 83%, o nível de aplicação de nitrogênio seria zero, porém, nesse cenário, a oferta de milho seria insuficiente para atender a demanda mundial (CAI *et al.*, 2014). Na China, por exemplo, nos anos 1990, os subsídios aos fertilizantes oferecidos aos produtores fizeram com que a EUN do país fosse a menor do mundo, atingindo valores de 25% em 2010 (LI *et al.*, 2013; SINGH; NARAYANAN, 2015; ZHANG *et al.*, 2015b). Logo, alteração no preço da cultura poderia ser mais eficaz para influenciar na taxa de aplicação de fertilizante, consequentemente a de emissão de N₂O.

Ademais, estudos sobre demanda de cereais concluíam que mudanças na dieta poderiam minimizar as emissões de GEE's (LASSALETTA *et al.*, 2014; 2016; REIS *et al.*, 2016). E, à medida que a renda das famílias pobres aumenta, há afastamento no consumo de cereal, justificado por preferências na diversificação da cesta básica, consumindo mais frutas, verduras e carnes (MITTAL, 2007). Logo, indiretamente isso poderia tornar o preço do cereal mais baixo, fazendo com os produtores se especializem em outras culturas, demandando menos fertilizantes nitrogenados.

De maneira geral, os resultados desta pesquisa demonstraram que a intensificação agrícola ocorrida no Brasil no período de 1994-2018 está relacionada ao aumento do uso de fertilizantes por área, o que poderia estar se traduzindo, em partes, em elevadas emissões de CO_{2eq.} no período. A EUN estimada em 2018 para o país está abaixo dos valores desejáveis para a América Latina, o que indica que as metas de redução dos GEE's até o fim do século podem ser comprometidas. A região Sudeste foi considerada a mais ineficiente no uso do fertilizante sintético e o Sul a maior emissora de N₂O para a atmosfera, em média, no período. Em termos de demanda por fertilizantes nitrogenados, enquanto o preço dos cereais continuar se valorizando, maior será o consumo desse insumo. Aumentar a produtividade e produção baseando-se em intensificação sustentável compreende um dos caminhos alternativos de

mudança ambiental futura, visto que o *trade-off* entre crescimento econômico e impacto ambiental sempre existirá, mas pode ser minimizado.

Conclui-se nessa pesquisa que a eficiência agroambiental do uso de nitrogênio na produção cerealífera se distingue temporalmente entre as diferentes regiões brasileiras, sendo a mais eficiente a região Centro-Oeste e a de menor eficiência a região Sudeste. A demanda por fertilizante nitrogenado sintético responde significativamente ao preço do cereal e à produção cerealífera, bem como a quantidade passada consumida. O uso crescente de nitrogênio na produção de cereais contribuiu, em partes, com as emissões de óxido nitroso.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desta pesquisa foi analisar o comportamento da demanda de fertilizantes nitrogenados para a produção de cereais no Brasil. O estudo também demonstrou o panorama da produção cerealífera nas dimensões estadual e regional, bem como o consumo passado do fertilizante. A análise da (in)eficiência do uso do nitrogênio foi apresentada, assim como o impacto resultante do uso de N em termos de emissões de GEE. As emissões de N₂O representam uma das principais consequências ambientais negativas do uso crescente de fertilizantes nitrogenados sintéticos, com valores que se distinguiram entre as regiões.

Os principais resultados demonstraram que o produtor, ao demandar os fertilizantes químicos a base de nitrogênio, leva em consideração, principalmente, o preço da cultura cerealífera e a produção que deseja cultivar, sempre em busca de ganhos econômicos. A inércia de uso passado de fertilizantes pelos produtores demonstra a dificuldade ou a falta de conhecimento de aprimoração produtiva. O desejo de se obter ganhos econômicos crescentes e, ou, a falta de conhecimento técnico supera a racionalidade de aplicação adequada de fertilizantes, gerando ineficiência de uso, perdas econômicas e ambientais.

O crescimento da produção de cereais no Brasil foi devido, em parte à intensificação agrícola ocorrida e não à extensificação de terras, visto que área destinada à cultura se manteve praticamente constante no período estudado. A produção cerealífera respondeu ao uso de fertilizantes sintéticos, porém, a dose de aplicação não foi otimizada. Concomitantemente, regiões mais desenvolvidas economicamente, como o Sudeste, tiveram doses anuais por área superiores à média brasileira, enquanto isso, regiões menos desenvolvidas, como o Nordeste, tiveram menores aplicações de nitrogênio. Esse desequilíbrio de uso se traduziu em ineficiência discrepante para ambas regiões.

A eficiência de uso de fertilizantes nitrogenados no Brasil vem decrescendo, mesmo com taxas anuais baixas. Porém, regiões como o Nordeste, apresentam decréscimo da eficiência superior às demais, resultado que é preocupante, visto que nessa região grande parte da população está em situação de pobreza e vulnerabilidade ambiental. Por outro lado, estados do Centro-Oeste se destacam na eficiência de uso de nitrogênio devido aos investimentos no setor agrícola, gerando maior retorno e capacidade de aprimoramento produtivo.

É evidente que as condições edafoclimáticas e econômicas às quais estão submetidas as regiões também podem impactar no uso de fertilizantes. No entanto, atenção devida deve ser dada, visto que a eficiência agroambiental aqui considerada leva em questão o seu uso racional

e não a disponibilidade de usar pouco ou muito. Existem áreas ricas e eficientes, mas também podem existir áreas pobres e eficientes.

O uso crescente de fertilizantes na produção de cereal no Brasil foi responsável, em partes, pela emissão de quase 9 milhões de toneladas de CO_{2eq.} em 2018, com participação expressiva dos estados do Sul e do Sudeste. Portanto, otimizar o uso de fertilizantes químicos minimizaria as emissões, sem impactar no rendimento da produção. A aplicação de nutriente correto, na dose certa, no momento mais adequado e no local requerido poderia aumentar ainda mais a produção, minimizando impactos sobre o meio ambiente.

A assimetria regional presente no Brasil resultou em diferentes resultados de eficiência de uso de nitrogênio, bem como de emissão de gases de efeito estufa, o que justifica estudos em níveis mais desagregados. Os resultados aqui encontrados são importantes tanto para a sociedade como para as entidades públicas governamentais. Os produtores respondem mais ao preço de cereal, o que inviabilizaria a princípio taxações em fertilizantes com objetivo de reduzir a demanda. Por outro lado, é necessária atenção para as áreas de baixa dosagem de fertilizante nitrogenado, devido ao empobrecimento do solo, comprometendo a segurança alimentar da população local. Em regiões de elevada dosagem, mecanismos de incentivos a fixação biológica de nitrogênio podem ser eficazes para minimizar o uso de nitrogênio sintético por área.

Mesmo o cereal sendo base alimentar tanto para humanos quanto animais, mecanismos de política social e de renda podem contribuir com a diversificação da cesta alimentar, consequentemente tornando as culturas agrícolas mais rotativas e dinâmicas. Incentivar e possibilitar à população uma dieta mais diversificada contribuiria com menor uso de fertilizantes sintéticos e menores taxas de emissão de N₂O. Convencer os agricultores, oferecer assistência agrícola eficiente e meios para investirem em técnicas de intensificação agrícola sustentável otimizaria o uso de insumos, tornando a produção mais econômica e ambientalmente correta.

Melhorias da eficiência do uso de nitrogênio na produção agrícola são críticas para enfrentar os maiores desafios da humanidade. Obter segurança alimentar, com a menor degradação ambiental possível, num ambiente de mudanças climáticas exige não somente aprimoramento do lado da produção, mas também de todos os consumidores, visto que mesmo que os impactos resultantes da ineficiência do uso de nitrogênio venham de regiões distintas ou

distantes, os impactos negativos são sentidos em escala global, comprometendo a sociedade como um todo.

REFERÊNCIAS

ACHEAMPONG, K.; DICKS, M. R. Fertilizer Demand for Biofuel and Cereal crop Production in the United States. **Research in Agricultural and Applied Economics**, v. 01, p. 1- 34, 2012.

AGIODA, A. *et al.* Conferência sobre agricultura e meio ambiente. Viçosa: UFV, NEPEMA, 1994

AINSWORTH, E. A.; ROGERS, A.; LEAKEY, A. D. B. Targets for crop biotechnology in a future high-CO₂ and high-O₃ world. **Plant Physiology**, v.147, p.13-19. 2008.

ANGELSEN, A.; KAIMOWITZ, D. When does technological change in agriculture promote deforestation . In: Lee, D. R., Barret, C. B. (eds.). Trade offs or synergies?: agricultural intensification, economic development and the environment. Wallingford, Oxon, UK, Wallingford, Oxon, UK, CAB International. CAB International. p. 89 – 114, 2001.

