



A indústria de fertilizantes nitrogenados do Brasil – atuais desafios e oportunidades

Guilherme Freire Mansor Antonio

Projeto de Final de Curso

Orientador

Prof. Jose Eduardo Pessoa de Andrade, M.Sc.

Fevereiro de 2020

A INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES NITROGENADOS DO BRASIL – ATUAIS DESAFIOS E OPORTUNIDADES

Guilherme Freire Mansor Antonio

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Química.

Aprovado por:

Luís Eduardo Duque Dutra, D.Sc.

Armando Lucas Cherem da Cunha, D.Sc.

Mariana de Mattos Vieira Mello Souza, D.Sc.

Orientado por:

José Eduardo Pessoa de Andrade, M.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Fevereiro de 2020

Ficha Catalográfica

Antonio, Guilherme Freire Mansor. A indústria de fertilizantes nitrogenados do Brasil – atuais desafios e oportunidades/Guilherme Freire Mansor Antonio

Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2020.

xii, 86 p.; il.

(Projeto) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2020.

Orientador: José Eduardo Pessoa de Andrade.

1. Fertilizantes nitrogenados. 2. Amônia/Ureia 3. Viabilidade Econômica. 4. Projeto. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. José Eduardo Pessoa de Andrade. I. A indústria de fertilizantes nitrogenados do Brasil – atuais desafios e oportunidades

À minha mãe, Margarida, por estar sempre presente na minha vida.

"Todos os seres vivos nutrem-se de substâncias idênticas àquelas que compõem seu próprio organismo." – Aristóteles (384 a.C. – 322 a.C.)

AGRADECIMENTOS

Esta seção é indubitavelmente a mais difícil de redigir: enquanto que alguns agradecimentos são um tanto quanto óbvios, confesso que tenho medo de esquecer e não registrar aqui o nome de algumas das pessoas com as quais dividi minhas alegrias, inseguranças, ideias e dúvidas durante a confecção deste trabalho. Se o fiz a você, meu caro leitor, peço o mais sincero perdão.

Agradeço primeiramente a Deus, por tornar tudo possível, ser o motivo condutor de todas as coisas e depositário perpétuo da minha fé e esperança. Graças a Ti, obtive sucesso em vários desafios da minha vida e tenho força para vencer os que ainda certamente virão.

Estendo as congratulações a todos aqueles da minha família que contribuíram para minha formação acadêmica, pessoal e profissional. Especialmente à minha mãe, a quem dedico este trabalho, por estar sempre presente na minha vida, tornando muitas das situações difíceis passadas, menos complicadas e mais vitoriosas.

Ao Professor José Eduardo Pessoa de Andrade pela sua infindável ajuda e inabalável paciência durante a orientação deste trabalho. Apesar de não ter tido aulas contigo durante a graduação, fiquei feliz por você ter aceito meu pedido de supervisão na confecção deste trabalho. Sou muito grato pelas nossas conversas, compartilhamento de ideias e aprendizado que tive durante estes últimos dois semestres.

Ao Professor Luís Eduardo Duque Dutra pela ajuda e conselhos pontuais durante a realização deste projeto final e também por ter sido quem, por meio das suas aulas de introdução à Economia, me fez iniciar o interesse pela área econômica.

Agradeço a banca por ter aceito o convite para esta apresentação e pelas correções e conselhos que, certamente, ajudaram a melhorar este trabalho.

Finalmente, também gostaria de citar o nome daqueles, dentre meus amigos e colegas, que de uma forma ou outra, contribuíram para a realização deste trabalho. Muito obrigado, Gisele Firmino, Rodrigo Cordeiro, Marcelo Alves, Matheus Lemos, André Nogueira, Rafael Tiradentes, Luana Gaspar, Camila Lopes, Lara Loureiro, Fernanda Henriques, Daniella Rabelo, Alisson Martins, Juliane Natalizi, Claudia Lira, Gabriel Santos, Ailma Pereira, Raíssa Camargo e Gean Almeida.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Química

A INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES NITROGENADOS DO BRASIL – ATUAIS DESAFIOS E OPORTUNIDADES

Guilherme Freire Mansor Antonio

Fevereiro, 2020

Orientador: Prof. José Eduardo Pessoa de Andrade, M. Sc.

O forte crescimento populacional dos últimos séculos e a previsão da continuidade do crescimento da população humana para as próximas décadas tornam necessário um aumento na oferta de alimentos. O Brasil é um país de forte vocação agrícola desde a sua fundação no século XVI, e foi, com o passar dos tempos, modificando a localização das principais safras do litoral para o interior e sempre aumentando sua produção. A produtividade das terras brasileiras também tem aumentado ano a ano. A agricultura, portanto, é um setor que torna o Brasil muito relevante no cenário econômico para os próximos anos. No entanto, o solo brasileiro é muito pobre em nutrientes, com exceção de algumas áreas específicas, como a terra roxa do oeste paulista. Desta forma, torna-se imperioso o uso de fertilizantes e insumos para fornecer à terra os nutrientes e condições mais favoráveis para o cultivo das colheitas. Os nutrientes requeridos em maior quantidade pelos vegetais para crescerem e se desenvolverem são, principalmente, nitrogênio, fósforo e potássio. Destes, os fertilizantes com nitrogênio, os nitrogenados, são aqueles com maior flexibilidade de acesso às jazidas minerais para sua produção, o que o deixa com a vantagem de ser produzido mais perto do mercado consumidor. Apesar do crescimento da produção e da produtividade agrícola ano após ano, observa-se que nos últimos tempos houve uma diminuição da produção nacional de fertilizantes em geral, com esta demanda sendo suprida por importações. Este trabalho visa apresentar o panorama dos fertilizantes no Brasil, com ênfase nos nitrogenados, passando pelos seus processos de produção, análise de mercado e avaliação econômica para melhor entender e refletir sobre as oportunidades atualmente existentes.

ÍNDICE

1. Introdução	1
1.1. Objetivos	4
1.2. Motivação	4
2. Visão panorâmica dos fertilizantes – metodologia da pesquisa.....	5
2.1. Histórico.....	5
2.2. A nutrição vegetal	12
2.3. O solo do Brasil.....	17
2.4. Fertilizantes	19
2.5. A indústria de fertilizantes nitrogenados.....	23
2.6. A indústria de fertilizantes fosfatados	33
2.7. A indústria de fertilizantes potássicos	37
3. A amônia e ureia.....	40
3.1. Mercado mundial	40
3.2. Mercado Brasileiro	45
3.2.1. Aspectos concorrenciais, logísticos e tributários	57
3.2.2. Panorama atual da indústria de fertilizantes e o papel do preço do gás natural.....	59
4. Análise econômica	63
5. Conclusões	82
6. Sugestões de trabalhos futuros.....	82
7. Referências.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Variação dos setores macroeconômicos que compõem o PIB brasileiro..	1
Figura 2 - Evolução da produção agrícola brasileira.....	2
Figura 3 - Evolução da produtividade das safras no Brasil.....	3
Figura 4 - Consumo de fertilizantes NPK por área colhida.....	4
Figura 5 - Imagem feita em homenagem a Justus von Liebig, mostrando-o com seus alunos.	8
Figura 6 - Anúncio de venda de guano nos Estados Unidos em 1873.	9
Figura 7 - Haber e Bosch em laboratório no início do século XX.	10
Figura 8 - Ilustração mostrando os principais nutrientes vegetais e suas classificações na tabela periódica.	14
Figura 9 - Alegoria representando a Lei dos Mínimos.	15
Figura 10 - Relação entre quantidade de nutrientes no solo e o rendimento de colheita.....	16
Figura 11 - Distribuição da fertilidade dos solos brasileiros.	18
Figura 12 - Resumo da cadeia dos principais fertilizantes minerais.	20
Figura 13 - Tipos de fertilizantes encontrados no mercado.....	21
Figura 14 - Exemplo de embalagem de fertilizante NPK, mostrando a concentração de cada nutriente.....	22
Figura 15 - Efeito da escassez de nitrogênio no solo em um girassol.	24
Figura 16 - Ciclo global do nitrogênio. Os valores numéricos representam o fluxo de nitrogênio elementar na ordem de 10^{12} g/ano.....	25
Figura 17 - Diagrama de blocos da síntese de amônia.....	28
Figura 18 - Produtos químicos derivados da amônia.....	30
Figura 19 - Comparação entre uma planta com correto suprimento de fósforo e outra com deficiência deste mineral.....	34
Figura 20 - Ciclobiogeoquímico do fósforo.....	35
Figura 21 - Principais produtos da indústria de fertilizantes fosfatados.	36
Figura 22 - Deficiência de potássio em folhas de soja.....	38
Figura 23 - Ciclo do potássio numa lavoura.....	39
Figura 24 - Distribuição geográfica da capacidade de produção de amônia.....	40
Figura 25 - Evolução histórica da população humana mundial e da produção de amônia.....	41
Figura 26 - Aplicações da amônia produzida mundialmente.	42
Figura 27 - Comportamento da capacidade de produção e demanda mundial da amônia para a	

década de 2000.....	43
Figura 28 - Capacidade instalada e demanda de ureia mundial ao decorrer do final do século XX e início do século XXI.	44
Figura 29 - Evolução das principais safras brasileiras ao longo da década de 2010.	46
Figura 30 - Distribuição geográfica da safra de soja 2018/2019.	47
Figura 31 - Distribuição geográfica da safra de milho 2018/2019.....	47
Figura 32 - Distribuição geográfica da safra de cana-de-açúcar 2018/2019.	48
Figura 33 - Distribuição geográfica dos principais tipos de café brasileiros na safra 2018/2019.	48
Figura 34 - Distribuição geográfica da safra de algodão 2018/2019.	49
Figura 35 - Distribuição da produção, importação e uso de fertilizantes nitrogenados no Brasil em 2018.	51
Figura 36 - Distribuição dos produtores de fertilizantes nitrogenados no território nacional.	53
Figura 37 - Taxa de utilização das fábricas de amônia no Brasil.	54
Figura 38 - Taxa de utilização das fábricas de ureia no Brasil.	54
Figura 39 - Composição média do preço do gás natural no Brasil.	61
Figura 40 - Mapa de gasodutos no Brasil.	62
Figura 41 - Análise de sensibilidade dos preços do gás natural, ureia e custo do investimento fixo na viabilidade econômica da planta integrada.....	81

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Principais nutrientes do metabolismo das plantas.....	13
Tabela 2 - Principais destinos dos nutrientes introduzidos no solo.....	17
Tabela 3 - Etapas do processo global de síntese da amônia.	27
Tabela 4 - Principais reações químicas no processo de produção da ureia.	30
Tabela 5 - Fertilizantes nitrogenados por teor de nitrogênio em massa.	33
Tabela 6 - Uso de nutrientes por cultura e região. Dados em kg de nutriente por hectare de plantação.....	50
Tabela 7 - Produção e entrega de fertilizantes nitrogenados (em toneladas de nitrogênio – N) por região e por ano no Brasil.	52
Tabela 8 - Panorama comercial da amônia no Brasil. Dados em toneladas de N.	55
Tabela 9 - Panorama comercial da ureia no Brasil. Dados em toneladas de N.....	56
Tabela 10 - Estrutura típica do investimento em uma indústria química.	64
Tabela 11 - Estrutura do investimento em uma planta de amônia.....	66
Tabela 12 - Valores dos índices CEPCI usados na atualização do ISBL da planta de amônia.	67
Tabela 13 - Preços dos principais insumos utilizados na produção de amônia.	68
Tabela 14 - Custos variáveis da produção de amônia. Fonte: elaborado pelo autor.	70
Tabela 15 - Recálculo dos valores da estrutura de investimento da planta de amônia.....	71
Tabela 16 – Fluxo de caixa anual da planta de amônia. Período de implantação – 3 anos.....	72
Tabela 17 – Cálculo do lucro líquido da planta de amônia.	73
Tabela 18 - Estrutura de custos de uma indústria química.	75
Tabela 19 - Dados gerais da planta de ureia e cálculo dos custos de partida.	76
Tabela 20 - Estrutura do investimento original e recálculo utilizando as novas premissas de capacidade e tempo.....	76
Tabela 21 - Estrutura de custos de uma planta de ureia.	77
Tabela 22 - Custos variáveis da planta integrada de ureia.	78
Tabela 23 – Cálculo do lucro líquido da planta integrada de ureia.	79
Tabela 24 - Fluxo de caixa da planta integrada de ureia.	80

ABREVIATURAS

ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos

CAPEX – Capital Expenditure

CEFER – IPT – Centro de Fertilizantes do Instituto de Pesquisas Tecnológicas

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IFA – International Fertilizer Association

LSPA – Levantamento Sistemático da Produção Agrícola

NPK – Nitrogênio, Fósforo e Potássio

OPEX – Operational Expenditure

TIR - Taxa Interna de Retorno

TMA – Taxa Mínima de Atratividade

TNT – Trinitrotolueno

VPL – Valor Presente Líquido

1. Introdução

Desde o final do século XVIII, a população humana mundial vem crescendo a ritmos elevados. Atualmente, há aproximadamente 7,7 bilhões de pessoas no planeta Terra, porém estima-se que em 2030 este número já tenha ultrapassado a marca dos 8,5 bilhões (ONU, 2019). Uma das exigências trazidas com esta elevada taxa de crescimento é o aumento da capacidade de produção e da oferta de alimentos. Portanto, observa-se que o agronegócio terá papel importante a nível mundial nas próximas décadas, principalmente em países com extensas áreas de cultivo e grande produção agrícola, como o Brasil (DOMINGOS, 2018).

O Brasil é, desde a sua constituição como colônia portuguesa no século XVI, um país de forte vocação agrícola e, ao longo dos últimos anos, o agronegócio brasileiro tem se mostrado um dos setores mais resilientes da economia, apresentando frequentemente taxa de crescimento superior ao dos outros setores econômicos do país, conforme exposto na Figura 1 (SERIGATI, 2013) . Um exemplo deste fato é demonstrado pelo crescimento do agronegócio nos últimos anos, apesar da crise econômica que assolou o país. Não é exagero afirmar que a recuperação que tem sido observada nos últimos meses no país se deve sobretudo ao setor primário da economia (ZAFLOON, 2019).

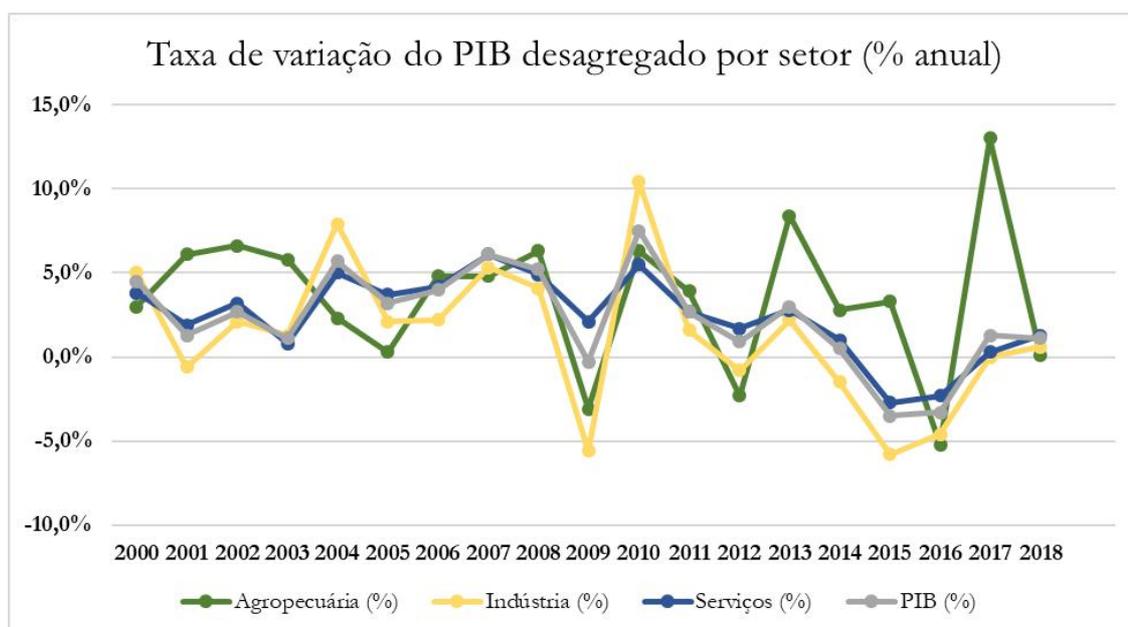


Figura 1 - Variação dos setores macroeconômicos que compõem o PIB brasileiro. Fonte: elaborado pelo autor com base em dados do IBGE, 2019.

As colheitas no Brasil têm aumentado com o passar dos anos, assim como a produtividade do solo. Segundo dados do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola do IBGE (LSPA – IBGE, 2018), a produção agrícola no país mantém seu crescimento desde o início da década de 1990, conforme mostrado na Figura 2. Além disso, a produtividade do solo também apresenta elevado ritmo de crescimento, tendo registrado um aumento de aproximadamente 80% nos últimos 25 anos, conforme explicitado na Figura 3.

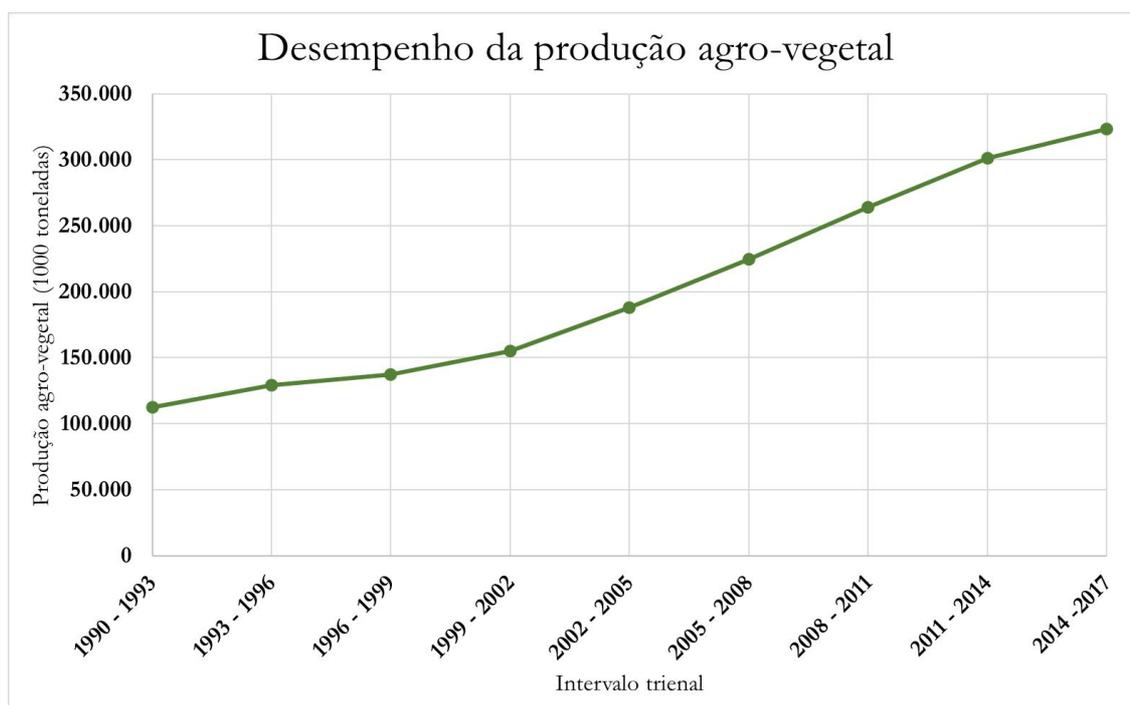


Figura 2 - Evolução da produção agrícola brasileira. Fonte: elaborado pelo autor com base em dados do LSPA-IBGE, 2018.

O desempenho agrícola brasileiro está alicerçado nos constantes investimentos e inovações promovidos especialmente pela Embrapa, que garantem vantagens competitivas para o setor (FILHO e GASQUES, 2016). O aumento da produção e produtividade agrícola está intimamente ligado a um maior uso de insumos, como por exemplo, de fertilizantes. Os fertilizantes, também conhecidos como adubos, são materiais usados com o objetivo de fornecer ao solo os nutrientes necessários para o crescimento das plantas, seja porque o solo é naturalmente pobre nestes elementos ou porque os mesmos foram retirados pela última safra (SOUZA, 2012). No Brasil, o uso de adubos é mandatório, visto que a quase totalidade do território nacional apresenta solos pobres em nutrientes (FRANCO, 2009). Assim como a produção e a produtividade

agrícolas, há uma clara tendência de aumento do consumo de fertilizantes no Brasil, conforme mostrado na Figura 4, que leva em conta os nutrientes necessários em maior quantidade pelas plantas, representados pelos elementos químicos nitrogênio, fósforo e potássio, conhecidos pela sigla NPK.

