VANESSA THEODORO REZENDE

**O efeito cascata do nitrogênio na cadeia produtiva da soja
brasileira destinada à alimentação animal na Europa**

Pirassununga

2021

VANESSA THEODORO REZENDE

**O efeito cascata do nitrogênio na cadeia produtiva da soja brasileira destinada à
alimentação animal na Europa**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Nutrição e Produção Animal da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Departamento:

Nutrição e Produção Animal

Área de concentração:

Nutrição e Produção Animal

Orientador:

Prof. Dr. Augusto Hauber Gameiro

Coorientador:

Prof. Dr. Thierry Christophe Bonaudo

Pirassununga
2021

Autorizo a reprodução parcial ou total desta obra, para fins acadêmicos, desde que citada a fonte.

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

(Biblioteca Virginie Buff D'Ápice da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade de São Paulo)

T. 4099
FMVZ

Rezende, Vanessa Theodoro

O efeito cascata do nitrogênio na cadeia produtiva da soja brasileira destinada à alimentação animal na Europa / Vanessa Theodoro Rezende. – 2021.

92 f. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia. Departamento de Nutrição e Produção Animal, Pirassununga, 2021.

Programa de Pós-Graduação: Nutrição e Produção Animal.

Área de concentração: Nutrição e Produção Animal.

Orientador: Prof. Dr. Augusto Hauber Gameiro.

Coorientador: Prof. Dr. Thierry Christophe Bonaudo.

1. Análise do fluxo de materiais. 2. Comércio internacional. 3. Fluxo de nitrogênio. 4. Produção animal. I. Título.

Certificado da Comissão de Ética

Comissão de Ética no Uso de Animais

Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia
Universidade de São Paulo

São Paulo, 02 de abril de 2021
CEUAX N [3339231120](#)

Ilmo(a). Sr(a).
Responsável: Augusto Hauber Gameiro
Área: Nutrição E Produção Animal

Título do projeto: "O efeito cascata do nitrogênio na cadeia produtiva da soja brasileira destinada à produção animal na Europa".

Parecer Consubstanciado da CEUA FMVZ

A Comissão de Ética no Uso de Animais da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade de São Paulo, na reunião de 09/12/2020, **ANALISOU** e **APROVOU** o protocolo de estudo acima referenciado. A partir desta data, é dever do pesquisador:

1. Comunicar toda e qualquer alteração do protocolo.
2. Comunicar imediatamente ao Comitê qualquer evento adverso ocorrido durante o desenvolvimento do protocolo.
3. Os dados individuais de todas as etapas da pesquisa devem ser mantidos em local seguro por 5 anos para possível auditoria dos órgãos competentes.
4. **Relatórios parciais** de andamento deverão ser enviados **anualmente** à CEUA até a conclusão do protocolo.

Prof. Dr. Marcelo Bahia Labruna
Coordenador da Comissão de Ética no Uso de Animais
Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade
de São Paulo

Camilla Mota Mendes
Vice-Coordenadora da Comissão de Ética no Uso de Animais
Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade
de São Paulo

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Autor: REZENDE, Vanessa Theodoro

Título: **O efeito cascata do nitrogênio na cadeia produtiva da soja brasileira destinada à produção animal na Europa**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Nutrição e Produção animal da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Data: 23/08/2021

Banca Examinadora

Prof. Dr. Augusto Hauber Gameiro

Instituição: FMVZ/USP Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Thiago Libório Romanelli

Instituição: ESALQ/USP Julgamento: Aprovado

Prof^a. Dr^a. Flávia Fernanda Simili

Instituição: APTA/IZ Julgamento: Aprovado

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Eduardo e Ana Cláudia, pelo apoio, por sempre acreditarem nos meus sonhos e os viverem comigo.

Ao meu irmão Eduardo, por todo o apoio e por ser meu companheiro em todos os momentos.

Aos meus avós Maria Elena e Adilson, por todo o amor, carinho e apoio durante toda a minha vida.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Augusto Hauber Gameiro e Prof. Dr. Thierry Bonaudo: “Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes” (Isaac Newton).

AGRADECIMENTOS

À Universidade de São Paulo (USP), à Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia (FMVZ) e ao Programa de Pós-Graduação em Nutrição e Produção Animal do Departamento de Nutrição e Produção Animal (VNP/FMVZ/USP), pela oportunidade, estrutura e apoio para condução desta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos, processo número 131783/2020-3.

Ao Escritório de Cooperação Internacional da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade de São Paulo (CCint-FMVZ/USP), na pessoa da Dra. Isabela Furegatti, por todo o auxílio nos trâmites do convênio com a AgroParisTech.

Ao Professor Doutor Augusto Hauber Gameiro, meu orientador, que além da inspiração e incentivo, compartilhou todo o seu conhecimento e me deu oportunidades de crescimento profissional e pessoal durante todo o período do mestrado.

Ao meu coorientador Professor Doutor Thierry Bonaudo, que apesar da distância física, me auxiliou em todos os momentos deste trabalho, dando-me a oportunidade de crescer e amadurecer com a condução desta pesquisa.

Aos amigos do Laboratório de Análises Socioeconômicas e Ciência Animal, por todo o conhecimento compartilhado, pela ajuda e amizade durante todo o período de mestrado. Um agradecimento especial para o Rafael, que foi meu tutor neste período, e para a Laya, que me acolheu desde do processo seletivo.

Aos Grupos de Estudo GEHAE e Emgrupo, por mudarem meu modo de pensar sobre a produção animal, a sociedade e o ambiente. Agradeço pelas reuniões incríveis e literaturas enriquecedoras, que definitivamente vou levar por toda a vida.

As amigas Juliana (Ivy) e Ana Laura (Dona Onça), pela convivência diária. Vocês foram minha família em Pirassununga! Obrigada por todas as noites de uno, as comidinhas, o Mufasa e o Quiqui. Vocês são o presente que a USP me deu!

As amigas da UNEC, Paloma e Elsa que acreditaram no meu potencial, me ensinaram muito durante o período que trabalhamos juntas e principalmente me apoiaram quando decidi fazer o mestrado.

Aos amigos espalhados pelas cidades que morei, que mesmo com a distância sempre torcem por mim e sempre estão presentes em todos os momentos. Um agradecimento especial as minhas amigas de longa data Ana Cristina, Clara e Lorena.

E claro, não podia deixar de agradecer as pessoas mais importantes, minha família. Agradeço meus pais Eduardo e Ana Cláudia, por me concederem a oportunidade de estudar e me ensinarem a importância de ter conhecimento. Ao irmão Eduardo, por ser o Zé que todo mundo queria ter como irmão. Aos meus avós Adilson e Maria Elena, por todo o apoio, carinho e amor. Aos tios, tias e primos por sempre torcerem por mim.

Por último, agradeço meus filhos de quatro patas: o Luigi (que já é a terceira formatura que ele participa), a Mel e o Sheik.

Muito obrigada!

“We are changing Earth more rapidly than we are understanding it.”

Peter M. Vitousek; Harold A. Mooney; Jane Lubchenco; Jerry M. Melillo, 1997.

RESUMO

REZENDE, V.T. **O efeito cascata do nitrogênio na cadeia produtiva da soja brasileira destinada à alimentação animal na Europa.** 2021. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

A ação do homem sob o ambiente tem promovido mudanças no ciclo do nitrogênio. Boa parte destas mudanças se devem à cadeia produtiva de alimentos (cerca de 74 a 85% do total de uso antropogênico de nitrogênio). Devido à mobilidade das moléculas e o excesso de produção de nitrogênio reativo, há uma cascata de efeitos ambientais do nitrogênio, que já tornaram este elemento no status de alerta dentre as nove fronteiras planetárias, potencializando efeitos ambientais irreversíveis que comprometem a sobrevivência de espécies no planeta. A soja e o farelo de soja são importantes fontes de proteína para alimentação de animais em todo o mundo, e o Brasil é um dos principais produtores e exportadores deste produto. Sendo assim, o objetivo deste estudo é estimar o efeito cascata do nitrogênio na exportação de soja e farelo de soja brasileiros destinados à alimentação de animais de produção na Europa. A hipótese é que este comércio internacional potencialize o acúmulo de nitrogênio entre os principais setores desta cadeia produtiva. Para avaliá-la, utilizou-se o método da contabilidade de fluxo de materiais, desde à produção de soja em grãos até o consumo por animais de produção, em um período de 12 anos. Os fluxos de nitrogênio analisados demonstram um possível aumento na eficiência relativa do uso do nutriente nas etapas de produção de soja e produção animal. Mas suas emissões para o ambiente durante toda a cadeia produtiva, os resultados tendem a uma estabilidade no indicador. Além disso, observa-se um maior aporte de nitrogênio reativo em cada fase do sistema produtivo nos anos avaliados, em termos absolutos. Esse maior aporte de nitrogênio reativo, aliado às emissões para o ambiente, potencializaram o efeito cascata do nitrogênio nesta cadeia produtiva, com o indicador demonstrando um acúmulo em torno de 30% em cada ano do estudo. Com isso, ressalta-se a importância de abordagens sistêmicas de cadeia produtiva para um melhor entendimento dos impactos do nitrogênio no ambiente visando a adoção de práticas mitigadoras.

Palavras-chave: Análise do Fluxo de Materiais. Comércio internacional. Fluxo de nitrogênio. Produção animal.

ABSTRACT

REZENDE, V.T. **The cascade effect of nitrogen on Brazilian soybean production chain intended for animal production on Europe.** 2021. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

The action of man on the environment has promoted changes in the nitrogen cycle. Most of these changes are due to the food production chain (about 74 to 85% of the total anthropogenic use of nitrogen). Due to the mobility of molecules and the excess production of reactive nitrogen, there is a cascade of environmental effects of nitrogen, which have already made this element into alert status among the nine planetary frontiers, potentiating irreversible environmental effects that compromise the survival of species on the planet. Soybeans and soybean meal are important sources of protein for animal feed around the world, and Brazil is one of the main producers and exporters of this products. Therefore, this study aims to estimate the cascade effect of nitrogen in the export of Brazilian soybeans and soybean meal destined for feed to farm animals in Europe. The hypothesis is that this international trade enhances the accumulation of nitrogen between the main sectors of this production chain. For this, the material flow accounting method was used, from the production of soybeans to consumption by farm animals, in 12 years. The analyzed nitrogen fluxes demonstrate a possible increase in the relative efficiency of the nutrient use in the soy production and animal production stages. But its emissions to the environment throughout the production chain, the results tend to stability in the indicator. In addition, there is a greater supply of reactive nitrogen in each phase of the production system in the years evaluated, in absolute terms. This greater contribution of reactive nitrogen, together with emissions to the environment, potentiated the cascade effect of nitrogen in this production chain, with the indicator showing an accumulation of around 30% in each year of the study. Thus, it emphasizes the importance of systemic approaches in the production chain for a better understanding of the impacts of nitrogen on the environment, intending to adopt mitigating practices.

Keywords: Material Flow Analysis. International Trade. Nitrogen Flow. Livestock.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - O ciclo do nitrogênio em sistemas agropecuários.....	22
Figura 2 - Produção e produtividade da soja brasileira de 1997 a 2019.....	27
Figura 3 – Cultura da soja nos biomas brasileiros em 2019.....	29
Figura 4 - Exportação de Soja em grãos e Farelo de soja, em toneladas, no período de 1997 a 2019.....	30
Figura 5 - Rebanho bovino, suíno, caprino e ovino na União Europeia em 2019, em milhões de cabeças.....	32
Figura 6 - Representação esquemática do balanço de nutrientes de um sistema.....	37
Figura 7 - Fluxos de nitrogênio na cadeia produtiva da soja brasileira no período de 2007 a 2019.....	48
Figura 8 - Fluxos de nitrogênio na cadeia produtiva da soja brasileira em 2007.....	51
Figura 9 - Fluxos de nitrogênio na cadeia produtiva da soja brasileira em 2019.....	52
Figura 10 - Emissões de nitrogênio consideradas no cálculo do indicador de cascata do nitrogênio (NCI), na cadeia produtiva do grão de soja no período de 2007 a 2019.....	54
Figura 11 - Emissões de nitrogênio destinadas ao ambiente e o indicador de cascata do nitrogênio (NCI) para a cadeia produtiva da soja brasileira, 2007 a 2019.....	55
Figura 12 - Importações e produção de soja em grão pela União Europeia, e a participação da soja em grão brasileira no período de 2007 a 2019.....	67
Figura 13 - Importações de farelo de soja pela União Europeia e a participação do farelo de soja brasileiro no período de 2007 a 2019.....	68
Figura 14 - Fluxos de nitrogênio da cadeia produtiva da soja brasileira e o seu comércio na Europa em 2007.....	69
Figura 15 - Fluxos de nitrogênio da cadeia produtiva da soja brasileira e o seu comércio na Europa em 2019.....	70
Figura 16 - Descrição dos fluxos de nitrogênio abordados nas Figuras 14 e 15.....	71
Figura 17 – Efetivo bovino, suíno e galináceo em cabeças da União Europeia (28 países), no período de 2007 a 2019.....	72
Figura 18 – Fluxos de nitrogênio considerados para a produção animal na União Europeia em 2007.....	73
Figura 19 – Fluxos de nitrogênio considerados para a produção animal na União Europeia em 2019.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Contribuição da maioria das <i>commodities</i> comercializadas internacionalmente nas trocas globais de nitrogênio.....	36
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Comexstat	Portal de estatísticas de comércio exterior do Brasil
EU	União Europeia
Eurostat	Portal de estatísticas da União Europeia
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FAOSTAT	Portal de estatísticas da FAO
FBN	Fixação biológica de nitrogênio
FEDIOL	Associação das Indústrias de Óleos Vegetais e Proteína Vegetal da União Europeia
Gg	Gigagramas
H ₃ NO	Hidroxilamina
MATOIIBA	Denominação do cerrado dos estados do Maranhão, Piauí, Tocantins e Bahia
Mha	Milhões de hectares
N	Nitrogênio
N ₂	Nitrogênio gasoso (não reativo)
N ₂ O	Óxido nitroso
NCI	Indicador Cascata de Nitrogênio
NCM	Nomenclatura Comum Mercosul
NH ₃	Amônia
NH ₄ ⁺	Amônio cátion
NO	Óxido Nítrico
NO ₂ ⁻	Nitrito
NO ₃ ⁻	Nitrato
N _r	Nitrogênio reativo
NUE	Indicador de eficiência no uso de nitrogênio
O ₃	Ozônio troposférico
Tg	Teragramas
ΔNu	Variação de estoque de nutriente

SUMÁRIO

1	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2	INTRODUÇÃO	18
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
	3.1 O NITROGÊNIO, SUA IMPORTÂNCIA E SEUS EFEITOS SOBRE O AMBIENTE	21
	3.1.1 <i>O efeito cascata do nitrogênio na cadeia produtiva da soja</i>	23
	3.1.2 <i>Os impactos ambientais do nitrogênio</i>	25
	3.2 A PRODUÇÃO DE SOJA NO BRASIL	26
	3.3 A PRODUÇÃO ANIMAL NA EUROPA	30
	3.4 A CONTABILIDADE DO FLUXO DE SUBSTÂNCIAS.....	37
4	O EFEITO CASCATA DO NITROGÊNIO NA CADEIA PRODUTIVA DA SOJA BRASILEIRA	40
	4.1 RESUMO.....	40
	4.2 INTRODUÇÃO	41
	4.3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
	4.3.1 <i>Sistema produtivo de soja considerado no modelo</i>	47
	4.3.2 <i>Os indicadores de eficiência do uso de nitrogênio e o efeito cascata</i>	48
	4.4 RESULTADOS.....	49
	4.4.1 <i>As entradas e saídas de nitrogênio na cadeia produtiva da soja brasileira</i>	49
	4.4.2 <i>A eficiência no uso do nitrogênio (NUE) e o Indicador de cascata do nitrogênio (NCI) na cadeia produtiva da soja brasileira</i>	53
	4.5 DISCUSSÃO	56
	4.6 CONCLUSÃO.....	57
5	A SOJA BRASILEIRA COMO ALIMENTO PARA ANIMAIS NA EUROPA: UMA VISÃO SOBRE OS FLUXOS DE NITROGÊNIO NA CADEIA PRODUTIVA	59
	5.1 RESUMO.....	59
	5.2 INTRODUÇÃO	60
	5.3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	62
	5.4 RESULTADOS.....	66
	5.5 DISCUSSÃO	75
	5.6 CONCLUSÃO.....	77
6	CONCLUSÕES	79
	REFERÊNCIAS.....	81
	ANEXOS	89

1 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi organizada em formato de artigos e composta em capítulos. Para facilitar o entendimento do conteúdo, bem como da pesquisa realizada, o primeiro capítulo contempla o componente textual introdutório, salientando a problemática envolvida, a justificativa do projeto e seus objetivos.

Já o segundo capítulo engloba a revisão da literatura sobre o tema, que foi dividida em quatro tópicos com o intuito de englobar todas as fases que serão abordadas neste trabalho: (i) o nitrogênio, sua importância e efeitos sobre o ambiente; (ii) a produção de soja no Brasil; (iii) a produção animal na Europa; (iv) a contabilidade do fluxo de substâncias. No primeiro tópico, apresenta-se informações sobre o nitrogênio, sua importância para os seres humanos e animais, bem como seus impactos ambientais, salientando o efeito cascata do nitrogênio, que será o foco do estudo. Em seguida, no segundo tópico, discorre-se sobre os avanços na produção de soja no Brasil e suas consequências para o ciclo do nitrogênio e ambiente. O terceiro tópico aborda a produção animal na Europa, como esforço de salientar como a soja produzida no Brasil é utilizada na Europa, e quais são os possíveis impactos gerados por este comércio exterior e subsequente produção animal. Para finalizar, uma breve introdução sobre o método a ser adotado nesta dissertação para contabilizar os fluxos de nitrogênio nos sistemas considerados é apresentada.

No terceiro capítulo foi estruturado o primeiro artigo, contemplando os fluxos de nitrogênio no sistema de produção de soja e farelo de soja no Brasil. Para o desenvolvimento destes fluxos considerou-se a produção nacional de soja no período de 2007 a 2019, e um sistema produtivo como principal fonte de nitrogênio para cultura: a fixação biológica de nitrogênio. Este estudo também inovou ao considerar os fluxos oriundos da necessidade de sementes para cultura e as perdas logísticas durante todo o processo, desde do cultivo até a processamento industrial da soja e sua transformação em farelo.

O quarto capítulo também foi estruturado em forma de artigo, tratando da união dos fluxos brasileiros de nitrogênio oriundo da soja e farelo de soja e sua destinação à alimentação de animais na Europa. Para isso, foram consideradas as produções animais de suínos, aves de corte e postura e bovinocultura de leite e de corte. O recorte da Europa levou em consideração a União Europeia, com

28 países. Os fluxos de nitrogênio foram contabilizados no período de 2007 a 2019.