ARAÚJO-FILHO, O. A. **Co-integração e causalidade na política de garantia de preços mínimos e preços agrícolas: o caso do milho no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Economia Rural) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

ARENHARDT, E. G. *et al.* The nitrogen supply in wheat cultivation dependent on weather conditions and succession system in southern Brazil. **African Journal of Agricultural Research**. v, 10, nº48, 2015.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS – ANDA. Anuários Estatísticos 1994 – 2018. Disponível em: < <http://www.anda.org.br>> Acesso em Setembro de 2019.

ATLAS DO AGRONEGÓCIO 2018 – Disponível em: < <https://br.boell.org/pt-br/atlas-do-agronegocio>> Acesso em Fev. 2019.

AZEEM, M. *et al.* Biochar improves soil quality and N₂-fixation and reduces net ecosystem CO₂ exchange in a dryland legume-cereal cropping system. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 172-182, 2019.

BARBOSA FILHO, M.P.; SILVA, O. F. Adubação de cobertura do feijoeiro irrigado com uréia fertilizante em plantio direto: um ótimo negócio. *Informações Agrônomicas*, Piracicaba, n.93, p.1-5, 2001.

BEATTIE, B. R.; TAYLOR, R. C. “The Economics of Production.” John Wiley and Sons, Inc. 1985.

BECKMANN, M. *et al.* Conventional land-use intensification reduces species richness and increases production: a global meta-analysis. **Global Change Biology**, v. 25, p. 1941–1956, 2019.

BELLIDO, L. L.; BELLIDO, R. J. L.; REDONDO, R. Nitrogen efficiency in wheat under rainfed Mediterranean conditions as affected by split nitrogen application. **Field Crops Research**, v. 94, p. 86-97, 2005.

BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R.; SUTILI, V. R. Relação entre temperatura e o aparecimento de fases fenológicas do milho (*Zea mays* L.). **Agronomia Sulriogradense**, Porto Alegre, v. 20, p. 111-132, 1984.

BERNHARD, A. The Nitrogen Cycle: Processes, Players, and Human Impact. **Nature Education Knowledge**, v.2, n°2, p. 1-9, 2010.

BERZSENYI, Z. *et al.* Effect of crop rotation and fertilisation on maize and wheat yields and yield stability in a long-term experiment. **European Journal of Agronomy**, v. 13, n°2, p.225-244, 2000.

BODIRSKY, B. L. **The Impact of Industrial Nitrogen Fertilizer Taxation on Agricultural N₂O Emissions, Agricultural Production and Food Prices**. Monografia. Wirtschafts- und Sozialwissensch aftlichen Fakultät der Universität Potsdam. p.112. Berlim. 2009.

BODIRSKY, B. L. *et al.* N₂O emissions from the global agricultural nitrogen cycle – current state and future scenarios. **Biogeosciences**, v. 9, p.4169-4197, 2012.

BODIRSKY, B. L., MÜLLER, C. Robust relationship between yields and nitrogen inputs indicates three ways to reduce nitrogen pollution. **Environmental Research Letters**, v.9, n.11, 2014.

BOMMARCO, R.; VICO, J.; HALLIN, S. Exploiting ecosystem services in agriculture for increased food security. **Global Food Security**, v. 17, p. 57-63, 2018.

BORLAUG, N. Feeding a Hungry World. **Science**, v. 318, n°. 5849, p.359 – 379, 2007.

BORTOLI, M. *et al.* Emissão de óxido nitroso nos processos de remoção biológica de nitrogênio de efluentes. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 01-06, Mar. 2012.

BOUWMAN, A. F. *et al.* Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 16, doi: 10.1029/2001GB001811, 2002.

BOUWMAN, L. *et al.* Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900–2050 period. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the U. S. A**, v.110, n.52, p.20882-20887, 2013.

BRAGA, Y. C. P. **Uma análise da demanda de gás natural no brasil: uma perspectiva metodológica**. Dissertação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio De Janeiro. p. 99. 2014.

BRENDER, J. D. Human health effects of exposure to nitrate, nitrite, and nitrogen dioxide. *Just Enough Nitrogen: Perspectives on How to Get There for Regions with too Much and too Little Nitrogen*. Editora: M A Sutton (Berlin: Springer). 2016.

BRINK, C. *et al.* Costs and benefits of nitrogen in the environment, in: *The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives*, Cambridge University Press, 2011.

BROCH, D. L.; RANNO, S. K. Fertilidade do solo, adubação e nutrição da cultura da soja. In: Tecnologia e Produção: Soja e Milho 2011/2012. Fundação MS, Maracaju-MS, 2012.

BUAINAIN, A. M.; GARCIA, J. R.; VIEIRA FILHO, J. E. R. V. Dinâmica da economia e da agropecuária no Matopiba. IPEA. Rio de Janeiro. 2017.

BURRELL, A. The demand for fertiliser in the United Kingdom. Annual Conference of the Agricultural Economics Society at Manchester in April 1988. Dez/1989.

CAI, R. *et al.* The impact of crop price on Nitrous Oxide Emissions: A dynamic programming approach. **Agricultural & Applied Economics Association's 2014 AAEA**. Minneapolis. 2014.

CASARIN, V. Eficiência no uso de nutrientes: Comparações na agricultura brasileira e mundial. **International Plant Nutrition Institute**. 2015.

CASSMAN, K. G. A. *et al.* Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 28, p.315-358, 2003.

CASTRO, C. N. A agropecuária na região Sul: limitações e desafios futuros. IPEA. Rio de Janeiro. 2014.

CASTRO, C. N. Desafios da Agricultura Familiar: O Caso da Assistência Técnica e Extensão Rural. Boletim Regional, Urbano e Ambiental, 2015.

CHEN, X. G. *et al.* Suitable nitrogen rate for storage root yield and quality of sweet potato. **Plant Nutrition and Fertilizer Science**, v. 21, nº4, p. 979-986, 2015.

CLARK, M.; TILMAN, D. Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. **Environmental Research Letters**, v. 12, Jun. 2017.

COELHO, A. M. *et al.* Nitrogen (15N) balance on a dark red latosol under "cerrado" vegetation cultivated with maize. **AGRIS Since**, v. 15, n.2, p.187-193, 1991.

COELHO, A. M. *et al.* Fertilidade de solos. In: Sistemas de Produção, 2. Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas-MG, 2008.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS - CFSEMG. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação. Viçosa, MG: 1999.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Disponível em: <<http://consultaweb.conab.gov.br/consultas/consultaInsumo.do?method=acaoCarregarConsulta>> Acesso em: 02. Mai. 2019.

CONSTATIN, J. *et al.* Large-scale assessment of optimal emergence and destruction dates for cover crops to reduce nitrate leaching in temperate conditions using the STICS soil-crop model. **European Journal of Agronomy**, v.69, p. 75-87, 2015.

CORRÊA, R. S. *et al.* Fluxos de óxido nitroso e suas relações com atributos físicos e químicos do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, nº9, p.1148-1155, Set/2016.

COSTA, L. *et al.* Parcelamento da adubação nitrogenada no desempenho produtivo de genótipos de trigo. **Revista Ciência Agronômica**. v. 44, nº02, Junho, 2013.

CRIST, E.; MORA, C.; ENGELMAN, R. The interaction of human population, food production, and biodiversity protection. **Science**, v.356, n.6335, p.260-264, Abr. 2017.

CRUTZEN, P. J. *et al.* N₂O Release from Agro-biofuel Production Negates Global Warming Reduction by Replacing Fossil Fuels. In: Crutzen P., Brauch H. (eds) Paul J. Crutzen: A Pioneer on Atmospheric Chemistry and Climate Change in the Anthropocene. SpringerBriefs on Pioneers in Science and Practice, vol. 50, p.227-238, 2008.

DAUBERMANN, E. C. *et al.* Expansão da área agrícola e produtividade das culturas no Brasil: testando hipóteses da legislação californiana de biocombustíveis. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 52, n.1, p. 081-098, Mar. 2014.

DEBRUIN, J.; BUTZEN, S. *Nitrogen Uptake in Corn*. In: Crop Insights, 2015.

DE KLEIN, C. A. M. *et al.* N₂O Emissions from Managed Soils, and CO₂ Emissions from Lime and Urea Application. In: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. v.4, p. 11.1-11.54. 2006.

DENBALY, M.; VROOMEN, H. Dynamic Fertilizer Nutrient Demands for Corn: A Cointegrated and Error-Correcting System. **American Journal Agricultural Economics**, v.75, p.203-209, Fev/1993.

DOBERMANN, A. Nitrogen Use Efficiency – State of the Art. IFA International Workshop on Enhanced-efficiency Fertilizers, Frankfurt, Germany, International Fertilizer Industry Association (IFA), Paris. Paper 316.p. 28-30 Jun/2005.

DOBERMANN A. Nutrient use efficiency – measurement and management. In: Fertilizer best management practices. General principles, strategy for their adoption and voluntary initiatives vs regulations. IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices. Brussels, Belgium, p. 1-28. 2007.