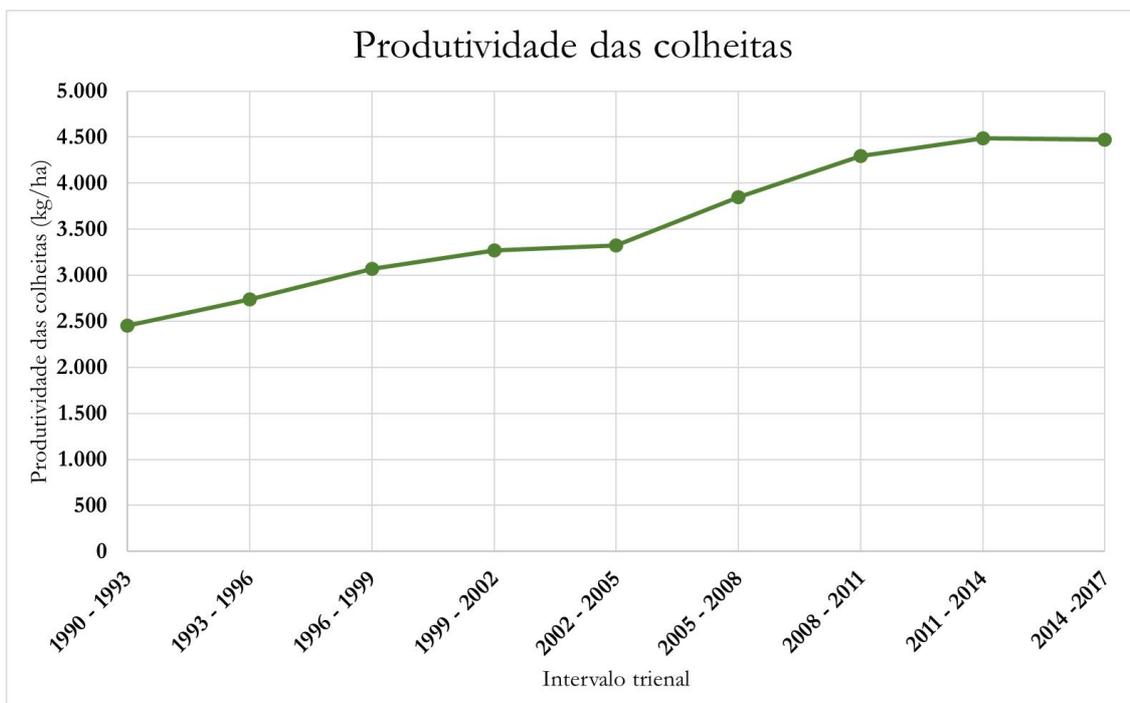


Figura 3 - Evolução da produtividade das safras no Brasil. Fonte: elaborado pelo autor com base em dados do LSPA-IBGE, 2018 .

Apesar da clara tendência de expansão da atividade agrícola brasileira e consequente maior consumo de insumos, a indústria de fertilizantes nacional encontra-se em um momento turbulento. Apesar de um aumento de demanda de quase 60% por fertilizantes no Brasil na última década, a produção nacional vem declinando, sendo que nos últimos 5 anos houve uma queda de aproximadamente 15% (ANDA, 2019). As maiores importações são de fertilizantes potássicos, seguidos de nitrogenados e, por último, fosfatados (RICHETTI, 2018).

Dentre os fertilizantes acima citados, apenas os nitrogenados são aqueles que apresentam maior flexibilidade de acesso aos depósitos minerais para sua fabricação. Tendo como fontes principais de matérias-primas o ar e o gás natural, pode-se obter a amônia, molécula básica da cadeia dos fertilizantes nitrogenados, que tem como vantagem poder ser sintetizada relativamente próxima do mercado consumidor de fertilizantes (KIISKI, SCHERER, *et al.*, 2015). No entanto, reporta-se atualmente a

parada de operação e fechamento de várias fábricas de fertilizantes nitrogenados no Brasil, justificadas, quase que na totalidade das vezes, pelo preço elevado do gás natural, o que causa uma tendência no aumento das importações destes insumos. Segundo a AEPET (2019), a Petrobras, por exemplo, ao hibernar suas fábricas de fertilizantes está deixando o país sem produção nacional de ureia, um importante fertilizante nitrogenado, o que pode comprometer a segurança e soberania alimentar do país.

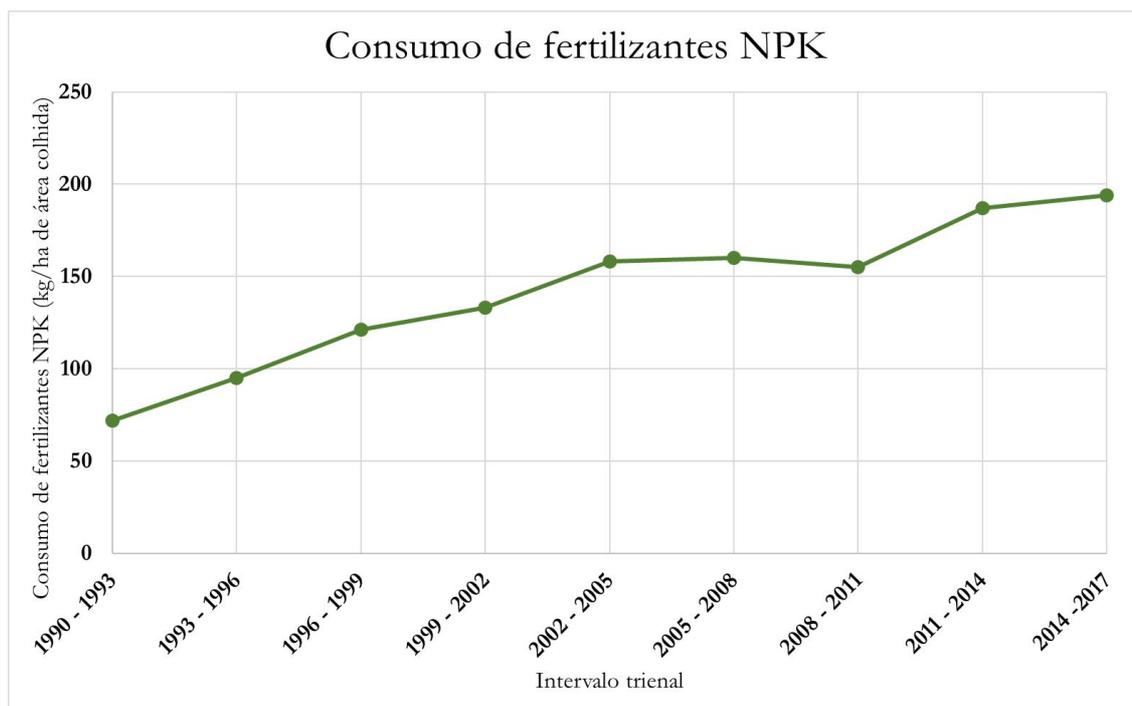


Figura 4 - Consumo de fertilizantes NPK por área colhida. Fonte: elaborado pelo autor com base em dados do LSPA-IBGE.

1.1. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo traçar um panorama da indústria de fertilizantes nitrogenados do Brasil, compreendendo sua situação passada, atual e perspectivas futuras. Além disso, refletir sobre a possível viabilidade econômica na produção de amônia e ureia, o principal fertilizante nitrogenado utilizado no mundo, associada ao preço do gás natural.

1.2. Motivação

A indústria de fertilizantes é de extrema importância para a soberania de um

país, sobretudo para o Brasil, com suas extensas áreas agricultáveis e sua grandeza na produção agrícola, tanto para exportação, quanto para consumo interno. Associado a isto, este estudo foi motivado também pela atual conjuntura desta indústria no Brasil, altamente afetada pelo preço do gás natural e pela grande demanda nacional por adubos, assunto que tem sido altamente debatido tanto na área de engenharia, quanto na econômica. Sem exagero, pode-se afirmar que o fortalecimento dessa indústria deve ser considerado estratégico para o futuro do país.

2. Visão panorâmica dos fertilizantes – metodologia da pesquisa

A metodologia adotada foi a de realizar uma ampla pesquisa na literatura existente sobre fertilizantes.

Foi adotada uma visão multidisciplinar, desde o início do uso das primeiras formas de adubo na Idade Antiga até os dias atuais, com o avanço do conhecimento do metabolismo vegetal e sua produção. Foram caracterizados os fertilizantes mais importantes, ou sintetizados ou recuperados pelo aproveitamento dos organominerais e dos biosintéticos. A seguir, foi focada a descrição dos processos de produção na indústria química sintética, com ênfase nos nitrogenados e, finalmente, concluída pela análise econômica da cadeia produtiva gás natural/amônia/ureia e reflexões sobre suas perspectivas futuras.

2.1. Histórico

Estima-se que a presença humana no planeta Terra remonte há mais de 300 mil anos e que, no decorrer deste tempo, a humanidade presenciou um grande número de acontecimentos, sejam estes naturais ou causados por suas próprias atividades em contato com a natureza. Enquanto uma boa parte dos eventos foi deletério ao desenvolvimento da espécie humana, também é possível elencar inúmeros outros que lhe foram edificantes. À primeira categoria podem-se citar desastres naturais como secas, inundações, doenças, além de guerras e outros conflitos; já à segunda, estão presentes a formação de povoados, entendimento da natureza, desenvolvimento da ciência, dentre outros. O conjunto destas experiências contrastantes permitiu que o ser humano construísse sua história e evoluísse até os dias atuais (MAZOYER e ROUDART, 2010).

Neste aspecto, um dos mais importantes episódios é denominado Revolução Agrícola, que ocorreu na pré-história e causou uma das maiores mudanças observadas até então. Estudos antropológicos mostram que por volta de 10 mil anos a.C., vários grupos humanos dispersos no planeta começaram a modificar seus hábitos de caça de animais e coleta de produtos vegetais para a começar a formar pequenos povoados e praticar a agricultura (MAZOYER e ROUDART, 2010). No momento de elaboração deste documento não há consenso na literatura sobre o porquê desta mudança ter acontecido. Há autores que teorizam sobre a ocorrência de secas, o que fez os antigos grupos nômades procurarem e se estabelecerem ao redor de áreas onde a água estava disponível, tais como pequenos oásis. No entanto, há outros que defendem que esta modificação social se baseou na adaptação do ser humano ao ambiente, em busca de poder e dominação, entre outros aspectos (BARKER, 2006).

Independente das causas desta transformação, seus efeitos foram profundamente disruptivos. O antigo homem nômade, agora sedentário, foi capaz de se estabelecer em pequenos povoados, o que lhe deu tempo de observar e experimentar o ambiente que o cercava. Do conhecimento adquirido por estas atividades surgiu a domesticação das plantas, isto é, a capacidade de implementar o plantio de espécies vegetais nas terras que cercavam os aldeamentos, podendo-se produzir alimentos, em vez de percorrer grandes distâncias para ir à procura daqueles naturalmente disponíveis. Pela primeira vez na história, cada indivíduo não precisava gastar seu tempo procurando seu próprio alimento. Outra peculiaridade que pode ser observada desta nova atividade foi a produção excedente de alimentos. Este fato tornava possível que apenas alguns indivíduos se dedicassem às atividades de plantio, enquanto outros poderiam usar seu tempo em novas tarefas. Com isto, surgiram as primeiras formas de arte rupestre, a confecção dos primeiros objetos de cerâmica, o comércio, a escrita, a hierarquia nas sociedades, entre outros (WEISDORF, 2005).

Juntamente com a percepção de que era possível cultivar vegetais, o homem também observou que alguns solos possuíam características que propiciavam o crescimento mais rápido e produziam vegetais mais vistosos e saborosos. Ainda na Antiguidade, relatos históricos comprovam estas verificações. No Antigo Egito e na Mesopotâmia, as plantações eram feitas às margens dos rios Nilo, no primeiro caso, e Tigre e Eufrates, no último. Evidências históricas destes povos mostram a percepção que as terras marginais ficavam mais férteis depois que aconteciam enchentes e materiais do fundo do rio penetravam no solo (LOPES, 2004). Registros oriundos das

antigas Grécia, Babilônia e do Império Romano mostram o conhecimento sobre o uso de esterco de animais, rochas calcárias e leguminosas para melhorar a fertilidade do solo. Homero menciona em uma de suas obras mais famosas, a Odisseia, o uso de esterco, assim como Xenofonte, estudioso grego também em um de seus manuscritos. Plínio, importante naturalista romano, também disserta sobre o uso de “terra branca” nas plantações, isto é, a denominação dada por ele às rochas calcárias. Já no final do primeiro milênio da era cristã, era conhecido o uso de cinzas de plantas na adubação de terrenos (KIISKI, SCHERER, *et al.*, 2015).

Com o passar dos séculos a seguir, outras fontes de adubação para solos também foram identificadas e usadas, como por exemplo o guano. Este material é formado basicamente por depósitos de excrementos de aves e morcegos que se solidificam em áreas rochosas. O poder fertilizante do guano já era conhecido empiricamente pela civilização Inca, antes mesmo do contato com os conquistadores espanhóis (LUZ e LINS, 2008). A maior parte da exploração de guano se deu no século XIX, quando europeus motivados pela descoberta das propriedades deste material, realizada numa das viagens de Alexander von Humboldt, começaram a realizar expedições para vários cantos do mundo, principalmente ao Chile, para minerá-lo (KIISKI, SCHERER, *et al.*, 2015). Para se ter ideia da importância do guano na época, em 1856 os Estados Unidos da América promulgaram o *Guano Islands Act*, em que davam o poder a qualquer cidadão americano de se apoderar e explorar estes depósitos encontrados na natureza (SMITHSONIAN).

Nesta época também, no campo da economia, o mundo se deparava com os estudos populacionais do inglês Thomas Malthus. Sua teoria defendia que o aumento da população humana na terra ocorreria numa taxa mais rápida que o aumento na produção de alimentos, o que poderia levar à miséria por falta de meios de subsistência. Esta teoria fez com que mais atenção fosse dada ao estudo da agricultura (KIISKI, SCHERER, *et al.*, 2015).

Apesar de tantas inovações com o passar dos tempos, foi só no século XIX que se utilizou o método científico para melhor entender a nutrição das plantas. Vários cientistas se debruçaram sobre esta temática, tais como: Johann Friedrich Mayer, que ainda no século XVIII percebeu os benefícios da adição de rochas calcárias às plantações; Jean Baptiste Boussingault, um dos pioneiros a perceber o papel do nitrogênio na nutrição dos vegetais; John Bennet Lawes e Joseph Henry Gilbert, que observaram os benefícios do fósforo oriundo da rocha fosfática, assim como outros

nutrientes de origem mineral; entre muitos outros (KIISKI, SCHERER, *et al.*, 2015).

Uma descoberta que quebrou vários paradigmas existentes até então foi realizada pelo químico alemão Justus von Liebig, na primeira metade do século XIX. Liebig buscava compreender quais elementos químicos eram essenciais para o metabolismo das plantas (LOPES, 2004). Suas conclusões, publicadas em 1840 no livro *Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie* (Química Orgânica e seus usos para a Agricultura e Fisiologia), mostraram que os nutrientes essenciais em maior quantidade para as plantas são nitrogênio, fósforo e potássio. Após a publicação de seus resultados, houve uma verdadeira revolução na agricultura (KIISKI, SCHERER, *et al.*, 2015).



Figura 5 - Imagem feita em homenagem a Justus von Liebig, mostrando-o com seus alunos. Fonte: MAAR, 2006.

Ainda no século XIX, começaram a surgir as primeiras manufaturas e fábricas de fertilizantes na Europa. Na Inglaterra, em 1842, foi patenteado um processo para a produção de fertilizantes fosfatados, baseado no tratamento da rocha fosfática com ácido sulfúrico (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 1911). Alguns anos depois, em 1846, já havia produção em grande escala de superfosfatos. Também, há registros de exploração mineral de sais de potássio na década de 1860. As fontes de nitrogênio da época advinham do salitre e do guano explorados na costa oeste da América do Sul. Estima-se que mais de 500.000 toneladas de guano foram extraídas e transportadas nos anos 1870 (KIISKI, SCHERER, *et al.*, 2015).

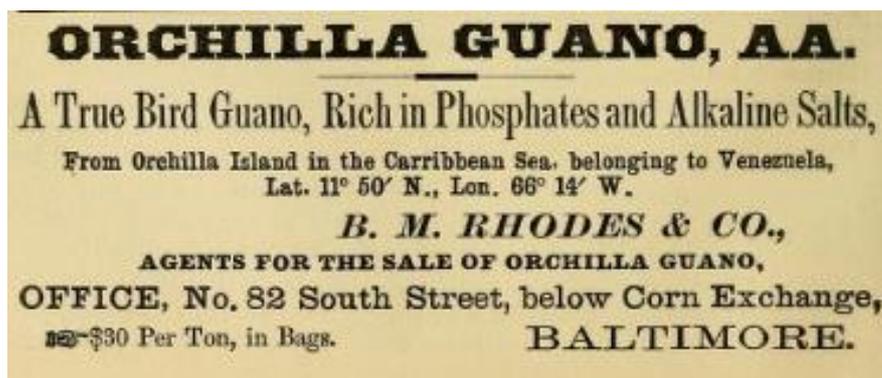


Figura 6 - Anúncio de venda de guano nos Estados Unidos em 1873. Fonte: WIKIWAND.

Foi também no século XIX que a fertilidade da terra começou a ser vista com mais seriedade no Brasil. Antes, no período colonial e no início do Brasil Império, havia quase nenhuma preocupação com a nutrição dos vegetais. Eram empregadas técnicas como a rotação de culturas, que permitia postergar o esgotamento do solo, simplesmente por mudar periodicamente o tipo de plantação que era feita em determinados lotes de terra. No fim do século XIX, Sua Majestade, o Imperador Dom Pedro II fundou o Instituto Agrônômico de Campinas, onde se produziram estudos e experimentos buscando desenvolver técnicas para melhorar a produtividade das plantações de café, o principal produto de exportação desta época. Esta foi a primeira vez na história nacional que a nutrição dos vegetais foi encarada de maneira científica (O AGRONÔMICO, 2007).

Alguns anos depois, na primeira metade do século XX, houve uma revolução no tocante à produção dos fertilizantes nitrogenados. Em 1904, um químico alemão chamado Fritz Haber começou a realizar experimentos em seu laboratório visando a produção de amônia a partir de seus elementos constituintes, o nitrogênio e o hidrogênio. Embora tenha obtido sucesso na sua tentativa, o teor de amônia obtido no efluente do reator era muito baixo, na ordem de 0,005 a 0,0125%, à pressão ambiente. Haber então propôs-se a estudar a conversão em amônia em diferentes pressões. Novos experimentos a 30 atmosferas, mostraram uma composição de amônia na corrente 28 vezes maior que a encontrada anteriormente. Naquela época, a pressão máxima que podia ser conseguida em laboratório era 200 atmosferas e cálculos teóricos feitos por Haber nessa condição e a 600 °C previam a formação de 8% de amônia no efluente (SMIL, 2000).

Em 1909, Haber recebeu em seu laboratório três representantes da BASF, entre eles o engenheiro mecânico Carl Bosch. Ao observarem que o processo funcionava,

Haber assina um contrato com a empresa e Bosch passa a estudar maneiras de fazer esse processo aumentar de escala, chegando a nível industrial, com pressões extremamente altas (150 – 250 atmosferas), nunca antes aplicadas na indústria. O novo processo, batizado de Haber-Bosch, não só tornou possível a produção de amônia na ordem de toneladas por dia, mas também inaugurou a era dos processos sob alta pressão na indústria química (SMIL, 2000). Em reconhecimento por tais feitos, ambos foram laureados com o prêmio Nobel de Química – Haber o recebeu em 1918 e Bosch em 1931. Registre-se que a amônia também se constituiu na matéria-prima básica de explosivos mais potentes, como a nitroglicerina e o trinitrotolueno (TNT), e sua fabricação passou a ter grande importância para uso militar e nas grandes obras de engenharia.