Por fim, o quinto capítulo traz as considerações finais da dissertação como um todo, elencando os fatos relevantes da pesquisa e suas implicações.

2 INTRODUÇÃO

A gestão dos fluxos de nutrientes é primordial nas cadeias produtivas agropecuárias e na produção de alimentos. Este manejo de nutrientes possibilitou o desenvolvimento de práticas agrícolas desde os primórdios da sociedade. A manipulação dos ciclos de nutrientes e a amplificação de seus fluxos tiveram aumentos significativos desde a industrialização da agricultura, o que possibilitou atender à crescente demanda por alimentos, mas provocou impactos nos ecossistemas e na saúde pública (GERBER et al., 2014). O nitrogênio é um elemento indispensável nas cadeias alimentares. Ele faz parte da formação de proteínas e enzimas, o que garante o funcionamento metabólico das plantas e dos animais. Ele é também o constituinte da maior parte dos ácidos nucleicos, que determinam as características genéticas dos seres vivos. Sua forma gasosa (N_2) está presente em abundância na atmosfera, mas para a maioria dos organismos este grande reservatório de nitrogênio não se encontra biologicamente disponível (GALLOWAY; COWLING, 2002). O nitrogênio reativo (N_r) corresponde a qualquer molécula de nitrogênio diferente da sua forma não reativa original (N_2), sendo esta, a forma disponível para utilização por plantas e microrganismos, e a mobilidade desses compostos químicos no ecossistema constitui o ciclo do nitrogênio.

O ciclo do nitrogênio tem sofrido alterações nas últimas sete décadas devido à ação do homem na produção de nitrogênio reativo (GALLOWAY et al., 2002). Os sistemas de produção de alimentos são responsáveis por 74% a 85% do total de uso antropogênico de nitrogênio (variando conforme a fonte da estimativa), contribuindo nas emissões de amônia (NH_3), nitrato (NO_3^-) e óxido nitroso (N_2O) (HERRERO et al., 2015). O aumento de N_2O na atmosfera se deu de forma significativa a partir da Revolução Industrial, e atualmente sabe-se que este aumento é um dos contribuintes para as mudanças climáticas observadas e projetadas para o planeta (IPCC, 2013).

O aumento do nitrogênio reativo causa consequências ambientais em escalas locais, regionais e globais. Isto se deve ao fato de que o nitrogênio reativo produzido é maior do que a capacidade do ecossistema em convertê-lo de volta a N_2 , por isso este excesso de nitrogênio pode se mover, transformar ou acumular-se dentro de um sistema, desenvolvendo o efeito cascata do nitrogênio (ERISMAN; GENNFELT; SUTTON, 2003; GALLOWAY, 1998). Um mesmo átomo de nitrogênio reativo pode causar múltiplos efeitos nos ecossistemas terrestres e aquáticos (GALLOWAY et al., 2013). Com o intuito de identificar os nove processos que regularam a estabilidade e resiliência do sistema terrestre, Joham Rockström e colaboradores (2009) criaram o conceito das fronteiras planetárias. Este conceito leva em conta vários estudos que explicam a atuação humana acarretando níveis críticos de integridade do planeta Terra. Então foram criados nove “pontos de detenção” (“fronteiras”) representando os limites estabelecidos para alguns processos. Esses limites, se ultrapassados, aumentariam o risco de mudanças nos ecossistemas, afetando a conservação de espécies no planeta Terra. O nitrogênio está inserido na fronteira planetária dos ciclos biogeoquímicos e já se encontra em níveis de alerta. A agricultura é a principal responsável pela mudança de quatro fronteiras planetárias. São elas: a integridade da biosfera, a mudança no uso da terra, o uso de água limpa e os fluxos biogeoquímicos (KAHILUOTO, 2019).

Globalmente, o aumento da demanda por produtos de origem animal provoca uma maior necessidade de cultivos agrícolas, com objetivo de produzir alimentos para garantir a nutrição e produção dos animais (IPCC, 2019). Dentre esses cultivos, a soja se torna importante, devido ao seu valor proteico e composição rica em aminoácidos essenciais, favorecendo assim o amplo uso de seus derivados na composição de rações e concentrados proteicos para animais (WU et al., 2014). O Brasil é o maior produtor de soja do mundo, com 124,8 milhões de toneladas produzidas na safra 2019/2020, dos quais 70,722 milhões de toneladas foram exportadas na forma de soja em grão, sendo que a Europa contribuiu com a importação de 10,937 milhões de toneladas (CONAB, 2021; COMEXSTAT, 2021). A soja impacta diretamente os segmentos de geração de nitrogênio reativo, pois além da planta ser uma leguminosa fixadora de nitrogênio, o transporte da produção, no Brasil, é realizado em sua maioria pela

malha rodoviária, contribuindo para a queima de combustíveis fósseis, além da maioria dos tratamentos culturais adotados serem mecanizados (CAVALETT, 2008; CAVALETT; ORTEGA, 2009; IPCC, 2013; RAUCCI et al., 2015).

A cadeia da soja tem impactos ambientais no Brasil mas também na Europa onde a importação massiva de soja leva ao desequilíbrio do ciclo local e regional do nitrogênio (JOUVEN, 2018; PEYRAUD et al., 2012). A Europa é deficitária em proteínas vegetais para alimentação dos animais, sendo que quase 90% das importações agrícolas deste continente são utilizados no setor de produção animal (PEYRAUD et al., 2012).

Para compreender o efeito cascata do ciclo do nitrogênio torna-se necessária a compreensão de todos os elos da cadeia produtiva da soja, desde a origem dos seus insumos, sua produção, sua transformação em farelo, óleo e demais subprodutos; seu uso na alimentação humana e animal, sua transformação em carne, leite e ovos nas diferentes espécies domésticas (GAMEIRO; BONAUDO; TICHIT, 2019).

Diante dos aumentos constantes nos volumes produzidos e transacionados, e da intensificação do sistema agropecuário, tornam-se necessários estudos sobre o impacto ambiental das atividades relacionadas, para que se obtenha embasamento que auxilie a tomada de decisões em políticas públicas e privadas sobre o sistema de produção e sua sustentabilidade, buscando o equilíbrio entre interesse econômico e preservação ambiental (BONAUDO et al., 2017; LASSALETTA et al., 2014).

Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa é estimar o efeito cascata do nitrogênio na exportação de soja brasileira destinada à produção animal da Europa, com a utilização de modelo matemático baseado no método da Contabilidade do Fluxo de Substâncias. Estimando o efeito cascata e os níveis de nitrogênio para o sistema de produção de soja existente no Brasil, pode-se melhor entender os processos-chave e a dinâmica do ciclo do nitrogênio, compreendendo os impactos da atividade de comércio exterior para o Brasil e para a Europa.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 O NITROGÊNIO, SUA IMPORTÂNCIA E SEUS EFEITOS SOBRE O AMBIENTE

O nitrogênio é um elemento químico não-metal cujo símbolo é N e está posicionado no grupo 15 da tabela periódica. Devido às suas características o N pode ser dividido em nitrogênio atômico encontrado em diversas substâncias químicas e nitrogênio molecular, que faz parte da constituição do ar atmosférico (N_2) correspondendo a cerca de 78% de todos os gases que formam o ar, e indisponível para a maioria dos seres vivos (GALLOWAY; COWLING, 2002).

O nitrogênio atômico está presente em diversas substâncias orgânicas e inorgânicas, como aminas, amidas, amônio quaternário, nitro compostos, óxidos de nitrogênio, ácidos nitrogenados, amônia, entre outros (CELLIER et al., 2011; GALLOWAY; COWLING, 2002; PEYRAUD et al., 2012).

O ciclo do nitrogênio é um ciclo biogeoquímico que garante a circulação do nitrogênio no ambiente e nos seres vivos. Diversos processos microbiológicos e vegetais estão envolvidos neste ciclo, que levam ao deslocamento deste elemento em escalas locais, regionais e globais, além da formação de várias moléculas, constituindo assim o nitrogênio reativo (N_r) (AMBUS et al., 2011; GALLOWAY et al., 2003). O N_r que é adicionado ao ecossistema por meio da atividade humana é denominado “nitrogênio antropogênico” (N antropogênico) (BOUWMAN; BEUSEN; BILLEN, 2009). O N_r , natural ou antropogênico, é altamente móvel, sendo na sua maioria dissipado no ar, água e ecossistemas terrestres (ERISMAN et al., 2013).

Em ecossistemas naturais, sem a interferência humana, a atmosfera, as plantas e o microbioma do solo são os grandes responsáveis para geração de N_r nos diversos ecossistemas (GALLOWAY; COWLING, 2002; GRUBER; GALLOWAY, 2008). Já em sistemas agropecuários, o ciclo do nitrogênio é dominado pela aplicação de fertilizantes nitrogenados em cultivos vegetais, pelas matérias orgânicas e a remoção de culturas (AMBUS et al., 2011). Independentemente de o ciclo do nitrogênio ser natural ou modificado pelo ser humano, há sempre fixação atmosférica do nitrogênio e criação de N_r nos

diversos ecossistemas. Os compostos químicos mais importantes na agropecuária são: a amônia em sua forma gasosa (NH_3), amônio cátion (NH_4^+), nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N_2O), nitrogênio na forma de gás (N_2) e hidroxilamina (H_3NO) (MARTÍNEZ-ESPINOSA et al., 2011).

Nos sistemas agropecuários pode-se ilustrar o fluxo de nitrogênio reativo dentro das diversas fases do sistema produtivo, conforme figura abaixo:

Figura 1 – O ciclo do nitrogênio em sistemas agropecuários

Fonte: Adaptado de CELLIER et al., 2011.

A fixação do N atmosférico acontece para produção de fertilizantes nitrogenados pelo Processo de Haber-Bosch, onde há uma quebra da forma inerte do nitrogênio e sua ligação com o gás hidrogênio, formando então a amônia. O custo energético desta reação é elevado, envolvendo altas temperaturas e pressão, além de catalisadores (LOPES, 2007). Este nitrogênio reativo é obtido de forma antropogênica e então adicionado ao solo, onde há uma eficiência de utilização para planta de 50%. Essas perdas se devem à lixiviação e transformação em formas gasosas, tornando um meio contaminante do ambiente (GALLOWAY et al., 2008; GRUBER; GALLOWAY, 2008; HERRERO et al., 2015; STEVENS, 2019).

Plantas leguminosas fixam o nitrogênio por meio da fixação biológica de nitrogênio (FBN), pela associação simbiótica com bactérias fixadoras, na qual a planta fornece o carboidrato necessário para suprir a alta demanda energética

da fixação do nitrogênio e as bactérias fornecem para planta o amônio (CÓRDOVA et al., 2019; LOPES, 2007; STEVENS, 2019; ZHANG et al., 2015).

Nos sistemas de produção animal, os animais ingerem o N_r pelo consumo de forrageiras e alimentos concentrados. Este nitrogênio reativo é utilizado pelo animal como parte essencial das proteínas e aminoácidos, além de ser um importante nutriente para processos metabólicos envolvidos no crescimento e transferência de energia. Parte deste nitrogênio é lançado ao ambiente, principalmente pelos dejetos animais (BILLEN; LASSALETTA; GARNIER, 2015; CELLIER et al., 2011; LASSALETTA et al., 2014). Estimativas indicam que o total de fertilizante sintético e fixação biológica de nitrogênio utilizados para produzir alimentos para os animais produziram $76 \text{ Tg}^1 \text{ N ano}^{-1}$, em 2010. Este valor já atinge o limite planetário para emissões de nitrogênio que é de $62\text{-}82 \text{ Tg N ano}^{-1}$ (UWIZEYE et al., 2020).

O ciclo do nitrogênio evoluiu durante bilhões de anos para um (quase) estável e equilibrado ciclo, no entanto, a cada ano que passa este equilíbrio e estabilidade são abalados devido às ações humanas, e cada vez mais há maior estoque de nitrogênio reativo no planeta, implicando mudanças ambientais a níveis locais e globais (BOUWMAN; BEUSEN; BILLEN, 2009; LASSALETTA et al., 2014; ROCKSTRÖM et al., 2009).

3.1.1 O efeito cascata do nitrogênio na cadeia produtiva da soja

As transferências e acúmulo de nitrogênio reativo nos ecossistemas constituem o conceito de “cascata do nitrogênio”. Este conceito reflete a deposição de excesso de nitrogênio reativo, como uma consequência da redução na eficiência da conversão de nitrogênio nos sistemas e/ou excesso de aporte nitrogenado de forma antropogênica. Com o excesso em um sistema, este nitrogênio reativo se move e se acumula nos diversos sistemas ambientais, construindo impactos em cascata (PEYRAUD et al., 2012).

Qualquer molécula de N_r pode ser convertida em outra molécula de N se condições forem satisfeitas. Portanto, um único átomo de N tem impactos em cascata até que seja armazenado em um reservatório de longo prazo ou

¹ Um teragrama (Tg) é uma fração decimal múltipla da unidade de massa básica no quilograma do Sistema Internacional de Unidades (SI). $1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g} = 10^9 \text{ kg}$.

desnitrificado para N inativo (ERISMAN et al., 2005; ERISMAN; GENNFELT; SUTTON, 2003; GALLOWAY, 1998; SKIBA; REES, 2014; VAN VUUREN et al., 2011). A cascata do nitrogênio traduz uma visão dinâmica e uma abertura do ciclo do nitrogênio, com entradas de N antrópicas e transporte internacional. Esse conceito permite demonstrar a complexidade de seus mecanismos e impactos nos diversos compartimentos ambientais (PEYRAUD et al., 2012).

Nas relações comerciais entre países este efeito pode ser observado por meio dos fluxos de nitrogênio embutidos nas transações entre eles. Utilizando a soja como base, pode-se observar que a Europa, por ser um grande importador de grão e farelo para alimentação de seus rebanhos, e um importante exportador de produtos agrícolas e fertilizantes, é um importador líquido de nitrogênio, e esta troca de nitrogênio levanta a questão de como os impactos estão sendo alocados entre as áreas de produção e os consumidores finais (PEYRAUD et al., 2012).

No caso do Brasil, o país arca com o custo ambiental da conversão de terras para produção de soja que não será utilizada ou beneficiada no país. Como a soja é uma *commodity*, seu preço também não é regulado pelo país produtor e sim pelo mercado mundial, sua demanda e oferta global do grão (PEYRAUD et al., 2012).

A produção animal redistribui a biomassa presente nas plantas em produtos de origem animal (como a carne, o leite, ovos, lã, ...) e dejetos. Assim, a produção animal é um importante fator nos ciclos biogeoquímicos de nutrientes no solo, na água, ar e nas plantas. Em sistemas naturais observa-se a ciclagem de carbono e nitrogênio é intimamente relacionada à fotossíntese, fixação atmosférica de nitrogênio, mineralização, nitrificação e desnitrificação, sendo que muitas dessas reações são feitas por microrganismos presentes no solo, no animal e nos dejetos dos animais. Com o aumento da intensidade dos sistemas de produção animal, e as longas distâncias entre os grãos e os animais, os ciclos biogeoquímicos dos nutrientes não têm sido completados, gerando impactos ambientais e diminuição na utilização destes nutrientes na cadeia produtiva (TAMMINGA, 2003).

Esta dimensão global da cascata de nitrogênio e sua variabilidade geográfica de acordo com climas, solos, estruturas de paisagem e forças motrizes agrícolas criaram a necessidade de uma visão mais sistêmica sobre o ciclo do nitrogênio e seus impactos no ambiente.

3.1.2 Os impactos ambientais do nitrogênio

Desde o início do século 20, as quantidades de N fixado de forma natural passaram a não ser suficientes para atender as demandas nutricionais dos seres humanos. Com a criação do processamento da amônia por meio do processo de Haber-Bosch, desenvolvido em 1910, foi possível produzir em grade escala N_r e aumentar fertilização, alcançando o rendimento necessário para atender às demandas humanas por alimento (GALLOWAY; COWLING, 2002). Há três principais fatores que favorecem o aumento de N_r na atmosfera além do processamento da amônia, são eles: i) o aumento da utilização de fertilizantes nitrogenados inorgânicos; ii) o aumento no cultivo de plantas fixadoras de nitrogênio; e iii) a combustão de combustíveis fósseis (IPCC,2013).

A preocupação ambiental com o nitrogênio é devida, principalmente, a três rotas deste nutriente no ambiente: a volatilização da amônia na atmosfera, a poluição de solo e lençóis freáticos por nitrato, e a emissão de óxido nitroso na atmosfera pela desnitrificação. O excesso de nitrogênio tem impactos negativos em diversas áreas, como mudança climática, perdas de biodiversidade e impacto a saúde humana (MOSIER et al., 1998; PRADOS et al., 2016; STEVENS, 2019).

As emissões agropecuárias acarretam acidificação de florestas, solos e ecossistemas aquáticos. A saturação de N no solo nos ecossistemas terrestres leva a transferência do N_r para os lençóis freáticos, resultando em eutrofização e em alguns casos, hipóxia nos ecossistemas costeiros (GALLOWAY et al., 2002). A qualidade do ar e o clima global também são afetados com o excesso de N_r , trazendo danos à camada de ozônio e mudanças climáticas (BILLEN et al., 2020).

É importante ressaltar que um aumento substancial da fixação biológica de nitrogênio induzido pelo homem, por meio do plantio crescente de leguminosas como a soja, leva à menor utilização de fertilizantes nitrogenados. Mas essa substituição de fertilizantes químicos pela fixação biológica não reduzirá os problemas da mobilização antropogênica de N_r para apoiar a produção de alimentos (ERISMAN et al., 2005; ERISMAN; GENNFELT; SUTTON, 2003; GALLOWAY, 1998; SKIBA; REES, 2014; VAN VUUREN et al., 2011).

Além disso, um mesmo balanço de nitrogênio pode levar a diferentes impactos dependendo da sensibilidade do ambiente. A desnitrificação e a lixiviação variam muito, dependendo do regime de chuvas e da temperatura. Quanto mais quente e seco o clima, menores são as perdas. A composição do solo também desempenha um papel importante, uma vez que na desnitrificação as perdas são maiores em solos com perfis mais turfosos e argilosos, e mínimas em solos arenosos. Já o risco de lixiviação é maior em solos arenosos (PEYRAUD et al., 2012).