DU, X. *et al.* Split application of reduced nitrogen rate improves nitrogen uptake and use efficiency in sweetpotato. **Scientific Reports**, v.9, nº 14058, 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. 2018a. Visão 2030. O futuro da Agricultura brasileira. Disponível em: <
<https://www.embrapa.br/documents/10180/9543845/Vis%C3%A3o+2030+->

[+o+futuro+da+agricultura+brasileira/2a9a0f27-0ead-991a-8cbf-af8e89d62829>](https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/38520821/braquiaria-consorciada-com-graos-pode-dobrar-produtividade-no-sealba) Acesso em Março 2020.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. 2018b. Braquiária consorciada com grãos pode dobrar produtividade no SEALBA. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/38520821/braquiaria-consorciada-com-graos-pode-dobrar-produtividade-no-sealba>> Acesso em 30/set/2019.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crop Plant. **Advances in Agronomy**. v, 88, p. 97-185, 2005.

FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P. Nitrogen use efficiency in lowland rice genotypes. **Journal Communications in Soil Science and Plant Analysis**. 2006

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Improving nutrient use efficiency of annual crops in Brazilian acid soils for sustainable crop production. **Journal Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v.32, 2007.

FAGERIA, N. K. *et al.* Nitrogen use efficiency in dry bean genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, v. 36, p.2179-2190, Nov/2013.

FERNANDES, F. C. S. *et al.* Doses, eficiência e uso de nitrogênio por seis cultivares de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.4, nº 2, p.195-204, 2005.

FERREIRA, S. M. P.; BOTELHO, L. O emprego industrial na Região Norte: o caso do Polo Industrial de Manaus. **Estudos Avançados**, v.28, nº81, p.141-154, 2014.

FERREIRA, I. E. P. **Modelos de regressão e curvas de produção vegetal: aplicações nas áreas de nutrição mineral de plantas e adubação**. Tese. Universidade de São Paulo. 134 p. Piracicaba, 2015a.

FERREIRA, M. D. P. **Climate Change, farm size and land use in Brazilian Legal Amazon**. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, p.105. 2015b.

FILHO, J. I. S. *et al.* Potencial do Matopiba na produção de aves e suínos. **Revista de Política Agrícola**, v. 01, n. 02, p.90-102. Abr/Mai/Jun/ 2016.

FISCHER, J. *et al.* We Need Qualitative Progress to Address the Food-Biodiversity Nexus: A Reply to Seppelt *et al.* **Trends in Ecology & Evolution**, v. 32, n.9, p.632-633, 2017.

FIXEN, P. *et al.* Nutrient/fertilizer use efficiency; measurement, current situation and trends. Chapter 1 in Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification. IFA/IWMI/IPNI/IPI. 2014

FOLEY, J. A. *et al.* Solutions for a cultivated planet. **Nature**, v. 478, p. 337–342, 2011.

FORSTER, P. *et al.* Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, et al, editores. Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press; p.131–234. 2007.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. Fertilizer requirements in 2015 and 2030 revisited. Roma. FAO 2000. Disponível em: <<http://www.fao.org/tempref/agl/agll/docs/fertreqrev.pdf>> Acesso em: 01. Mai. 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. Fertilizer requirements in 2015 and 2030 revisited. 2004. Land and Plant Nutrition Management Service Land and Water Development Division. 2004.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. “Climate-Smart” Agriculture Policies, Practices and Financing for Food Security, Adaptation and Mitigation. 2010. p.349. 2010.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. The State of Food Insecurity in the World . 2012. Economic growth is necessary but not sufficient to accelerate reduction of hunger and malnutrition. Disponível em < <http://www.fao.org/3/a-i3027e.pdf>>. Acesso em: Fev.2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO 2013. FAO statistical yearbook 2013 world food and agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma. p. 307, 2013.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Boletín de la Seguridad Alimentaria y Nutricional. Oficina Regional de La FAO para America Latina y Caribe. ENE. Mar. 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i7369s.pdf>> Acesso em 30/set/2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO 2018. Disponível em < <https://nacoesunidas.org/fome-aguda-afeta-113-milhoes-de-pessoas-no-mundo-diz-relatorio-da-onu/amp/>> e <<http://www.fao.org/3/I9553ES/i9553es.pdf>>. Acesso em 10. Jun. 2019.

FORNAZIER, A.; VIEIRA FILHO, J. E. R. Heterogeneidade estrutural na produção agropecuária: uma comparação da produtividade total dos fatores no Brasil e nos Estados Unidos. Brasília: Ipea, 2013.

FREEMAN, K. W.; RAUN, W. R. Advances in Nitrogen Handling Strategies to Increase the Productivity of Wheat. In: Buck H. T. Nisi, J. E.; Salomón, N. Wheat Production in Stressed Environments. **Developments in Plant Breeding**, v. 12, 2005.

FREITAS, R. E.; MACIENTE, A. N. Culturas agrícolas líderes nas mesorregiões mais dinâmicas. Radar da Tecnologia, Produção e Comércio Exterior, n. 43, p. 63-74, fev. 2016.

FREITAS, R. E.; MENDONÇA, M. A. A. Expansão Agrícola no Brasil e a Participação da Soja: 20 anos. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v.54, n. 3, p.497-515, 2016.

FRITZSONS, E. **Avaliação Do Impacto Da Contaminação Por Nitrogênio Na Bacia Hidrográfica Cárstica De Fervida/Ribeirão Das Onças - Colombo/Pr**. Dissertação. Universidade Federal do Paraná. 186p. Curitiba, 1999

GASQUES, J. G. *et al.* Total factor productivity in Brazilian agriculture. In: FUGLIE, K. O.; WANG, S. L.; BALL, V. E. (Ed.). Productivity growth in agriculture: an international perspective. Oxfordshire: CAB International, p. 145-162, 2012.

GAZZONI, D. L. Como alimentar 10 bilhões de cidadãos na década de 2050? **Ciência e Cultura**, São Paulo, v.69, n.04, p. 33-38, 2017.

GITTI, D. C. Manejo da adubação do milho safrinha, in: Tecnologia e Produção: Milho safrinha 2014. Fundação MS, Maracaju-MS, 2014.

GODFRAY, C.J. *et al.* Food security: The challenge of feeding 9 billion people. **Science**, v. 327, n. 5957, p. 812–818, 2010.

GOOD, A. G.; BEATTY, P. H. Fertilizing Nature: A Tragedy of Excess in the Commons. **PLoS Biology**, v.9, n°8, 2011.

GUNJAL, K. R. *et al.* Fertilizer demand functions for five crops in the United States. **Southern Journal of Agricultural Economics**, v. J-9759, n° 2102. p.111-116, 1980.

HOLMES, W.; ALDRICH, D. T. A. Nitrogen ous fertilizers and the production of crops and grass. **Proceeding of the Nutrition Society**, v.16, p.9–14, 1957

HOBEN, J. P. *et al.* Nonlinear nitrous oxide (N₂O) response to nitrogen fertilizer in on-farm corn crops of the US Midwest. **Global Change Biology**, v.17, p.1140–1152, 2011.

HOUGHTON, J. T. *et al.* Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group it o the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press; 2001

HUFFMAN, W. E.; JIN, Y.; XU, Z. The economic impacts of techonology and climate change. New evidence from U.S. corn yields. **Agricultural Economics**, v.49, n.4, p. 407-545, 2018.

HULME, M. F. *et al.* Conserving the birds of Uganda's banana-coffee arc: Land sparing and land sharing compared. **PLOS ONE**, v.8, n.2, p.1-12, 2013.

INÁCIO, S. R. F. Produção e comercialização de insumos para produção de fertilizantes: Um panorama mundial e os paradigmas do Brasil. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Grupo de Extensão e Pesquisa em Logística Agroindustrial – ESALQ-LOG. p.18, 2013.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE 2010. Mapas de solos do Brasil. Disponível em: <<https://mapas.ibge.gov.br/tematicos/solos>> Acesso em Agosto/2019a.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE 2018. Atlas Escolar. Disponível em < <https://atlascolar.ibge.gov.br/>> Acesso em Agosto/2019b.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA – IEA. Mercado de fertilizantes: aumento das importações preocupa. **Análise e Indicadores do Agronegócio**. v. 13, nº4, Abr2018.

INTERNATIONAL COFFEE COUNCIL – ICC. Study on fertilizer prices. International Coffee Organization. v.102, nº2, Mar/2009.

INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION – IFA . 2002. Fertilizer use by crop. Rome: IFA, IFDC, IPI, PPI, FAO; 2002. Disponível: <http://www.fertilizer.org/En/Knowledge_Resources/Library/IFA_Selection_Fertilizer_Use.aspx> Acesso em Abril/2019.

INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION – IFA. 2012 Plant Nutrition. Disponível em: < <https://www.fertilizer.org/>> 2012. Acesso em Set/2019.

INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION – IFA. 2014. Plant Nutrition. Disponível em: < https://www.fertilizer.org/Public/About_fertilizers/About_Plant_Nutrition/Public/About_Fertilizers/About_Plant_Nutrition.aspx#what-are-fertilizers> 2014, Acesso em Set/2019.