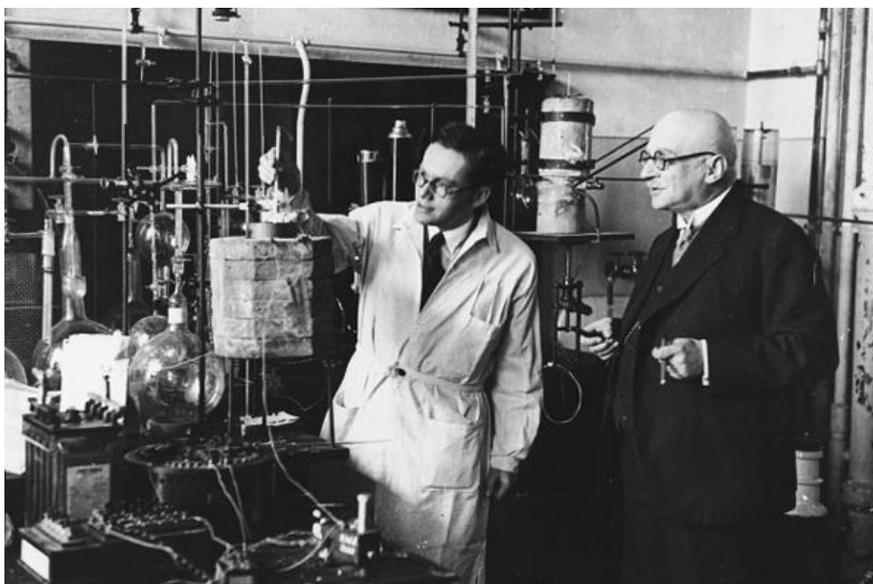


Figura 7 - Haber e Bosch em laboratório no início do século XX. Fonte: The Institute for Mindful Agriculture, 2016.

No decorrer do século XX, mais atenção foi dada às pesquisas em relação ao metabolismo das plantas e a indústria de fertilizantes se instalou em grande parte do globo. Neste período, foram descobertos outros nutrientes que podiam aumentar expressivamente a produtividade das safras, apesar destes muitas vezes serem requeridos em quantidades ínfimas (KIISKI, SCHERER, *et al.*, 2015). Ademais, durante a época da Segunda Guerra Mundial, novas técnicas e processos foram desenvolvidos para a indústria bélica, principalmente na indústria dos nitratos, tornando possível implementar inúmeras destas melhorias para a produção de fertilizantes e assegurar a produção agrícola para a crescente população (LOPES, 2004). No início da

década de 1950, nos países desenvolvidos, a produção de fertilizantes já era da ordem de 15 milhões de toneladas (IFDC - UNIDO, 1985).

No Brasil, o desenvolvimento da indústria se deu de maneira consideravelmente mais lenta. Até o final da década de 1960, quase a totalidade da demanda de fertilizantes para a agricultura era atendida por importações. Havia apenas uma quantidade insignificante de fábricas nesta época, que mal supriam a demanda interna. Como exemplos, podem-se citar: o início da exploração de uma mina de fosfato pelo grupo Bunge no ano de 1940 em São Paulo, aliado com o surgimento de algumas fábricas de superfosfato na década de 1950 (CUNHA, 2017). Juntamente com o início da produção de fertilizantes fosfatados, o embrião da indústria de fertilizantes nitrogenados surgiu também nesta época, com a instalação de algumas fábricas, como aquela da Petrobras em Cubatão (SP) que tinha a capacidade instalada de 300 toneladas diárias de nitrocálcio (O SEMANÁRIO, 1958). Em 1967, surge a Associação Nacional de Difusão de Adubos (ANDA), com o objetivo de promover o setor de fertilizantes dentro do agronegócio brasileiro, buscando ganhos de produção e produtividade agrícola (CUNHA, 2017).

Em 1974, o governo implementou o I Plano Nacional de Fertilizantes e Calcário Agrícola, trazendo importante crescimento da indústria, chegando até a autossuficiência em certos fertilizantes fosfatados. Vale a pena salientar que o sucesso no beneficiamento dos minérios de fósforo se deu em parte por tecnologias brasileiras, como o processo desenvolvido pelo professor da USP, Paulo Abib na década de 1960 (FERRAN, 2007). Este incentivo governamental tornou possível o início da exploração de novas minas de rocha fosfática, a implementação de novas fábricas de fertilizantes básicos, entre outros empreendimentos. Foi nesta época que surgiu a primeira planta de amônia e ureia usando gás natural, em Camaçari (BA). Com estes incentivos, a indústria nacional teve um gigantesco crescimento, chegando a atender quase a metade da demanda interna na década de 1980 e atingindo a autossuficiência em relação à grande parte dos fertilizantes fosfatados (DIAS e FERNANDES, 2006).

Na década de 1990, no entanto, o desenvolvimento do setor de fertilizantes observado começa a esmaecer. Apesar de ser implementado um II Plano Nacional de Fertilizantes até 1995 e a indústria nacional chegar a atender quase 60% da demanda interna, mudanças governamentais promoveram a abertura do mercado e privatização de muitas empresas do setor de fertilizantes. Estas medidas causaram, além da concentração empresarial, o fechamento de várias plantas produtoras de fertilizantes em território nacional (QUARTUCCI, 2008).

Atualmente, a indústria de fertilizantes continua em crescimento a níveis globais de forma a fornecerem insumos à agricultura. No entanto, no Brasil este quadro se inverte, uma vez que a situação atual é marcada por pedidos de recuperação judicial e o encerramento das atividades de várias empresas do setor.

2.2. A nutrição vegetal

As plantas, como todos os outros seres vivos, precisam ter suas necessidades nutricionais satisfeitas para que possam crescer e se desenvolver adequadamente. Hoje em dia, sabe-se que os vegetais precisam ter disponíveis certas moléculas, que podem ser classificadas de acordo com a quantidade em que são necessárias para o equilibrado metabolismo vegetal. Os elementos necessários em maiores quantidades são classificados como macronutrientes, enquanto aqueles demandados em menor quantidade são chamados de micronutrientes. Há também outros que apresentam papel benéfico em certas plantações, mas não são essenciais, geralmente levando a uma maior produção agrícola ou maior teor nutritivo nas safras (IFDC - UNIDO, 1985).

Os macronutrientes compreendem os seguintes elementos químicos: carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre. Os três primeiros são oriundos do ar e da água, e como estão disponíveis comumente em grandes quantidades no ambiente, não lhes é dada muita atenção como nutrientes por parte da indústria de fertilizantes, embora sejam indispensáveis para o metabolismo vegetal. Os três próximos elementos da lista são os denominados macronutrientes primários. Nitrogênio, fósforo e potássio estão presentes em aproximadamente 1,5%, 0,2% e 1% do peso das plantas e desempenham funções essenciais no metabolismo vegetal, tais como: reações bioquímicas de produção de energia, como a fotossíntese, produção de frutos, entre outros. Os três últimos são conhecidos como macronutrientes secundários e têm essa denominação porque geralmente estão presentes em menores quantidades nos materiais que contém macronutrientes primários usados para adubar o solo, sejam naturais ou parte de fertilizantes industrializados. Além disso, podem ser considerados secundários pois grande parte dos solos não são tão deficientes nestes nutrientes quanto nos nutrientes considerados primários. Cálcio, magnésio e enxofre também fazem parte de importantes processos metabólicos, podendo limitar severamente o desenvolvimento de um vegetal caso não estejam presentes em quantidades adequadas. Eles estão presentes nas concentrações de 0,5%, 0,2%, 0,1%,

respectivamente (IFDC - UNIDO, 1985).

Os micronutrientes são necessários em quantidades bem menores que os macronutrientes, principalmente para funções específicas, sendo presentes em enzimas, processos de transferência de energia, e na formação de hormônios, por exemplo. Estes elementos estão presentes geralmente em partes por milhão (ppm) no peso das plantas. Por serem mais específicos, estas quantidades podem variar bastante de cultura para cultura vegetal. Há outros nutrientes não-essenciais que podem ter efeitos benéficos dependendo do vegetal. Vanádio, sódio, silício, cobalto, entre outros podem ajudar a melhorar o rendimento da safra e, em alguns casos, a nutrição humana, por agregar esses materiais no vegetal (IFDC - UNIDO, 1985). As informações gerais sobre os nutrientes estão sumarizadas na Tabela 1 e também na Figura 8.

Tabela 1 - Principais nutrientes do metabolismo das plantas. Elaborado pelo autor com base em IFDC – UNIDO, 1985

Nutrientes essenciais		Obtidos do ar e água	Carbono, Hidrogênio, Oxigênio
	Macronutrientes	Primários	Nitrogênio, Fósforo, Potássio
		Secundários	Cálcio, Magnésio, Enxofre
	Micronutrientes		Boro, Cloro, Cobre, Ferro, Manganês, Molibdênio, Zinco
Nutrientes não essenciais			Sódio, Silício, Cobalto, Vanádio

Os elementos químicos e a nutrição das plantas

		Elemento mineral essencial										Elemento não-mineral essencial					Elemento não essencial				
H																				He	
Li	Be											B	C	N	O	F				Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl				Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br				Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I				Xe	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At				Rn	
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts				Og	
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu								
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr								

Figura 8 - Ilustração mostrando os principais nutrientes vegetais e suas classificações na tabela periódica. Fonte: adaptado de Hort Americas, 2019

Justus von Liebig também notou em seus experimentos que o crescimento e o desenvolvimento vegetal são, contudo, governados por aquele nutriente que está em menor disponibilidade relativa. Em outras palavras, mesmo que um elemento químico essencial ao metabolismo vegetal esteja em quantidade ideal, não haverá nutrição adequada, e esta será limitada por aquele nutriente presente abaixo do nível ideal. Esta ideia foi cunhada de Lei dos Mínimos e foi extremamente importante para o surgimento das primeiras indústrias de fertilizantes, que por sua vez, deveriam fabricar materiais que correspondessem às necessidades de cada solo e cultura em particular. Uma alegoria foi criada para facilitar o entendimento desta ideia: num barril sendo enchido de água, as varas de madeira que o compõem representam um determinado nutriente e têm comprimento proporcional a este. Aquela vara de menor comprimento, isto é, o nutriente em menor quantidade relativa, controla o nível de água, ou seja, o rendimento da safra (IFDC - UNIDO, 1985). Esta alegoria está representada na Figura 9.



Figura 9 - Alegoria representando a Lei dos Mínimos. Fonte: adaptado de Fifth Season Gardening, 2019

O aspecto benéfico causado por um determinado nutriente está primordialmente relacionado à sua quantidade disponível no solo. Já se sabe que em quantidades inferiores às adequadas de nutrientes, o desenvolvimento vegetal não ocorre de maneira satisfatória. Além disso, quando presentes em quantidades acima do ideal, pode haver toxidez e desbalanceamento nutricional, além do desperdício intrínseco de adubo pelo solo (IFDC - UNIDO, 1985). Um bom exemplo é o caso do potássio: quando um solo é deficiente em potássio, os grãos produzidos geralmente pouco se desenvolvem e apresentam tamanho menor que o costumeiro; já quando em excesso, ele aumenta a salinidade do solo e pode facilitar a disponibilidade de alumínio e manganês na forma iônica, também tóxicos para as culturas (SOUZA, 2012). Geralmente, a quantidade de nutriente comumente introduzida no solo é próxima ao valor crítico, isto é, 90% da quantidade ótima de nutrientes para o metabolismo vegetal, conforme apresentado na Figura 10.

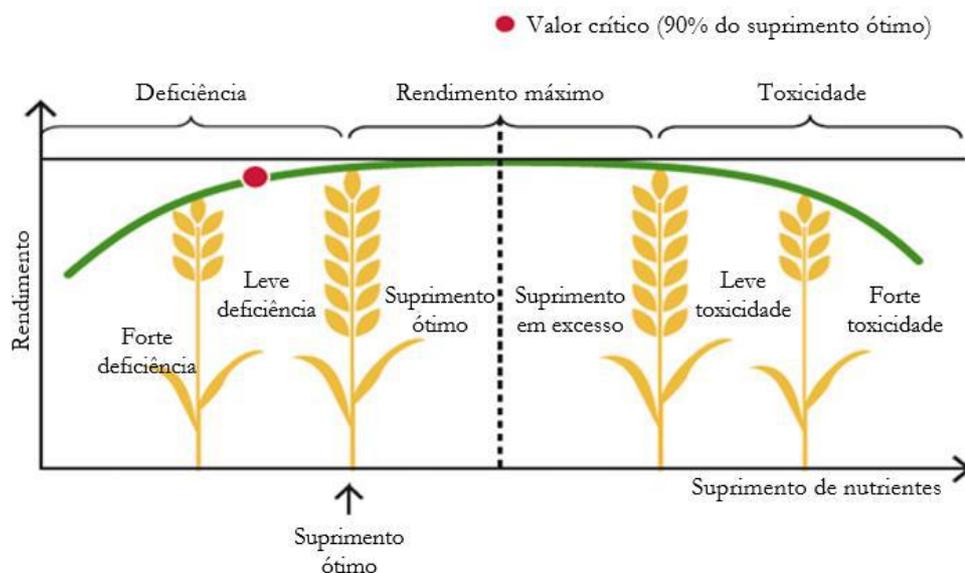


Figura 10 - Relação entre quantidade de nutrientes no solo e o rendimento de colheitas:

Fonte: adaptado de Omnia, 2017

Também é importante levar em conta as interações entre as espécies químicas existentes nos adubos e solo. Há casos em que a presença de um elemento aumenta a quantidade de outro, mas também pode ocorrer o inverso. Um exemplo é o caso do fósforo, que quando aplicado em solos onde zinco está presente, forma complexos insolúveis de com este elemento, aumentando drasticamente a deficiência de zinco nas plantas. Já o magnésio quando é introduzido, ajuda a aumentar a absorção de fósforo pelos vegetais (SOUZA, 2012).

Os nutrientes introduzidos no solo com ajuda de fertilizantes podem, contudo, ser perdidos. Dentre os mecanismos mais relevantes para este acontecimento estão as perdas gasosas, quando um nutriente reage consigo mesmo ou com outro componente no solo formando uma molécula gasosa; a erosão, quando parte do solo é desgastada juntamente com os fertilizantes; a imobilização, quando os nutrientes se unem à outros componentes do solo e formam moléculas em que estes não estão disponíveis para as plantas; a percolação, quando os nutrientes são arrastados ou lixiviados por chuvas (SOUZA, 2012). Os destinos dos nutrientes dos fertilizantes aplicados no solo estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Principais destinos dos nutrientes introduzidos no solo. Fonte: Souza, 2012

	N	P	K
Absorvido pelas culturas	50 – 70%	10 – 20%	50%
Perdas gasosas	5 – 35%	-	-
Erosão	0 – 20%	0 – 20%	45 – 50%
Imobilização	10 – 40%	50 – 90%	-
Percolação	0 – 20%	0 – 5%	0 – 5%

2.3. O solo do Brasil

Em 1 de maio de 1500, o escrivão Pero Vaz de Caminha redigiu sua célebre carta ao rei Dom Manuel I de Portugal, considerada por muitos a certidão de nascimento do Brasil, na qual descreveu as abundâncias naturais da terra recém descoberta, geralmente resumidas na famosa frase “em se plantando, tudo dá”. Contudo, com o passar do tempo, foram sendo observadas pelos primeiros colonizadores as dificuldades em se obter bons rendimentos com o plantio das mais variadas culturas em solo nacional (MARTON, 2016).

Os solos podem ser definidos como materiais naturais oriundos de uma mistura de minerais cominuídos por ação de intemperismo na rocha-mãe, matéria orgânica em decomposição, ar e água. É o solo que dá suporte mecânico às plantas, permitindo que elas cresçam e se desenvolvam, e é a partir do solo, que os vegetais absorvem em grande parte os nutrientes necessários à vida (IFDC - UNIDO, 1985). Para propiciar um bom suporte físico, assim como, um bom desenvolvimento do vegetal, estima-se que a composição média do solo deve ser de: 50% de sólidos e 50% de poros, sendo que na primeira metade 45% representam minerais e o 5% restantes matéria orgânica; já a segunda metade está igualmente dividida em 25% de ar e 25% de água (SOUZA, 2012).

Basicamente, as diferenças existentes entre as propriedades dos mais variados tipos de solos presentes na Terra se dão pelos seus mecanismos de formação, composição da rocha-mãe e condições meteorológicas as quais foram submetidos (IFDC - UNIDO, 1985). Atualmente, classifica-se o solo brasileiro em treze diferentes

tipos, sendo que a maioria é de caráter ácido, com alto teor de alumínio e de baixa fertilidade natural (EMBRAPA). A distribuição dos solos brasileiros por fertilidade pode ser observada na Figura 11.

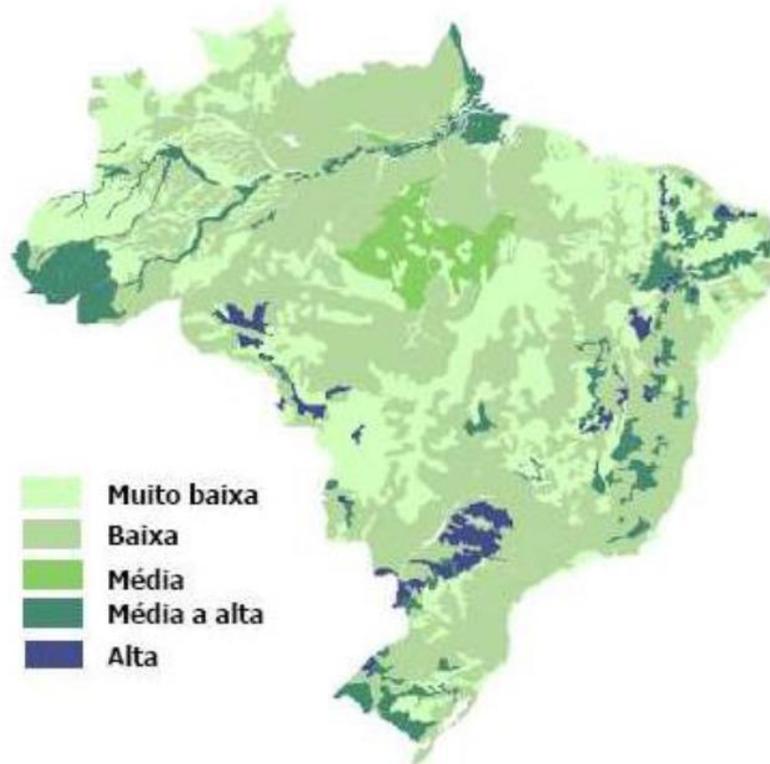


Figura 11 - Distribuição da fertilidade dos solos brasileiros. Fonte: IBGE, 2002

O pH do solo está diretamente associado à disponibilidade das espécies químicas presentes nele. Em solos de pH ácido, como no caso do Brasil, a absorção de nutrientes essenciais às plantas é dificultada, fazendo com que estes fiquem sob formas químicas não disponíveis às plantas, como é o caso do fósforo. Além da imobilização de certos nutrientes causada pela acidez, há a maior presença de espécies tóxicas como o íon alumínio e o íon manganês. O alumínio, por exemplo, impede o correto crescimento e desenvolvimento das raízes das plantas (IFDC - UNIDO, 1985). Nestes casos, a melhor alternativa é a calagem do solo, isto é, a introdução de calcário (CaCO_3) de modo a corrigir o pH (SOUZA, 2012).

Outro fator pernicioso para a fertilidade do solo nacional é o clima. Em regiões quentes, como as de clima tropical e semiárido, geralmente os solos são pobres em matéria orgânica, uma vez que a atividade de micro-organismos presentes nestes são mais acentuadas. Ademais, a ocorrência de fortes chuvas tem importante efeito

lixiviante, retirando da terra nutrientes fundamentais para o metabolismo das plantas (SOUZA, 2012).

2.4. Fertilizantes

No Brasil, a Lei N° 6894 de 1980 define fertilizante como uma substância mineral ou orgânica, natural ou sintética, fornecedora de um ou mais nutrientes vegetais (BRASIL, 1980). De forma mais abrangente, os fertilizantes, também conhecidos como adubos, são materiais que aumentam a disponibilidade de nutrientes essenciais ao metabolismo vegetal no solo, e cujo uso tem como objetivo tornar o solo adequado à cultura de uma determinada planta, seja porque determinado solo apresenta baixa fertilidade ou porque os nutrientes presentes nele foram retirados pela última safra. Além disso, certos tipos de fertilizantes também são responsáveis por melhorar certas propriedades físicas do solo, como: a melhora na retenção de água, redução da erosão, menor compactação e acidez dos solos (KIISKI, SCHERER, *et al.*, 2015).