3.2 A PRODUÇÃO DE SOJA NO BRASIL

O rápido crescimento da produção de soja no Brasil, observado principalmente a partir de 1970, foi estimulado pelas intervenções governamentais e aumento da demanda pelo grão e seus derivados. Melhorias tecnológicas em sementes, crédito subsidiado, redução de impostos e preços competitivos no mercado exterior são alguns dos estímulos para os agricultores investirem na cultura da soja (GARRETT; LAMBIN; NAYLOR, 2013).

Os plantios de soja começaram no Brasil na região sul do país, principalmente nos estados do Rio Grande do Sul e Paraná. Mas devido às pesquisas da Embrapa com novos cultivares, adaptados aos solos mais ácidos e com alto teor de alumínio, a soja se expandiu para o Centro-Oeste brasileiro na década de 70. Para encorajar esta expansão agrícola, o governo forneceu crédito para compra de terras e investimentos em infraestrutura, favorecendo então a migração de agricultores do Sul país para a exploração agrícola no Cerrado brasileiro (GARRETT; LAMBIN; NAYLOR, 2013).

Atualmente a soja produzida no Brasil apresenta técnicas de cultivo que proporcionam maiores taxas de produtividade por hectare, sendo que a média nacional se encontra superior a 3.000 kg ha⁻¹, por safra, e as maiores taxas de crescimento são observadas nos estados do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Minas Gerais e Bahia (LAMAS; RICHETTI, 2019). O plantio de soja no Brasil evoluiu ao longo dos anos. Em 1977 foram produzidas 12.145.000 toneladas de grãos de soja, com uma produtividade média de

1.748 kg ha⁻¹, já em 2019 a produção foi de 124.800.000 toneladas de grãos de soja, com uma produtividade média de 3.322 kg ha⁻¹ (CONAB,2021).

Figura 2 – Produção e produtividade da soja brasileira de 1997 a 2019

Fonte: CONAB,2021. Elaboração da autora

Dentre os biomas brasileiros importantes na expansão do plantio de soja no Brasil, destaca-se o cerrado. O cerrado compreende uma savana neotropical e sua conversão em terra para agricultura começou na década de 60. Atualmente, é o bioma com maior expansão agrícola no país, devido à sua menor exigência de reserva legal quando comparado ao bioma amazônico. Além disso, não há diretrizes comerciais como a moratória da soja aplicadas a este bioma². Pode-se dividir este bioma em três áreas distintas (RAUSCH et al., 2019):

- 1) O cerrado mato-grossense, correspondendo a uma parte da Amazônia legal, onde há um código florestal mais restrito do que as outras regiões;

² A moratória da soja é um pacto comercial, realizado em julho de 2006, pela Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE) e Associação Brasileira dos Exportadores de Cereais (ANEC) com o governo e sociedade civil. Essa medida é um compromisso de não comercializar, nem financiar, soja produzida em áreas que foram desmatadas no Bioma Amazônico após 22 de julho de 2008 (ABIOVE,2021).

- 2) O MATOPIBA, que é a denominação do cerrado dos estados do Maranhão, Piauí, Tocantins e Bahia, onde observa-se o maior crescimento nos plantios de soja nos últimos anos;
- 3) O cerrado da região sudeste do país, que é uma antiga fronteira agrícola e que atualmente predomina-se o plantio de soja.

Entre os anos de 2003 e 2014, a conversão de áreas de cerrado para o plantio de soja foi de 16% a 32% do total das áreas convertidas deste bioma. No total, a soja substituiu cerca de 1,3 milhões de hectares de vegetação nativa neste período, em média 108.000 hectares por ano. As maiores conversões foram observadas na região do MATOPIBA (24% a 46%), seguido pelo Cerrado mato-grossense (6% a 33%), e Cerrado do Sudeste brasileiro (2% a 11%), e estas conversões são cinco vezes maiores que as observadas no bioma Amazônico (GIBBS et al., 2015; RAUSCH et al., 2019).

Na região Amazônica, para tentar diminuir o desmatamento, e consequentemente o custo ambiental da produção de soja no centro-oeste e norte do país, foi criado em 2006 e implantado em 2008 a chamada “moratória da soja”, onde a soja produzida nesses locais é impedida de ser financiada e possuiu barreiras para a comercialização e exportação (ABIOVE; AGROSATÉLITE, 2019).

As taxas médias de desflorestamento observadas antes de 2008 eram de 8.037 km² ano⁻¹. Após a implantação da moratória esta taxa foi reduzida para 1.548 km² ano⁻¹ representando uma redução maior que cinco vezes em relação ao período anterior. Isto revela que os mecanismos adotados na moratória da soja estão sendo eficazes para redução do desflorestamento (ABIOVE; AGROSATÉLITE, 2019).

Figura 3 – Cultura da soja nos biomas brasileiros no ano de 2019

Fonte: Agrosatélite, 2020. Legenda: Mha – Milhões de hectares.

A expansão da cultura da soja no Brasil favoreceu a maior participação do país no comércio exterior da soja. Em 1997 a exportação de soja em grãos representou 51,4% do total produzido naquele ano, já em 2019 este valor subiu para 60,6%, sendo o produto mais exportado pelo país no setor agropecuário. Em 2019, 72,6% das exportações brasileiras de soja tiveram como destino a China, e a Europa comprou 18,2% da soja brasileira (COMEXSTAT,2021; CONAB,2021).

Já nas exportações de farelo de soja, em 2019, 53% das tiveram como destino a Europa e 33% a Ásia. O maior estado exportador foi o Mato Grosso, com 30,4% das exportações deste subproduto. O gráfico abaixo demonstra a evolução das exportações de farelo de soja e soja em grão no período de 1997 a 2019 (COMEXSTAT,2021).

Figura 4 – Exportação de Soja em grãos e Farelo de soja, em milhões de toneladas, no período de 1997 a 2020

Fonte: COMEXSTAT, 2021.

Até o ano de 2000, as exportações de farelo de soja sobressaíam as exportações de soja em grãos. Após este período pode-se observar o constante crescimento das exportações de soja em grão e uma tendência de estabilidade nas exportações de farelo de soja. Em 2012 há uma queda significativa nas exportações de soja em grão, principalmente devido à seca em regiões produtoras observadas neste ano. O farelo de soja apresentou queda nas exportações a partir do ano de 2018, muito se deve ao fato do preço do farelo de soja brasileiro ser superior ao praticado por outros países exportadores (COMEXSTAT,2021).

3.3 A PRODUÇÃO ANIMAL NA EUROPA

A produção animal na Europa representa 44% do valor total da produção agrícola deste continente (FAO, 2021). Em 2019 havia 143 milhões de suínos, 77 milhões de bovinos e 74 milhões de ovinos e caprinos, mas a maioria deste rebanho estava distribuído em uma pequena quantidade de países (EUROPEAN COMMISSION, 2021) e em regiões especializadas desses países.

Aproximadamente três quartos do rebanho bovino da União Europeia (EU) em 2019 estava distribuída na França (23,5%), Alemanha (15,1%), Espanha (8,6%), Irlanda (8,5%), Itália (8,3%) e Polônia (8,1%). Aproximadamente três quartos do rebanho suíno da EU é encontrado na Espanha (21,8%), Alemanha (18,2%), França (9,4%), Dinamarca (8,9%), Holanda (8,3%) e Polônia (7,8%). A maior parte do rebanho ovino da EU está localizado na Espanha (24,8%), Romênia (16,6%), Grécia (13,5%), França (11,4%) e Itália (11,25). Já o rebanho caprino é encontrado em maior efetivo na Grécia, Espanha e Romênia (Figura 5) (EUROPEAN COMMISSION, 2021)

Figura 5- Rebanho bovino, suíno, caprino e ovino na União Europeia em 2019, em milhões de cabeças

Rebanho Bovino, Suíno, Caprino e Ovino, 2019
(milhões de cabeças)

(1) Bovinos, provisório.

(2) Caprinos, estimado.

(3) Provisório.

(4) Ovinos, provisório.

(5) Caprinos, provisório.

(6) Dados de 2018.

(7) Bovinos, 2018. Ovinos e Caprinos, 2017.

(8) Estimativas.

Fonte: Eurostat (online data codes: apro_mt_lscatl, apro_mt_lspig, apro_mt_lssheep and apro_mt_lsgoat)

A Europa está entre as regiões com a maior taxa per capita de ingestão de proteína e ingestão de proteína oriunda de fonte animal. Isto explica a importância da produção animal para a região, onde cerca de 85% da produção vegetal local é destinada para alimentar animais (Principalmente forragem e pastagem). Porém a produção vegetal local não supre toda a demanda animal e uma grande parte de proteaginosas é importada para produção de ração (BILLEN et al., 2014). De um total de 16,4 Tg N produzido em áreas agrícolas (considerando áreas de pastagem e lavoura) no ano de 2004, apenas 2,4 Tg N (cerca de 15%) foram utilizadas diretamente para alimentação humana. A maioria foi destinada ao consumo animal (8,8 Tg N ano⁻¹, ou 54%) (LEIP et al., 2015). O uso de nitrogênio na produção animal é menos eficiente quando comparado ao setor agrícola, sendo que menos de um terço do N é fixado em produtos animais (leite, carne, ...). Portanto, dois terços deste N é concentrado em coprodutos (couro), dejetos e esterco, sendo que os dejetos e esterco gerados são reaproveitados como fertilizantes para a cultura vegetal e uma pequena parte é perdida por volatilização e lixiviação, gerando riscos e impactos ambientais (GODINOT et al., 2016). Além disso, a produção animal cada vez mais compete por recursos cada dia mais escassos, como terra, água e energia (DE VRIES; DE BOER, 2010).

Na produção agropecuária europeia, sistemas agrícolas possuem um maior indicador de eficiência do uso de nitrogênio (NUE) quando comparado a sistemas de produção animal. Sistemas agrícolas possuem um NUE médio de 61%, enquanto sistemas de produção de bovinos leiteiros um NUE médio de 28% e suinoculturas um NUE médio de 43% (QUEMADA et al., 2020). A inclusão de perdas de nitrogênio externas a fazenda, tiveram um grande efeito no NUE das produções de animais, o que salienta a necessidade de se considerar fatores de ajuste deste indicador quando se calcula e interpreta balanços a nível de propriedade rural (QUEMADA et al., 2020).

A cadeia produtiva de animais de produção redistribui a biomassa presente em plantas ou partes da planta, em produtos de origem animal como carne, leite, ovos, lã, poder de tração, fezes, urina, respiração e fermentação. A produção animal pode ser vista como um resultado da ciclagem biogeoquímica de nutrientes entre o solo, água, ar, plantas, animais e dejetos. O desequilíbrio nos

ciclos destes nutrientes pode implicar em emissões danosas ao ambiente (TAMMINGA, 2003).

A cadeia produtiva do setor animal em 2010 contribuiu por aproximadamente 65 Tg N ano⁻¹ nas emissões globais antropogênicas de nitrogênio. Onde 29 Tg N ano⁻¹ são na forma de NO₃⁻, 26 Tg N ano⁻¹ na forma de NH₃, 8 Tg N ano⁻¹ em óxidos de nitrogênio e 2 Tg N ano⁻¹ na forma de N₂O. Estas emissões são oriundas da aplicação de fertilizantes sintéticos, uso de dejetos animais em lavouras e pastagens, manejo dos dejetos animais e transporte de produtos ricos em nitrogênio para alimentação dos animais e seres humanos (UWIZEYE et al., 2020).

As emissões do setor de produção animal contribuem fortemente para os seguintes impactos ambientais (LEIP et al., 2015):

- 1) Emissões de amônia e óxidos de nitrogênio contribuem na produção de partículas secundárias e de ozônio troposférico (O₃), sendo fatores importantes na depleção da qualidade do ar;
- 2) Produção de gases de efeito estufa como metano, óxido nitroso e gás carbônico pela combustão de combustíveis fósseis e pela mudança no uso da terra;
- 3) Perda de biodiversidade como consequência da mudança no uso da terra, emissões de amônia e mudanças climáticas; e
- 4) O setor de produção animal também impacta diretamente na qualidade da água, causando prejuízos para saúde humana além de alterações nos ecossistemas de água doce e salgada.

Uma significativa porcentagem dos nutrientes consumidos por meio do alimento é excretada pelas fezes e urina, sendo que esta excreção representa algo em torno de 60 a 90% dos nutrientes presentes na dieta, dependendo da espécie animal, composição da dieta, produtividade e manejo adotado (LIU et al., 2017). Sendo assim, dejetos de animais são grandes fontes de carbono orgânico e nutrientes, e são conhecidos pelo potencial de melhorar a qualidade do solo e fertilizar lavouras. Seu manejo inadequado (coleta, estocagem e aplicação na lavoura) contribui para altas perdas de nutrientes para o ar e cursos d'água (LIU et al., 2017).

O nitrogênio é um componente essencial para formação das proteínas, e compostos gasosos (NH_3 , N_2O , N_2) facilmente escapam do sistema, especialmente por meio do dejetos animal e manejo adotado. Em sistemas de pastejo, a maior parte das fezes e urina são deixados na pastagem e os nutrientes então reciclados, mas comumente observa-se que o uso deste nitrogênio é baixo devido à má distribuição destas fezes e urina na área de pastejo. Em sistemas de produção mistos, ou seja, que integram produção animal e vegetal, a reciclagem e uso de nutrientes oriundo de dejetos dependem de manejo deste dejetos e a disponibilidade e acessibilidade aos fertilizantes e tecnologias. Em sistemas intensivos de produção, a reciclagem de nutrientes oriunda dos dejetos é desafiadora, porque na maioria das vezes observa-se a falta de área para aplicação deste dejetos, como consequência, os nutrientes não são eficientemente utilizados nestes sistemas produtivos (LIU et al., 2017).

Além dos impactos oriundos da produção animal, a nível fazenda, deve-se considerar os impactos ambientais da cadeia produtiva como um todo. De acordo com dados da FAO de comércio exterior, em 2004 a União Europeia (EU) (27 países) foi uma importante consumidora de produtos agrícolas destinados à produção animal, sendo a soja em grãos o produto com maior participação. Os maiores fornecedores são a Argentina, Brasil e Estados Unidos, representando 84% do total de importações do bloco (FAO, 2021). Esta demanda por produtos agrícolas agrupa países, setores e consumidores em uma cadeia global de suprimentos (SHUTTERS; MUNEEPEERAKUL, 2012). Esta dependência externa por suprimentos tem um importante e crescente impacto nos ecossistemas globais dos sistemas agropecuários, como por exemplo, a depleção de águas profundas, mudança no uso da terra e desmatamento, e as emissões de gases do efeito estufa (TAHERZADEH; CARO, 2019).

Dados sobre o impacto ambiental da soja comercializada internacionalmente demonstram que o uso para alimentação animal representa três quartos (73%) da água virtual³ e terra associadas ao comércio internacional de soja. O uso da soja para alimentação humana corresponde a 24% da água virtual e terra associadas ao comércio internacional de soja. Cerca de 2% do total de água e

³ Água virtual é a água “incorporada” em um bem de consumo, considerando toda a sua cadeia de produção. Este conceito foi apresentado pelo geógrafo norte-americano Tony Allan, no início da década de 90.

terra foram alocados para grãos de soja utilizados para sementes, energia, e perdas dentro da cadeia produtiva (TAHERZADEH; CARO, 2019). Sendo assim, é importante avaliar a cadeia produtiva das matérias primas para a produção animal e calcular seus impactos ambientais nas diferentes etapas do ciclo produtivo. A tabela 1 abaixo demonstra a contribuição da maioria das *commodities* comercializadas internacionalmente nos fluxos globais de nitrogênio.

Tabela 1 – Contribuição da maioria das *commodities* comercializadas internacionalmente nas trocas globais de nitrogênio.

1961			1986			2010		
<i>Commodities</i>	GgN	%	<i>Commodities</i>	GgN	%	<i>Commodities</i>	GgN	%
Trigo	782	26	Trigo	1.719	16	Soja	5.816	25
Soja	249	8	Soja	1.647	15	Farelo de Soja	4.589	19
Milho	217	7	Farelo de Soja	1.616	15	Trigo	2.817	12
Lã	187	6	Milho	895	9	Milho	1.630	7
			Ração e			Ração e		
Cevada	128	4	farinha de	753	7	farinha de	586	2
			glúten			glúten		
Arroz	105	3	Cevada	346	3	Farinha de colza	564	2
Outros	1.364	46	Outros	3.547	34	Outros	8.169	33
Total de N	3.032			10.523			23.585	

Legenda: GgN = gigagramas⁴ de nitrogênio. N = nitrogênio % = participação do produto no total, em porcentagem. Fonte: Adaptado de LASSALETТА et al., 2014.

Em relação ao comércio, em 1961 houve aumentos significativos no comércio exterior de soja e farelo de soja. Sendo que a soja saiu de uma participação de 8% em 1961 para 25% em 2010. Levando em consideração que praticamente todos os produtos de soja, as farinhas, o trigo e o milho são utilizados para alimentar animais, os dados do gráfico claramente indicam que a maior parte do comércio internacional de *commodities* está destinado à alimentação de animais (LASSALETТА et al., 2014). Ressalta-se assim, a importância da análise de fluxos de nutrientes considerando toda a cadeia

⁴ Gigagramas (Gg) = É uma fração decimal múltipla da unidade de massa básica no quilograma do Sistema Internacional de Unidades (SI), 1 Gg = 10⁹ gramas.

produtiva e não apenas o setor da produção animal à nível de fazenda (GAMEIRO; BONAUDO; TICHIT, 2019)

3.4 A CONTABILIDADE DO FLUXO DE SUBSTÂNCIAS

A Contabilidade de Fluxo de Materiais ou Contabilidade de Fluxo de Substâncias, permite estimar o fluxo de matéria em um sistema produtivo em várias escalas, seja em nível de fazenda ou a nível de cadeia produtiva. Esta análise está incluída na área de estudo conhecida como “metabolismo industrial” ou “ecologia industrial”, que foi proposta por Robert Ayres (AYRES, 1989).

A metodologia se baseia no fato de que se os fluxos de energia, matéria ou substâncias podem ser estimados e associados entre si por meio de equações matemáticas, compreendendo assim o funcionamento deste sistema, a quantidade de recursos alocados, os tipos de produtos e resíduos gerados durante o processo e qual a eficiência deste processo (GAMEIRO et al., 2017).

Quantificar o balanço de nutrientes significa quantificar os nutrientes que entram e saem de um determinado sistema, sendo o cálculo baseado no princípio de conservação de massa, onde o total de entradas (inputs) é igual ao total de saídas (outputs) mais a variação de estoque (ZHANG et al., 2020).

Figura 6 – Representação esquemática do balanço de nutrientes de um sistema

Fonte: Adaptado de ZHANG et al. (2020).