JANKOWSKI, K. *et al.* Deep soils modify environmental consequences of increased nitrogen fertilizer use in intensifying Amazon agriculture. **Scientific Reports**. v.8, n.13478, p.1-11, set. 2018.

JARECKI, M. K. *et al.* Cover crop effects on nitrous oxide emission from a manure-treated Mollisol. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.134, p.29–35, 2009.

JOHNSTON, A. E.; POULTON, P. R. Nitrogen in Agriculture: An Overview and Definitions of Nitrogen Use Efficiency. **Proceedings International Fertiliser Society**, v.651, 2009.

JU, X. Tang. *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the U. S. A**, v. 106, n. 19, p. 3041-3046, 2009.

KEOHANE, M. N. O.; OLMSTEAD, S. M. Markets and the Environment. Island Press, Washington. 2016.

LADHA, J. K. *et al.* Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospect and prospect. **Advances in Agronomy**, v. 87, p. 86-156, 2005.

LARA CABEZAS, W. A. R. *et al.* Imobilização de nitrogênio da uréia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou cobertura na cultura de milho, no sistema plantio direto. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.29, p. 215-226, 2005.

LASSALETTA, L. *et al.* 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. **Environmental Research Letters**, v.9, n.10, 2014.

LASSALETTA, L. *et al.* Nitrogen use in the global food system: past trends and future trajectories of agronomic performance, pollution, trade, and dietary demand. **Science-Environmental Research Letters**, v.11, Set. 2016.

LEAL, F. T. **Produtividade, qualidade e eficiência de uso do nitrogênio de cultivares de feijoeiro comum.** Tese. Universidade Estadual Paulista UNESP. Campus Jaboticabal. p.63, 2019.

LEONARD, P. L. A Note on the Demand for Fertilizer in West Pakistan. **The Pakistan Development Review**, v.9, nº4, p.419-425, 2014.

LI, Y. *et al.* An analysis of China's fertilizer policies: impacts on the industry, food security, and the environment. **Journal of Environmental Quality**, v.42, nº 4, p.972-981, 2013.

LIANG, B. C.; MACKENZIE, A. F. Corn yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency as influenced by nitrogen fertilization. **Canadian Journal of Soil Science**, Manitoba, v. 74, n. 2, p. 235-240, 1994.

LIEBIG, J. V. **Organic chemistry in its applications to agriculture and physiology.** Londres. Taylor and Walton, 387p. 1840.

LINQUIST, B. *et al.* An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops. **Global Change Biology**, v.18, p.194–209, 2012.

LOICK, N. Denitrification as a source of nitric oxide emissions from incubated soil cores from a UK grassland soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 95, p. 1-7, Abr. 2016.

MAHJOURIMAJD, S. *et al.* Evaluation of Australian wheat genotypes for response to variable nitrogen application. **Plant Soil**, v. 399, p. 247–255, 2016.

MARIS, S. C. *et al.* Effect of irrigation, nitrogen application, and a nitrification inhibitor on nitrous oxide, carbon dioxide and methane emissions from an olive (*Olea europaea L.*) orchard. **Science of the Total Environmental**, v. 538, p.966-978, 2015.

MEIKLE, S. A nitrogen tax for Agriculture. Agricultural and Rural Actors Working together for good food, good farming and better rural policies in the EUA. 2018. Disponível em: <<http://www.arc2020.eu/nitrogen-tax-agriculture/>> Acesso em Nov/2019.

MERGOS, G. J.; STOFOROS, CH, E. Fertilizer demand in Greece. **Agricultural Economics**, v.17, p.227-235, 1997.

MEYER-AURICH, A. *et al.* Cost efficient rotation and tillage options to sequester carbon and mitigate GHG emissions from agriculture in Eastern Canada. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 117, n°2, p.119-127, 2006.

MICROBIAL LIFE – Educational Resources. The Gulf of Mexico Dead Zone. 2018. Disponível em: < <https://serc.carleton.edu/microbelife/topics/deadzone/index.html>> Acesso em Março 2020.

MIRANDA, E. E. Matopiba: desenvolver a agricultura ou os agricultores? *Correio Brasiliense*, 30 abr. 2015.

MITSCHERLICH, E. A. **Das gesetz des minimums und das gesetz des abnehmenden bodenertrages**. *Landwirtschaftliche Jahrbucher*, Berlim, v.38, p. 537-552, 1909.

MOSIER, A. R.; SYERS, J. K.; FRENEY, J. R. Agriculture and the Nitrogen Cycle. Assessing the Impacts of Fertilizer Use on Food Production and the Environment. **SCOPE**, v. 65, 2005.

MOSS, B. Water pollution by agriculture. **Biological Sciences**. v.363, n°1491, p.659-666, 2007.

MITTAL, S. What Affects Changes in Cereal Consumption? **Economic & Political Weekly**, v.42, n°5, p.444-447, 2007.

MUELLER, N. D, *et al.* Declining spatial efficiency of global cropland nitrogen allocation. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 31, n°2, p.245-257, 2017.

MYRBECK, Â. *et al.* Effects of autumn tillage of clay soil on mineral N content, spring cereal yield and soil structure over time. **European Journal Agronomy**, v. 37, p. 96 - 104, 2012.

NASCENTE, A. S.; CARVALHO, M. C. S.; ROSA, P. H. Growth, nutrient accumulation in leaves and grain yield of super early genotypes of common bean. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 46, p.292-300, 2016.

NEWELL PRICE, J. *et al.* An Inventory of Mitigation Methods and Guide to their Effects on Diffuse Water Pollution, Greenhouse Gas Emissions and Ammonia Emissions from Agriculture. 2011. Disponível em: < <http://www.avondtc.org.uk/Portals/0/Farmscoper/DEFRA%20user%20guide.pdf> > Acesso em Out/2019.

NICOLELLA, A. C. *et al.* Determinantes da demanda de fertilizantes no Brasil no período de 1970 a 2002. **Revista de Economia Rural**, v.43, n°01, 2005.

OENEMA, O. *et al.* Nitrogen Use Efficiency (NUE) - an indicator for the utilization of nitrogen in agriculture and food systems. **EU Nitrogen Expert Panel**, v. 47, Dez. 2015.

OLIVEIRA, A. J. Fertilidade do solo e nutrição mineral da soja. Circular Técnica 62, Embrapa Soja, Londrina-PR, 2008.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU 2015. Mundo precisará produzir 70% mais alimentos até 2050. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/mundo-precisara-produzir-70-mais-alimentos-ate-2050-calcula-onu/>>. Acesso em: 22. fev. 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU 2019. World Population Prospects 2019. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf>. Acesso em: 04/Jan/2020.

PARIKH, S. J.; JAMES, B. R. Soil: The foundation of Agriculture. **Nature Education**, v.3, nº10, 2012.

PARRY, M. L. *et al.* Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. **Global Environmental Change**, v.14, n.1, p.53-67, 2004.

PESQUISA DE ORÇAMENTO FAMILIARES – POF – IBGE 2009 . Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/rendimento-despesa-e-consumo/9050-pesquisa-de-orcamentos-familiares.html?=&t=destaques>>. Acesso 02. Mai. 2019.

PHALAN, B. *et al.* Minimising the harm to biodiversity of producing more food globally. **Food Policy**, v. 36, p. S62–S71, 2011.

PIRES, M. V. *et al.* Nitrogen-Use Efficiency, Nitrous Oxide Emissions, and Cereal Production in Brazil: Current Trends and Forecasts. **PLOS ONE**, v.10, Ago. 2015.

PROCÓPIO, S. O.; SANTIAGO, A. D.; CARVALHO, H. W. L. Estudos de População de Plantas de Soja na Região do SEALBA. 2018. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 134. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Tabuleiros Costeiros . Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1095207/1/OKBP134ONLINEok.pdf>> Acesso em Janeiro/2020.

PROFETA, G. A.; BRAGA, M. J. Poder de mercado na indústria brasileira de fertilizantes NPK (04-14-08), no período de 1993-2006. **Revista Economia Sociologia Rural**, v.49, n.4, p.838-855. 2011.

PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL. Declaração de Verificação de Gases de Efeito Estufa. 2010. Disponível em: <https://www.engie.com.br/uploads/2019/04/Relat%C3%B3rio-Invent%C3%A1rio-de-Emiss%C3%B5es-Engie_2018_Portugues.pdf> Acesso em: 10.Mai.2019.

QIAO, J. *et al.* Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 146, p.103–112, 2012.

QUINKENSTEIN. *et al.* Biomass, Carbon and Nitrogen Distribution in Living Woody Plant Parts of *Robina pseudoacacia* L. Growing on Reclamation Sites in the Mining Region of Lower Lusatia (Northeast Germany). **Plant and Soil**, v.35, p.382-390, 2012.