Aliado à legislação apresentada acima, o Decreto N° 4954 de 2004 dispõe sobre a classificação dos diferentes tipos de fertilizantes encontrados atualmente no mercado brasileiro. Primeiramente, os fertilizantes podem ser classificados em relação ao tipo de nutriente que apresentam, isto é, como fertilizantes minerais ou orgânicos. Os primeiros são definidos como “produto de natureza fundamentalmente mineral, natural ou sintético, obtido por processo físico, químico ou físico-químico, fornecedor de um ou mais nutrientes de plantas”, enquanto o outro tipo é caracterizado no decreto como “produto de natureza fundamentalmente orgânica, obtido por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matérias-primas de origem industrial, urbana ou rural, vegetal ou animal, enriquecido ou não de nutrientes minerais” (BRASIL, 2004). Um resumo da cadeia dos principais fertilizantes minerais está mostrado na Figura 12.

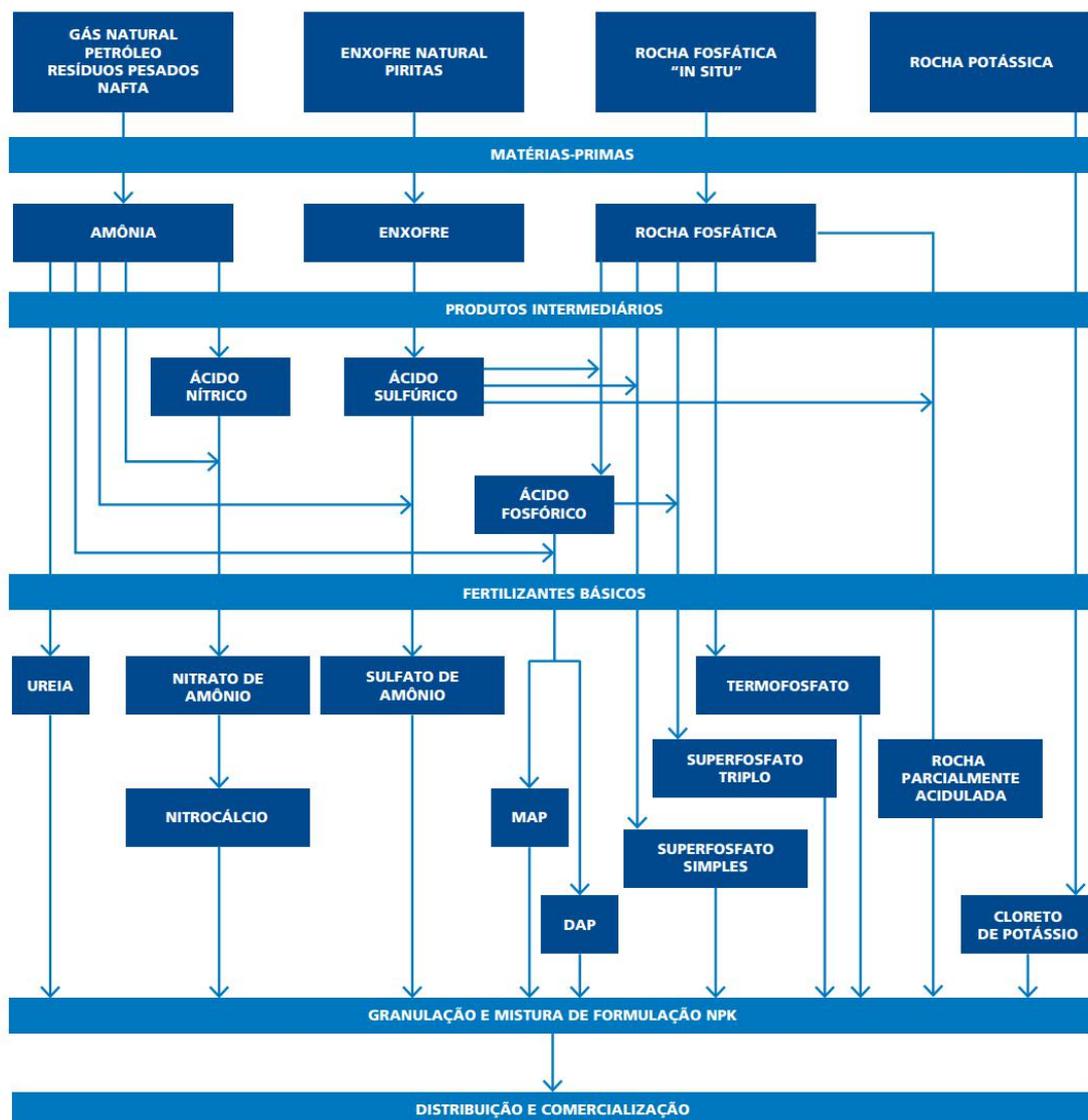


Figura 12 - Resumo da cadeia dos principais fertilizantes minerais. Fonte: Dias e Fernandes, 2006

Além do tipo de nutriente presente nos adubos, pode-se classificá-los também em relação à presença de um ou mais nutrientes. Os fertilizantes mononutrientes contêm apenas um macronutriente primário, enquanto os fertilizantes multinutrientes possuem dois ou mais macronutrientes primários diferentes. Como uma subdivisão, os multinutrientes podem ser divididos em mistos, compostos e complexos. Primeiramente, os mistos são obtidos pela mistura física de fertilizantes mononutrientes em quantidades especificadas. Um exemplo seria a mistura de ureia, superfosfato e cloreto de potássio para obter um fertilizante multinutrientes adequado à uma determinada lavoura. Neste tipo de adubo, cada grânulo do pó contém apenas um

nutriente. Em segundo lugar, há os compostos, isto é, aqueles que são obtidos a partir da mistura de substâncias de diferentes nutrientes, porém há mais de um nutriente presente em cada grânulo e a composição dos grânulos varia, sendo apenas conhecida a composição média dos grânulos da mistura. Por último, além presença de mais de um nutriente em cada grânulo, tal como os mistos, os fertilizantes complexos apresentam composição uniforme em cada grânulo. Isto é conseguido, por exemplo, através de reações químicas, em que se consegue adequar a correta proporção do produto, como nos fosfatos de amônio, obtidos pela reação entre amônia e ácido fosfórico (SOUZA, 2012). A Figura 13 esquematiza esta classificação.

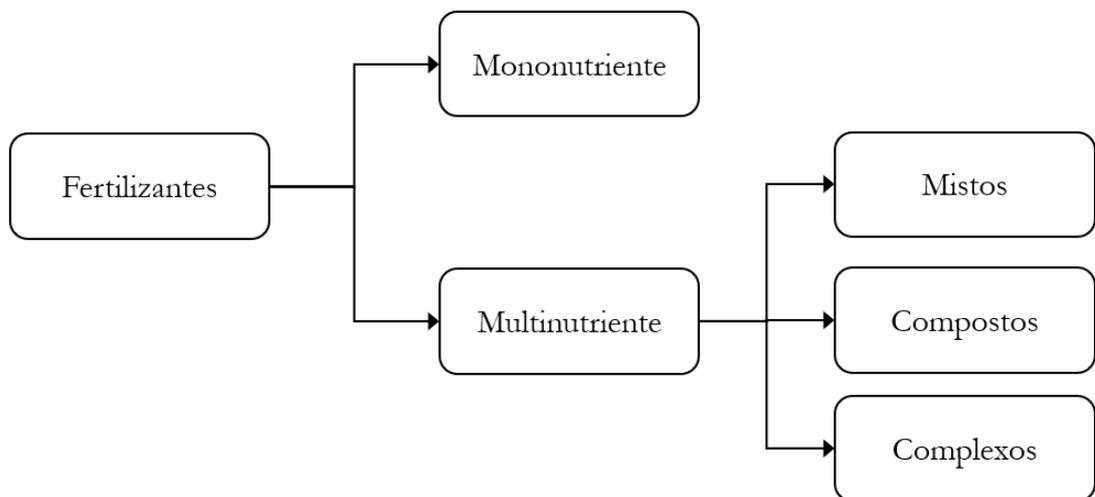


Figura 13 - Tipos de fertilizantes encontrados no mercado. Fonte: elaborado pelo autor

Os fertilizantes macronutrientes minerais são comumente comercializados em misturas de nutrientes fornecedores de nitrogênio, fósforo e potássio, conhecidos como fertilizantes NPK. Nas embalagens, o teor de cada nutriente é expressado por números que se referem às concentrações de nitrogênio, descrito pela quantidade em massa de N elementar; fósforo, em termos mássicos de P_2O_5 ; e potássio, como porcentagem mássica de K_2O . A Figura 14 exemplifica essa nomenclatura. É importante notar que nem sempre o somatório atinge 100%, indicando que há presença de agentes inertes na mistura ou de outros componentes, como condicionadores de solo (SOUZA, 2012).



Figura 14 - Exemplo de embalagem de fertilizante NPK, mostrando a concentração de cada nutriente. Fonte: Dimy

Os fertilizantes que contêm macronutrientes secundários e micronutrientes também têm uma classificação específica segundo a legislação brasileira. Os fertilizantes com macronutrientes secundários são definidos como “produto que contém os macronutrientes secundários, isoladamente ou em misturas destes, ou ainda com outros nutrientes”. Já os fertilizantes com micronutrientes são apresentados como “produto que contém micronutrientes, isoladamente ou em misturas destes, ou com outros nutrientes”. Apesar de serem usados em menor quantidade e em situações às vezes específicas, vale a menção deste tipo de material no texto, visto que os mesmos são essenciais ao metabolismo vegetal (BRASIL, 2004).

Ademais, existem os fertilizantes organominerais e biofertilizantes, classes de adubos que têm sido bastante estudadas recentemente. Os fertilizantes organominerais não são nada mais que a mistura de fertilizantes orgânicos, tais como esterco de animais ou resíduos de esgoto sanitário, com os fertilizantes minerais já descritos acima, tal como os NPK. O uso deste tipo de material é importante pois melhora as características físicas do solo, ajuda a diminuir o déficit da balança comercial em termos de fertilizantes minerais e facilita a destinação e monetização de resíduos orgânicos (OLIVEIRA, 2015). Por outro lado, os biofertilizantes são resultado da fermentação de resíduos orgânicos, como restos de vegetais, borra de café, restos de frutas, entre outros, por micro-organismos. Este produto é rico em nutrientes, também ajuda a diminuir os

impactos ambientais dos rejeitos que seriam descartados e ajuda a proteger a plantação de pragas (STUCHI, 2015).

Os adubos também podem diferir na sua forma de apresentação e liberação de nutrientes. Eles podem ser sólidos, geralmente em forma de pó, grãos ou pérolas, que têm como principal vantagem a melhor estocagem e maior uniformidade de aplicação no solo, assim como líquidos, que têm os nutrientes mais facilmente disponíveis às plantas. A liberação dos nutrientes pode ser rápida, como os fertilizantes utilizados em fase líquida ou lenta, que é mais comum em fertilizantes sólidos. A liberação lenta de nutrientes pode ser conseguida usando polímeros biodegradáveis ou enxofre nos grãos. As principais vantagens são evitar a toxidade pela liberação de uma grande quantidade de nutrientes de uma só vez e também a economia de mão de obra, uma vez que os adubos podem ser aplicados apenas uma vez por safra (SOUZA, 2012).

Por fim, é bem vasto o campo de estudo dos fertilizantes, que tem natureza multidisciplinar, envolvendo conhecimento científico diversificado. Nesta seção foram apresentados os termos mais frequentemente utilizados e as classificações mais encontradas no mercado brasileiro e mundial. Este trabalho tem como objetivo principal o estudo dos fertilizantes macronutrientes primários, mais especificamente os nitrogenados. Todos os outros tipos de adubos estão fora do escopo deste estudo.

2.5. A indústria de fertilizantes nitrogenados

Aminoácidos, proteínas, clorofila, enzimas, material genético, entre outras moléculas constituem os produtos onde o nitrogênio tem papel fundamental em todas as instâncias do metabolismo das plantas. Desta forma, não seria difícil de imaginar que este elemento químico é o nutriente mineral necessário em maior quantidade para manter um satisfatório crescimento e desenvolvimento vegetal (AULAKH e MALHI, 2005). Um fornecimento de nitrogênio adequado é muito importante para manter a absorção adequada de outros nutrientes, uma vez que a absorção de fósforo, por exemplo, é facilitada quando o nitrogênio está presente em correta proporção (GROHSKOPF, 2019) A Figura 15 mostra os efeitos visuais da deficiência de

nitrogênio para um vegetal.



Figura 15 - Efeito da escassez de nitrogênio no solo em um girassol. Fonte: North Carolina State University, 2018

Na natureza, as mais variadas espécies químicas deste elemento estão presentes em diferentes materiais abióticos e também em seres vivos, deslocando-se de um para outro por meio das interações que estes realizam entre si. O movimento de um determinado elemento químico num determinado ambiente e ecossistema é descrito pelo seu ciclo biogeoquímico, que mostra como um certo elemento é, por exemplo, removido do solo, utilizado por seres vivos e, posteriormente, devolvido ao ambiente (ADUAN, 2004). O ciclo do nitrogênio é apresentado na Figura 16.

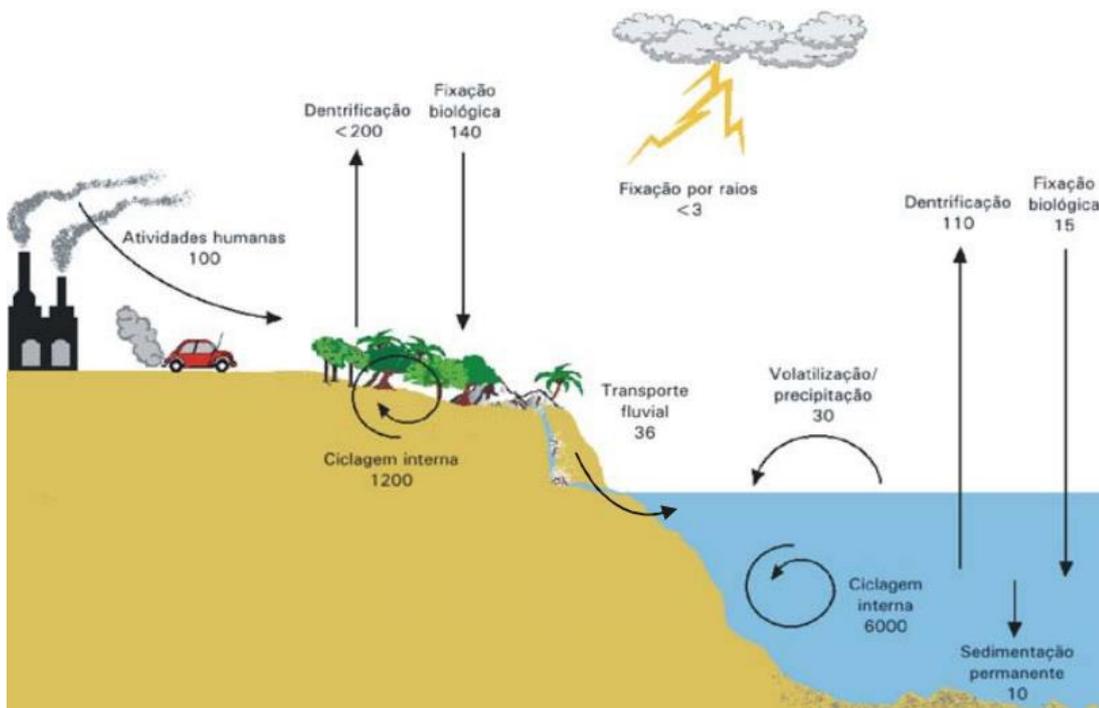


Figura 16 - Ciclo global do nitrogênio. Os valores numéricos representam o fluxo de nitrogênio elementar na ordem de 10^{12} g/ano. Fonte: Aduan, 2004

A quase totalidade do nitrogênio mundial existe numa forma pouco reativa e indisponível à maioria dos seres vivos do planeta, o nitrogênio atmosférico (N_2). Este ciclo engloba basicamente duas classes de reações químicas: as de disponibilização, que transformam o nitrogênio naturalmente indisponível em moléculas mais reativas e assimiláveis como a amônia (NH_3), o íon amônio (NH_4^+) e o ânion nitrato (NO_3^-), e as reações de indisponibilização, que devolvem o nitrogênio sob forma de N_2 para a atmosfera (ADUAN, 2004).

Entre as reações de disponibilização mais importantes está a fixação biológica do nitrogênio realizada por alguns micro-organismos. As leguminosas, classe de plantas que engloba o feijão, a soja e a ervilha, abrigam em suas raízes certas espécies de bactérias capazes de capturar o nitrogênio atmosférico e transformá-lo em compostos de nitrogênio assimiláveis. Este processo, que ocorre por meio de uma associação simbiótica, é comumente realizado por certos gêneros de bactérias, como as *Rhizobium sp.* e *Cyanophita sp.* Ao contrário da grande maioria dos vegetais, plantas deste tipo raramente precisam de outras fontes de nitrogênio para se desenvolverem. Além disso, é importante mencionar que o ser humano é atualmente um importante agente neste ciclo, graças aos processos químicos desenvolvidos no século XX para produção de amônia, chegando a ter a mesma ordem de grandeza dos processos de disponibilização

naturais (ADUAN, 2004). Em menor grau, também ocorre produção de formas assimiláveis de nitrogênio pela ação de raios, erupção de vulcões e queima de combustíveis fósseis (GOMES, SOUZA, *et al.*, 2008).

As reações de indisponibilização de nitrogênio para os seres vivos, também conhecidas como reações de desnitrificação, podem ocorrer pela ação de microorganismos anaeróbios e queima de matéria orgânica. Algumas famílias de bactérias utilizam o nitrato em seu metabolismo como intermediário para a produção de energia, liberando N_2 para a atmosfera como subproduto. Isto ocorre por exemplo em plantações de arroz, em que a planta é cultivada em terrenos alagados. Neste caso, por exemplo, prefere-se o uso de fertilizantes com liberação lenta do nutriente, de forma a evitar perdas para a atmosfera (SOUZA, 2012).

As espécies de nitrogênio absorvidas pelas plantas compreendem o íon nitrato e o cátion amônio, sendo que o primeiro é preferido em relação ao último. O íon nitrato é mais disponível metabolicamente para as plantas, porém tem como desvantagem a sua alta tendência à lixiviação. Por outro lado, o nitrogênio amoniacal tem menor tendência às perdas por arraste, embora precise ser transformado biologicamente para nitrato no solo. As principais desvantagens do último tipo são a tendência a imobilização por formação de componentes mais estáveis com partículas do solo e perda por evaporação quando aplicado em solos alcalinos (SOUZA, 2012).

Hoje em dia, a principal matéria-prima para a cadeia dos fertilizantes nitrogenados é a amônia, molécula constituída por um átomo de nitrogênio e três átomos de hidrogênio, de fórmula química NH_3 . No início do século XXI, esta molécula já era produzida na ordem de milhões de toneladas/ano em plantas localizadas em mais de oitenta países (INTRATEC, 2017). Com ela, é possível a produção em escala industrial de importantes fertilizantes largamente utilizados no mundo atual, como: ureia, nitrato de amônio, fosfatos de amônio e nitrato de cálcio. Além disso, a amônia também é usada para a produção de ácido nítrico, importante produto intermediário da indústria química (NIELSSON, 1987).

Atualmente, o processo químico de produção de amônia ainda é baseado no processo pioneiro desenvolvido por Haber e Bosch no início do século XX na Alemanha. No início, as plantas desta molécula tinham capacidade de produção de cerca de 50 toneladas/dia, já nos dias de hoje, este valor pode ultrapassar a ordem de 3000 toneladas/dia, um aumento de mais de sessenta vezes (SOUZA, 2012). A molécula de

amônia é produzida pela reação entre gás nitrogênio (N₂), obtido do ar atmosférico e gás hidrogênio (H₂), que pode ser oriundo de gás natural, nafta, óleo pesado, resíduo asfáltico e carvão. Destes, o gás natural é o preferido, pois é o que menos onera os custos de investimento, operação e de energia da planta. Devido a isto, ele é utilizado em mais de 80% das plantas existentes atualmente no mundo, incluindo o Brasil, sendo as outras matérias-primas somente utilizadas em casos muito específicos, como no caso da China, que possui grandes reservas de carvão (NIELSSON, 1987). Neste estudo, portanto, será somente apresentado o processo químico que utiliza o gás natural como matéria-prima.

Basicamente, a síntese da amônia é precedida de vários processos que, a partir do gás natural, geram o gás hidrogênio, o qual é misturado ao gás nitrogênio nas proporções adequadas a montante do reator de síntese. Nos parágrafos seguintes, serão descritas resumidamente cada uma destas etapas. Um resumo do processo está apresentado na Figura 17 e na Tabela 3.

Tabela 3 - Etapas do processo global de síntese da amônia. Fonte: Souza, 2012.