Na figura acima, a saída de nutrientes por meio de produtos, inclui os nutrientes colhidos e removidos do sistema, que usualmente possuem valor econômico (exemplo: grãos, palhas e produtos animais). ΔNu significa a variação no estoque de nutrientes dentro do sistema a ser estudado (ZHANG et al., 2020).

Alguns autores sugerem algumas aplicações ou motivações para uso da Contabilidade de Fluxo de Materiais, como (AYRES, 1989; ZHANG et al., 2020).

- Combinação de dados de entrada no sistema, com o detalhamento técnico dos processos de produção por parte da engenharia, fornecendo estimativas mais acuradas sobre a geração de resíduos;
- Reconstrução histórica da geração de resíduos ao longo do tempo;
- Aplicação em análises de ciclo de vida de materiais;
- Fornecimento de uma base objetiva para a análise do efeito antropogênico sobre os processos naturais;
- Identificação e quantificação de faltas ou perdas de nutrientes; e
- Avaliação da eficiência do uso de nutrientes em um sistema, podendo ser uma lavoura, sistema de produção animal ou toda a cadeia produtora de alimento.

A técnica é interessante para sistemas agropecuários por ajudar na sinalização de indicadores de sustentabilidade, já que a metodologia segue os fluxos físicos de recursos naturais desde sua extração até a sua disposição final, avaliando em cada processo, as entradas, saídas, reciclagens, transformações e perdas no sistema a ser estudado (GAMEIRO et al., 2017).

As escalas do sistema definem os principais elementos que serão examinados dentro de um limite, ou seja, uma escala espacial. Uma escala temporal também se torna necessária, variando entre uma safra, vários anos ou décadas (LASSALETТА et al., 2014; ZHANG et al., 2020). As escalas podem ser a nível de solo-planta, onde serão quantificados os fluxos presentes na produção agrícola de uma fazenda, região, estado ou país. Pode ser na escala do sistema animal, determinando o balanço de nutrientes presentes nos vários sistemas de produção animal. Uma visão maior abrangeria o sistema agroalimentar, que estende os limites do sistema desde a produção até a cadeia de suprimento de alimentos e seu uso no mercado ou consumidor final. Sendo que a escala mais global da cadeia, seria denominada sistema panorâmico, que considera as atividades humanas e o ecossistema terrestre como um sistema integrado e avalia o “novo” nutriente introduzido pelas atividades humanas (BILLEN; LASSALETТА; GARNIER, 2014).

A quantificação do nitrogênio é interessante pois além da proteína ser essencial a dieta humana, a técnica permite unificar as medidas e ressaltar a

relação entre produção de alimentos, seu consumo e o meio ambiente (BILLEN; LASSALETТА; GARNIER, 2014). Para complementar o estudo da contabilidade de fluxo de materiais, torna-se necessário o uso de múltiplos indicadores para colocar os diferentes sistemas de produção e espécies relacionadas à produção animal em um mesmo parâmetro, podendo assim compará-los (DOMINGUES et al., 2019).

Pela perspectiva do ciclo do nitrogênio, as lavouras são consideradas responsáveis pela entrada de nitrogênio reativo no solo, por meio da aplicação de fertilizantes, dejetos, fixação simbiótica e deposição atmosférica. A razão entre o teor de N contido na colheita e o total de N contido na entrada da lavoura define a eficiência do uso do nitrogênio (NUE). Nesta ótica biogeoquímica, os fluxos de nutrientes e sua eficiência de utilização podem ser bons parâmetros para a avaliação da cadeia produtiva e seus impactos (BILLEN; LASSALETТА; GARNIER, 2014).

4 O EFEITO CASCATA DO NITROGÊNIO NA CADEIA PRODUTIVA DA SOJA BRASILEIRA

Este capítulo é baseado no artigo “Cascade effect of Nitrogen on Brazilian Soybean Production Chain”, publicado em regime Open Access, distribuído sob a licença Creative Commons Attribution, pela revista Nitrogen editora MDPI em 1 de abril de 2021:

REZENDE, V.T.; BONAUDO, T.; ALVES, R.B.; NACIMENTO, R.A.; GAMEIRO, A.H. Cascade Effect of Nitrogen on Brazilian Soybean Production Chain. Nitrogen, v.2, n.2, p. 128-138. <https://doi.org/10.3390/nitrogen2020009>

4.1 RESUMO

O grão de soja é um dos maiores produtos comercializados no mundo. Naturalmente, esta leguminosa fixa o nitrogênio por meio da fixação biológica de nitrogênio, transformando o nitrogênio atômico inerte em formas reativas. Com isso, o avanço do cultivo da soja pode causar impactos ambientais tanto localmente quanto globalmente. Este estudo visa estimar os fluxos de nitrogênio e a sua eficiência de uso na cadeia produtiva da soja Brasileira, aplicando a metodologia de análise de fluxo de materiais (MFA). A inovação deste estudo advém da proposta de um novo indicador para estimar o “efeito cascata do nitrogênio” em uma escala temporal de 12 anos (2007 a 2019). A hipótese é que este indicador é capaz de demonstrar um acúmulo das emissões de nitrogênio ao longo da cadeia produtiva. Além disso, o método é capaz de demonstrar as principais fontes de emissões de nitrogênio para o ambiente. A fixação biológica de nitrogênio foi a maior entrada observada no sistema estudado. A eficiência no uso do nitrogênio foi de 81% na etapa de produção do grão, e o indicador cascata do nitrogênio, que representa a razão entre as emissões de nitrogênio para o ambiente e o total de nitrogênio disponível no produto final, foi de 5,2% para a cadeia produtiva do farelo de soja no ano de 2019, com uma clara tendência de aumento durante o período estudado. Sendo assim, o Brasil contribui

significativamente nas emissões globais de nitrogênio já que o país é um importante produtor e comerciante no mercado internacional.

Palavras-chave: nitrogênio reativo, produção de alimentos, Brasil, produção de soja, análise do fluxo de materiais, eficiência do uso de nitrogênio.

4.2 INTRODUÇÃO

O nitrogênio apesar de ter promovido o crescimento da produção agropecuária, é também responsável por diversos efeitos adversos ao ambiente com danos comprovados à saúde humana, à biodiversidade e aos ecossistemas aquáticos e terrestres (BOWMAN; BEUSEN; BILLEN, 2009; LASSALETТА et al., 2014; GALLOWAY; COWLING, 2002). Dentro das nove fronteiras planetárias (ROCKSTROM et al., 2009) o nitrogênio, juntamente com fósforo já se encontram em níveis de incerteza, com efeitos nocivos ao equilíbrio dos ecossistemas (ROCKSTROM et al., 2020). O avanço na produção de alimentos contribui para o aumento nas emissões de nitrogênio reativo para a biosfera, por meio do uso de fertilizantes sintéticos, fixação biológica do nitrogênio, manejo de dejetos oriundos da produção animal e queima de combustíveis fósseis (IPCC, 2013). Em 2010, a cadeia da produção animal contribuiu com aproximadamente 65 Tg de N no total das emissões antropogênicas globais. Isso representa 39% das emissões de nitrato, 23% das emissões de óxidos de nitrogênio, 60% das emissões de amônia e 32% das emissões de óxido nitroso (UWIZEYE et al., 2020). O termo nitrogênio reativo engloba todas as formas de nitrogênio exceto a forma gasosa inerte (N_2), ou seja, incluindo amônia, óxidos de nitrogênio, formas de nitrogênio perdidas nos cursos d'água e o nitrogênio presente nos organismos na forma de proteínas, aminoácidos e outras formas orgânicas (GALLOWAY; COWLING, 2002; BILLEN; LASSALETТА; GARNIER, 2015). O aumento do nitrogênio reativo causa impactos ambientais em diversas escalas, sendo elas locais, regionais e globais. Isto se deve ao fato de que a quantidade de nitrogênio reativo produzido é maior que a capacidade dos ecossistemas em convertê-lo a forma não reativa. Sendo assim, este excesso de nitrogênio pode mover-se, acumular-se ou transformar-se, desenvolvendo assim, o “efeito

cascata” do nitrogênio (GALLOWAY, 1998). O “efeito cascata” representa uma forma dinâmica de entendimento do ciclo do nitrogênio, onde é demonstrado a existência de interações entre os sistemas e os seus impactos nos diferentes ecossistemas (PEYRAUD et al., 2012). O efeito cascata também demonstra a abertura do ciclo do nitrogênio. Um importante fato desta cascata é que uma vez iniciada, a fonte produtora do nitrogênio reativo se torna irrelevante, isto se deve ao fato de que as formas de nitrogênio reativo podem ser convertidas entre elas e causar diferentes efeitos na atmosfera e nos ecossistemas aquáticos e terrestres (GALLOWAY et al., 2003).

A soja é amplamente cultivada devido a sua importância como alimento para animais (maior fonte de proteína vegetal) e seu uso como óleo para alimentação humana e manufatura de biocombustíveis (CATTELAN; DALL’AGNOL, 2018). O Brasil atualmente é o maior produtor de grãos de soja do mundo, com 124,8 milhões de toneladas produzidas na safra de 2019/2020, e também é um importante exportador de grãos e farelo de soja. Entre 1977 e 2019 houve um aumento na produção de soja de 12 vezes e um aumento de produtividade de 2,7 vezes (CONAB, 2021). Este aumento é uma consequência da expansão do cultivo desta leguminosa, em sua maior parte no centro-oeste brasileiro, que se tornou a região com maior produção do país. Atualmente outra região brasileira ganha destaque, a região nordeste do país, que se transformou na nova fronteira agrícola brasileira. Devido a esta expansão, biomas como a Amazônia e Cerrado sofreram impactos e medidas como a “Moratória da Soja” (um acordo entre compradores e produtores para não ocorrer comércio de produtos oriundos de locais de desmatamento) e o código florestal (Lei federal de proteção de florestas) foram implementados com objetivo de conter o desmatamento. Além do desmatamento, a soja também é relacionada à mudanças no uso da terra em diversas regiões do país, substituindo principalmente áreas de pastagem (RAUSCH et al., 2019).

As mudanças no uso da terra, desmatamento, avanços do plantio de soja e o desenvolvimento da agricultura no país, contribuíram ao aumento no uso de nitrogênio antropogênico. Um exemplo é a fixação biológica de nitrogênio (FBN), que em 1995 representou 3,5 Tg de nitrogênio, já em 2002 este valor subiu para 7,3 Tg, representando respectivamente 70% e 77,6% do total de entradas antropogênicas brasileiras (FILOSO et al., 2006). Sendo assim, a fixação

biológica representa a maior fonte de nitrogênio reativo no ciclo brasileiro, ressaltando a importância do cultivo da soja neste ciclo (FILOSO et al., 2006).

Então, torna-se necessário melhor entender o efeito cascata do nitrogênio e suas consequências nos vários ecossistemas em que ele atua, já que este tópico não é muito estudado e abordado em políticas públicas para desenvolvimento sustentável (GALLOWAY et al., 2008). As políticas atuais têm focado em estratégias focadas em elementos individuais, sem considerar as inter-relações e conexões entre os elementos e suas escalas de atuação (XU et al., 2019). Sendo assim, o objetivo deste capítulo é explorar em quais fases do ciclo produtivo da soja brasileira tem os maiores impactos no ciclo do nitrogênio, além disso, estimar o efeito cascata do ciclo do nitrogênio na cadeia produtiva da soja brasileira. Para isso, foi adotada a metodologia da análise dos fluxos de materiais, aliada a análise do indicador de eficiência do uso do nitrogênio e ao novo indicador proposto para estimar o efeito cascata. Com os dados de fluxos da cadeia produtiva da soja brasileira e os indicadores esperamos responder à questão de quanto nitrogênio esta cadeia produtiva necessita, e quanto deste nitrogênio reativo é destinado ao ambiente, potencializando os efeitos ambientais. Esta resposta pode ajudar a melhorar o manejo de nutrientes e reduzir as perdas logísticas na cadeia produtiva da soja brasileira.

4.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados foram coletados para a produção de soja brasileira e o seu processamento industrial em farelo de soja, no período de 2007 a 2019. Os dados foram organizados em entradas e saídas de nitrogênio (toneladas/ano), conforme detalhado abaixo:

1. As entradas e saídas consideradas no balanço de nitrogênio na etapa de produção de soja foram:

Entradas

- Deposição atmosférica: Processo importante de remoção de compostos nitrogenados e outros poluentes do ar para a superfície terrestre, podendo ocorrer na forma de deposição úmida e deposição seca. Os valores

considerados neste estudo foram: para a região central e sul do Brasil: 8 kg de N/ha/ano, e para a região amazônica de 4 kg de N ha ano⁻¹ (VET et al., 2014);

- Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN): Processo de transformação do nitrogênio gasoso (N₂) em estruturas assimiláveis por outros organismos, especialmente vegetais. Valor considerado neste estudo 180 kg de N ha ano⁻¹ (HUNGRIA; CAMPO; MENDES; 2001);
- Área plantada e Produtividade: hectares de área plantada soja no Brasil por ano. Produtividade da soja brasileira por ano (kg ha⁻¹) (CONAB, 2021);
- Necessidade de sementes para o plantio: Considerando que são necessários 68,75 kg por hectare de sementes de soja, para garantir um estande de 250 mil plantas por hectare com poder germinativo de 80% e inserção de 10% a mais na quantidade de sementes no campo para possíveis perdas por pragas e erros na semeadura (EMBRAPA, 2014);
- Importação de sementes para plantio: Importação brasileira de sementes de soja para plantio. Nomenclatura Comum do Mercosul (NCM) considerados: 12010010-Soja para semeadura, 12011000-Soja, mesmo triturada, para semeadura (COMEXSTAT, 2021);
- Consumo de sementes nacionais: A diferença entre a necessidade de sementes para plantio e a quantidade de semente importada.
- Novas terras para plantio de soja: A diferença de área plantada de um ano para o outro foi considerada como novas áreas para plantio de soja. Elas foram divididas entre os biomas: Amazônia, Cerrado e Pampa. As emissões foram calculadas considerando que 22% das áreas de Cerrado foram oriundas de desmatamento, 5% das áreas Amazônicas, e 8,2% das áreas no Pampa, e o restante de conversão de pastagens para lavoura. As emissões foram calculadas em kg de N por hectare por ano, sendo que para as pastagens e o Pampa foi considerado um valor de 0,75 Kg de N e para o desmatamento da Amazônia 3,95 Kg de N, para o desmatamento no cerrado 4,75 Kg de N (RAUSCH et al., 2019; ABIOVE, 2021; VERCHOT et al., 1999; KUPLICH; COAPONE; COSTA, 2018; BUSTAMANTE et al., 2006).

Saídas:

- Soja Colhida: Quantidade de grãos de soja colhidos na safra (CONAB, 2021);

- Soja Produzida: Quantidade de grãos colhidos acrescido de 0,5% de perdas durante a colheita.
- Perdas na Colheita e Transporte: Consideradas as perdas referentes ao transporte rodoviário da fazenda ao armazém de grãos e as perdas durante a colheita. Valor considerado 0,5% (APROSOJA, 2021);
- Restos Culturais: Quantidade de nitrogênio presente nas folhas e no caule da planta de soja no momento da colheita, estimadas em 15 kg de nitrogênio para cada 1000 kg de grãos de soja produzidos por hectare (HUNGRIA; CAMPO; MENDES, 2001);

2. Entradas e saídas consideradas no balanço de nitrogênio na etapa de armazenamento do grão.

Entradas:

- Soja Colhida: Quantidade de grãos de soja colhidos na safra (CONAB,2021);
- Importação de Soja: Importação de grãos de soja considerando os seguintes NCM: 12019000- Soja, mesmo triturada, exceto para semeadura. 12010090- Outros grãos de soja, mesmo triturados (COMEXSTAT,2021);
- Estoque inicial: Quantidade de soja em grão estocada, no início do ano corrente, em unidades de armazenamento das indústrias, tradings, cooperativas e cerealistas (ABIOVE,2021).

Saídas:

- Processamento de Grãos: Quantidade de grãos de soja destinados ao processamento industrial (ABIOVE,2021);
- Exportação de grãos: Exportação de grãos de soja considerando os seguintes NCM: 12019000- Soja, mesmo triturada, exceto para semeadura. 12010090- Outros grãos de soja, mesmo triturados (COMEXSTAT,2021);
- Estoque final: Quantidade de soja em grão estocada, no final do ano corrente, em unidades de armazenamento das indústrias, tradings, cooperativas e cerealistas (ABIOVE,2021);
- Perdas durante o processo: Perdas de estocagem de grãos (0,9%), e perdas referente ao transporte até a indústria processadora ou porto (0,25%) (APROSOJA,2021).

3. Entradas e saídas consideradas no balanço de nitrogênio na etapa de processamento industrial da soja.

Entradas:

- Estoque inicial de farelo de soja: Quantidade de farelo de soja estocada no início do ano corrente pelo setor processador (ABIOVE,2021);
- Importação de farelo de soja: Quantidade de farelo de soja importada pelo Brasil considerando os NCM: 23040010- Farinhas e pellets, da extração do óleo de soja. 23025000- Sêmeas, farelos e outros resíduos de leguminosas (COMEXSTAT,2021);
- Grãos direcionados para o processamento: Quantidade de grãos de soja destinados ao processamento industrial (ABIOVE,2021).

Saídas:

- Exportação de farelo de soja: Quantidade de farelo de soja exportada pelo Brasil, considerando os NCM: 23040010- Farinhas e pellets, da extração do óleo de soja. 23025000- Sêmeas, farelos e outros resíduos de leguminosas (COMEXSTAT,2021);
- Consumo interno de farelo de soja: A diferença entre a quantidade de farelo produzido pela indústria e a quantidade de farelo exportada;
- Estoque final: Quantidade de farelo de soja estocada no final do ano corrente pelo setor processador (ABIOVE,2021);
- Perdas durante o processo industrial: Perdas oriundas do processamento do grão e transporte do farelo de soja, valor de 1% de perdas (APROSOJA,2021).

Para análise destes dados, utilizou-se a metodologia de análise do fluxo de materiais (MFA), onde os fluxos de nitrogênio foram alocados em três fases distintas: (i) a produção da soja no campo (produção de soja); (ii) estoque e comércio de grãos de soja (cerealista); (iii) produção do farelo de soja pelo processamento industrial. O balanço considerou que as entradas de nitrogênio subtraídas das saídas e variação de estoque deveriam ser iguais a zero (ANEXO A) (BILLLEN; LASSALETТА; GARNIER, 2014; GAMEIRO; BONAUDO; TICHIT, 2018).