RAMACIOTI, I. No tabuleiro do SEALBA tem... In Plant Project. p. 85-90. 2018. Disponível em: <<http://plantproject.com.br/novo/sexoes/revista/?r=27299694/63505924>>. Acesso em outubro/2019.

RAUN, W. R.; JOHNSON, G. V. Improving Nitrogen Use Efficiency for Cereal Production. **Agronomy Journal Abstract**, v. 91, n.3, p. 357-363,1999.

RAY, D. K. *et al.* Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. **Plos One**, v.8, n.6, e66428, 2013.

RAZA, S. *et al.* Piling up reactive nitrogen and declining nitrogen use efficiency in Pakistan: a challenge not challenged (1961–2013). **Environmental Research Letters**, v.13, nº13, 2018.

REIS, S. *et al.* Synthesis and review: Tackling the nitrogen management challenge: from global to local scales. **Environmental Research Letters**, v.11, nº12, 2016.

RIBEIRO, D. Processo de Haber – Bosch. **Revista de Ciência Elementar**, v.1, nº1, 2013.

ROBERTSON, G. P. Abatement of nitrous oxide, methane, and the other non-CO2 greenhouse gases: the need for a systems approach. In: Field CB, Raupach MR, editors. The global carbon cycle. Washington, DC: Island Press; p.493–506. 2004

ROBERTSON, G. P.; SWINTON, S. M. Reconciling agricultural productivity and environmental integrity: a grand challenge for agriculture. **Frontier Ecology Environmental**, v. 3, p.38-46, 2005.

ROBERTSON, G. P. *et al.* Nitrogen - climate interactions in US agriculture. **Biogeochemistry**. v. 114, p.41–70. 2013.

ROCKSTROM, J. *et al.* A safe operating space for humanity. **Nature**, v.461, p.472-475, 2009.

RUDEL, T. K. *et al.* Agricultural intensification and changes in cultivated areas, 1970 - 2005. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America – PNAS**, v. 106, nº49, p.20675-20680, 2009.

RUTTING, T. *et al.* Efficient use of nitrogen in agriculture. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.110, nº1,p.1-5, 2018

SAATH, K. C. O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, n.2, p.195-212, 2018.

SAHAR, Y. *et al.* Effect of split application of nitrogen fertilizer on growth and yield of hybrid rice (GRH1). **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v.6, p.1–5, 2012.

SANCHEZ, P. A. Soil Fertilizer and hunger in Africa. **Science**, v.295. p.2019-2020. 2002.

SAMUEL, A. L.; EBENEZER, A. O. Mineralization Rates of Soil Forms of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium as Affected by Organomineral Fertilizer in Sandy Loam. **Advances in Agriculture**, v.14, p.5. 2014.

SCHIPANSKI, M. E. *et al.* A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems. **Agriculture System**, v. 125, p.2–22, 2014

SCIENTIFIC AMERICAN. What Causes Ocean “Dead Zones”? - 2015. Disponível em: <<https://www.scientificamerican.com/article/ocean-dead-zones/>>. Acesso em Março 2020.

SEPPELT, R.; BECKMANN, M.; VACLAVIK, T. Searching for Win–Win Archetypes in the Food–Biodiversity Challenge: A Response to Fischer *et al.* **Trends in Ecology & Evolution**. Letter. v. 32, n.9, p.630-632, set. 2017.

SHARPLEY, A. N. *et al.* Agriculture as a potential source of water pollution. **Agriculture, hydrology and water quality**. p.4-5. 2002.

SINGH, A. P.; NARAYANAN, K. Impact of economic growth and population on agrochemical use: evidence from post-liberalization India. **Environment Development and Sustainability**. v. 17, nº6, 2015.

SILVA, C. L. *et al.* Nitrogen use efficiency is associated with chlorophyll content in Brazilian spring wheat. **Australian Journal of Crop Science**, v. 8, nº6, 2014a.

SILVA, C. L. *et al.* Caracterização de cultivares brasileiros de trigo em termos de eficiência no uso de nitrogênio. **Bragantia**, v. 73, nº 2, 2014b.

SILVA, A. J. C. **Eficiência do uso do Nitrogênio e desempenho agrônômico do milho em sistema de plantio direto na palha de Leucena no Trópico Úmido**. Dissertação. Universidade Federal do Maranhão. Chapadinha – MA, p.35, 2016.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA – SEEG. 2017 Disponível em: <http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2017/10/RelatoriosSeeg2017-Sintese_final.pdf> Acesso em: 28.Mar.2019.

SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE GASES – SEEG. 2018a. Observatório do Clima. Emissões do setor de Agropecuária. Documento de Análise 2018a. Disponível em<https://www.imaflora.org/downloads/biblioteca/Relatorios_SEEG_2018-Agro_Final_v1.pdf> Acesso em Outubro/2019.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA – SEEG. 2018b Disponível em: <<http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2018/08/Relatorios-SEEG-2018-Sintese-FINAL-v1.pdf>> . Acesso em 10. Jun. 2019

SISTEMA IBGE DE RECUPERAÇÃO AUTOMÁTICA – SIDRA – IBGE 2018. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/770>> e

<<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618#resultado>> e <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>>
Acesso em 02. Mai. 2019.

SMITH, P. F. Mineral analysis of plant tissues. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 13, p. 81-108, 1962.

SMITH, K. A. *et al.* Emissions of N₂O and NO associated with nitrogen fertilization in intensive agriculture, and the potential for mitigation. **Soil Use Management**, v.13, p.296–304, 1997.

SNYDER, C. *et al.* Agriculture: sustainable crop and animal production to help mitigate nitrous oxide emissions. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 9, p.46-54, 2014.

STEIN, L. Y.; KLOTZ, M. G. The Nitrogen Cycle. **Current Biology**, v. 26, n. 3, p. R94–R98, 2016.

STEINER, M. P. **A partial equilibrium analysis of global fertilizer supply and demand.** Tese. Faculty of the Graduate School University of Missouri.p118. Mai/2014.

SUN, L. *et al.* Effects of nitrogen fertilizer application time on dry matter uptake and yield of Chinese potato variety KX 13. **Potato Research**, v. 55, p. 303–313, 2012.

SUSTAINABLE DEVELOPMENT SOLUTIONS NETWORK – SDSN. Indicators and a Monitoring Framework for the Sustainable Development Goals. 2015.

SUTTON, M. A. *et al.* The European Nitrogen Assessment. Cambridge University Press, Cambridge, 2011.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia Vegetal*. Editora: Artmed. 3^a Edição. 2006.

TENKORANG, F.; DEBOER, J. L. Forecasting long-term global fertilizer demand. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 83, n. 3, p.233-247, Out. 2008.

THOMAZELLA, C. Sete fatores que afetam os preços dos adubos. 2019. AGROMOVE. Disponível em: <<https://blog.agromove.com.br/7-fatores-influenciam-precos-adubos/>> Acesso em Agosto/2019.

TILMAN, D. *et al.* Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the U. S. A.**, v.108, n.50, p. 20260-20264, Dez. 2011.

TKACHUK, R. Calculation of the nitrogen-to-protein conversion factor. In: Hulse JH, Rachie KO, Billingsley LW. Nutritional standards and methods of evaluation for food legume breeders. Ottawa: **International Development Research Centre (IDRC)**; p.78-81, 1977.

TÔSTO, K. L. *et al.* Nitrogen Use Efficiency: A local and regional approach for Brazilian Agriculture. **RA'E GA: O Espaço Geográfico em Análise**. v.46, n° 3, p.125-139, 2019.

TROEH, F. R.; THOMPSON, L. M. *Soils and Soil Fertility*. Quinta Edição. Oxford University Press, 1993.

VAN RAIJ, B. *Fertilidade do solo e adubação*. São Paulo: Agronômica Ceres, p.58–178, 1991.

VIEIRA FILHO, J. E. R.; GASQUES, J. G.; SOUSA, A. G. de. Can Brazil feed the world? Not yet, but it has the potential! Rome: GFAR. (The Futures of Agriculture, Brief n. 33). Julho, 2012.

VIEIRA FILHO, J. E. R. Expansão da fronteira agrícola no Brasil: desafios e perspectivas. IPEA. Rio de Janeiro. Ago. 2016.

VITOUSEK, P. M. *et al.* Nutrient imbalances in agricultural development. **Science**, v.324, p. 1519-1520, Jun. 2009.

WANG, W. N. *et al.* Evaluating regional mean optimal nitrogen rates in combination with indigenous nitrogen supply for rice production. **Field Crops Research**, v.137, p. 37-48, 2012.

WESTHOEK, H. *et al.* Food choices, health and environment: Effects of cutting Europe's meat and dairy intake. **Global Environmental Change**, v.26, p.196–205. 2014.

WHITSON, A. R.; WALSTER, H. L. *Soils and soil fertility*. St. Paul MN: 1912. Webb. p. 73. Disponível em: <https://ia800906.us.archive.org/26/items/soilsandsoilfer00walsgoog/soilsandsoilfer00walsgoog.pdf>> Acesso em Janeiro/2020.