Etapa	Reação
Dessulfurização	Adsorção em óxidos ou hidrodessulfurização
Reforma primária	$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3 H_2$
Reforma secundária	$CH_4 + \frac{1}{2} O_2 + (2 N_2) \rightleftharpoons CO + 2 H_2 + (2 N_2)$
Conversão por shift	$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$
Remoção de CO ₂	Absorção física ou química
Metanação	$CO + 3 H_2 \rightleftharpoons CH_4 + H_2O$ $CO_2 + 4 H_2 \rightleftharpoons CH_4 + 2 H_2O$
Síntese de amônia	$3 H_2 + N_2 \rightleftharpoons 2 NH_3$

Primeiramente, a carga de gás natural passa por um processo de dessulfurização, com o objetivo de retirar gases sulfurados, como sulfeto de hidrogênio e mercaptanas que podem envenenar os catalisadores dos processos a jusante, isto é, desativá-los, fazendo-os perder a atividade catalítica, prejudicando ou até mesmo inviabilizando o processo de produção de amônia como um todo (NIELSSON, 1987).

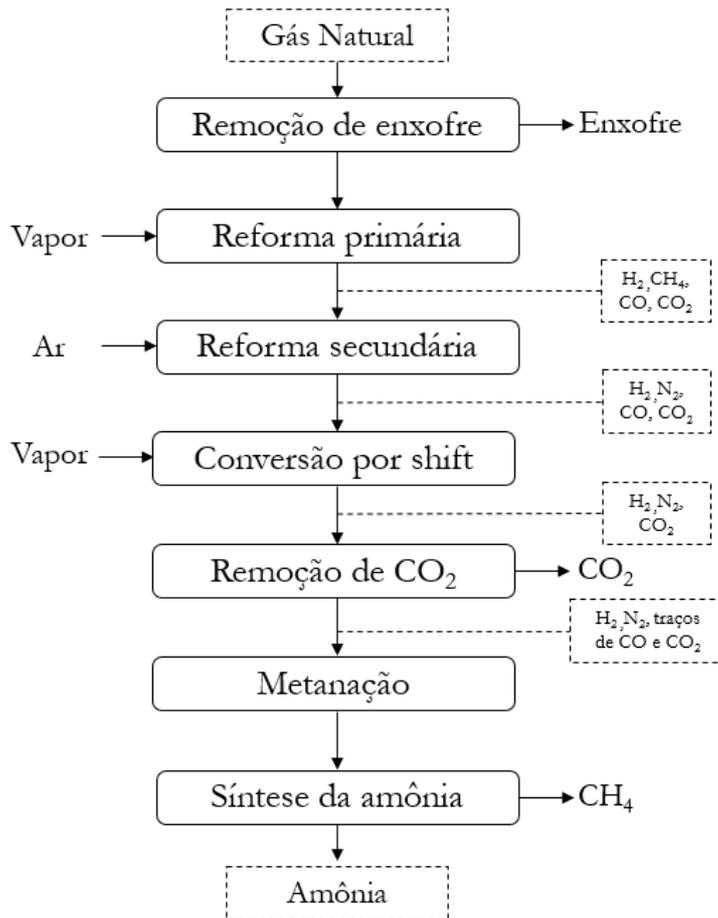


Figura 17 - Diagrama de blocos da síntese de amônia. Fonte: adaptado de Nielsson, 1987 e Souza, 2012.

Em seguida, ocorrem as etapas de reforma catalítica que têm como objetivo produzir o gás hidrogênio a partir do gás natural alimentado. A primeira reforma utiliza vapor e consegue conversões na ordem de 60% (SOUZA, 2012). Por isso, a jusante se encontra mais uma etapa de reforma, que desta vez utiliza ar em vez de vapor d'água. Esta segunda etapa é basicamente uma oxidação parcial do metano não reagido no processo anterior e também tem como objetivo a introdução de nitrogênio do ar à mistura, que posteriormente será utilizada para a síntese da amônia. A corrente de saída do segundo reformador contém monóxido e dióxido de carbono que serão convertidos nas etapas seguintes (NIELSSON, 1987).

Logo após a etapa de reforma, há a conversão por shift que se fundamenta na reação do monóxido de carbono com vapor d'água para gerar mais gás hidrogênio e dióxido de carbono. Este coproduto é, então, retirado na próxima etapa do processo por meio de processos de absorção química ou física, por exemplo usando um solvente (SOUZA, 2012).

É importante que não haja resíduos de monóxido nem dióxido de carbono na corrente que alimenta o reator de síntese de amônia, pois o catalisador utilizado pode perder significativamente a atividade catalítica. Devido a isso, passa-se a corrente gasosa por uma etapa de metanação, na qual estes resíduos reagem com gás hidrogênio gerando metano e vapor d'água. O metano formado permanece na mistura de gases junto com nitrogênio e hidrogênio e entra no reator de síntese como um inerte (NIELSSON, 1987).

Logo em seguida, esta mistura é comprimida para as pressões de processo, na ordem de 100 a 250 atmosferas. O vapor d'água oriundo da reação de metanação condensa e é retirado. Assim, a mistura de gás nitrogênio e hidrogênio entra no reator de síntese de amônia. Ao fim, a amônia produzida é comprimida até liquefazer para ser estocada em esferas ou transportada via dutos ou caminhões tanque para o seu destino (APPL, 2011). Em 2017, os três maiores produtores desta molécula foram a China, com mais de 48 milhões de toneladas no ano e 29% de participação mundial, seguido da Rússia com 17 milhões de toneladas e 9,9% de participação e, finalmente os Estados Unidos da América com 15 milhões de toneladas e 8 % de contribuição. O Brasil é 29º colocado na lista com 910 mil toneladas e uma parcela de 0,5% de contribuição (ANDA, 2019).

Os principais licenciadores de tecnologia para as plantas de amônia são as empresas KBR, Haldor Topsoe, e Uhde. A KBR, por exemplo, oferece tecnologia que reduz os custos de equipamentos e de operação, sendo um dos grandes diferenciais a capacidade de remover os gases inertes antes da entrada do reator, aumentando a taxa de conversão (KBR, 2019). A Haldor Topsoe inovou nos fornos de reforma, trocando as duas etapas por uma só e é capaz de gerar gás de síntese de maneira mais rentável e ainda promove maior economia de escala (HALDOR TOPSOE, 2019). A Uhde, por sua vez, promoveu mudanças nos dois reatores de reforma, melhorando a mistura de gás nitrogênio e hidrogênio, e também melhorou a integração energética da planta (THYSSENKRUPP, 2019).

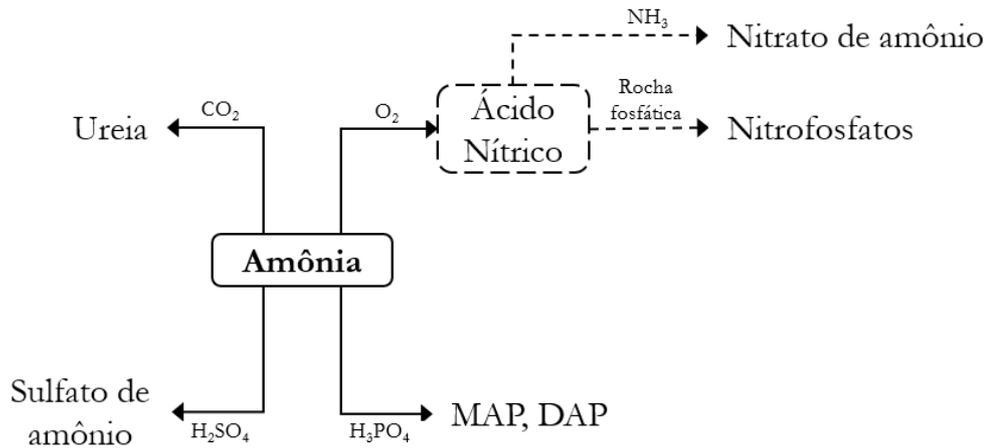


Figura 18 - Produtos químicos derivados da amônia. Fonte: adaptado de Souza, 2012.

Da amônia podem se obter os mais variados fertilizantes nitrogenados, conforme mostrado na Figura 18. Atualmente, o mais utilizado dentre eles é a ureia ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$). Historicamente, a ureia é uma molécula com importante simbolismo, pois foi sintetizada pela primeira vez por Friedrich Wöhler no século XIX usando compostos inorgânicos, contradizendo a até então presente Teoria da Força Vital, a qual estabelecia que apenas seres vivos poderiam sintetizar moléculas orgânicas. No início do século XX, a ureia era produzida industrialmente pela hidratação da cianamida de cálcio. Atualmente, a ureia é obtida por meio da reação entre a amônia e dióxido de carbono, subproduto do gás de síntese da planta de amônia. A ureia é obtida basicamente numa sequência de duas reações químicas: a primeira consiste na formação do carbamato de amônio pela reação entre amônia e gás carbônico, enquanto a segunda é a decomposição do carbamato formado, produzindo a ureia (MEESSEN, 2010). As equações químicas que representam estas reações estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Principais reações químicas no processo de produção da ureia. Fonte: Meessen, 2010.

Etapa	Reação
Síntese do carbamato de amônio	$2\text{NH}_3 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{NH}_2\text{CO}_2\text{NH}_4$
Decomposição do carbamato de amônio	$\text{NH}_2\text{CO}_2\text{NH}_4 \rightleftharpoons \text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{H}_2\text{O}$

As reações são realizadas num reator tipo autoclave a altas pressões, que permitem que a reação ocorra em fase líquida. Nestas reações é importante que se haja um controle adequado da temperatura, pressão e composição das espécies químicas no

reator para se obter o produto em um rendimento satisfatório. Alguns exemplos relevantes são: a conversão aumenta com a temperatura até um ponto de máximo em 200 °C; a formação da ureia se dá somente em fase líquida, sendo necessárias pressões na ordem de 140 a 250 atm para tal; a conversão é máxima com a razão NH_3/CO_2 próxima de 3 e com a razão $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ tendendo a zero (SOUZA, 2012). Um aspecto positivo das reações envolvidas neste processo é que a primeira reação é rápida e exotérmica, enquanto que a segunda é endotérmica. No entanto, o calor gerado pela primeira reação consegue ser transferido e aproveitado para a segunda etapa e mantém um saldo positivo de geração de calor, o que representa uma vantagem em termos de eficiência energética (MEESSEN, 2010).

Na saída do reator, obtém-se uma solução de ureia que segue para os equipamentos a jusante na fábrica para ser evaporada e a ureia cristalizada ou granulada em equipamentos específicos. O carbamato não reagido é decomposto em amônia e dióxido de carbono que podem ser reciclados ao reator. Atualmente, este processo é mais comumente feito pelo sistema de estripagem, no entanto, também há plantas antigas que usam o sistema convencional. O sistema convencional baseia seu funcionamento pela passagem da solução de carbamato numa sequência de equipamentos que despressurizam gradualmente a mistura, até se chegar à pressão atmosférica. Com isso, o carbamato se decompõe em seus produtos de origem, que são reciclados. O sistema de estripagem, ao contrário do anterior, não diminui significativamente a pressão aplicada à mistura de carbamato, mas sim injeta uma das matérias-primas do processo (amônia ou dióxido de carbono) na solução, promovendo a decomposição do carbamato em seus reagentes de origem (SOUZA, 2012).

Há atualmente um grande número de licenciadores de tecnologia para o processo de produção industrial de ureia. A empresa holandesa Stamicarbon é uma das mais relevantes do setor, empregando em seus projetos o sistema de estripagem que usa CO_2 como fluxo de gás para decomposição do carbamato. Plantas com esta tecnologia estão presentes em vários continentes no mundo, incluindo o Brasil. A tecnologia da Stamicarbon propicia um CAPEX reduzido e baixo consumo global de energia no processo (STAMICARBON). Outro licenciador de tecnologia relevante é a Toyo, empresa japonesa que emprega sua tecnologia em mais de 100 plantas espalhadas pelo mundo. Assim, como a Stamicarbon, a Toyo preza por reduzir os custos fixos e de energia, ao mesmo tempo em que aumenta a capacidade produtiva do processo. Atualmente, plantas com esta tecnologia conseguem produzir até 4000 toneladas/dia de

ureia (TOYO ENGINEERING). Também é importante citar as empresas Casale e Snamprogetti que são importantes detentores de tecnologia para a ureia, e como os anteriores, projetam suas plantas visando maior produção com menor custo energético e perda de produtos e matérias-primas (MEESSEN, 2010).

Por fim, as principais vantagens da ureia são sua facilidade de produção, transporte e aplicação, além do alto teor de nitrogênio (46% N). Graças a estes fatos, ela é um dos adubos preferidos para uso nas principais lavouras (SOUZA, 2012). A título de curiosidade, uma pequena parcela da ureia produzida também é utilizada como agente mitigador de emissão de óxidos de nitrogênio em sistemas de exaustão automotivos (MEESSEN, 2010).

O sulfato de amônio – $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – é outra substância importante, pois carrega em si também o enxofre, um macronutriente secundário. Este sal pode ser obtido na rota de produção do nylon, já que é um subproduto de um dos intermediários da síntese deste polímero, a caprolactama. Além disso, também pode ser fabricado pelo processo Merseburg, que se baseia na reação de carbonato de amônio e sulfato de cálcio em solução aquosa. Finalmente, ele também pode ser produzido pela reação direta entre amônia gasosa e ácido sulfúrico, numa reação fortemente exotérmica (SOUZA, 2012).

O nitrato de amônio é outra importante fonte de nitrogênio para os vegetais e chegou a ser o fertilizante nitrogenado mais utilizado mundialmente até a década de 1970. O nitrato de amônio tem a importante vantagem de combinar a ação rápida do grupamento nítrico com a ação lenta do grupamento amônio, além de apresentar custo baixo de produção. No entanto, o mesmo apresenta sérios riscos no armazenamento, manuseio e aplicação, visto que pode se comportar como um explosivo em ambientes confinados e/ou na presença de matéria orgânica. Não é raro de se encontrarem registros nos jornais noticiando explosões repentinas em depósitos deste material. Industrialmente, o nitrato de amônio é fabricado pela reação de neutralização entre amônia e ácido nítrico, seguida de evaporação para obtenção do sal em fase sólida. Com este composto também pode ser obtido o nitrocálcio, uma mistura de nitratos de cálcio e amônio, que além de conter um macronutriente secundário, está menos suscetível à explosão (SOUZA, 2012).

Os outros fertilizantes minerais que contêm nitrogênio, mas também carregam algum outro macronutriente primário em suas composições químicas, como por exemplo, MAP, DAP e nitrofosfatos, serão descritos nas seções a seguir. Resumidamente, a Tabela 5 apresenta os fertilizantes nitrogenados mais comuns e

outros usados apenas em casos mais específicos, ressaltando os seus respectivos teores nutricionais de nitrogênio (SOUZA, 2012).

Tabela 5 - Fertilizantes nitrogenados por teor de nitrogênio em massa. Fonte: Souza, 2012.

Substância	Teor de nitrogênio em massa (% N)
Sulfato de amônio	21%
Bicarbonato de amônio	17%
Nitrato de cálcio	16%
Nitrato de sódio	16%
Nitrato de amônio	34%
Nitrato de cálcio-amônio	21-27%
Nitrato de sulfato-amônio	26-30%
Ureia	46%
Cianamida cálcica	20%

2.6. A indústria de fertilizantes fosfatados

O fósforo é constituinte de várias moléculas essenciais à vida, como: ácidos nucleicos, componentes da parede de células, ATP e ADP, que atuam na transferência de energia, entre outros. Além disso, este elemento químico tem papel fundamental no desenvolvimento de raízes, sementes, frutos e flores. O fósforo é absorvido na forma de dihidrogenofosfato (H_2PO_4^-) e monohidrogenofosfato (HPO_4^{2-}), sendo preferencialmente absorvido pela primeira espécie química. A Figura 19 mostra os efeitos da deficiência de fósforo.



Figura 19 - Comparação entre uma planta com correto suprimento de fósforo e outra com deficiência deste mineral. Fonte: PRO-MIX, 2018

O ciclo natural do fósforo é peculiar, pois o elemento é o único que não possui nenhuma forma no estado gasoso presente no ambiente. O fósforo geralmente existe em formas não disponíveis para os seres vivos, majoritariamente sob a forma de rochas sedimentares do tipo cristalino apatita. O fósforo torna-se disponível para a biota por meio do intemperismo no solo, que ataca estas rochas e transforma o elemento em questão em fosfatos. Estas espécies mais solúveis são carregadas por rios e chegam até o mar, onde, em contato com um ambiente mais alcalino, precipitam novamente em formas insolúveis, sedimentando no leito marinho (ADUAN, 2004).

A exploração humana das jazidas de rocha fosfática aumentou consideravelmente a migração do fósforo presente na litosfera para os oceanos, porém o caminho inverso não foi favorecido. Isto é comprovado pela crescente dificuldade na mineração deste tipo de rocha, que são encontradas em profundidades cada vez maiores e com menores teores de fósforo. Deve-se ressaltar, portanto, que uso e exploração indiscriminada deste mineral trará escassez no futuro, com uma mudança provável de fonte de rocha fosfática para os oceanos (ADUAN, 2004). Abaixo, a Figura 20 esquematiza o ciclo biogeoquímico do fósforo.

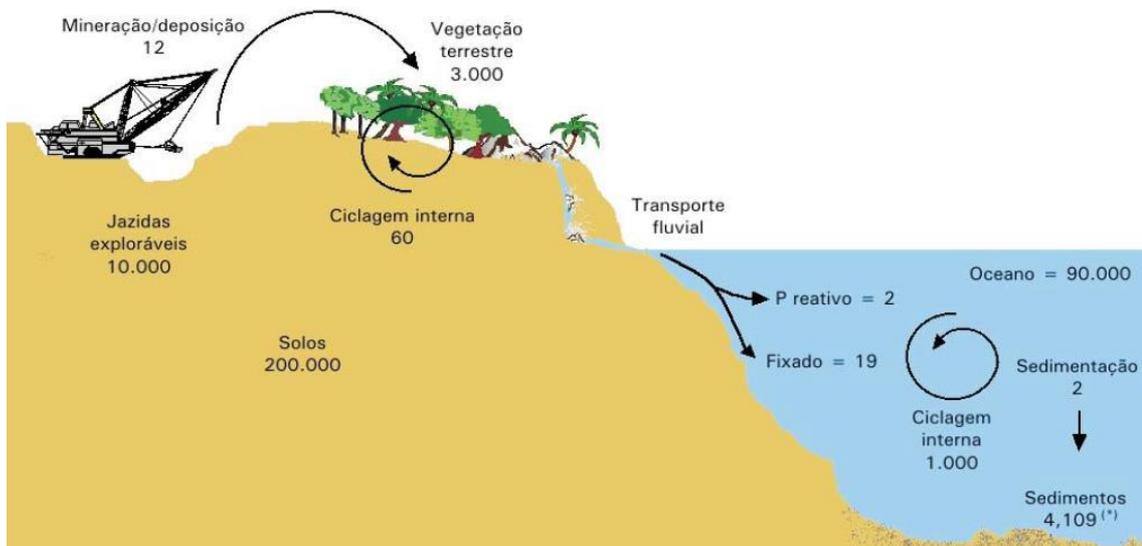


Figura 20 - Ciclobiogeoquímico do fósforo. Fonte: Audan, 2004

A partir da rocha fosfática, podem-se obter uma grande variedade de fertilizantes, conforme apresentado na Figura 21. Dentre eles, a classe dos superfosfatos é a mais utilizada nas lavouras (SOUZA, 2012). O fosfato parcialmente acidulado é uma alternativa interessante, pois é de baixíssimo custo de implementação. Este adubo consiste do uso de um ácido mineral, como ácido fosfórico ou ácido sulfúrico, para atacar a rocha fosfática, de forma a tornar disponível o fósforo para as plantas. Uma cartilha do Centro de Fertilizantes do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (CEFER – IPT) indicava que o uso desta alternativa era uma saída para reduzir a dependência de importações de fertilizantes fosfatados do Brasil no início da década de 1980. Complementava-se também que, o uso de ácido sulfúrico também tinha a vantagem de adicionar uma fonte de enxofre ao solo (CEKINSKI e BETTIOL, 1983).