4.3.1 Sistema produtivo de soja considerado no modelo

O itinerário técnico para a produção de soja utilizou dados disponíveis pelo Agribenchmark (2021), pela propriedade BR1300MT, localizada na região Centro-oeste do Brasil. Este itinerário representa o sistema produtivo adotado na região Centro-oeste, que por sua vez, é similar aos sistemas produtivos da região Norte e Nordeste do país. Sendo assim, este itinerário representa 58% da quantidade de soja produzida na safra 2018/2019 (CONAB,2021). O sistema produtivo conta com adoção do plantio direto, sementes geneticamente modificadas, mecanização para preparo do solo, plantio, tratos culturais e colheita. O preparo do solo consiste em calagem do solo para corrigir a acidez, fertilização química com produtos à base de potássio, fósforo e micronutrientes. O aporte nitrogenado é oriundo da fixação biológica de nitrogênio e a deposição atmosférica. Os tratos culturais consistem em pulverizações de herbicidas e fungicidas (sendo que nosso modelo não considerou o teor de nitrogênio nestes agroquímicos). As emissões de nitrogênio oriundas do desmatamento e da mudança no uso da terra foram consideradas. Os dados referentes à produção, produtividade, área plantada, desmatamento e mudança no uso da terra foram coletados a nível estadual, no período de 2007 a 2019. Os biomas considerados no desmatamento foram o Cerrado, a Amazônia e o Pampa.

Após a colheita da soja, há o plantio subsequente de milho, denominado safrinha, que neste estudo foi considerado como o destino do nitrogênio oriundo dos restos culturais da soja. Os grãos de soja colhidos são transportados para os armazéns cerealistas, onde são secos e estocados para a venda em momento oportuno. Para a produção de farelo de soja, foram considerados dados da Associação Brasileira da Indústria de Óleos Vegetais (ABIOVE), contabilizando as perdas relativas ao transporte e logística durante todo o ciclo produtivo. Para isso, foi considerado em toda a cadeia o transporte rodoviário, que representa o modal mais utilizado no país. A figura 7 abaixo detalha os fluxos de nitrogênio e o sistema produtivo da soja brasileira considerado neste estudo.

Figura 7 - Fluxos de nitrogênio na cadeia produtiva da soja brasileira no período de 2007 a 2019. As cores da seta representam a origem do fluxo de nitrogênio. O retângulo tracejado representa a fronteira do sistema considerada neste modelo. FBN é a sigla para fixação biológica do nitrogênio. As letras a,b,c,d,e,f correspondem aos fluxos considerados para cálculo do indicador cascata do nitrogênio.

Fonte: Adaptado de Rezende et al., 2021.

4.3.2 Os indicadores de eficiência do uso de nitrogênio e o efeito cascata

Para calcular a eficiência no uso do nitrogênio nos diferentes estágios da produção de soja e derivados, foi utilizado o indicador NUE (eficiência no uso do nitrogênio) (GERBER et al., 2014), que é calculado pela razão entre o total de produto colhido em termos de teores de nitrogênio sob a quantidade de nitrogênio que entrou no sistema (BILLEN, LASSALETТА, GARNIER; 2014). As estimativas de eficiência são essenciais em estudos de avaliação de cadeias produtivas, já que baixas eficiências no uso de nutrientes comumente são associadas a maiores emissões para o ambiente (HERRERO et al., 2015).

O NUE em sistemas agropecuários tem sido utilizado em diversos estudos como um indicador para estimar o avanço no cumprimento de metas de desenvolvimento sustentável, sendo que foi aceito e é utilizado por 193 países

membros da Assembleia geral das nações unidas (ZHANG et al., 2015). Neste estudo, o NUE e sua evolução foram calculados para o sistema produtivo da soja em grão e para o sistema produtivo do farelo de soja no período de 2007 a 2019. Do ponto de vista do ciclo do nitrogênio, a eficiência na fase produtiva da lavoura pode ser considerada como a capacidade de conversão do nitrogênio adicionado ao solo, fertilizantes, dejetos animais, fixação biológica de nitrogênio e deposição atmosférica, comparado a quantidade de nitrogênio no produto final (BILLEN, LASSALETTE, GARNIER; 2014).

Um novo indicador foi proposto neste estudo: O indicador cascata de nitrogênio (NCI), que contempla as emissões de nitrogênio para o ambiente durante as fases do sistema produtivo da soja (lavoura, comércio e processamento industrial). Para este indicador é levado em conta que há uma concentração de nitrogênio no ambiente em cada etapa da cadeia produtiva. Sendo assim, ele é calculado pela razão entre as toneladas de nitrogênio que foram disponibilizadas ao ambiente, e a quantidade em toneladas de produtos comercializáveis da soja. Este é um indicador adimensional que demonstra explicitamente a porcentagem de emissões enviadas ao ambiente dentro do total de nitrogênio presente no produto comercializado. Os fluxos considerados para o cálculo do indicador estão demonstrados na Figura 7. O indicador calculado para a produção de grão de soja, considerou os fluxos “b e c” para o ambiente, e o fluxo “a” para o produto (Figura 7). Já o NCI acumulado contou com as emissões para o ambiente oriunda dos fluxos da lavoura (“b” e “c”), comercialização (“f”) e processamento (“e”), e o produto final considerado foi toneladas de farelo de soja produzidos (“d”).

Equação do indicador cascata de nitrogênio (NCI):

$$NCI = \frac{\text{Toneladas de nitrogênio destinadas ao ambiente}}{\text{Toneladas de nitrogênio presentes no produto}} \quad (1)$$

4.4 RESULTADOS

4.4.1 As entradas e saídas de nitrogênio na cadeia produtiva da soja brasileira

A maior entrada de nitrogênio no sistema de produção de soja foi oriunda da fixação biológica de nitrogênio (FBN), com um aumento observado no período

de estudo de 39%. Este aumento na FBN se deve ao aumento da área plantada no país, que era de aproximadamente 23 milhões de hectares em 2009, comparados a aproximadamente 37 milhões de hectares em 2019. Além disto, este aumento na área plantada acarretou em maior demanda por sementes e ocorreu em sua maior parte em áreas que eram destinadas a outros tipos de culturas, ou seja, houve uma mudança no uso da terra de forma geral em todo o país. O maior crescimento ocorreu no Cerrado, onde as mudanças no uso da terra foram superiores ao desmatamento. Em geral, as entradas de nitrogênio no sistema de produção de soja brasileiro saíram de aproximadamente 9 Tg de nitrogênio no ano de 2007, para aproximadamente 12 Tg de nitrogênio no ano de 2019.

Em relação as saídas de nitrogênio, foi observado uma maior transferência de nitrogênio entre os setores por meio do fluxo de grão de soja. Abordando o destino desta soja, houve uma mudança na comercialização do produto: em 2007 a maior parte da produção era destinada ao mercado interno, já em 2019, o mercado externo correspondeu a 63% do destino da produção brasileira. Com isso, o Brasil se consolida como um exportador de nitrogênio, ressaltando a importância de quantificar e otimizar os fluxos de nitrogênio da cadeia produtiva da soja e seus coprodutos. Na comercialização do farelo de soja, foi observada a mesma tendência, com um aumento significativo das exportações, mas ainda não sobressaiu o consumo doméstico. As exportações de farelo de soja aumentaram mais de 3 milhões de toneladas de produto nos 12 anos avaliados neste estudo. As figuras 8 e 9 abaixo demonstram os fluxos de nitrogênio nos anos de 2007 e 2019.

Figura 8 - Fluxos de nitrogênio na cadeia produtiva da soja brasileira em 2007.

Fluxos de nitrogênio na cadeia produtiva da soja do Brasil- 2007

Fonte: Adaptado de Rezende et al.,2021.

Figura 9 – Fluxos de nitrogênio na cadeia produtiva da soja brasileira em 2019

Fluxos de nitrogênio na cadeia produtiva da soja brasileira -2019

Fonte: Adaptado de Rezende et al., 2021

Outra importante saída, que influenciou nos resultados de emissões para o ambiente, foram as perdas relacionadas a logística, colheita, e estocagem, que teve um aumento de 75,36% entre os anos de 2007 e 2019. Estes resultados são similares aos encontrados na literatura, que ressaltam o fato de que estas perdas não podem ser excluídas de modelos, já que em cada fase as perdas são decimais, mas quando vistas do ponto da cadeia produtiva elas se tornam relevantes, mais ainda em produção de grãos, onde o volume comercializado chega a milhões de toneladas (PÉRA; CAIXETA-FILHO, 2018).

A variação de estoque dentro do balanço de nitrogênio do sistema estudado mostrou diferentes resultados ao longo da cadeia produtiva. Sendo que, no setor de produção da soja a variação de estoque foi negativa e nos processos de comercialização e industrialização os valores foram positivos. A variação de estoque negativa na etapa da lavoura vem do uso do nitrogênio disponível no solo, e também de possíveis variações no nitrogênio oriundas do desmatamento e mudanças no uso do solo. A variação de estoque positiva observada nos outros segmentos da cadeia produtiva podem ser um resultado da mudança no estoque destes setores de um ano para o outro.

4.4.2 A eficiência no uso do nitrogênio (NUE) e o Indicador de cascata do nitrogênio (NCI) na cadeia produtiva da soja brasileira

A eficiência no uso do nitrogênio na etapa de produção do grão durante o período abordado no estudo foi praticamente estável em 81%. Esta estabilidade pode ser atribuída ao fato de que não houve mudanças significativas no manejo da lavoura no período de estudo.

Houve um aumento significativo nas emissões para o ambiente nos três setores do estudo, no qual a produção de soja apresentou os maiores valores, com aproximadamente 49 mil toneladas em 2007, para aproximadamente 87 mil toneladas em 2019. Mas apesar disto, o indicador de cascata do nitrogênio (NCI) para o setor de produção do grão variou de 0,524% em 2007 para 0,522% em 2019, sendo praticamente estável. Para entender o comportamento do indicador NCI dentro da cadeia produtiva do grão de soja é necessária uma maior compreensão do comportamento das demais emissões avaliadas nesta cadeia,

para isso o gráfico abaixo (figura 10) detalha as emissões consideradas no indicador NCI para o setor de produção de grão de soja.

Figura 10- Emissões de nitrogênio consideradas no cálculo do indicador de cascata do nitrogênio (NCI), na cadeia produtiva do grão de soja no período de 2007 a 2019.

Fonte: Elaboração da autora.

Podemos ressaltar que as perdas referentes à colheita e transporte até o armazém foram significativas dentre as emissões destinadas ao ambiente. E nos anos onde a produção de grãos foi menor, houve também quedas no indicador, já que o cálculo das perdas foi estimado por meio de porcentagem de perdas em relação ao produzido no ano. Observamos também, que houve períodos com maior intensidade no desmatamento e na ocupação de novas áreas, isto coincide com o período de abertura de novas fronteiras agrícolas, como o Nordeste brasileiro.

Apesar do indicador NCI no setor de produção de grão ter mostrado uma tendência de estabilidade, mas uma ligeira queda para o ano de 2007 em relação à 2019, o NCI acumulado em toda a cadeia produtiva (ou seja, considerando além do setor de produção do grão, o setor cerealista e o da indústria processadora) teve um valor de 4,145% em 2007 e 5,216% em 2019, o que demonstra a necessidade de avaliação de uma cadeia produtiva e não análises

isoladas dos setores. Abaixo temos o gráfico (Figura 11) que demonstra o comportamento do indicador e suas variáveis dentro do período de estudo, e observa-se que as quedas nos anos de 2008, 2011 e 2015 são oriundas das quedas de produtividade observadas no setor produtivo, assim como o NCI do setor do grão de soja. Sendo que, nos a produtividade brasileira nestes anos foi de, respectivamente, 2835, 3266 e 3203,38 kg/ha.

Figura 11 - Emissões de nitrogênio destinadas ao ambiente e o indicador de cascata do nitrogênio (NCI) para a cadeia produtiva da soja brasileira, 2007 a 2019

Fonte: Adaptado de Rezende et al.,2021.

Observa-se uma maior participação das emissões oriundas da lavoura de soja, ou seja, as emissões detalhadas na figura 11, em seguida das emissões oriundas do setor cerealista e por último o setor industrial de produção de farelo de soja. As variações no indicador acompanharam os mesmos anos que o indicador para o grão de soja.

4.5 DISCUSSÃO

Já que a soja é uma planta leguminosa, era esperado que a maior entrada de nitrogênio reativo no sistema viria da fixação biológica. O valor de 11 Tg N ano⁻¹ no ano de 2019 corresponde a 13% do máximo de entradas oriundas de novo nitrogênio antropogênico na atmosfera oriundos da agropecuária, proposto por Rockstrom e colaboradores no conceito de fronteira planetária (82 Tg N ano⁻¹ de nitrogênio) (ROCKSTROM et al., 2009). Estudos anteriores estimaram os valores de fixação biológica de nitrogênio no Brasil de 7,5 Tg N ano⁻¹ em 2009 (VET et al., 2014), e 4,6 Tg N ano⁻¹ em 2005 (SUN et al., 2018). Sendo assim, pode-se observar que o aumento da área plantada de soja contribui para os aumentos na fixação biológica de nitrogênio e que o Brasil contribui em grande proporção ao máximo das entradas globais de nitrogênio oriundos da agropecuária.

Desmatamento e mudança no uso da terra foram importantes no crescimento da soja brasileira dentro do período estudado. Medidas como a “Moratória da Soja” no bioma amazônico, que restringe o comércio de grãos de soja de áreas oriundas de desmatamento, foram efetivas em reduzir a conversão de florestas tropicais para lavouras, mas ao mesmo tempo, encorajou a abertura de novas fronteiras agrícolas em outros biomas, na qual a legislação ambiental não é tão restritiva, como exemplo o Cerrado. Como resultado disto, regiões dentro do MATOPIBA, que correspondem a áreas nos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, tem se consolidado como as maiores expansões no cultivo de soja nos últimos anos (RAUSCH et al., 2019).

A produção de soja e farelo de soja no Brasil é destinada ao mercado interno e externo. Nos últimos anos, houve um aumento nas exportações desses produtos, o que consolidou o Brasil como um importante fornecedor de proteínas globalmente. O aumento deste comércio internacional acarreta aumento no transporte de nitrogênio reativo de origem antropogênica, o que pode afetar o clima, os ciclos biogeoquímicos atmosféricos, e a composição dos ecossistemas aquáticos e terrestres. Em 2004, aproximadamente 45 Tg N de um total de 187 Tg N foram adicionadas à atmosfera, oriundas do comércio internacional, na qual 40 Tg das 45 foram oriundas de produtos derivados da soja e produção de carne (GALLOWAY et al., 2008).

Outros estudos também demonstraram um balanço negativo na produção agrícola (SUN et al., 2018). Na soja, este balanço é oriundo da menor necessidade de fertilizantes químicos nitrogenados para a cultura, já que a planta é uma leguminosa e que o clima tropical tem maiores taxas de FBN (SUN et al., 2018). A segunda safra de grãos (“safrinha”) transforma este estoque negativo em positivo, já que nesta fase além de agregar os restos culturais da safra anterior, há um maior aporte de fertilizantes nitrogenados para atender a demanda da cultura (SUN et al., 2018).

A eficiência no uso do nitrogênio neste estudo foi de 81% para a produção agrícola da soja. Estudos de eficiência de nutrientes conduzidos na América Latina obtiveram valores de NUE de 71,1% para lavouras em países produtores de soja, e valores de 40% para lavouras brasileiras. Mas estas análises contemplaram outras culturas além da soja, como a cultura do milho e trigo, por isso os valores observados foram inferiores ao encontrado neste estudo. Leguminosas são conhecidas por serem mais eficientes no uso do nitrogênio do que gramíneas (BILLEN; LASSALETТА; GARNIER, 2014; ZHANG et al.; 2015).

O NUE demonstra que o Brasil mantém a eficiência no uso do nitrogênio que entra no sistema (GERBER et al., 2014), apesar do aumento de produção observado no período, o indicador manteve-se constante. O NCI, que também praticamente se manteve constante no setor de produção de grão, mostrou aumento significativo quando analisado na cadeia produtiva até a produção do farelo de soja. Além disso, os valores de emissão de toneladas de nitrogênio para o ambiente também aumentaram no período estudado. O que significa que há um aumento de consumo de recursos e de externalidades para o ambiente, em proporções maiores do que a produtividade observada no grão. Isto ressalta a importância de análises detalhadas da cadeia produtiva, e não só a visão de setor produtivo (GAMEIRO, BONAUDO, TICHIT; 2018).

4.6 CONCLUSÃO

O avanço do cultivo de soja no Brasil fez com que o país se torna o maior fornecedor de proteína vegetal do mundo, mas este avanço influencia o ciclo global do nitrogênio, já que aumenta a quantidade de nitrogênio reativo

produzido e aumenta as emissões de moléculas a base de nitrogênio para o ambiente. A fixação biológica de nitrogênio é a principal fonte de entrada de nitrogênio reativo para a lavoura e apresentou aumentos exponenciais nos últimos anos. Em 2019, ela já representava 13% do total de emissões de nitrogênio oriundas da agricultura aceitas para manter o nitrogênio dentro da zona de segurança das fronteiras planetárias. O “indicador cascata” (NCI) parece ser eficiente em demonstrar o acúmulo de nitrogênio entre os estágios produtivos da soja e farelo de soja no Brasil, apontando que nos 12 anos avaliados no estudo, os valores de emissões para o ambiente praticamente dobraram em termos absolutos. Sendo assim, melhorias no sistema produtivo, com reduções no desmatamento, perdas logísticas e uma melhor reciclagem de nutrientes são necessárias e podem contribuir para reduzir os impactos desta produção nas emissões globais de nitrogênio. Aliado a isso, pode-se observar que estudos que contemplem cadeias produtivas ao invés de sistemas produtivos isolados, são mais eficientes em demonstrar o acúmulo e o efeito cascata do ciclo do nitrogênio.

Apesar dos avanços, algumas limitações devem ser reconhecidas e podem servir de inspiração para novos estudos. A principal limitação deste estudo é a escassez de dados detalhados e dados oficiais precisos sobre as emissões e fluxos de nitrogênio nos diferentes biomas brasileiros.