WOOLDRIDGE, J. M, *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*. p. 54. 2011.

YAN, *et al.* Two-year simultaneous records of N₂O and NO fluxes from a farmed cropland in the northern China plain with a reduced nitrogen addition rate by one-third. **Agriculture Ecosystems & Environment**. v. 178, p.38-50, Set/2018

YAN, *et al.* Rethinking sources of nitrogen to cereal crops. **Global Change Biology**, v. 26, nº1, p.191-199, 2019.

ZABEL, F. *et al.* Global impacts of future cropland expansion and intensification on agricultural markets and biodiversity. **Nature Communications**, v. 10, n. 2844, p. 1-10, 2019.

ZHANG, X. *et al.* The Economic and Environmental Consequences of Implementing Nitrogen-Efficient Technologies and Management Practices in Agriculture. **Journal of Environmental Quality**. Special Section. Fev/2015a.

ZHANG, X. *et al.* Managing nitrogen for sustainable development. **Nature**. v. 528, p.51.59, Nov/2015b.

ZHANG, X. *et al.* Response of nitric and nitrous oxide fluxes to N fertilizer application in greenhouse vegetable cropping systems in southeast China. **Scientific Reports**. v.6, nº 20700, Fev/2016.

ZHANG, X. *et al.* Agricultural sustainable intensification improved nitrogen use efficiency and maintained high crop yield during 1980–2014 in Northern China. **Science of The Total Environment**, v. 596-597, p.61-68, Oct.2017.

ZHANG, X. A plan for efficient use of nitrogen fertilizers. **Nature**, v.543, p.322-323, 2017.

APÊNDICES
APÊNDICE A

Tabela A1 - Consumo de fertilizantes a base de nitrogênio (ton), consumo de fertilizantes nitrogenados destinados a produção de cereais (ton), área plantada com cereais (ha), uso de fertilizantes por unidade de área plantada de cereais (kg/ha) e produção total de cereais no Brasil, entre os anos de 1994 e 2018.

Anos	Consumo de fertilizantes N (ton)	Consumo de Fertilizantes N/cereais (ton)	Área Plantada/ cereais (ha)	Uso de fertilizantes N/área (kg/ha)	Produção Total de cereais (ton)
1994	1.176.940	528.671.36	21.003.618	25,17	45.796.359
1995	1.134.645	494.710.62	20.038.897	24,69	49.591.823
1996	1.197.357	524.495.69	18.054.062	29,05	42.388.144
1997	1.305.598	556.350.76	18.082.036	30,77	44.826.093
1998	1.455.429	566.941.13	16.533.038	34,29	40.693.160
1999	1.393.049	573.525.93	18.304.177	31,33	47.583.030
2000	1.668.195	689.517.17	18.837.058	36,60	46.478.189
2001	1.639.915	677.047.49	18.731.972	36,14	57.076.319
2002	1.815.741	700.751.27	18.570.034	37,74	50.827.592
2003	2.223.075	865.500.96	20.288.051	42,66	67.404.571
2004	2.244.710	827.331.06	20.884.070	39,62	63.903.285
2005	2.201.404	757.500.60	19.945.418	37,98	55.342.592
2006	2.296.871	776.138.02	18.946.665	40,96	58.889.080
2007	2.750.830	969.571.59	19.698.351	49,22	69.205.762
2008	2.502.245	892.165.60	21.047.713	42,39	79.507.461
2009	2.555.885	882.140.07	20.512.305	43,01	70.738.098
2010	2.854.819	911.096.53	18.848.479	48,34	74.980.350
2011	3.366.341	1.070.274.53	19.661.372	54,44	77.438.807
2012	3.434.810	1.117.656.26	20.501.275	54,52	89.761.778
2013	3.698.486	1.195.106.34	21.458.040	55,70	100.777.195
2014	3.871.997	1.221.649.84	22.211.335	55,00	101.286.352
2015	3.532.721	1.076.029.04	21.634.410	49,74	105.925.334
2016	4.366.345	1.300.073.99	21.269.080	61,13	84.058.374
2017	4.377.438	1.362.552.14	22.923.229	59,44	117.877.940
2018	4.286.577	1.277.359.80	21.822.055	58,54	102.965.616
Média	2.534.057	872.566	19.992.270	43	69.812.932
Desv.Padrão	1.072.366,06	270.449,38	1.536.450,74	10,96	22.898.932,3

Fonte de dados: IBGE, ANDA, com dados trabalhados pela autora

Tabela A2 - Consumo de fertilizantes a base de nitrogênio (ton), consumo de fertilizantes nitrogenados destinados a produção de cereais (ton), área plantada com cereais (ha), uso de fertilizantes por unidade de área plantada de cereais (kg/ha) e produção total de cereais na região Norte, entre os anos de 1994 e 2018.

Anos	Consumo de fertilizantes N (ton)	Consumo de Fertilizantes N/cereais (ton)	Área Plantada/ cereais (ha)	Uso de fertilizantes N/área (kg/ha)	Produção Total de cereais (ton)
1994	4.466	2.585,20	1.125.752	2,30	1.867.111
1995	4.941	3.057,51	1.221.722	2,50	2.074.211
1996	6.322	3.835,08	1.070.987	3,58	1.567.776
1997	6.477	3.931,82	1.080.150	3,64	1.627.273
1998	11.406	7.011,82	1.174.124	5,97	1.745.384
1999	10.766	6.739,87	1.298.637	5,19	2.146.125
2000	13.731	8.568,18	1.281.538	6,69	2.016.192
2001	15.067	8.653,65	1.046.899	8,27	1.852.674
2002	17.197	9.507,00	991.187	9,59	1.762.160
2003	22.917	12.514,49	1.084.176	11,54	2.231.161
2004	23.927	12.625,51	1.181.419	10,69	2.525.954
2005	22.692	11.127,39	1.221.184	9,11	2.578.155
2006	27.211	12.246,96	1.042.595	11,75	2.111.144
2007	34.738	15.773,17	1.011.762	15,59	2.115.446
2008	31.206	13.837,25	998.780	13,85	2.326.714
2009	30.899	13.334,18	944.459	14,12	2.290.289
2010	33.113	13.594,85	911.820	14,91	2.343.697
2011	47.860	19.472,83	968.022	20,12	2.332.347
2012	64.025	24.136,36	893.955	27,00	2.626.837
2013	78.262	26.178,71	835.796	31,32	2.581.587
2014	89.841	26.932,59	828.570	32,50	2.737.187
2015	89.841	26.471,45	885.601	29,89	3.335.889
2016	107.998	29.694,15	849.576	34,95	2.871.342
2017	114.258	34.484,12	1.007.783	34,22	3.893.875
2018	115.058	31.076,15	905.583	34,32	3.496.393
Média	40.969	15.096	1.034.483	16	2.362.277
Desv.Padrão	36.698	9.542	138.864	11	576.863

Fonte de dados: IBGE, ANDA, com dados trabalhados pela autora

Tabela A3 - Consumo de fertilizantes a base de nitrogênio (ton), consumo de fertilizantes nitrogenados destinados a produção de cereais (ton), área plantada com cereais (ha), uso de fertilizantes por unidade de área plantada de cereais (kg/ha) e produção total de cereais na região Nordeste, entre os anos de 1994 e 2018.

Anos	Consumo de fertilizantes N (ton)	Consumo de Fertilizantes N/cereais (ton)	Área Plantada/ cereais (ha)	Uso de fertilizantes N/área (kg/ha)	Produção Total de cereais (ton)
1994	117.103	49.930	4.793.488	10,42	4.565.298
1995	119.902	49.308	4.485.143	10,99	4.192.451
1996	121.784	46.173	3.287.608	14,04	3.022.027
1997	122.031	45.085	3.325.649	13,56	3.158.232
1998	135.484	47.784	2.746.466	17,40	1.791.177
1999	119.986	45.114	3.228.736	13,97	3.226.638
2000	147.286	54.997	3.435.186	16,01	4.319.080
2001	149.854	56.494	3.308.880	17,07	2.811.072
2002	175.310	64.695	3.478.596	18,60	3.187.334
2003	214.549	81.971	3.708.379	22,10	4.155.897
2004	201.073	74.831	3.803.473	19,67	4.244.538
2005	197.012	70.744	3.654.617	19,36	4.274.315
2006	230.066	82.586	3.691.291	22,37	4.405.823
2007	258.626	94.905	3.776.084	25,13	4.271.116
2008	226.438	80.468	3.792.580	21,22	5.731.483
2009	251.539	93.505	3.950.761	23,67	6.019.370
2010	280.905	97.612	3.447.092	28,32	5.133.625
2011	300.210	106.680	3.823.203	27,90	6.410.810
2012	315.219	105.125	3.160.229	33,26	4.629.187
2013	295.175	96.756	2.951.703	32,78	5.550.224
2014	337.624	115.624	3.485.094	33,18	7.691.933
2015	294.198	94.453	3.193.926	29,57	6.542.460
2016	341.423	104.418	2.812.080	37,13	3.543.615
2017	356.945	115.106	3.073.232	37,45	7.011.958
2018	372.596	117.567	3.014.283	39,00	6.461.416
Média	227.293,5	79.677,05	3.497.111,16	23,36	4.654.043.16
Desv.Padrão	84.755,33	25.044,45	477.452,06	8,61	1.468.884.27

Fonte de dados: IBGE, ANDA, com dados trabalhados pela autora

Tabela A4 - Consumo de fertilizantes a base de nitrogênio (ton), consumo de fertilizantes nitrogenados destinados a produção de cereais (ton), área plantada com cereais (ha), uso de fertilizantes por unidade de área plantada de cereais (kg/ha) e produção total de cereais na região Sudeste, entre os anos de 1994 e 2018.