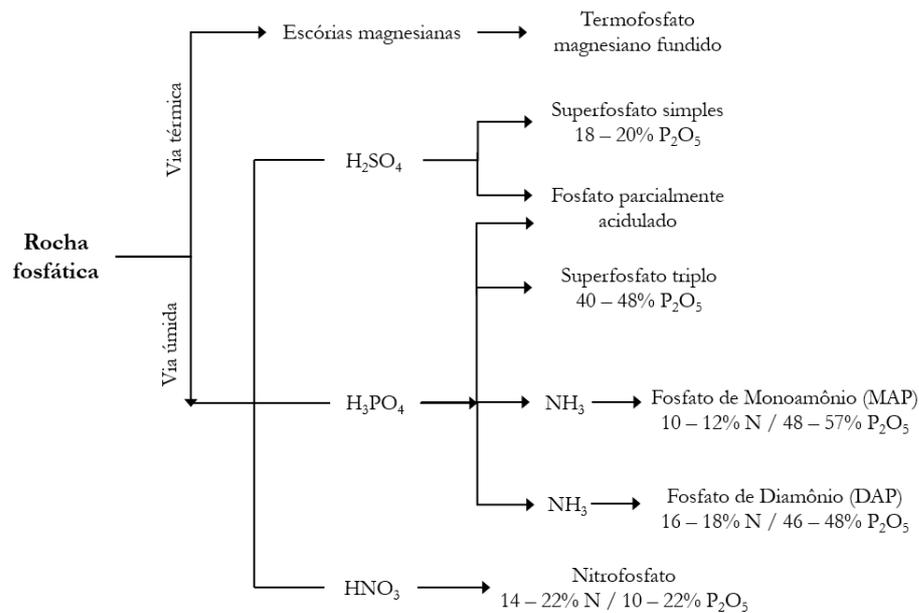


Figura 21 - Principais produtos da indústria de fertilizantes fosfatados. Fonte: Souza, 2020.

Tal como o fosfato parcialmente acidulado, os superfosfatos também são produzidos pelo ataque de ácidos à rocha fosfática, porém esta classe de fertilizantes utiliza proporções maiores de ácidos e têm um processo de fabricação mais definido (SOUZA, 2012). O superfosfato simples (SSP) é o que tem maior uso no Brasil. Ele é produzido pelo ataque da rocha fosfática com ácido sulfúrico primeiramente, em seguida a rocha não reagida é colocada em contato com ácido fosfórico, para finalmente produzir o SSP. Um grande problema ambiental deste processo é a formação de sulfato de cálcio como subproduto pelo ataque com ácido sulfúrico. Este sal, conhecido como fosfogesso, não possui demanda suficiente e tende a se acumular em áreas a céu aberto anexas às plantas produtoras. Já no caso do superfosfato triplo (TSP), é somente utilizado o ácido fosfórico para atacar a rocha fosfática, obtendo-se um produto com concentração de fósforo bem maior. Além disso, não há formação de fosfogesso (MAZZILLI, SAUEIA e NISTI, 2019).

O termofosfato é obtido pelo aquecimento da rocha fosfática em fornos na presença de escórias de silício e magnésio, subproduto de processos de fundição de minérios. A escória tem papel fundamental, pois diminui a quantidade de energia necessária para fundir a rocha fosfática e também cria espécies químicas disponíveis de fósforo para as plantas. Embora este produto tenha como vantagem o uso de rochas fosfáticas de menor qualidade, a grande desvantagem é o alto consumo de energia nos fornos de calcinação da rocha. No Brasil, a produção deste tipo de adubo é ínfima

(SOUZA, 2012).

Finalmente, os fosfatos de amônio (MAP e DAP) são obtidos pela reação entre ácido fosfórico e amônia gasosa. Basta controlar a proporção entre cada um dos reagentes para se obter o fertilizante complexo no teor final desejado. Ademais, o nitrofosfato é obtido quando se usa ácido nítrico para atacar a rocha fosfática. Uma das vantagens desta metodologia, conhecida como processo Odda, é a não formação de fosfogesso (IPNI, 2015).

Atualmente, os maiores produtores de rocha fosfática no mundo são China, Marrocos, Estados Unidos, Rússia, Jordânia e Brasil. O total mundial de produção desta rocha chegou a ordem de 200 milhões de toneladas em 2017, sendo que a China explorou 82 milhões de toneladas do minério no mesmo ano, com uma participação de 39% no total e o Brasil conta com 5 milhões de toneladas e participação na ordem de 3% (ANDA, 2019).

2.7. A indústria de fertilizantes potássicos

Diferentemente dos outros macronutrientes supracitados, o potássio não se combina com outros elementos para formar moléculas complexas nos organismos vegetais, sendo absorvido e cumprindo seu papel metabólico na forma de íon livre, K^+ (IFDC - UNIDO, 1985). Este metal alcalino tem papel fundamental na ativação de enzimas, atua no transporte de moléculas vitais, como açúcares, e também na síntese de proteínas. Ademais, o potássio é responsável pelo equilíbrio osmótico das células, atuando no abrir e fechar dos estômatos, que são pequenas estruturas presentes nas folhas responsáveis pela troca de oxigênio, dióxido de carbono e água com o ambiente. Este equilíbrio iônico também é útil para prevenir o efeito de secas e o ataque de pragas, como algumas espécies de fungos (SOUZA, 2012). Os efeitos da falta de potássio estão mostrados na Figura 22.



Figura 22 - Deficiência de potássio em folhas de soja. Fonte: USP, 2017

O ciclo do potássio se baseia no equilíbrio existente entre as reservas minerais e a parte que é adicionada ou removida do solo. O potássio mineral encontrado no solo sob a forma fixada transforma-se no cátion potássio, que é utilizado pelos seres vivos. Parte deste elemento é repostado pelos resíduos de plantas e excrementos de animais, assim como por uso de fertilizantes. Por outro lado, pode haver perda do material por erosão das jazidas de potássio e lixiviação no solo, assim como pela colheita das safras. Este ciclo mostra-se presente apenas numa determinada região ligada à lavoura, não conectando extensas partes do ambiente, tal como nos ciclos do fósforo e nitrogênio anteriormente apresentados (USP, 2017). Este ciclo está esquematizado na Figura 23.

do NaCl e KCl. Depois da britagem e moagem do minério até espessuras de partículas adequadas, ocorre a lixiviação a quente, onde é possível retirar o NaCl que é menos solúvel que o KCl. Depois desta separação, o KCl é cristalizado em outro tanque e obtido com maior teor de pureza (SOUZA, 2012).

O líder mundial de produção de potássio é o Canadá, com mais de 12 milhões de toneladas de rocha extraída no ano de 2017. Este país também tem as maiores reservas do mundo deste mineral, chegando a contar com mais de 50% das reservas mundiais. O Brasil, por sua vez, ocupa a décima posição no mesmo ano, com uma produção de mais de 200 mil toneladas. Atualmente, apenas uma jazida, localizada em Taquari-Vassouras no estado do Sergipe, é explorada no Brasil (ANDA, 2019).

3. A amônia e ureia

3.1. Mercado mundial

As plantas de produção de amônia estão presentes atualmente em todos os continentes habitados o planeta. A distribuição da capacidade produtiva ao redor do globo no ano de 2005 está mostrada na Figura 24.

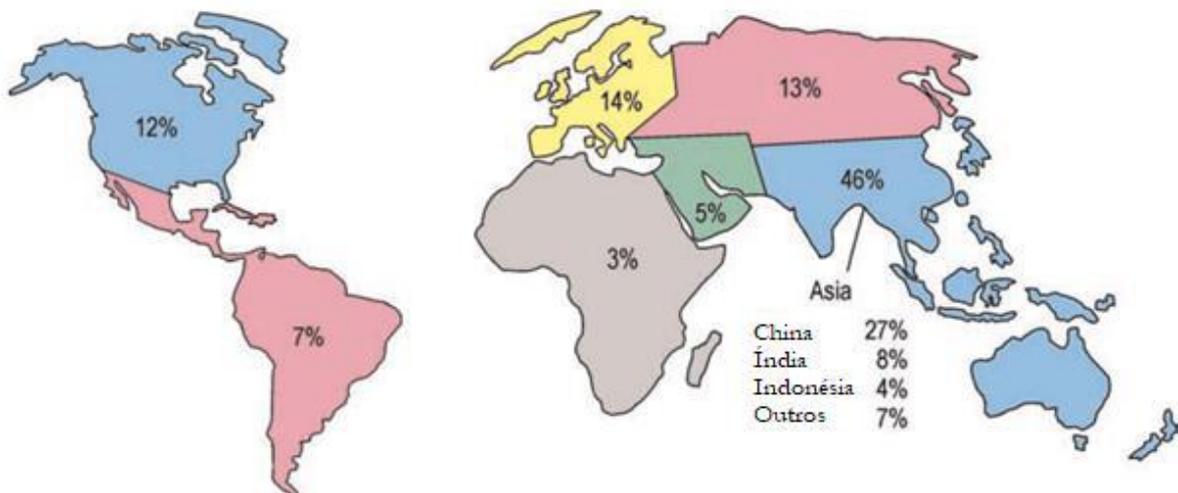


Figura 24 - Distribuição geográfica da capacidade de produção de amônia. Fonte: adaptado de Gosnell, 2005.

Durante grande parte do século XX, a maioria da capacidade produtiva estava localizada nos Estados Unidos e Europa, mas hoje em dia, a maior parte da produção global está deslocada para o eixo Ásia-Pacífico, nomeadamente para a China e Índia. Atualmente a produção anual de amônia é da ordem de milhões de toneladas ao ano (ANDA, 2019). Historicamente, é interessante observar a correlação positiva entre o

crescimento populacional e a produção mundial de amônia (APPL, 2011). Portanto, não é difícil de se concluir que a mudança das plantas para lugares com a maior densidade demográfica do mundo, e conseqüente demanda por insumos agrícolas, era previsível. Esta correlação está apresentada graficamente na Figura 25.

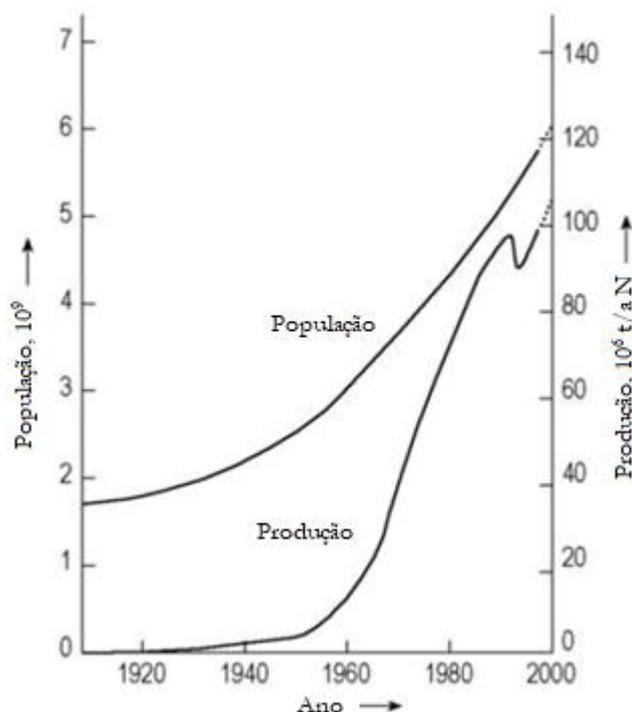


Figura 25 - Evolução histórica da população humana mundial e da produção de amônia. Fonte: adaptado de Appl, 2011

A amônia é uma matéria-prima essencial para a indústria química moderna. Estima-se que todo átomo de nitrogênio processado na indústria química atual tenha origem na amônia sintética. Além disso, estima-se que mais de 1% de toda a energia gerada por combustíveis fósseis anualmente no planeta seja consumida para a produção desta importante molécula. Como dito nas seções anteriores, a maior parte da amônia produzida é encaminhada para os processos produtores de fertilizantes. No entanto, a amônia também é usada na fabricação de plásticos, corantes, produtos farmacêuticos, explosivos, entre outros usos. Como molécula, amônia é largamente empregada como agente refrigerante em processos que necessitam de baixas temperaturas, seja na indústria alimentícia ou na farmacêutica. Atualmente, também vem se buscando usar amônia em aplicações ambientalmente sustentáveis e também para o setor de energia. Exemplos destas tendências são o uso para a absorção de gases sulfurados oriundos de processos de refino de petróleo, gerando por sua vez, sulfato de amônio que pode ser

comercializado como fertilizante; assim como, a eletrólise da amônia, que tem se mostrado uma boa maneira de se obter hidrogênio em locais onde a produção e compra deste gás são demasiadamente caras ou no caso do transporte em longas distâncias (APPL, 2011). A Figura 26 mostra a distribuição dos usos industriais da amônia a nível global em 2011.

Aplicações da amônia a nível mundial

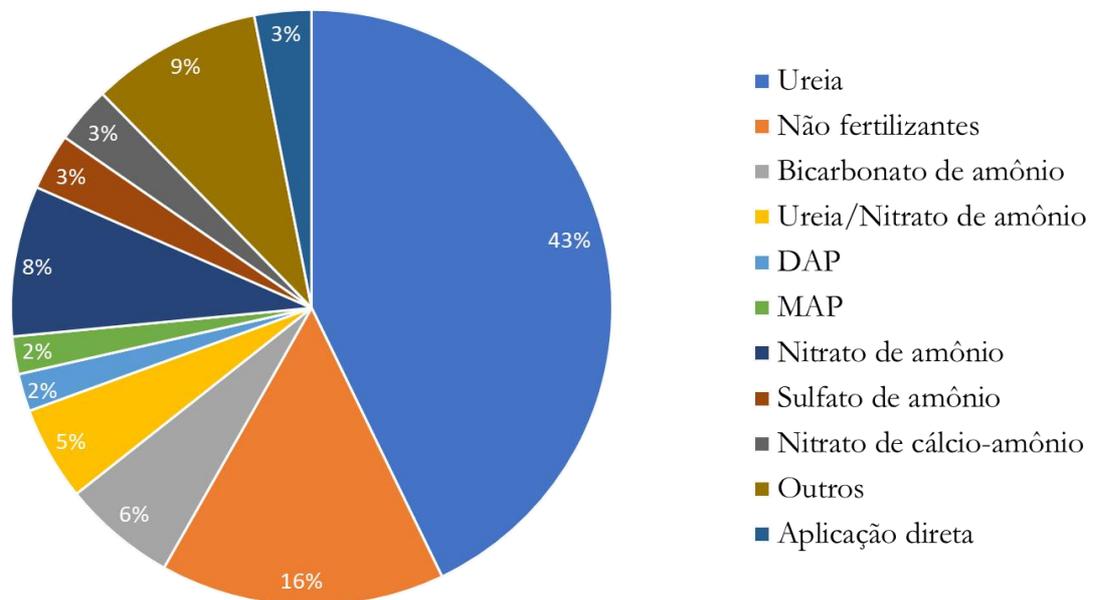


Figura 26 - Aplicações da amônia produzida mundialmente. Fonte: elaborado por autor com dados de Appl, 2011

A maior parte da amônia produzida no mundo vai para a fabricação de ureia, que também tem produção na ordem de milhões de toneladas por ano atualmente. É comum que as plantas de ureia se localizem próximas às plantas de amônia, com o objetivo de eliminar gastos de liquefação, transporte e regaseificação de amônia. Estes tipos de plantas tendem a se localizar onde a matéria-prima (gás natural) é abundante e barata, uma vez que o custo desta matéria-prima, que também é usada como combustível, representa grande parte do custo final de produção da ureia (MEESSEN, 2010). Além dos usos como fertilizantes, a ureia também encontra papel na indústria de tintas e vernizes, cosméticos, produtos farmacêuticos, polímeros, entre outras (SOUZA, 2012).

A indústria de amônia tem perspectivas de crescimento para os próximos

anos. Segundo APPL (2011), a demanda de nitrogênio sintético no futuro deve crescer mais que a taxa de crescimento da população. Esta previsão está ancorada no crescimento de demanda de carne ser de aproximadamente 3% ao ano e, uma vez que, mais de um quinto do nitrogênio sintético produzido é utilizado na produção de rações animais, isto deve levar a uma maior demanda por amônia. A consultoria Merchant Research (2020) estima um crescimento anual médio de 3,5% no mercado de amônia até o fim desta década. Além disso, comenta que a maior parte da produção continuará indo para fins fertilizantes, porém a deverá haver maior aplicação em outros segmentos, como o de explosivos. A empresa Mordor (2018), afirma que o eixo geográfico Ásia-Pacífico continuará sendo o principal produtor e consumidor desta molécula. Só a China, usa uma média de 300 kg de nitrogênio por hectare de terra agricultável, valor quase quatro vezes a média global. A grande maioria das novas plantas deverá usar como matéria-prima o gás natural devido à grande economia de custo de capital (CAPEX) e custo de operação (OPEX) promovida por esta matéria prima. A grande exceção está na China, que conta com limitadas reservas de gás e grandes jazidas de carvão. A Figura 27 mostra a projeção de demanda (APPL, 2011). A Figura 27 apresenta o comportamento de demanda e capacidade de produção de amônia para a primeira década deste século.

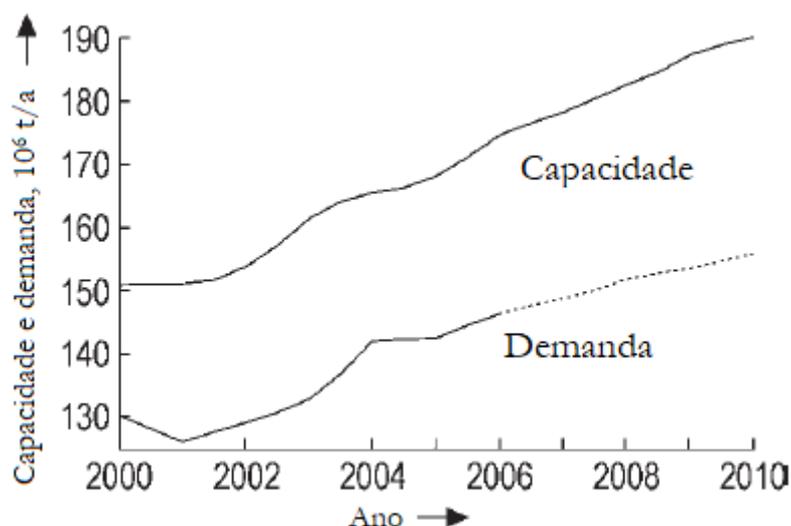


Figura 27 - Comportamento da capacidade de produção e demanda mundial da amônia para a década de 2000. Fonte: adaptado de Appl, 2011

A ureia, por sua vez, também cresceu em produção e demanda com o passar das últimas décadas. O perfil de crescimento de oferta e demanda está apresentado na

Figura 28. O perfil de crescimento de mercado previsto para a ureia nos próximos anos muito se assemelha com o da amônia. Dados da empresa Merchant Research (2020) indicam o crescimento da demanda de ureia mundial, principalmente na região Ásia-Pacífico para os próximos anos. A consultoria Mordor (2018) prevê também um crescimento anual de 2,5% no mercado de ureia até 2024, sendo que além dos fertilizantes, a demanda por abatedores de emissão de óxidos de nitrogênio automotivos também aumentará. Segundo a empresa PR Newswire (2019), as regiões com maior exportação de ureia compreendem os países do Mar Negro e do Golfo Pérsico, que são responsáveis na maior parte do tempo pelo preço global desta commodity.

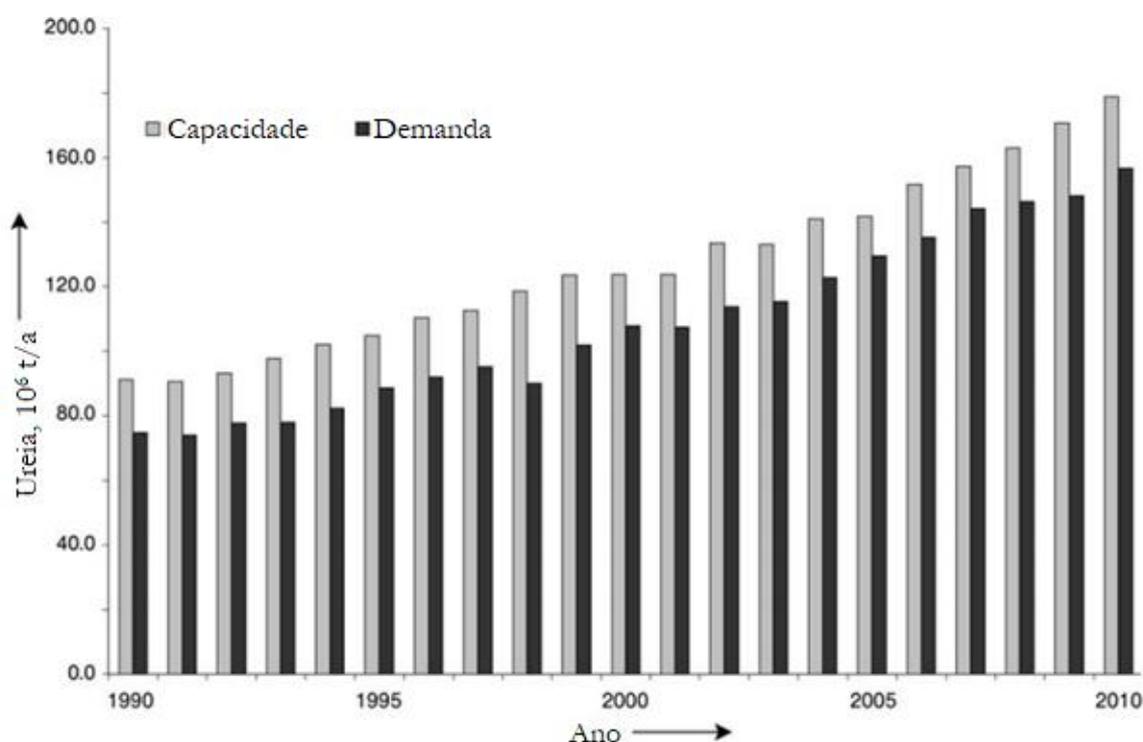


Figura 28 - Capacidade instalada e demanda de ureia mundial ao decorrer do final do século XX e início do século XXI. Fonte: adaptado de Meessen, 2010.