5 A SOJA BRASILEIRA COMO ALIMENTO PARA ANIMAIS NA EUROPA: UMA VISÃO SOBRE OS FLUXOS DE NITROGÊNIO NA CADEIA PRODUTIVA

5.1 RESUMO

O comércio internacional de soja para alimentar animais altera o ciclo do nitrogênio a partir do momento em que a distância física entre produção animal e produção vegetal desconecta o ciclo dos nutrientes, diminuindo a reciclagem de nutrientes e aumentando o aporte de nitrogênio reativo nas várias etapas da cadeia produtiva. Esta mudança na dinâmica do ciclo potencializa o efeito cascata do nitrogênio, aumentando e acumulando as emissões de nitrogênio reativo na biosfera. Sendo assim, objetivo deste estudo foi estimar os fluxos de nitrogênio da soja brasileira destinada à alimentação animal na Europa, e como estes fluxos impactam o efeito cascata do nitrogênio em um período de 12 anos. A hipótese é que o comércio de soja e farelo de soja brasileiro é significativo para o transporte de nitrogênio reativo, e é capaz de potencializar os impactos em cascata do nitrogênio no ambiente. Para isso, foram estimados os fluxos de nitrogênio na cadeia produtiva da soja brasileira e seu consumo por animais de produção na Europa, utilizando a metodologia de análise do fluxo de materiais. Para quantificar o efeito cascata do nitrogênio no sistema produtivo, utilizou-se o indicador cascata do nitrogênio (NCI), que representa a proporção de emissões de nitrogênio ao ambiente em toda a cadeia produtiva sobre o total de nitrogênio obtido no produto comercializável. Nesta cadeia produtiva, considerou-se os seguintes produtos: soja em grão, farelo de soja, produtos de origem animal (carne bovina, carne suína, carne de frango, ovos de galinha e leite de vaca). O Brasil é um importante fornecedor de farelo e soja em grão para a Europa. Estes produtos na Europa são utilizados, em sua maioria para a alimentação de animais. O farelo de soja esteve presente em 24% do total de proteína vegetal consumida pelos animais de produção da Europa, no ano de 2019. Os fluxos de nitrogênio analisados demonstram um possível aumento na eficiência dos animais, já que no período de estudo houve uma redução na quantidade de proteína vegetal ingerida e uma maior produção de produtos de origem animal

(carne, leite, ovos) e uma menor produção de dejetos. Mas ao analisar toda a cadeia produtiva, o NCI foi praticamente estável durante o período do estudo, ressaltando a importância de análises de cadeia produtiva e não somente a nível de propriedade de produção animal.

5.2 INTRODUÇÃO

A agropecuária é um dos maiores contribuintes para as alterações no ciclo global do nitrogênio (LASSALETTA et al., 2014). Os aumentos nos fluxos de nitrogênio neste sistema proporcionaram um excedente de produtos que possibilitou o desenvolvimento da sociedade, já que a necessidade por camponeses para o trabalho no campo ficou menor e a produtividade agrícola proporcionou um excedente de produção capaz de suprir a demanda da crescente população urbana (MAZOYER; ROUDART, 2010). Este aumento na produção teve como consequência a introdução de quantidades crescentes de nitrogênio reativo (Nr; qualquer composto nitrogênio diferente do nitrogênio atmosférico N_2) na biosfera, contribuindo principalmente para impactos na qualidade do ar e da água por meio da lixiviação e desnitrificação de compostos como nitrato, amônia e óxidos de nitrogênio (GALLOWAY et al., 2008).

Uma das principais mudanças no sistema agrícola mundial foi o aumento significativo do comércio internacional de produtos agrícolas. Este crescimento do comércio exterior contribui com mudanças no uso da terra, emissões de gases do efeito estufa e perdas de nitrogênio reativo (LASSALETTA et al., 2014). Esta possibilidade de comércio exterior de uma forma econômica e eficaz, aumentou a disponibilidade de insumos para a agricultura e pecuária, principalmente a disponibilidade de fertilizantes agrícolas e maquinário (MAZOYER; ROUDART, 2010). Com isso, regiões se especializaram em criações de animais ou produção agrícola, distanciando assim a agricultura da pecuária.

Este distanciamento entre os sistemas produtivos leva a uma menor reciclagem de nutrientes entre os sistemas. Além disso, há uma maior necessidade de aportes de novo nitrogênio reativo em cada fase da cadeia produtiva, o que muitas vezes implica aumento de emissões para o ambiente e

diminuição da capacidade de absorção pelos ecossistemas deste nitrogênio reativo, constituindo assim o chamado “efeito cascata do nitrogênio” (GALLOWAY et al., 2008; LASSALETТА et al., 2014). O efeito cascata do nitrogênio contempla as consequências deste acúmulo e distribuição do nitrogênio reativo produzido nos diferentes ecossistemas. Sabe-se que o nitrogênio reativo produzido é móvel e tem a capacidade de se associar, transformar e acumular em níveis locais, regionais e globais, e assim potencializar danos ambientais na biosfera (GALLOWAY et al., 2003). Os impactos ambientais deste acúmulo e superprodução de nitrogênio reativo levaram o nitrogênio, juntamente com o fósforo, a se tornarem uma fronteira planetária já ultrapassada em níveis de incerteza, o que traz consequências para a manutenção da vida no planeta (ROCKSTRÖM et al., 2009).

O Brasil e os Estados Unidos foram responsáveis por atender 64% da demanda por soja em grãos da União Europeia em 2019 (FAO, 2021). Nos últimos anos, a expansão da soja foi significativa no Brasil, sendo que biomas como Cerrado e Amazônia sofreram desmatamento para atender esta demanda. Além disso, há uma mudança no uso da terra, com áreas de agricultura e pecuária sendo convertidas para a produção de soja. Estudos estimam uma perda ambiental na ordem de US\$ 120 bilhões em 2008 oriunda da transação de soja pela União Europeia, confirmando que os benefícios agroindustriais da importação de soja são obtidos por meio de danos ao ambiente e comprometimento da qualidade de vida das futuras gerações (BOEREMA et al., 2016).

Sendo assim, o comércio da soja brasileira e farelo de soja para alimentar animais na Europa, implica uma exportação de “nitrogênio virtual”, ou seja, além do nitrogênio contido no produto comercializado, há também todo o nitrogênio reativo que foi lançado ao ambiente durante toda a cadeia produtiva, que possibilita assim a cascata de efeitos em diversos ecossistemas e regiões do planeta. Com isso, o objetivo deste estudo foi estimar os fluxos de nitrogênio da soja brasileira destinada à alimentação animal na Europa, e como estes fluxos impactou o efeito cascata do nitrogênio em um período de 12 anos. A hipótese é que o comércio de soja e farelo de soja brasileiro é significativo e é capaz de potencializar os impactos em cascata do elemento no ambiente, já que na produção vegetal há maiores perdas (mudança no uso da terra, desmatamento,

perdas logísticas e perdas durante a colheita e armazenamento) do que a produção animal.

5.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os fluxos de nitrogênio na cadeia produtiva da soja brasileira e a produção animal na Europa foram estimados no período de 2007 a 2019, levando em consideração os fluxos descritos para o sistema produtivo da soja brasileira em Rezende et al. (2021) (ANEXO A). Para a produção animal na Europa, foram considerados dados dos rebanhos suíno, bovino e galináceo, da União Europeia (28 países). No que se refere à quantificação dos fluxos de nitrogênio nas diferentes fases deste ciclo produtivo, foi utilizada a metodologia de contabilidade de fluxos de materiais, e partindo do pressuposto de que as entradas de nitrogênio subtraídas das saídas e variação de estoque seriam iguais a zero (ANEXO B) (BILLEN; LASSALETТА; GARNIER, 2014; GAMEIRO; BONAUDO; TICHIT, 2019).

O sistema de produção animal europeia foi dividido em duas etapas produtivas: i) o uso de soja em grão e farelo de soja no sistema de produção de animais; e ii) O consumo de proteína vegetal pela produção animal e a produção de produtos de origem animal. No primeiro sistema foram consideradas as seguintes entradas e saídas do sistema:

1. Entradas de nitrogênio pelo sistema de uso de soja e farelo de soja para alimentação de animais na Europa:

- Soja importada pela União Europeia (28 países): Fonte dos dados Eurostat, considerando os seguintes códigos de comércio exterior: 12010090 e 12019000. Para o cálculo do teor de nitrogênio, considerou-se um teor de 6,5% de N para a soja em grão.
- Farelo de soja importado pela União Europeia (28 países): Fonte dos dados Eurostat, considerando os seguintes códigos de comércio exterior: 23025000 e 23040000. Para o cálculo do teor de nitrogênio, considerou-se um teor de proteína bruta de 46% do farelo de soja.

- Soja produzida pela União Europeia (28 países): Fonte de dados Eurostat. Para o cálculo do teor de nitrogênio, considerou-se um teor de 6,5% de N para a soja em grão.

Para o cálculo da participação brasileira nas importações de soja e farelo de soja da União Europeia, foram levantados os dados referentes ao comércio exterior brasileiro, por meio do portal Comexstat, onde foram considerados os seguintes códigos NCM: i) soja em grãos: 12019000 e 12010090. ii) farelo de soja: 23040010 e 23025000. A participação foi calculada pela razão entre o total importado de origem brasileira pelo total das importações considerando todas as origens.

2. Saídas de nitrogênio pelo sistema de uso de soja e farelo de soja para alimentação de animais na Europa

- Soja exportada pela União Europeia (28 países): Dados da Eurostat. Considerando os mesmos códigos e teor de nitrogênio das importações.
- Farelo de soja exportado pela União Europeia (28 países): Dados da Eurostat. Considerando os mesmos códigos e teor de proteína bruta das importações.
- Consumo de farelo de soja pela Indústria de alimentos para animais da União Europeia: Dados da FEDIOL (*The EU vegetable oil and protein meal industry association*).
- Consumo de farelo de soja pelo mercado consumidor da União Europeia: Para estimar a quantidade de farelo de soja disponibilizado ao mercado consumidor (neste caso, a quantidade de farelo de soja vendida dentro da União Europeia como ingrediente para alimentação animal, excluindo indústria), subtraiu-se a produção total de farelo de soja da União Europeia pelo consumo de farelo de soja pela indústria de alimentos para animais e a quantidade exportada de farelo de soja.

Para calcular a participação brasileira em cada saída abordada neste modelo, utilizou-se a mesma proporção de participação calculada nas importações de farelo de soja e soja em grãos.

No ciclo produtivo de animais, foram considerados os rebanhos: suíno, bovino de leite, bovino de corte, frango de corte e galinha de postura, na União

Europeia (28 países), no período de 2007 a 2019. Para estimar o consumo de farelo de soja pela produção animal, somou-se os dados do consumo de farelo de soja pela indústria de alimentos para animais, com os dados do consumo de farelo de soja pelo mercado consumidor da União Europeia. Estes dados foram convertidos para quantidade de nitrogênio, considerando o farelo de soja com um teor de proteína bruta de 46%. Foram estimados também o total de ingestão de proteína vegetal em toneladas de nitrogênio, calculado conforme descrito por Billen et al. (2014), onde somou-se as excreções da produção animal (método de cálculo descrito abaixo) e a produção de produtos de origem animal, excluindo os coprodutos da produção animal (couro, vísceras, sangue e ossos). Com os dados de teor de nitrogênio presente no farelo de soja destinado aos animais e a quantidade de proteína vegetal consumida em toneladas de nitrogênio, foi estimada a participação brasileira no montante consumido pelos animais da União Europeia no período abordado pelo estudo.

Foi estimada a participação da soja no total de produtos de origem animal, para isso utilizou-se a seguinte fórmula:

$$\text{Soja produto animal} = \frac{\text{Total de nitrogênio farelo de soja}}{\text{Total de nitrogênio em produtos de origem animal}} \quad (2)$$

Sendo que:

Total de nitrogênio farelo de soja = soma dos teores de nitrogênio do farelo de soja oriundo de rações comerciais e do farelo de soja como ingrediente disponibilizado para produção animal.

Total de nitrogênio em produtos de origem animal = somatória do teor de nitrogênio presente nos seguintes produtos: i) carne bovina; ii) leite de vaca; iii) carne suína; iv) carne de frango; v) ovos de galinha e vi) dejetos. Neste estudo não foram considerados nitrogênio oriundo de couro, vísceras e ossos, seguindo o mesmo princípio que Billen et al (2014) e Lassaletta et al. (2014).

Para a participação brasileira no teor de nitrogênio presente no produto de origem animal europeu, foram obtidos os dados de produção de leite, produção de carne bovina, produção de ovos, produção de carne suína e produção de carne de frango. Os dados referentes à produção leiteira foram obtidos na base de dados da Eurostat (*raw cows milk*) e para os valores de teor de nitrogênio

presente no leite, foram coletados também os dados do teor de proteína média anual no Eurostat. Para conversão da proteína do leite em nitrogênio utilizou-se o fator de correção de 6,38 proposto pela FAO (2018). A produção de carne bovina teve como fonte de dados a FAOSTAT, e o teor de nitrogênio calculado levando em consideração o teor de proteína bruta de 26%, e o fator de conversão do nitrogênio de 6,25 (FAO,2018). Os dados de produção de carne suína são oriundos da FAOSTAT, com um teor de proteína bruta de 27% e um fator de correção para conversão em nitrogênio de 6,25 (FAO,2018). A produção de ovos levou em consideração ovos inteiros com casca (*Eggs, hen, in shell, number*) do banco de dados da FAOSTAT, o teor de nitrogênio considerado foi de 1,03 g/ovo conforme descrição da FAO (2018). Para carne de frango, os dados também foram obtidos na FAOSTAT, com teor de proteína de 27% e fator de correção para nitrogênio de 6,25 (FAO, 2018).

Para estimar os dejetos produzidos pelas produções de animais consideradas neste modelo, primeiro obteve-se os efetivos animais em cabeças, para os seguintes rebanhos: i) galinhas poedeiras; ii) frangos de corte; iii) efetivo bovino (incluindo todas as categorias) iv) vacas leiteiras; v) matrizes suínas, vi) leitões vii) suínos em crescimento viii) suínos em fase de engorda. Todos os efetivos foram consultados na base de dados da Eurostat, considerando a União Europeia 28 países. A excreção média das produções animais seguiu o modelo descrito por Billen et al. (2014), onde o efetivo em cabeças do rebanho das diferentes espécies e categorias foram multiplicados pelos fatores de excreção per capita descritos por Van der Hoeck (1998). Deste dejetos, foram descontados 30% como perdas de estocagem e manejo do dejetos animal (BILLEN et al., 2014). O restante foi considerado neste modelo como dejetos disponível para a lavoura.

$$\text{Excreção Livestock} = \frac{((\text{Efaves} \times 0,5) + (\text{Efvl} \times 100) + ((\text{Efbov} - \text{Efvl}) \times 50) + (\text{Efsui} \times 11))}{1000} \quad (3)$$

Sendo:

Efaves= Efetivo de galinhas de corte e postura;

Efvl= Efetivo de vacas leiteiras;

Efbov= Efetivo de bovinos (todas as categorias e aptidões);

Efsui= Efetivo de suínos (todas as categorias).

Então, como balanço de nitrogênio no sistema de produção animal da união europeia, considerou-se neste modelo as entradas oriundas da proteína vegetal consumida pelas espécies abordadas. E como saídas de nitrogênio o teor de nitrogênio na carne suína, bovina e de frango produzidas, além do teor de nitrogênio presente no leite e nos ovos. Os dejetos foram alocados nas saídas na forma de perdas para o ambiente por meio da estocagem e manejo, e o dejeito reciclado para lavouras.

Com intuito de estimar o efeito cascata do nitrogênio na produção animal da Europa, foi calculado o indicador cascata do nitrogênio (NCI), conforme descrito em Rezende et al. (2021), considerando como numerador as perdas de dejetos por manejo e estocagem além das perdas para o ambiente oriundas do processamento industrial da soja brasileira descritos em Rezende et al. (2021), dividido pela soma do nitrogênio presente nos produtos de origem animal.

Equação para calcular o acúmulo de nitrogênio na cadeia produtiva da soja brasileira para a alimentação animal na Europa:

$$NCI = \frac{N \text{ oriundo perdas dejetos} + N \text{ oriundo perdas farelo de soja brasileiro}}{N \text{ oriundo produtos de origem animal}} \quad (4)$$

5.4 RESULTADOS

O Brasil é um importante fornecedor de grão e farelo de soja para União Europeia. No ano de 2007 foram importadas 587.533,66 toneladas de nitrogênio por meio de soja em grãos. Em 2019 este valor foi reduzido para 311.509,38 toneladas de nitrogênio. Percebe-se durante o período estudado, que o Brasil diminui sua participação nas importações de soja em grãos pela União Europeia (59% em 2007 para 31% em 2019). Parte desta diminuição pode ser atribuída ao fato do aumento de produção do grão pelos países da EU e ao aumento da participação de outros países fornecedores de soja em grãos, como é o caso dos Estados Unidos da América (Figura 12).

Figura 12 – Importações e produção de soja em grão pela União Europeia, e a participação da soja em grão brasileira no período de 2007 a 2019.

Legenda: SOJABRN- Toneladas de nitrogênio oriundos da soja em grão brasileira exportada para a União Europeia; IMPSOJAN- Toneladas de nitrogênio oriundos da importação de soja em grãos pela União Europeia; SOJPROD- Toneladas de nitrogênio oriunda da soja produzida pela União Europeia; PARTBRS- Participação da soja em grão brasileira no total de soja em grão importado pela União Europeia. Fonte: Elaborado pela autora.

O farelo de soja não seguiu a mesma tendência da soja em grãos na participação brasileira. No ano de 2007, foram importadas 5,79 toneladas de nitrogênio oriundas do farelo de soja brasileiro. Já em 2019, este valor foi para 139.863,16 toneladas de nitrogênio. Por conseguinte, a participação brasileira saltou de praticamente 0% em 2007 para 6,59% em 2019 (Figura 13).

Figura 13 - Importações de farelo de soja pela União Europeia e a participação do farelo de soja brasileiro no período de 2007 a 2019.

Legenda: FSBRN- Toneladas de nitrogênio oriundo do farelo de soja brasileiro exportado para União Europeia; IMPFSN- Toneladas de nitrogênio oriundo das importações de farelo de soja pela União Europeia; PARTBRFS- Participação do farelo de soja brasileiro no total de importações da União Europeia. Fonte: Elaborado pela autora.

Por meio da análise dos fluxos de nitrogênio de toda a cadeia produtiva da soja brasileira até o comércio para União Europeia, pode-se observar que as maiores contribuições de nitrogênio no sistema avaliado ainda estão na fase brasileira, principalmente na etapa de produção de soja. Em 2007, os maiores fluxos de nitrogênio observados foram a produção de soja em grão no Brasil, a fixação biológica de nitrogênio pela soja, as importações de farelo de soja pela União Europeia, a produção de farelo de soja no Brasil e o fornecimento do farelo de soja para a indústria de alimentos para animais na Europa (Figura 14). Em 2019, observa-se que os fluxos brasileiros de soja em grão destinados ao mercado exterior sofreram um aumento significativo, apesar disso dentro do sistema europeu, não houve mudanças consideráveis nos fluxos de nitrogênio, permanecendo as importações de farelo de soja, e o consumo de farelo de soja pela indústria de alimentos para animais os maiores fluxos (Figura 15).