Anos	Consumo de fertilizantes N (ton)	Consumo de Fertilizantes N/cereais (ton)	Área Plantada/ cereais (ha)	Uso de fertilizantes N/área (kg/ha)	Produção Total de cereais (ton)
1994	541.614	216.384,26	3.583.035	60,39	8.385.424
1995	563.642	222.410,92	3.462.631	64,23	9.204.018
1996	578.060	208.782,68	2.934.845	71,14	7.801.698
1997	641.168	234.597,41	3.006.386	78,03	8.793.361
1998	682.560	231.881,29	2.788.097	83,17	8.235.475
1999	619.072	217.905,42	2.939.417	74,13	8.593.842
2000	721.382	245.310,51	2.731.499	89,81	8.012.557
2001	706.179	234.918,78	2.686.106	87,46	8.885.823
2002	738.528	237.794,38	2.657.703	89,47	9.493.980
2003	883.954	281.647,31	2.818.866	99,92	11.095.578
2004	891.475	273.808,11	2.909.538	94,11	11.882.652
2005	977.190	293.941,93	2.917.112	100,76	11.474.833
2006	1.032.630	295.753,44	2.790.285	105,99	10.467.291
2007	1.158.056	314.340,57	2.604.383	120,70	11.162.840
2008	978.494	250.464,19	2.689.353	93,13	12.278.746
2009	999.372	222.868,42	2.387.290	93,36	11.094.063
2010	1.081.888	229.699,29	2.295.267	100,08	11.011.303
2011	1.290.904	272.041,54	2.329.992	116,76	10.815.374
2012	1.259.616	271.697,87	2.430.082	111,81	13.108.461
2013	1.292.305	269.942,89	2.439.820	110,64	12.786.689
2014	1.321.625	273.873,12	2.504.542	109,35	12.119.718
2015	1.214.264	250.695,10	2.517.691	99,57	12.835.082
2016	1.457.285	296.228,20	2.515.828	117,75	11.592.048
2017	1.513.971	295.828,09	2.430.779	121,70	13.505.461
2018	1.320.868	257.380,28	2.390.809	107,65	12.683.409
Média	978.644,08	256.007,84	2.710.454,24	96,04	10.692.789,04
Desv.Padrão	302.499,98	30.124,04	323.443,43	17,26	1.786.738.694

Fonte de dados: IBGE, ANDA, com dados trabalhados pela autora

Tabela A5 - Consumo de fertilizantes a base de nitrogênio (ton), consumo de fertilizantes nitrogenados destinados a produção de cereais (ton), área plantada com cereais (ha), uso de fertilizantes por unidade de área plantada de cereais (kg/ha) e produção total de cereais na região Sul, entre os anos de 1994 e 2018.

Anos	Consumo de fertilizantes N (ton)	Consumo de Fertilizantes N/cereais (ton)	Área Plantada/ cereais (ha)	Uso de fertilizantes N/área (kg/ha)	Produção Total de cereais (ton)
1994	386.882	199.577,59	8.596.361	23,22	23.736.828
1995	327.147	164.239,06	8.137.796	20,18	26.334.450
1996	343.765	178.408,74	8.031.476	22,21	22.025.122
1997	358.097	177.869,08	7.782.871	22,85	22.372.611
1998	421.775	194.852,51	7.338.084	26,55	22.011.758
1999	422.183	199.576,13	7.563.819	26,39	24.240.190
2000	499.749	246.503,58	8.061.464	30,58	22.871.520
2001	488.940	254.546,98	8.641.084	29,46	33.013.471
2002	574.136	278.531,07	8.425.826	33,06	26.928.473
2003	666.981	325.332,44	9.141.767	35,59	36.700.509
2004	708.180	325.967,17	8.942.476	36,45	31.301.246
2005	631.653	269.773,65	8.154.332	33,08	25.191.793
2006	634.786	274.388,51	8.019.048	34,22	29.549.420
2007	780.836	334.881,01	8.022.267	41,74	35.972.293
2008	764.316	349.300,71	8.781.476	39,78	39.592.801
2009	826.242	368.082,30	8.660.265	42,50	33.045.349
2010	882.822	354.827,03	7.594.176	46,72	37.443.401
2011	992.556	402.739,69	7.811.104	51,56	38.140.864
2012	977.889	405.334,80	8.057.429	50,31	36.408.109
2013	1.136.489	460.201,61	8.278.535	55,59	41.774.834
2014	1.161.620	454.115,92	8.211.504	55,30	40.290.036
2015	995.756	365.939,33	7.646.315	47,86	39.859.869
2016	1.271.969	444.795,41	7.296.778	60,96	37.200.504
2017	1.218.911	434.728,11	7.465.239	58,23	41.163.547
2018	1.219.570	414.390,77	7.025.113	58,99	35.458.462
Média	747.730	315.156,13	8.067.464,20	39,34	32.105.098,40
Desv.Padrão	307.501,45	95.915,52	539.238,15	12,85	6.914.973,62

Fonte de dados: IBGE, ANDA, com dados trabalhados pela autora

Tabela A6 - Consumo de fertilizantes a base de nitrogênio (ton), consumo de fertilizantes nitrogenados destinados a produção de cereais (ton), área plantada com cereais (ha), uso de fertilizantes por unidade de área plantada de cereais (kg/ha) e produção total de cereais na região Centro Oeste, entre os anos de 1994 e 2018.

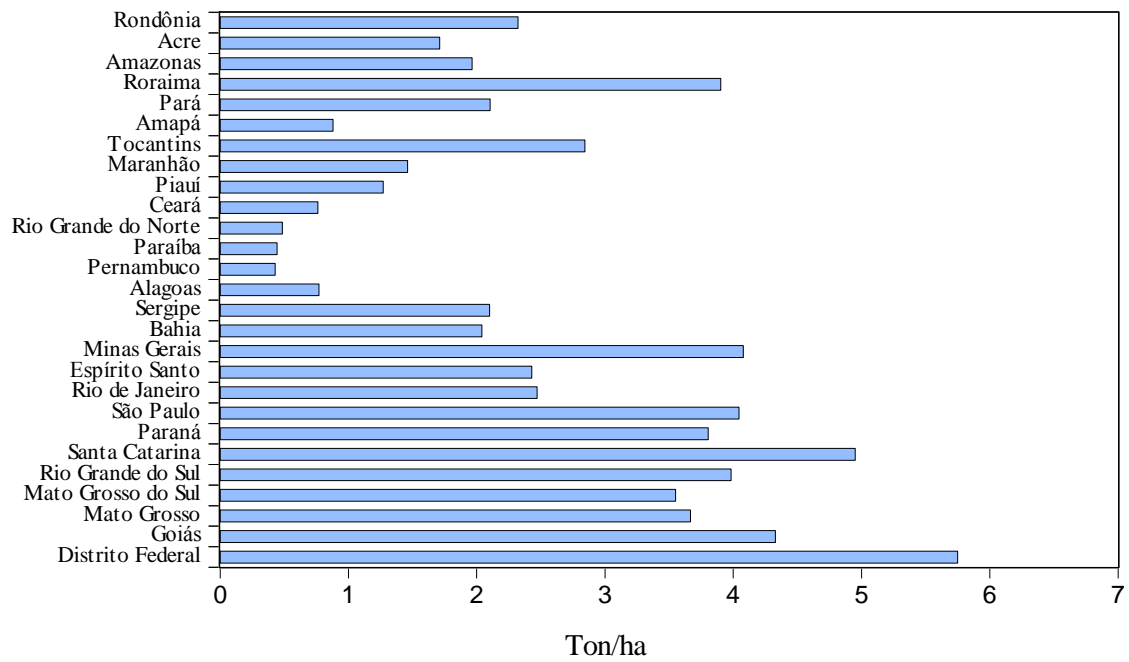
Anos	Consumo de fertilizantes N (ton)	Consumo de Fertilizantes N/cereais (ton)	Área Plantada/ cereais (há¹)	Uso de fertilizantes N/área (kg/há⁻¹)	Produção Total de cereais (ton)
1994	126.875	46.425,28	2.904.982	15,98	7.241.698
1995	119.013	40.161,77	2.731.605	14,70	7.786.693
1996	147.426	56.058,79	2.729.146	20,54	7.971.521
1997	177.825	66.098,08	2.886.980	22,90	8.874.616
1998	204.204	58.660,62	2.486.267	23,59	6.909.366
1999	221.042	76.600,69	3.273.568	23,40	9.376.235
2000	286.047	95.710,24	3.327.371	28,76	9.258.840
2001	279.875	84.493,86	3.049.003	27,71	10.513.279
2002	310.570	83.088,76	3.016.722	27,54	9.455.645
2003	434.674	119.759,35	3.534.863	33,88	13.221.426
2004	420.055	111.094,35	4.047.164	27,45	13.948.895
2005	372.857	90.316,36	3.998.173	22,59	11.823.496
2006	372.178	83.464,95	3.403.446	24,52	12.355.402
2007	518.574	147.424,26	4.283.855	34,41	15.684.067
2008	501.791	146.549,37	4.785.524	30,62	19.577.717
2009	447.833	124.247,19	4.569.530	27,19	18.289.027
2010	576.091	153.955,21	4.600.124	33,47	19.048.324
2011	734.811	188.898,21	4.729.051	39,94	19.739.412
2012	818.061	238.369,78	5.959.580	40,00	32.989.184
2013	896.255	273.548,70	6.952.186	39,35	38.083.861
2014	961.287	283.318,08	7.181.625	39,45	38.447.478
2015	938.662	276.691,83	7.390.877	37,44	43.352.034
2016	1.187.670	357.366,19	7.794.818	45,85	28.850.865
2017	1.173.353	383.046,21	8.946.196	42,82	52.303.099
2018	1.258.485	390.058,82	8.486.267	45,96	44.865.936
Média	539.420,56	159.016,28	4.682.756,92	30,80	19.998.724,64
Desv.Padrão	355.972,80	109.265,6	1.987.533,4	8,89	13.743.577