De acordo com a empresa de inteligência de mercado Absolute Reports (2020), dentre os mais importantes players de amônia e ureia no mundo estão a norueguesa Yara, com plantas por todo o mundo, a americana CF Industries, a canadense Nutrien, a suíça Eurochem, a russa Acron, as chinesas SINOPEC e CNPC, assim como a estatal indiana Rashtriya (ABSOLUTE REPORTS, 2020).

A empresa de consultoria ICIS (2018) levantou, com dados da International Fertilizer Association (IFA), as principais rotas de comércio de amônia no mundo. Destacam-se: o fluxo de importação de amônia de Trinidad e Tobago para os Estados

Unidos, devido ao baixo custo do gás natural do país caribenho; as importações da Europa e países do norte da África da amônia russa; exportações da península arábica e também da Rússia para a Índia; e a exportação da Indonésia para a Coreia do Sul. A ureia tem consideravelmente mais trocas comerciais no mundo do que a amônia. As principais rotas advêm do Oriente Médio e Rússia para países da América Latina, Estados Unidos, Europa, Oceania e Índia. Também é relevante o comércio de ureia entre Trinidad e Tobago e os Estados Unidos da América.

Atualmente, vários empreendimentos tem sido construídos e postos em operação ao redor do mundo. Segundo a revista Chemical Week, em 2018 a norueguesa Yara e a alemã BASF se uniram numa *joint-venture* para construir uma planta de amônia no Texas, Estados Unidos. A planta de capacidade de produção de 750 mil toneladas por ano terá dois fins distintos: será usada pela empresa norueguesa para produção de fertilizantes, enquanto a alemã usa a amônia na rota de produção de polímeros. Em 2019, foi anunciado que uma outra planta será construída na Índia usando tecnologia da KBR com o objetivo de diminuir a dependência das importações de amônia e ureia. Ao contrário da tendência mundial, esta planta será baseada em carvão à despeito do gás natural. Outro projeto de 1,3 bilhão de dólares está tomando forma em Bangladesh. Trata-se de uma planta de amônia e ureia com capacidade de produção de 1,6 mil toneladas/dia de amônia e 2,8 toneladas/dia de ureia.

3.2. Mercado Brasileiro

Durante a última década, as maiores safras do Brasil em termos de toneladas de produção foram: a soja, o milho, a cana-de-açúcar, o café e o algodão. Acompanhando esta tendência, estas culturas foram as que mais consumiram fertilizantes neste período (ANDRA, 2019). A Figura 29 apresenta graficamente as safras ao decorrer da década de 2010.

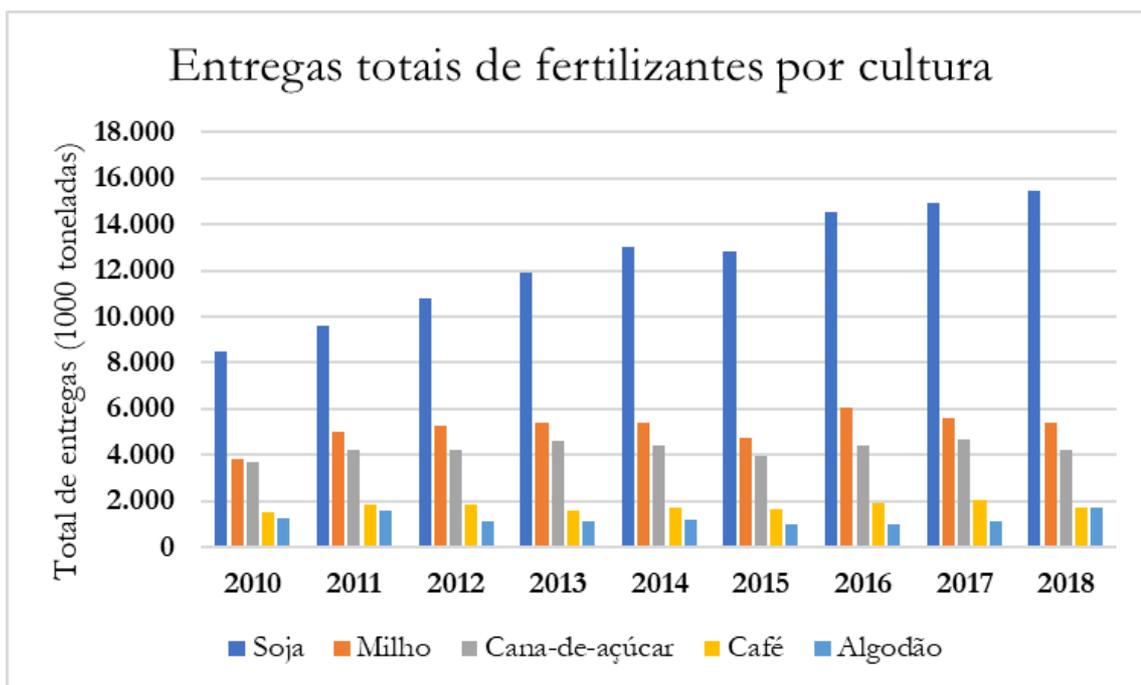


Figura 29 - Evolução das principais safras brasileiras ao longo da década de 2010. Fonte: elaborado pelo autor com dados de ANDA, 2019

A distribuição geográfica das plantações das principais safras brasileiras está apresentada nas Figuras 30 até 34, representando dados da safra 2018/2019. As três maiores culturas do país localizam-se preponderantemente na região Centro-Sul do país, tendo a soja também um volume de produção importante no estado da Bahia. Particularmente, com relação ao café, sua presença também é forte nos estados nordestinos do Maranhão e da Bahia. Por último, a quinta maior safra brasileira, o algodão é a que está mais dispersa pelo território brasileiro, tendo importantes contribuições das regiões Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste (CONAB, 2019). Ao observar estes dados é importante destacar a interiorização da agricultura no país, que por muitos séculos, foi praticada exclusivamente no litoral. A Embrapa teve e continua tendo papel fundamental nesta expansão, principalmente por adaptar espécies vegetais às condições do cerrado brasileiro.

Produção de soja no Brasil

Levando em conta as exportações do 'complexo soja'



Figura 30 - Distribuição geográfica da safra de soja 2018/2019. Fonte: infográfico elaborado por G1, com dados do CONAB e Secretaria de Comércio Exterior

Produção de milho no Brasil

Somando as temporadas de verão e de inverno



Figura 31 - Distribuição geográfica da safra de milho 2018/2019. Fonte: infográfico elaborado por G1, com dados do CONAB e Secretaria de Comércio Exterior

Produção de algodão no Brasil

Somando as produções de pluma e caroço

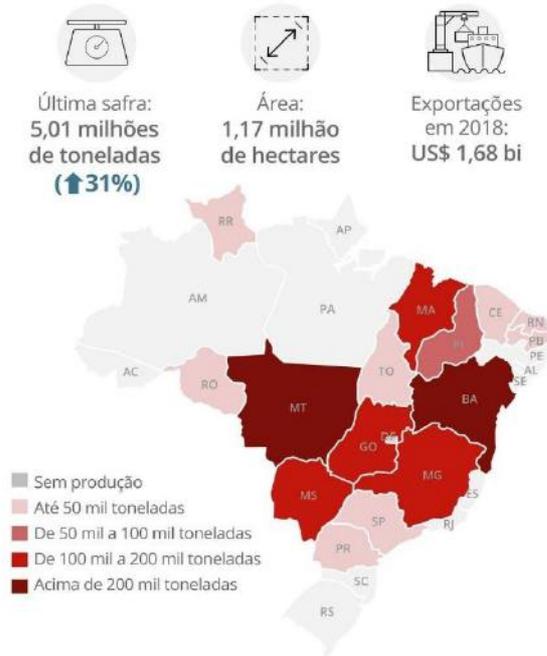


Figura 34 - Distribuição geográfica da safra de algodão 2018/2019. Fonte: infográfico elaborado por G1, com dados do CONAB e Secretaria de Comércio Exterior

Um estudo da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO-ONU) realizado em 2006 levantou a quantidade de nutrientes aplicados ao solo brasileiro por cultura e região no ano de 2002, conforme mostrado na Tabela 6. A soja, apesar de ser a maior safra brasileira, é uma leguminosa e, portanto, possui em suas raízes uma associação simbiótica com bactérias que fixam e lhe fornecem nitrogênio, em troca de matéria orgânica oferecida pela planta. Dessa forma, esta cultura não necessita de uma reposição intensiva de nitrogênio no solo. Por outro lado, todas as demais grandes plantações realizadas no país requerem um fornecimento de nitrogênio considerável, em alguns casos sendo este o nutriente aplicado em maior quantidade, como na cultura do café (FAO-ONU, 2006). Na última linha da Tabela 6 é possível observar a necessidade de nitrogênio como um todo pela cultura.

Tabela 6 - Uso de nutrientes por cultura e região. Dados em kg de nutriente por hectare de plantação. Fonte: elaborado pelo autor com base em dados da FAO, 2006

	Soja			Milho			Cana-de-açúcar			Café			Algodão		
	<i>N</i> (%)	<i>P₂O₅</i> (%)	<i>K₂O</i> (%)	<i>N</i> (%)	<i>P₂O₅</i> (%)	<i>K₂O</i> (%)	<i>N</i> (%)	<i>P₂O₅</i> (%)	<i>K₂O</i> (%)	<i>N</i> (%)	<i>P₂O₅</i> (%)	<i>K₂O</i> (%)	<i>N</i> (%)	<i>P₂O₅</i> (%)	<i>K₂O</i> (%)
Norte	2	36	33	10	22	20	14	28	63	28	14	28	0	0	0
Nordeste	4	39	41	22	23	25	31	30	79	63	31	0	49	75	83
Centro-Oeste	7	76	68	40	46	41	57	60	130	115	57	60	90	147	136
Sudeste	7	73	62	43	44	37	61	57	118	123	61	57	96	142	124
Sul	9	58	60	53	35	35	76	45	113	154	76	45	120	112	119
% Total	5%	49%	46%	34%	34%	32%	25%	23%	52%	53%	26%	21%	27%	37%	36%

No tocante ao comércio de fertilizantes nitrogenados brasileiro, há um grande déficit de produção nacional deste produto em relação à demanda interna. Com base em dados da ANDA (2019), foi montado o mapa da Figura 35, referente ao ano de 2018, o qual evidencia o consumo maior do que a produção destes materiais em todas as regiões do país. Neste mapa temático, é possível observar a produção em cada região do país (Norte e Nordeste foram somados, devido à pequena representatividade da primeira região), assim como a entrega de adubos nitrogenados em cada uma delas e as importações pelos portos do país. O caso mais gritante é o Centro-Oeste em que menos de 2% da demanda é satisfeita por produção local. Em termos nacionais, a produção nacional de fertilizantes nitrogenados atende apenas a 14% da demanda do país. A Tabela 7 sumariza os dados desde 2010.



Figura 35 - Distribuição da produção, importação e uso de fertilizantes nitrogenados no Brasil em 2018. Dados em toneladas. Fonte: elaborado pelo autor com base em dados da ANDA, 2019

Tabela 7 - Produção e entrega de fertilizantes nitrogenados (em toneladas de nitrogênio – N) por região e por ano no Brasil. Fonte: tabela elaborada pelo autor com dados de ANDA, 2019.

	Norte/Nordeste			Centro-Oeste			Sudeste			Sul		
	Produção	Entregas	Produção/ Entregas	Produção	Entregas	Produção/ Entregas	Produção	Entregas	Produção/ Entregas	Produção	Entregas	Produção/ Entregas
2010	328.934	314.018	105%	23.471	576.091	4%	222.534	1.081.888	21%	118.368	882.822	13%
2011	369.235	348.070	106%	22.868	734.811	3%	227.680	1.290.904	18%	188.335	992.556	19%
2012	384.791	379.244	101%	29.479	818.061	4%	266.295	1.259.616	21%	111.005	977.889	11%
2013	376.082	373.437	101%	22.818	896.255	3%	225.410	1.292.305	17%	127.067	1.136.489	11%
2014	368.171	427.265	86%	27.611	961.287	3%	224.267	1.321.625	17%	78.401	1.161.620	7%
2015	364.839	384.039	95%	31.791	938.662	3%	226.659	1.214.264	19%	165.544	995.756	17%
2016	411.921	449.421	92%	33.891	1.187.670	3%	230.862	1.457.285	16%	99.990	1.271.999	8%
2017	284.704	471.203	60%	26.843	1.173.353	2%	205.480	1.513.971	14%	33.605	1.218.911	3%
2018	294.443	487.654	60%	21.717	1.258.485	2%	228.074	1.320.868	17%	45.669	1.219.570	4%

É possível concluir por meio da observação da Tabela 7 que todas as regiões brasileiras são deficitárias. As regiões Norte/Nordeste em certos anos produzem mais do que o necessário, no entanto parte desta produção é escoada para o restante do Brasil. Mesmo assim, o excedente é insuficiente para suprir a demanda das outras regiões. O Centro-Sul, região que concentra parte majoritária das cinco maiores safras brasileiras, é que se encontra mais desbalanceada. Ademais, é possível também concluir que houve diminuição da oferta nacional com o passar dos anos, principalmente na região Sul.

A distribuição geográfica das indústrias de fertilizantes nitrogenados brasileiras se encontra na Figura 35. Com o passar dos anos, a indústria nacional sofreu vários processos de aquisições por empresas estrangeiras, como por exemplo, a compra da Vale Fertilizantes pela Yara e Mosaic. Apesar da demanda de fertilizantes ter crescido com o tempo, não houve mudança significativa de capacidade instalada nas plantas (RICHETTI, 2018).

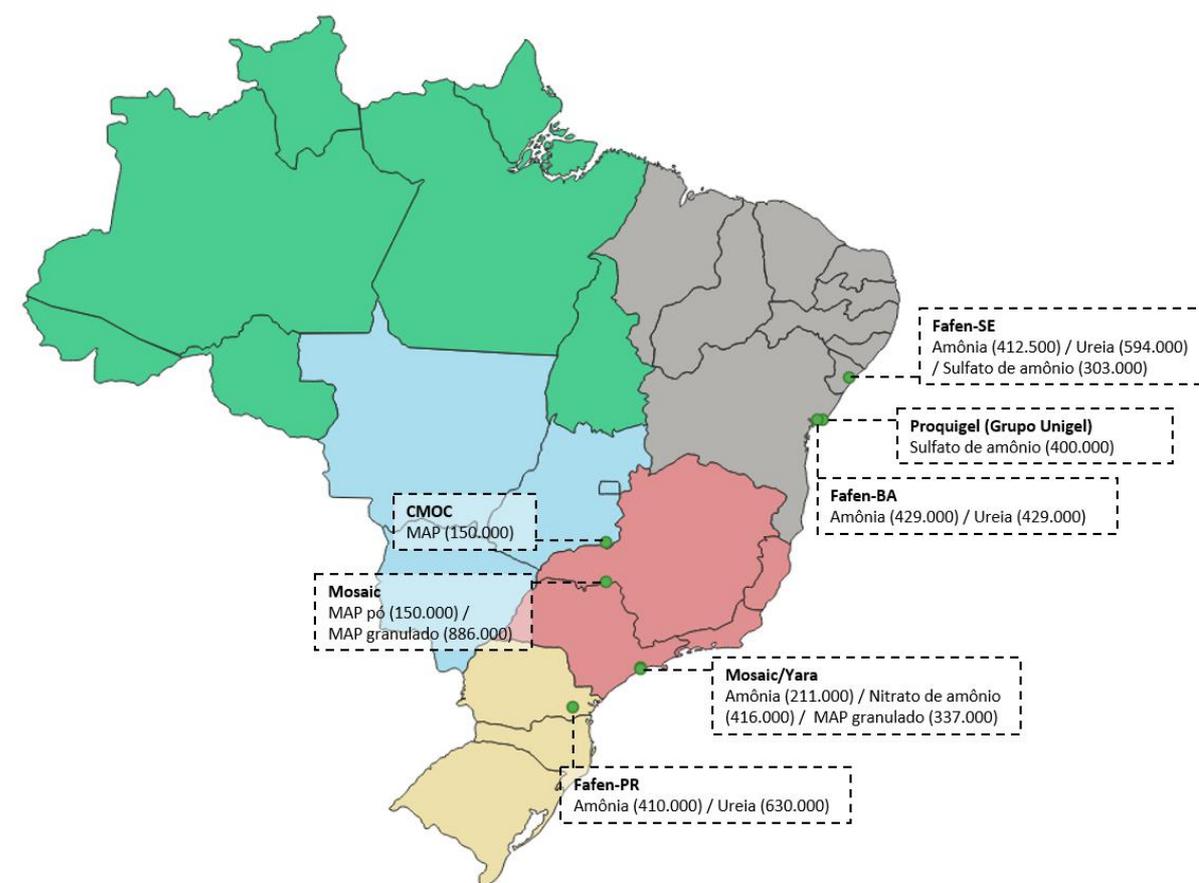


Figura 36 - Distribuição dos produtores de fertilizantes nitrogenados no território nacional.

Fonte: elaborado pelo autor com dados da ANDA, 2019

As Tabelas 8 e 9 apresentam o panorama de mercado da amônia e ureia no Brasil. É possível concluir com a observação das tabelas o incipiente aumento de capacidade de produção e a queda pronunciada da taxa de utilização das indústrias nacionais nos últimos anos. As Figuras 37 e 38 apresentam graficamente os dados das tabelas.

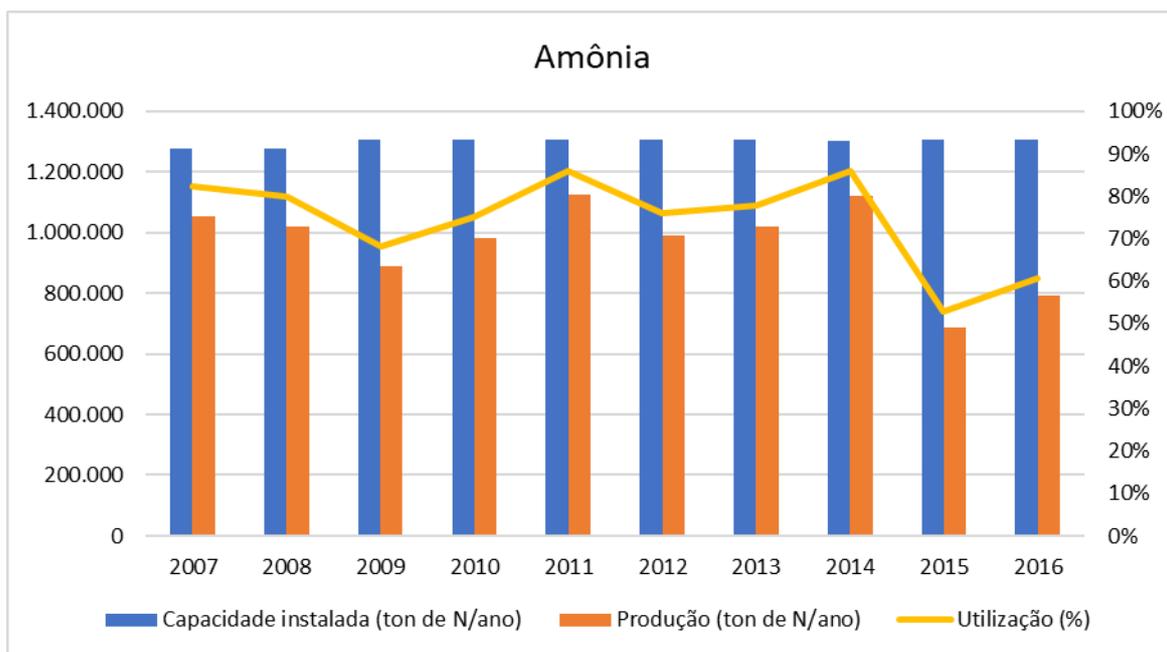


Figura 37 - Taxa de utilização das fábricas de amônia no Brasil. Fonte: Elaborado pelo autor com dados de ABIQUIM (2016).