Figura 14 – Fluxos de nitrogênio da cadeia produtiva da soja brasileira e o seu comércio na Europa em 2007

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 15 - Fluxos de nitrogênio da cadeia produtiva da soja brasileira e o seu comércio na Europa em 2019.

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 16 – Descrição dos fluxos de nitrogênio abordados nas Figuras 14 e 15

Fonte: Elaborado pela autora.

Após o processamento industrial, a produção de farelo de soja pela União Europeia no período avaliado permaneceu praticamente constante, em torno de 3 milhões de toneladas de nitrogênio produzidos. A participação brasileira na produção de farelo de soja foi de 14% em 2007 e 13% em 2019, também com tendência de estabilidade. Este fato pode estar relacionado ao fato de que a demanda pelo farelo de soja no continente é praticamente estável, pois não houve mudanças significativas no efetivo de rebanho durante o período do estudo (Figura 17). Este farelo de soja produzido teve três destinos considerados: a exportação, indústria de alimentos para animais e mercado interno. A maior parte foi destinada à indústria de alimentos para animais, com 2 milhões de toneladas de nitrogênio. No balanço de nitrogênio desta etapa, houve uma variação de estoque positiva, provavelmente oriunda dos estoques de farelo de soja de um ano corrente para o outro, que não foram alocados nas saídas de nitrogênio por falta de dados consistentes e oficiais sobre a sua quantidade.

Figura 17 – Efetivo bovino, suíno e galináceo em cabeças da União Europeia (28 países), no período de 2007 a 2019.

Fonte: FAOSTAT e Eurostat. Organizado pela autora.

As saídas de farelo de soja para a indústria e para o mercado interno foram somadas e incorporadas como farelo de soja disponível para a produção animal. Para os fluxos de nitrogênio da produção animal considerou-se os fluxos de proteína vegetal pois há outras fontes de proteína para animais além do farelo de soja. E como é difícil estimar uma dieta única para as várias categorias de animais e sistemas produtivos, a estimativa de consumo de proteína vegetal indica fluxos mais reais dentro do sistema avaliado. Para confirmar se o consumo de farelo de soja pela produção animal da EU está proporcionalmente correto em relação ao consumo de proteína vegetal, comparou-se os dados disponíveis da EUROSTAT, no relatório de balanço de proteína para alimentação animal e os dados estimados por este modelo. Ambos, apontam para uma participação de farelo de soja no total de proteína vegetal consumida variando entre 24 a 27% dentre os anos de 2007 a 2019. E a participação brasileira no total de proteína vegetal consumida, com tendência de estabilidade em 3% no mesmo período.

Os produtos de origem animal foram convertidos em toneladas de nitrogênio, sendo que a produção de carne suína obteve o maior fluxo, variando de 983 mil de toneladas em 2007 para cerca de 1 milhão de toneladas em 2019.

O segundo maior fluxo de nitrogênio foi da produção de leite de vaca, com aproximadamente 719 mil toneladas em 2007 para aproximadamente 969 mil toneladas em 2019. A menor participação foi a de carne bovina, com cerca de 300 mil de toneladas nos anos considerados (Figura 18 e Figura 19).

Figura 18 - Fluxos de nitrogênio considerados para a produção animal da União Europeia em 2007.

Produção Animal União Europeia 2007

Fonte: Elaborado pela autora.

No ano de 2007 foram consumidas pela produção animal da EU, 10,321 milhões de toneladas nitrogênio oriundo de proteína vegetal. Este montante considera todas as fontes de proteína presente na dieta, seja ela a base de forragens ou cereais. A perda de dejetos foi significativa neste ano, com 7,778 milhões de toneladas produzidos, sendo divididos em 5,445 milhões de toneladas destinados às lavouras e 2,333 milhões de toneladas perdidas durante o manejo e estocagem deste dejetos (Figura 18).

Figura 19 – Fluxos de nitrogênio considerados para a produção animal na União Europeia em 2019

Produção Animal União Europeia 2019

Fonte: Elaborado pela autora.

Em 2019 houve um leve aumento no consumo de proteína vegetal, quando comparado ao ano de 2007, sendo de 10,334 milhões de toneladas de nitrogênio. Os dejetos produzidos foram de 7,338 milhões de toneladas de nitrogênio, sendo 5,127 milhões de toneladas destinados às lavouras e 2,201 milhões de toneladas perdidos durante o manejo e estocagem deste dejetos. Sendo assim, houve uma ligeira redução na produção de dejetos e na perda destes dejetos quando comparados os anos de 2007 e 2019, possivelmente devido ao aumento da eficiência da produção animal durante o período (Figura 19).

O indicador cascata do nitrogênio (NCI) no período do estudo praticamente se manteve estável, sendo que em 2007 foi de 30% e 29% em 2019. Este indicador representa todas as perdas ambientais que ocorreram desde da produção da soja em grão no Brasil, o seu processamento industrial e o consumo pela produção animal na EU.

O indicador cascata do nitrogênio (NCI) durante toda a cadeia produtiva da soja brasileira até a produção animal europeia apresentou os seguintes valores:

i) para a produção de grãos de soja 0,524% em 2007 para 0,522% em 2019

(REZENDE et al., 2021); ii) considerando toda a produção agroindustrial do farelo de soja brasileiro o valor foi de 4,145% em 2007 para 5,216% em 2019 (REZENDE et al., 2021); iii) na produção animal europeia 30% em 2007 para 29% em 2019. Pode-se assim, observar que houve acúmulo de nitrogênio no ambiente, à medida que se avança na cadeia produtiva. Na produção animal da EU a quantidade de nitrogênio emitida para o ambiente durante toda a cadeia deste estudo correspondeu a 29% do total produzido em produtos de origem animal (carne, leite e ovos), no ano de 2019.

5.5 DISCUSSÃO

A produção e o comércio de *commodities* carregam consigo emissões durante toda a cadeia produtiva, sendo estas emissões significantes e que devem ser consideradas por políticas de manejo de nutrientes em sistemas agropecuários (LASSALETТА et al., 2014; UWIZEYE et al., 2020). Estas emissões potencializam o efeito cascata do nitrogênio e uma aproximação física entre os sistemas agrícolas e de produção animal poderia contribuir para uma maior reciclagem de nutrientes e assim, reduzir as emissões desta cadeia produtiva (LASSALETТА et al., 2014). Neste estudo, considerando as emissões de nitrogênio para o ambiente, a maior parte ocorreu no sistema produtivo animal, por meio de perdas de dejetos devido ao manejo e estocagem deste resíduo. Em segundo lugar as maiores emissões foram no processamento industrial da soja e em último lugar, a produção da soja.

A União Europeia é dependente da soja e farelo de soja brasileiros para a alimentação de seus animais de produção. Em 2019 a participação da soja brasileira nas importações europeias foi de 31% e a participação do farelo de soja foi de 6,59%. Esta dependência já foi considerada em outros estudos sobre o tema, em diferentes delimitações temporais (BOEREMA et al., 2016; LASSALETТА et al., 2014; UWIZEYE et al., 2020). Uwizeye et al. (2020), cita que 12% das emissões oriundas do comércio internacional de alimentos para animais são da soja brasileira. Lassaletta et al. (2014), relataram que em 2010, 81% das exportações mundiais de soja foram produzidas nos Estados Unidos, Brasil e Argentina. Este comércio entre Brasil e União Europeia demonstrou ter

efeitos deletério em termos ambientais e socioeconômicos, com consumo de capital natural e provocando perdas permanentes em serviços ecossistêmicos importantes, e em contrapartida não trazendo benefícios econômicos para a sociedade (BOEREMA et al., 2016).

Grande parte deste farelo de soja e soja em grãos demandado pela União Europeia é destinada para a indústria de alimentos para animais. Em 2007, foram destinadas 2,5 milhões de toneladas de nitrogênio e em 2019, 2,2 milhões de toneladas. Esta diminuição foi suprida pela maior demanda de farelo de soja para o mercado interno europeu, uma possibilidade é que os produtores de animais têm aumentado a fabricação própria de ração para os animais, e dependido menos da indústria.

Em relação a produção animal, o efetivo em cabeças dos animais sofreu pouca alteração. O frango de corte e galinhas de postura apresentaram queda na quantidade de cabeças nos anos de 2018 e 2019, mas ainda é o maior efetivo, seguido pelos suínos e por último os bovinos. Os maiores fluxos de nitrogênio observados em 2019, foram de carne suína, com 1,034 milhões de toneladas de nitrogênio. Em estudo recente, as emissões de nitrogênio oriundas da produção de suínos e aves contribuíram com 29% das emissões do setor de produção de animais. A maior proporção de emissões foi oriunda dos ruminantes, com 71% do total, ou seja aproximadamente 46 Tg N ano⁻¹ (UWIZEYE et al., 2020). Os sistemas de criação de monogástricos são conhecidos por emitirem menos gases do efeito estufa e terem melhores conversões alimentares quando comparados com os sistemas de criação de ruminantes, mas em contrapartida a dependência destes animais por cereais como soja e milho é muito maior (HERRERO et al., 2015). Sendo assim, não se deve focar em qual sistema é melhor ou mais eficiente e sim em mudanças na cadeia produtiva como um todo para reduzir os impactos da produção de animais.

Uma das limitações deste estudo pode ser atribuída à não separação dos fluxos de nitrogênio para as diversas produções animais, e isto não foi realizado devido à dificuldade em se encontrar um sistema produtivo que representasse a Europa, e mais ainda, uma dieta que fosse base para a produção destes animais, principalmente os ruminantes.

O indicador cascata do nitrogênio (NCI) apresentou um leve crescimento na cadeia produtiva do farelo de soja brasileiro no período estudado e uma leve

tendência de estabilidade na produção animal da Europa. Isto indica que há um acúmulo de nitrogênio em diferentes proporções dentro da cadeia produtiva de animais de produção. Em termos absolutos os valores de emissões para o ambiente aumentaram, e as entradas de nitrogênio reativo nos sistemas abordados também aumentaram. Também é importante ressaltar que o valor de ingestão de proteína vegetal pelos animais aumentou no período do estudo, com uma menor produção de dejetos no mesmo período, há um provável aumento da eficiência dos animais no período, mas somente a nível de fazenda. Por isso, quando abordado as emissões de nitrogênio durante toda a cadeia produtiva o indicador não sofreu alterações significativas. Com isso, pode-se indicar que o sistema de produção de animais precisa ser readequado para melhor integrar os fluxos dentro do ciclo do nitrogênio e assim reduzir os impactos da atividade nos ecossistemas globais.

5.6 CONCLUSÃO

O presente estudo demonstra a importância do Brasil como fornecedor de proteína vegetal para alimentação de animais na Europa, por meio da exportação de farelo de soja e soja em grãos. Atualmente a Europa é deficitária em produção de alimento para animais e necessita do mercado exterior para a criação de animais de produção.

Os fluxos de nitrogênio analisados demonstram um possível aumento na eficiência dos animais, já que no período de estudo houve uma redução relativa na quantidade de proteína vegetal ingerida e uma maior produção de produtos de origem animal (carne, leite, ovos) e uma menor produção relativa de dejetos. Isto demonstra que as medidas adotadas pela comunidade europeia para a melhor eficiência no uso do nutriente a nível de fazenda têm surtido efeitos positivos. Mas ao analisar os fluxos de nitrogênio durante toda a cadeia de produção, ou seja, desde a produção da soja no Brasil até o seu consumo na Europa, os resultados tendem a uma estabilidade no indicador.

Com isso, o indicador de eficiência do nitrogênio (NCI), obteve certa estabilidade nos 12 anos do estudo, salientando a hipótese deste estudo que é a de que o comércio de soja e farelo de soja brasileiro é significativo para o

transporte de nitrogênio reativo, e é capaz de potencializar os impactos em cascata do nitrogênio no ambiente.

Sendo assim, são necessárias abordagens sistêmicas de cadeia produtiva para um melhor entendimento da utilização e eficácia de uso dos nutrientes. Com estes estudos é possível ressaltar os pontos de avanço e os gargalos existentes na cadeia produtiva de animais.

6 CONCLUSÕES

A produção e o comércio de soja em grão e farelo de soja brasileiro carregam consigo emissões durante os vários setores desta cadeia produtiva, sendo essas emissões significativas e que devem ser consideradas em análises de sistemas produtivos agropecuários. Estas emissões potencializam o efeito cascata do nitrogênio e favorecem o avanço do nutriente para níveis não seguros dentro das fronteiras planetárias propostas por Rockström (2009). O excesso de nitrogênio na atmosfera tem sido relacionado com poluição e eutrofização da água, poluição e neblina do ar, buracos na camada de ozônio, morte de florestas e mudanças climáticas.

A Europa é dependente da soja e farelo de soja para alimentação de seus animais de produção. O Brasil por ser um grande produtor e exportador desta oleaginosa, contribui significativamente nas emissões de nitrogênio. O avanço no cultivo da soja observado no país no período avaliado neste estudo demonstra que há um aumento na quantidade de nitrogênio reativo produzido e consequentemente um aumento nas emissões para o ambiente. A fixação biológica de nitrogênio é a principal entrada de nitrogênio reativo para a cultura da soja e apresentou aumentos exponenciais nos últimos anos. Sendo que em 2019, 11 Tg/N/ano foram produzidas oriundo desta entrada, correspondendo à 13% do máximo de entradas oriundas de nitrogênio produzido pelo setor agropecuário.

Esta soja e farelo de soja quando destinado à alimentação de animais na Europa, proporciona a transformação desta proteína vegetal em proteína de produtos de origem animal, tendo como principal emissão para o ambiente as perdas oriundas do manejo e estocagem dos dejetos produzidos. Isto porque pela Europa ter consolidado suas áreas de produção animal e ter mantido praticamente estável seu rebanho, as emissões oriundas de mudança do uso da terra e desmatamento são menores do que o observado em países com expansões na produção animal.

Os resultados apontam para um acúmulo de nitrogênio entre os setores produtivos da cadeia de produção de alimentos de origem animal na Europa. Estas emissões de nitrogênio ocorrem em escalas locais e globais, potencializando o efeito cascata do nitrogênio. Uma possível forma de reduzir

estes impactos seria aproximar fisicamente o sistema agrícola e pecuário, para favorecer a reciclagem de dejetos de animais, contribuindo para uma maior reciclagem de nutrientes e assim, reduzir as emissões desta cadeia produtiva.

O presente estudo inova ao propor um indicador baseado na razão entre as emissões de nitrogênio para o ambiente e a quantidade de nitrogênio presente no produto a ser comercializado. Este cálculo mostrou-se eficiente em apontar os pontos críticos de emissões durante a cadeia produtiva e de estimar o acúmulo de nitrogênio em toda a cadeia. Mas apesar dos avanços, as limitações deste indicador devem ser ressaltadas, sendo a maior delas a falta de bases de dados oficiais sobre as emissões e consumo de nitrogênio nos diversos tipos de sistemas produtivos que são praticados, tanto na produção da soja quanto na produção de animais.

REFERÊNCIAS

- ABIOVE, Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais. Estatísticas. Disponível em: <https://abiove.org.br/estatisticas/> (acesso em: 27 janeiro de 2021).
- ABIOVE; AGROSATÉLITE. **Moratória da Soja- Monitoramento por imagens de satélites dos plantios de soja no bioma Amazônia. Safra 2017/18.** [s.l.: s.n.].
- AGRIBENCHMARK. Cash Crop. Disponível online em: <http://www.agribenchmark.org/cash-crop/sector-country-farm-information/country-profiles/brazil.html> (acesso em: 27 janeiro de 2021).
- AMBUS, P. et al. Nitrogen processes in terrestrial ecosystems. In: M. SUTTON, C. HOWARD, J. ERISMAN, G. BILLEN, A. BLEEKER, P. GRENNFELT, ET AL. (Ed.). . **The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives.** [s.l.] Cambridge University Press, 2011. p. 99–125.
- APROSOJA, Associação dos Produtores de Soja. Cartilha Para Minimizar Perdas. Disponível em: <http://www.aprosoja.com.br/comunicacao/release/aprosoja-lanca-cartilha-para-minimizar-perdas> (acesso em: 27 janeiro de 2021).
- AYRES, R. U. Industrial metabolism. In: AYRES, R. U. et al. (Eds.). . **Industrial metabolism, the environment and application of materials-balance principles for selected chemicals.** [s.l.] IIASA Research Report, 1989.
- BILLEN, G.; LASSALETТА, L.; GARNIER, J. A biochemical view of the global agro-food system: Nitrogen flows associated with protein production, consumption and trade. **Global Food Security**, v. 3, p. 209–219, 2014.
- BILLEN, G.; LASSALETТА, L.; GARNIER, J. A vast range of opportunities for feeding the world in 2050: trade-off between diet, N contamination and international trade. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 2, p. 025001, 1 fev. 2015.
- BILLEN, G. et al. Modeling indirect N₂O emissions along the N cascade from cropland soils to rivers. **Biogeochemistry**, v. 148, n. 2, p. 207–221, 2020.
- BOEREMA, A.; PEETERS, A.; SWOLFS, S.; VANDEVENNE, F.; JACOBS, S.; STAES, J.; MEIRE, P. Soybean Trade: Balancing Environmental and Socio-Economic Impacts of an Intercontinental Market. **Plos One**, v.11, n.5, e0155222,

2016.

BONAUDO, T. et al. Analyser une transition agro-alimentaire par les flux d'azote: Aussois un cas d'étude du découplage progressif de la production et de la consommation. **Revue d'économie régionale et urbaine**, v. 5, p. 967–990, 2017.

BOUWMAN, A. F.; BEUSEN, A. H. W.; BILLEN, G. Human alteration of the global nitrogen and phosphorus soil balances for the period 1970-2050. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 23, n. 4, 2009.

BUSTAMANTE, M.; MEDINA, E.; ASNER, G.; NARDOTO, G.; GARCIA-MONTIEL, D. Nitrogen cycling in tropical and temperate savannas. **Biogeochemistry**, 79, 209–237, 2006.

CATTELAN, A.J.; DALL'AGNOL, A. The rapid soybean growth in Brazil. **OCL**, 25, D102, 2018.

CAVALETT, O. Life Cycle Assessment of Soybean (in Portuguese). Tese de doutorado em Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas (unicamp), p. 245, 2008.

CAVALETT, O.; ORTEGA, E. Emergy, nutrients balance, and economic assessment of soybean production and industrialization in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 8, p. 762–771, 2009.

CELLIER, P. et al. Nitrogen flows and fate in rural landscapes. **The European Nitrogen Assessment**, p. 229–248, 2011.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Série Histórica das Safras**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: Março, 2021.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Safrá Brasileira de Grãos**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos> (acesso em 27 janeiro 2021).