Fonte de dados: IBGE, ANDA, com dados trabalhados pela autora

APÊNDICE B**Tabela B1** - Produtividade dos cereais no Brasil e nas regiões 1994 – 2018 (Ton/ha)

Ano	Brasil	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centro-Oeste
1994	2,18	1,66	0,95	2,34	2,76	2,49
1995	2,47	1,70	0,93	2,66	3,24	2,85
1996	2,35	1,46	0,92	2,66	2,74	2,92
1997	2,48	1,51	0,95	2,92	2,87	3,07
1998	2,46	1,49	0,65	2,95	3,00	2,78
1999	2,60	1,65	1,00	2,92	3,20	2,86
2000	2,47	1,57	1,26	2,93	2,84	2,78
2001	3,05	1,77	0,85	3,31	3,82	3,45
2002	2,74	1,78	0,92	3,57	3,20	3,13
2003	3,32	2,06	1,12	3,94	4,01	3,74
2004	3,06	2,14	1,12	4,08	3,50	3,45
2005	2,77	2,11	1,17	3,93	3,09	2,96
2006	3,11	2,02	1,19	3,75	3,68	3,63
2007	3,51	2,09	1,13	4,29	4,48	3,66
2008	3,78	2,33	1,51	4,57	4,51	4,09
2009	3,45	2,42	1,52	4,65	3,82	4,00
2010	3,98	2,57	1,49	4,80	4,93	4,14
2011	3,94	2,41	1,68	4,64	4,88	4,17
2012	4,38	2,94	1,46	5,39	4,52	5,54
2013	4,70	3,09	1,88	5,24	5,05	5,48
2014	4,56	3,30	2,21	4,84	4,91	5,35
2015	4,90	3,77	2,05	5,10	5,21	5,87
2016	3,95	3,38	1,26	4,61	5,10	3,70
2017	5,14	3,86	2,28	5,56	5,51	5,85
2018	4,72	3,86	2,14	5,31	5,05	5,29
Média	3,44	2,36	1,35	4,04	4,00	3,89
Desv. Padrão	0,91	0,78	0,46	0,99	0,92	1,07

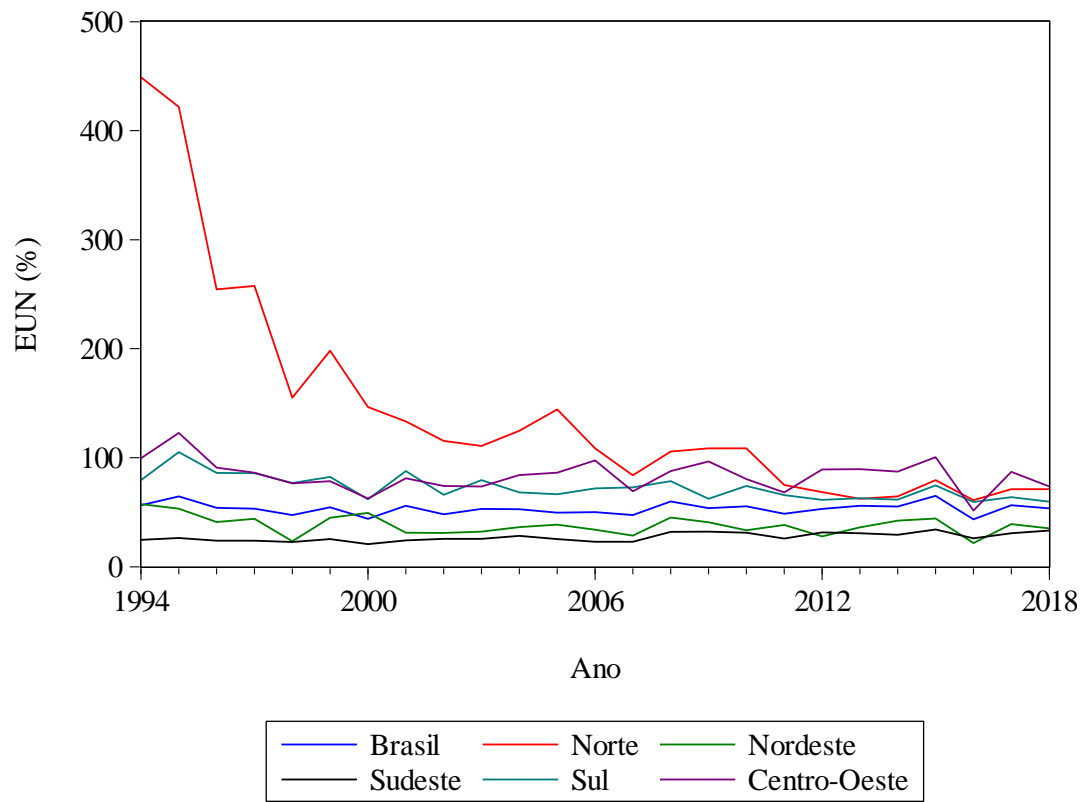
Fonte: Resultado da Pesquisa

Figura B1 - Produtividade Média das Unidades de Federação 1994 – 2018 (Ton/ha)

Fonte de dados: Resultado da pesquisa

APÊNDICE C

Figura C1 – Evolução da EUN na produção de cereais, considerando a região Norte em %



Fonte de dados: Resultado da pesquisa

APÊNDICE D

Tabela D1 - Estimações de demanda

	(1) MQO	(2) EF	(3) EA	(4) MQ2E
L,ln_nitr	0,92496*** (0,02995)	0,11875 (0,10284)	0,92496*** (0,02995)	0,93443*** (0,03216)
L,ln_produ_ ce re	-0,05886 (0,05228)	-0,01507 (0,06353)	-0,05886 (0,05228)	
ln_ipc	0,31689*** (0,11209)	0,22302* (0,12983)	0,31689*** (0,11209)	0,26738** (0,11891)
ln_preco_n	-0,29413 (0,23307)	-0,31157 (0,31165)	-0,29413 (0,23307)	-0,25857 (0,23804)
ln_preco_p	-0,11566 (0,14096)	-0,20939 (0,22219)	-0,11566 (0,14096)	-0,15744 (0,13489)
ln_preco_k	0,03102 (0,25962)	0,02403 (0,24965)	0,03102 (0,25962)	0,00780 (0,26087)
ln_pib_agr	0,00479 (0,02964)	-0,15286 (0,25615)	0,00479 (0,02964)	0,00546 (0,02974)
ln_produ_cere	0,15146*** (0,05301)	0,05935 (0,07302)	0,15146*** (0,05301)	0,08120*** (0,03057)
_cons	2,12254 (1,96451)	13,26449*** (4,40813)	2,12254 (1,96451)	2,37917 (1,91912)
r2	0,99130	0,11698		
bic	27,55161	-67,36877		
p	0,00000	0,24654	0,00000	0,00000
Sargan				0,84
Hausman				0,19

Erros Padrão entre parênteses: EA: Efeito Aleatório, EF: Efeito Fixo, * $p < 0,10$, ** $p < 0,05$, *** $p < 0,01$

Fonte: Resultado da Pesquisa