CÓRDOVA, S. C. et al. Soybean nitrogen fixation dynamics in Iowa, USA. **Field Crops Research**, v. 236, p. 165–176, 2019.

DE KLEIN, C. A. M. et al. Nitrogen performance indicators for dairy production systems. **Soil Research**, v. 55, n. 5–6, p. 479–488, 2017.

DOMINGUES, J. P. et al. Exploring trade-offs among indicators of performance and environmental impact in livestock areas. **Regional Environmental Change**, v. 19, n. 7, p. 2089–2099, 2019.

EMBRAPA. *Tecnologias de Produção de Soja—Região Central do Brasil 2014*; Sistemas de Produção: Londrina, Brasil, 2014; p. 242.

ERISMAN, J. W. et al. The Dutch N-cascade in the European perspective. **Science in China**, v. 48, n. Special Issue, p. 827–842, 2005.

ERISMAN, J. W. et al. Consequences of human modification of the global nitrogen cycle. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 368, n. 1621, 2013.

ERISMAN, J. W.; GENNFELT, P.; SUTTON, M. The European perspective on nitrogen emission and deposition. **Environment International**, v. 29, p. 311–325, 2003.

EUROPEAN COMMISSION. **EUROSTAT, European statistics**. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>>. Acesso em: 19 abr. 2021.

EUROPEIA, U. A Directiva « Nitratos » da União Europeia. p. 1–4, 2010.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Version 1- Nutrient flows and associated environmental impacts in livestock supply chains: Guidelines for assessment**. Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership. Rome, FAO. 196 p., 2018.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT- Food and agriculture data**. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/>>. Acesso em: 19 abr. 2021.

FILOSO, S.; MARTINELLI, L.A.; HOWARTH, R.W.; BOYER, E.W.; DENTENER, F. Human activities changing the nitrogen cycle in Brazil. **Biogeochemistry**, 79, 61–89, 2006

FIXEN, P. et al. Nutrient/ Fertilizer Use Efficiency: Measurement, Current Situation and Trends. In: **Managing Water and Fertilizer for Sustainable Agricultural Intensification**. IFA, IWMI, IPNI E IPI, p. 8–38. Dezembro de 2014.

GALLOWAY, J. N. The global nitrogen cycle: changes and consequences. **Environmental Pollution**, v. 102-S1, p. 15–24, 1998.

GALLOWAY, J.N.; ABER, J.D.; ERISMAN, J.W.; SEITZINGER, S.P.; HOWARTH, R.W.; COWLING, E.B.; COSBY, B.J. The Nitrogen Cascade. **Bioscience**, 53, 341–356, 2003

GALLOWAY, J. N. et al. Nitrogen : Too Much of a Good. **Ambio**, v. 31, n. 2, p. 60–63, 2002.

GALLOWAY, J. N.; COWLING, E. B. Reactive nitrogen and the world: 200 Years

of change. **Ambio**, v. 31, n. 2, p. 64–71, 2002.

GALLOWAY, J.N.; TOWNSEND, A.R.; ERISMAN, J.W.; BEKUNDA, M.; CAI, Z.; FRENEY, J.R.; MARTINELLI, L.A.; SEITZINGER, S.P.; SUTTON, M.A. Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. **Science**, 320, 889–892, 2008

GALLOWAY, J. N.; LEACH, A. M.; BLEEKER, A.; ERISMAN, J. W. A chronology of human understanding of the nitrogen cycle. **Philosophical transactions of the royal society**, v. 368, 201301120, 2013.

GAMEIRO, A. H. et al. A contabilidade do fluxo de materiais como método para análise da sustentabilidade da produção animal. In: GOBESSO, A. A. DE O. et al. (Eds.). . **Novos Desafios da Pesquisa em Nutrição e Produção Animal - Edição 2017**. Pirassununga: 5D, 2017. p. 150–170.

GAMEIRO, A. H.; BONAUDO, T.; TICHIT, M. Nitrogen, phosphorus and potassium accounts in the Brazilian livestock agro-industrial system. **Regional Environmental Change**, v. 19, n. 3, p. 893–905, 2019.

GARRETT, R. D.; LAMBIN, E. F.; NAYLOR, R. L. Land institutions and supply chain configurations as determinants of soybean planted area and yields in Brazil. **Land Use Policy**, v. 31, p. 385–396, 2013.

GERBER, P. J. et al. Nutrient use efficiency: A valuable approach to benchmark the sustainability of nutrient use in global livestock production? **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 9, p. 122–130, 2014.

GIBBS, H. K. et al. Brazil's Soy Moratorium. **Science**, v. 347, n. 6220, p. 377–378, 2015.

GODINOT, O. et al. Relative nitrogen efficiency, a new indicator to assess crop livestock farming systems. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 35, n. 2, p. 857–868, 4 abr. 2015.

GODINOT, O. et al. Indicators to evaluate agricultural nitrogen efficiency of the 27 member states of the European Union. **Ecological Indicators**, v. 66, p. 612–622, 1 jul. 2016.

GRUBER, N.; GALLOWAY, J. N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. **Nature**, v. 451, n. 7176, p. 293–296, 2008.

HERRERO, M. et al. Livestock and the Environment: What Have We Learned in the Past Decade? **Annual Review of Environment and Resources**, v. 40, n. 1, p. 177–202, 2015.

- HERRIDGE, D.F.; PEOPLES, M.B.; BODDEY, R.M. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. **Plant Soil**, 311, 1–18, 2008.
- HUNGRIA, M.; CAMPO, R.J.; MENDES, I.C. Fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja. **Embrapa Soja**, 35, 48, 2001.
- IPCC. Chapter 6: Carbon and Other Biogeochemical Cycles. **IPCC**, v. 5, 2013.
- IPCC. IPCC 2019- Special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystem. **Research Handbook on Climate Change and Agricultural Law**, p. 74–102, 2019.
- JOUVEN, M. Quels équilibres végétal/animal en France métropolitaine, aux échelles nationale et des « petites régions agricoles ». **INRA Prod. Anim.**, v. 31, p. 353–364, 2018.
- KAHILUOTO, H. **The Concept of Planetary Boundaries**. [s.l.] Elsevier, 2019. v. 1
- KUPLICH, T.M.; COAPONE, V.; COSTA, L.F.F. O Avanço da soja no bioma Pampa. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**, 31, 83–100, 2018.
- LAMAS, F. M.; RICHETTI, A. Changes in land use in Mato Grosso do Sul. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 6, n. 4, p. 49–56, 2019.
- LASSALETTA, L. et al. Food and feed trade as a driver in the global nitrogen cycle: 50-year trends. **Biogeochemistry**, v. 118, n. 1–3, p. 225–241, 2014.
- LEIP, A. et al. Impacts of European livestock production: Nitrogen, sulphur, phosphorus and greenhouse gas emissions, land-use, water eutrophication and biodiversity. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 11, 2015.
- LIU, Q. et al. Global animal production and nitrogen and phosphorus flows. **Soil Research**, v. 55, n. 5–6, p. 451–462, 2017.
- LOPES, E. S. Fixação Biológica do Nitrogênio no Sistema Solo-planta. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. E; VITTI, G. C. (Eds.). **Anais do simpósio sobre nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. 2007: International Plant Nutrition Institute, 2007. p. 43–72.
- MARTÍNEZ-ESPINOSA, R. M. et al. Enzymology and ecology of the nitrogen cycle. **Biochemical Society Transactions**, v. 39, n. 1, p. 175–178, 2011.
- MAZOYER, M.; ROUDART, L. A história das agriculturas no mundo: Do neolítico à crise contemporânea. São Paulo: Editora UNESP, 568 p., 2010.

MDIC, Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. COMEXSTAT-Estatísticas do Comércio Exterior do Brasil. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home> (acesso em: 27 janeiro de 2021).

MOSIER, A. et al. Closing the global N₂O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. **Nutrient cycling in Agroecosystems**, v. 52, p. 225–248, 1998.

OENEMA, O. et al. Integrated assessment of promising measures to decrease nitrogen losses from agriculture in EU-27. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 133, n. 3–4, p. 280–288, 2009.

OITA, A.; MALIK, A.; KANEMOTO, K.; GESCHKE, A.; NISHIJIMA, S.; LENZEN, M. Substantial nitrogen pollution embedded in international trade. **Nature geoscience**, v. 9, n.2, p. 11-115, 2016.

PÉRA, T.G.; CAIXETA-FILHO, J.V. Perdas na logística de soja e milho no Brasil: Contribuições para o fortalecimento do agronegócio. **Em Anais do XXI SEMEAD Seminários em Administração**, São Paulo, Brasil, novembro 2018, 6–8.

PEYRAUD, J. et al. Les flux d'azote liés aux élevages. **Cultures**, n. January, p. 68, 2012.

PRADOS, L. F. et al. Manejo ambiental e predição da excreção de nitrogênio e fósforo por bovinos de corte. **Exigências Nutricionais de Zebuínos Puros e Cruzados - BR CORTE**, p. 327, 2016.

QUEMADA, M. et al. Exploring nitrogen indicators of farm performance among farm types across several European case studies. **Agricultural Systems**, v. 177, 1 jan. 2020.

RAUCCI, G. S. et al. Greenhouse gas assessment of Brazilian soybean production: a case study of Mato Grosso State. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 418–425, 2015.

RAUSCH, L. L. et al. Soy expansion in Brazil's Cerrado. **Conservation Letters**, v. 12, n. 6, 27 nov. 2019.

REZENDE, V.T.; BONAUDO, T.; ALVES, R.B.; NACIMENTO, R.A.; GAMEIRO, A.H. Cascade Effect of Nitrogen on Brazilian Soybean Production Chain. **Nitrogen**, v. 2, n. 2, p. 128-138, 2021.

ROCKSTRÖM, J.; EDENHOFER, O.; GAERTNER, J.; DECLERCK, F. Planet-proofing the global food system. *Nat. Food*, 1, 3–5, 2020.

ROCKSTRÖM, J. et al. Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating

- Space for Humanity. **Ecology and Society**, v. 14, n. 2, 2009.
- SHUTTERS, S. T.; MUNEEPEERAKUL, R. Agricultural trade networks and patterns of economic development. **PLoS ONE**, v. 7, n. 7, 2012.
- SKIBA, U. M.; REES, R. M. Nitrous oxide, climate change and agriculture. **CAB Reviews**, v. 9, n. 10, p. 1–7, 2014.
- STEVENS, C. J. Nitrogen in the environment. **Science**, v. 363, n. 6427, p. 578–580, 2019.
- SUN, J.; MOONEY, H.; WU, W.; TANG, H.; TONG, Y.; XU, Z.; HUANG, B.; CHENG, Y.; YANG, X.; WEI, D.; et al. Importing food damages domestic environment: Evidence from global soybean trade. **Proc. Natl. Acad. Sci.**, 115, 5415–5419, 2018.
- TAHERZADEH, O.; CARO, D. Drivers of water and land use embodied in international soybean trade. **Journal of Cleaner Production**, v. 223, p. 83–93, 2019.
- TAMMINGA, S. Pollution due to nutrient losses and its control in European animal production. **Livestock Production Science**, v. 84, n. 2, p. 101–111, 2003.
- UWIZEYE, A. et al. Nitrogen emissions along global livestock supply chains. **Nature Food**, v. 1, n. July, p. 1–10, 2020.
- VAN DER HOEK, K. W. Nitrogen efficiency in global animal production. **Em: Nitrogen, the Confer-N-s**, cap. 3, p. 127-132, 1998.
- VAN VUUREN, D. P. et al. Global projections for anthropogenic reactive nitrogen emissions to the atmosphere: an assessment of scenarios in the scientific literature. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 3, p. 359–399, 2011.
- VAN ZANTEN, H. H. E. et al. Global food supply: land use efficiency of livestock systems. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 5, p. 747–758, 2016.
- VERCHOT, L.V.; DAVIDSON, E.A.; CATTÂNIO, H.; ACKERMAN, I.L.; ERICKSON, H.E.; KELLER, M. Land use change and biogeochemical controls of nitrogen oxide emissions from soils in eastern Amazonia. **Glob. Biogeochem. Cycles**, 13, 31–46, 1999.
- VET, R.; ARTZ, R.S.; CAROU, S.; SHAHAW, M.; RO, C.U.; AAS, W.; BAKER, A.; BOWERSOX, V.C.; DENTENER, F.; GALY-LACAUX, C.; et al. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt,

base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus. **Atmospheric Environ.**, 93, 3–100, 2014.

VRIES, M.; DE BOER, I. J. M. Comparing environmental impacts for livestock products: A review of live cycle assessments. **Livestock Science**, v.128, p. 1-11, 2010.

WU, G. et al. Production and supply of high-quality food protein for human consumption: Sustainability, challenges, and innovations. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1321, n. 1, p. 1–19, 2014.

XU, Z.; CHAU, S.N.; RUZZENENTI, F.; CONNOR, T.; LI, Y.; TANG, Y.; LI, D.; GONG, M.; LIU, J. Evolution of multiple global virtual material flows. **Sci. Total. Environ.**, 658, 659–668, 2019. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.12.169.

ZHANG, X. et al. Managing nitrogen for sustainable development. **Nature**, v. 528, n. 7580, 2015.

ZHANG, X. et al. Quantifying Nutrient Budgets for Sustainable Nutrient Management. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 34, n. 3, 2020

ANEXO A – Balanço de nitrogênio do sistema produtivo da soja e farelo de soja brasileiro

Etapa 1- Produção de soja, em toneladas de nitrogênio

ANO	ENTRADAS	SAÍDAS	VAR. ESTOQUE	BALANÇO
2019	12.570.870,07	20.657.256,57	- 8.086.386,51	-
2018	12.057.517,36	19.848.412,88	- 7.790.895,53	-
2017	11.757.303,79	18.626.870,22	- 6.869.566,43	-
2016	11.606.176,41	19.191.250,39	- 7.585.073,98	-
2015	11.097.293,53	15.025.056,29	- 3.927.762,76	-
2014	11.029.327,42	16.776.426,12	- 5.747.098,70	-
2013	10.877.152,03	15.576.080,68	- 4.698.928,66	-
2012	10.204.806,82	15.172.496,58	- 4.967.689,76	-
2011	9.680.749,54	13.363.569,83	- 3.682.820,29	-
2010	9.485.888,43	13.092.165,37	- 3.606.276,94	-
2009	9.006.574,21	12.001.880,53	- 2.995.306,32	-
2008	9.051.519,38	10.865.211,05	- 1.813.691,68	-
2007	9.007.342,20	11.590.983,84	- 2.583.641,64	-

Etapa 2- Armazenamento e comércio do grão de soja, em toneladas de nitrogênio

ANO	ENTRADAS	SAÍDAS	VAR. ESTOQUE	BALANÇO
2019	16.942.389,79	7.871.086,10	9.071.303,69	-
2018	16.759.105,12	8.495.745,36	8.263.359,77	-
2017	15.739.373,39	7.866.264,83	7.873.108,56	-
2016	16.058.220,70	6.599.110,30	9.459.110,41	-
2015	12.742.099,21	6.702.714,27	6.039.384,94	-
2014	14.129.640,93	6.000.413,99	8.129.226,94	-
2013	13.134.386,42	5.678.057,28	7.456.329,14	-
2012	13.046.068,97	5.042.851,58	8.003.217,39	-
2011	11.406.845,53	5.339.589,77	6.067.255,76	-
2010	11.060.472,32	4.808.167,84	6.252.304,48	-
2009	10.416.920,65	4.311.502,50	6.105.418,15	-
2008	9.431.998,73	4.408.762,24	5.023.236,49	-
2007	9.916.310,49	4.232.575,67	5.683.734,82	-

Etapa 3 – Processamento industrial da soja em grão e produção do farelo de soja, em toneladas de nitrogênio

ANO	ENTRADAS	SAÍDAS	VAR. ESTOQUE	BALANÇO
2019	2.957.633,07	2.463.919,76	493.713,31	-
2018	2.989.884,48	2.442.440,18	547.444,30	-
2017	2.812.813,11	2.324.081,20	488.731,91	-
2016	2.650.908,03	2.224.835,26	426.072,76	-
2015	2.720.122,06	2.264.318,19	455.803,87	-
2014	2.520.103,54	2.116.117,76	403.985,78	-
2013	2.438.043,31	2.032.905,60	405.137,71	-
2012	2.461.892,94	2.043.628,64	418.264,30	-
2011	2.508.685,86	2.084.491,48	424.194,37	-
2010	2.377.562,08	1.987.072,27	390.489,81	-
2009	2.072.063,00	1.713.893,54	358.169,45	-
2008	2.200.967,60	1.803.328,18	397.639,42	-
2007	2.123.666,29	1.772.985,53	350.680,76	-

ANEXO B – Balanço de nitrogênio da produção animal na Europa

Etapa 1- Balanço da produção de farelo de soja pela Europa, em toneladas de nitrogênio.

ANO	ENTRADAS	SAÍDAS	VAR. ESTOQUE	BALANÇO
2019	3.300.690,27	3.181.858,83	118.831,44	-
2018	3.258.222,60	3.139.867,93	118.354,68	-
2017	3.181.931,64	3.050.069,97	131.861,67	-
2016	3.215.922,56	3.064.164,65	151.757,92	-
2015	3.357.740,92	3.211.421,06	146.319,86	-
2014	3.135.201,10	3.046.845,12	88.355,97	-
2013	3.061.854,16	3.016.784,68	45.069,48	-
2012	3.187.087,29	3.163.616,06	23.471,23	-
2011	3.286.605,86	3.196.585,27	90.020,59	-
2010	3.553.017,67	3.418.647,42	134.370,24	-
2009	3.236.770,29	3.100.103,53	136.666,77	-
2008	3.592.034,86	3.506.151,99	85.882,87	-
2007	3.621.641,31	3.523.182,56	98.458,75	-

Etapa 2- Balanço do uso de proteína vegetal para alimentação animal na Europa, em toneladas de nitrogênio.

ANO	ENTRADAS	SAÍDAS	VAR. ESTOQUE	BALANÇO
2019	10.334.735,25	10.334.735,25	-	-
2018	10.276.667,07	10.276.667,07	-	-
2017	10.497.294,16	10.497.294,16	-	-
2016	10.476.299,57	10.476.299,57	-	-
2015	10.374.133,03	10.374.133,03	-	-
2014	10.234.859,55	10.234.859,55	-	-
2013	10.225.160,66	10.225.160,66	-	-
2012	10.145.418,33	10.145.418,33	-	-
2011	10.168.706,65	10.168.706,65	-	-
2010	10.178.061,72	10.178.061,72	-	-
2009	10.208.276,81	10.208.276,81	-	-
2008	10.259.655,74	10.259.655,74	-	-
2007	10.321.892,86	10.321.892,86	-	-