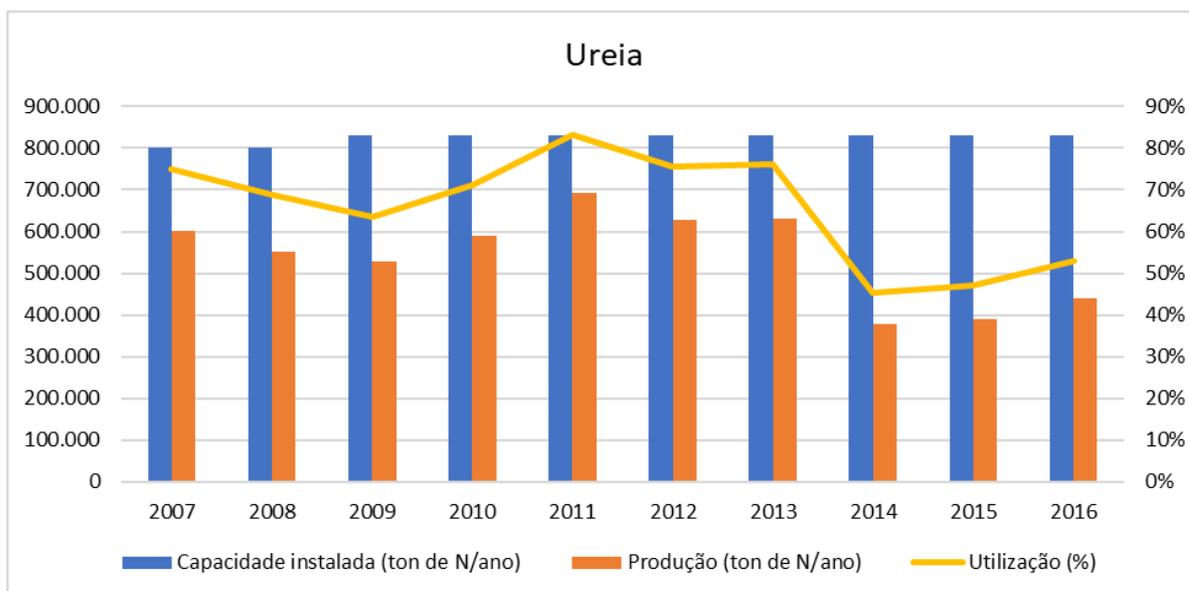


Figura 38 - Taxa de utilização das fábricas de ureia no Brasil. Fonte: elaborado pelo autor com dados de ABIQUIM (2016).

Tabela 8 - Panorama comercial da amônia no Brasil. Dados em toneladas de N. Fonte: elaborado pelo autor com dados de ABIQUIM (2016).

Amônia						
Ano	Capacidade instalada	Produção	% de utilização	Importações	Exportações	Consumo aparente
2007	1.276.849	1.052.568	82%	286.865	83832,76176	1.255.600
2008	1.276.849	1.021.610	80%	290.741	32122,21188	1.280.229
2009	1.306.291	888.708	68%	292.040	19794,88329	1.160.953
2010	1.307.773	980.858	75%	264.999	21187,80341	1.224.669
2011	1.307.773	1.125.132	86%	328.613	19895,91306	1.433.848
2012	1.307.773	991.840	76%	275.174	23502,70918	1.243.511
2013	1.307.773	1.018.054	78%	299.487	29203,07106	1.288.338
2014	1.303.985	1.120.036	86%	268.299	12246,528	1.376.089
2015	1.304.084	688.706	53%	251.734	19836,66506	920.603
2016	1.304.182	791.976	61%	258.099	19749,82471	1.030.325

Tabela 9 - Panorama comercial da ureia no Brasil. Dados em toneladas de N. Fonte: elaborado pelo autor com dados de ABIQUIM (2016).

Ureia						
Ano	Capacidade instalada	Produção	% de utilização	Importações	Exportações	Consumo aparente
2007	802.167	602.686	75%	1.846.737	12.217	2.437.207
2008	802.201	551.886	69%	1.328.505	7.238	1.873.152
2009	831.601	529.481	64%	2.051.857	6.300	2.575.037
2010	831.601	590.886	71%	1.631.267	5.526	2.216.628
2011	831.601	691.851	83%	1.341.371	3.739	2.029.483
2012	831.601	628.923	76%	1.417.625	1.985	2.044.563
2013	831.601	632.235	76%	1.187.766	3.540	1.816.461
2014	831.601	377.706	45%	905.405	3.977	1.279.134
2015	831.601	390.650	47%	1.042.117	3.202	1.429.565
2016	831.601	440.279	53%	1.171.503	6.146	1.605.636

3.2.1. Aspectos concorrenciais, logísticos e tributários

Para entender melhor esta indústria, uma análise pode ser feita utilizando a metodologia proposta por Michael Porter em 1979. Este modelo de análise competitiva de empresas se baseia em evidenciar e analisar cinco principais forças: o poder de negociação dos fornecedores, o poder de negociação dos compradores, a ameaça de novos entrantes (concorrentes), a rivalidade existente entre os concorrentes existentes e a ameaça de produtos substitutos (JÚNIOR e CALLADO, 2008).

Primeiramente, o poder de negociação dos fornecedores de matéria-prima é bastante intenso neste tipo de indústria. Isto se deve aos seguintes fatos: há um reduzido número de fornecedores de matéria-prima, como por exemplo, o gás natural; não há como substituir com rapidez a matéria-prima do processo, sendo muitas vezes impossível a substituição devido ao projeto dos equipamentos utilizados pela indústria, adequados a uma matéria-prima específica; há uma dicotomia no fato de a matéria-prima fornecida ser muito importante para o comprador, embora os compradores não sejam tão relevantes para os fornecedores em termos de quantidade de matéria-prima consumida; custos elevados ou impossibilidade de mudança de fornecedor. Estes aspectos geram uma grande vulnerabilidade a este tipo de indústria, uma vez que aumentos nos preços dos insumos e matérias-primas podem diminuir significativamente a margem de lucro ou até inviabilizar economicamente o processo (FERRI, 2010).

Em segundo lugar, o poder de negociação dos compradores também é significativo. Os fertilizantes são, em geral, produtos padronizados com normas brasileiras e internacionais, isto é, apresentam quase nenhuma diferenciação entre si, fazendo com que o custo de mudança de um fornecedor de fertilizantes para outro seja zero para o cliente. Além disto, são produtos comprados em grandes quantidades, o aumenta a pressão do comprador por menores preços. Para estes insumos agrícolas, o comprador procura entre as empresas fornecedoras menor preço e melhor disponibilidade e rapidez de entrega (JÚNIOR e CALLADO, 2008).

A ameaça de novos entrantes é baixa devido a alguns fatores naturais que protegem este tipo de indústria. A necessidade de capital para projetar, construir, comissionar e operar indústrias deste tipo é da ordem de bilhões de dólares, o que diminui fortemente a capacidade de novos players entrarem no mercado. Ademais, o acesso às matérias-primas é um fator extremamente importante, já que dependendo da localização e do contrato firmado com o fornecedor, podem haver preços mais baixos que deixem as empresas já existentes com maiores margens de lucro. Além disto, a

localização do mercado consumidor dos produtos da indústria é outro aspecto relevante, uma vez que os custos de frete e as perdas durante o transporte podem deixar o produto mais caro, tornando-o menos competitivo. Finalmente, há também a economia de escala nestas plantas, em que os custos fixos são diluídos fortemente com o aumento da quantidade produzida. Muitas vezes, novos entrantes constroem plantas de capacidade menor em relação às existentes, o que gera desde o início da produção uma menor margem de lucro (JÚNIOR e CALLADO, 2008).

Em relação aos produtos substitutos, não há preocupações relevantes de curto e médio prazos para este aspecto. Os principais substitutos são os adubos orgânicos e biofertilizantes, que precisam ser aplicados em quantidades muito elevadas para conter os mesmos teores nutritivos dos fertilizantes minerais. No caso dos fertilizantes organominerais, há uma mistura entre os adubos minerais e orgânicos, mas atualmente o uso desta classe de adubos na agricultura comercial é muito pouco representativo (FERRI, 2010).

Por fim, a rivalidade entre os concorrentes neste tipo de indústria é maior quando há mais players no mercado, que tendem a baixar os preços dos produtos para aumentar sua penetração de mercado, levando em conta também que os produtos das mais variadas empresas têm pouca diferenciação. A competitividade aumenta quando o preço das safras também sobe, situação que deixa o agricultor com mais dinheiro em caixa para adquirir insumos. Assim, as vendas de fertilizantes tendem a aumentar quando há safras mais valorizadas e as indústrias destes insumos tendem a baratear o preço e concorrer mais entre si. (JÚNIOR e CALLADO, 2008)

Outro aspecto relevante no Brasil são os custos de transporte e a tributação incidente nestes produtos. Os custos de transporte são elevados no Brasil por causa do tamanho do território e da crescente interiorização das plantações. Além disto, o estado precário de grande parte das rodovias e ausência de quantidade adequada de ferrovias, torna o transporte mais caro e difícil em muitas localidades (MARCONATO, 2012). No produto fabricado em território nacional, incidem sobre o preço o frete até o destino e o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS). Uma crítica feita ao sistema de tributação brasileiro é que há cobrança de ICMS mais de uma vez quando a comercialização do produto envolve dois estados diferentes (RICHETTI, 2018) . Enquanto isso, os produtos importados não sofrem cobrança de impostos de importação desde 2006, assim como não há cobrança de ICMS quando o mesmo é consumido pelo estado que o importou (MARCONATO, 2012). Esta discrepância tributária onera o

produtor brasileiro e o deixa menos competitivo.

3.2.2. Panorama atual da indústria de fertilizantes e o papel do preço do gás natural

O panorama atual da indústria de fertilizantes nitrogenados no Brasil é bem adverso. Os principais players do mercado não realizaram importantes investimentos em suas plantas ou aumento significativo da capacidade de produção nos últimos quinze anos, a despeito da crescente demanda de fertilizantes para a agricultura (RICHETTI, 2018). São recorrentes no noticiário exemplos desta afirmação: em 2016, a Petrobras propôs em seu Plano de Negócios e Gestão que pretendia vender suas duas fábricas de fertilizantes na Bahia e em Sergipe, em 2019 a Yara anunciou que poderia fechar sua fábrica em Cubatão; também neste mesmo ano a Petrobras parou a produção em suas duas fábricas do nordeste, Bahia e Sergipe; em 2020 a Petrobras encerrou a produção em sua última fábrica de fertilizantes nitrogenados, localizada no Paraná. Todos estes casos têm um problema em comum: o alto preço do gás natural no Brasil (JORNAL DO COMÉRCIO, 2019) e, no caso do Paraná, ainda sem divulgação aberta da estrutura de seus custos, já que utiliza resíduo asfáltico e não o gás natural como matéria-prima.

Para se entender a estrutura do mercado do gás natural no Brasil é importante primeiro tomar conhecimento da sua história no país. As primeiras descobertas de gás natural no Brasil remontam à década de 1940, com a descoberta de reservas de petróleo no Recôncavo Baiano. Nesta época, a exploração começou em pequena escala principalmente com capital privado. Em 1953, no entanto, o governo de Getúlio Vargas promulgou a Lei 2004/53 que estabelecia o monopólio da União sobre a exploração das jazidas de petróleo e hidrocarbonetos localizadas em território nacional. Com isto, a recém fundada estatal brasileira de petróleo Petrobras obteve monopólio na pesquisa, exploração, refino e distribuição destes produtos até os consumidores finais (ANP, 2019).

Com o fim do regime militar e a promulgação de uma nova constituição em 1988, a Petrobras viu seu papel como distribuidora de gás até os consumidores acabar, sendo que a partir de então, cada estado da federação teria monopólio sobre a distribuição do gás canalizado dentro de seus limites territoriais. Em decorrência desta mudança, as empresas estatais de gás natural pertencentes à cada unidade da federação surgiram. Mais tarde, em 1995, durante o governo de Fernando Henrique, houve a aprovação de duas emendas constitucionais que permitiram a concessão às empresas

privadas dos direitos de distribuição de gás canalizado nas unidades da federação e também a quebra do monopólio da Petrobras instituído 42 anos antes, abrindo o mercado de óleo e gás para a atuação de empresas privadas, nacionais ou estrangeiras. No entanto, só houve a devida normatização da nova política energética nacional em 1997 com a Lei 9478/97, que criou a Agência Nacional do Petróleo (ANP) e estabeleceu as diretrizes para a participação de novas empresas no setor. Coube à ANP a regulação e fiscalização das atividades da indústria de óleo e gás em todo território nacional a partir de então (ANP, 2019).

Também em 1997 começou a construção do gasoduto Brasil-Bolívia, concluída dois anos depois. Este empreendimento aumentou significativamente a oferta de gás natural no território nacional. Finalmente em 2009, com o grande crescimento do mercado de gás no Brasil, foi criada a Lei 11909/09, conhecida popularmente como a Lei do Gás, um novo marco para regular e fiscalizar o mercado de gás brasileiro (ANP, 2019).

Apesar de todas estas alterações no mercado, a Petrobras acabou mantendo o monopólio *de facto* no transporte de gás por gasodutos em todo o país, visto que a quase totalidade dos gasodutos do país foram resultados de seus investimentos e pertenciam até 2019 à Transportadora Associada de Gás (TAG), subsidiária do Sistema Petrobras (G1, 2019). Desde 2016, quando Pedro Parente assumiu a presidência da Petrobras, foi implementada pela estatal uma política de preços de paridade com o preço internacional do produto comercializado. Isto ajudou a encarecer fortemente o preço do gás vendido às distribuidoras, que por sua vez, repassaram-no aos consumidores finais (JORNAL DO COMÉRCIO, 2019).

Associações do setor industrial no país, como a Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (Firjan) e a Federação de Indústrias do Estado de São Paulo (Fiesp), culpabilizam a Petrobras pelo fraco desempenho da indústria no Brasil. Uma reportagem divulgada no Jornal do Comércio em 2019 indica que o preço do gás praticado no Brasil para o consumidor industrial vem crescendo desde 2012. Segundo a Firjan (2019), o preço elevado do gás impede que a indústria nacional seja competitiva frente às importações de produtos acabados, que vem crescendo ano a ano. Também em 2019, a Fiesp repudiou o aumento de 33% do preço do gás natural praticado pela distribuidora local em São Paulo (JORNAL CONTÁBIL, 2019). A Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM) também repudia a realidade do gás no território nacional. Segundo esta entidade, este aumento cessou a produção de metanol

no país, produto hoje atendido exclusivamente por importações. Em outras indústrias em que o gás natural é utilizado somente como combustível, mudanças nos equipamentos têm sido realizadas para utilizar outros materiais, como madeira, resíduos de biomassa, entre outras fontes de calor (JORNAL DO COMÉRCIO, 2019).

Efeito semelhante ocorreu com as fábricas de fertilizantes nitrogenados, que diminuíram significativamente suas produções. Neste último caso, o gás natural é o primeiro elo da cadeia produtiva predominante no mundo, com a integração das fábricas amônia e ureia pertencentes a uma única empresa. No Brasil, essa integração ainda é maior, pois o gás natural praticamente também é produzido pela Petrobras que agrega seu valor na cadeia produtiva até o produto final ureia.

A discussão sobre o preço deste insumo no Brasil não é fácil nem superficial nos seus motivos e consequências. Dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2019, mostram que o valor cobrado pelo gás para o consumidor industrial em 2018 é da ordem de US\$ 11/MMBtu sem impostos, sendo que o preço acrescido de impostos pode chegar a US\$ 14/MMBtu. Estes preços são bem elevados frente aos US\$ 4/MMBtu nos Estados Unidos da América, aos US\$ 8/MMBtu na Europa e US\$ 10/MMBtu no Japão, sendo que estas duas últimas regiões geográficas são abastecidas por importações de gás (EPE, 2019). A composição do preço do gás no Brasil é mostrada na Figura 39, na qual é possível observar que o custo de exploração é menor que 50% do total do preço do gás.

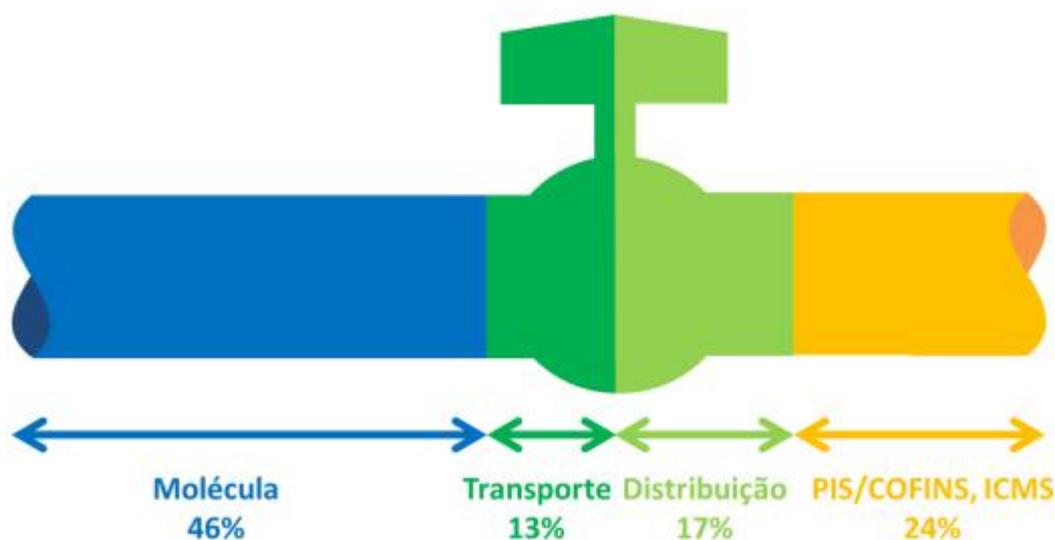


Figura 39 - Composição média do preço do gás natural no Brasil. Fonte: EPE, 2019.

Recentemente, o governo do presidente Jair Bolsonaro tem tomado medidas para modificar a estrutura do mercado de gás brasileiro e abri-lo para mais concorrência.

aproveitado para consumo (DUTRA, 2019).

Causa estranheza também o fechamento das fábricas de fertilizantes nitrogenados (FAFEN) em Sergipe e na Bahia com a justificativa da alta do preço do gás. Se a Petrobras vende o gás que ela mesmo explora e distribui para suas próprias fábricas, não faz sentido a cobrança de preços internacionais para tal. No início da década de 2010, a estatal se orgulhava de ser a maior produtora de fertilizantes nitrogenados do país e tinha planos de expansão para novas fábricas, tais como: a Unidade de Fertilizantes Nitrogenados III – UFN III – em Três Lagoas (MS), para atender o mercado consumidor do Centro-Oeste usando gás do gasoduto Brasil-Bolívia; a UFN IV em Linhares (ES); e a UFN Vem Uberaba (MG). Apesar de suas construções já terem sido iniciadas, estas indústrias não tiveram suas obras concluídas (G1, 2011).

Em 2019, as FAFENs Bahia e Sergipe tiveram seu controle alienado por dez anos para o grupo Unigel, que conta com uma fábrica de sulfato de amônio também no Nordeste. A última fábrica de fertilizantes da Petrobras, na cidade de Araucária (PR), teve sua paralização em janeiro de 2020 (PETROBRAS, 2020). Estas medidas deixam a agricultura brasileira ainda mais exposta às variações internacionais de preços de fertilizantes, agora quase totalmente importados.

4. Análise econômica

O projeto de uma indústria química é uma atividade complexa que envolve um grande número de etapas e a atuação de uma equipe multidisciplinar. No tocante ao investimento em uma planta química, estas etapas são geralmente classificadas em três fases temporais distintas: o pré-investimento, investimento e a operação. A primeira fase engloba fundamentalmente a identificação e estudo de oportunidade de uma planta química, elaboração de estudos de pré-viabilidade e viabilidade técnica e econômica. A segunda etapa, por sua vez, se refere ao projeto de engenharia, construção, treinamento de pessoal técnico e administrativo, entre outras atividades. Já a última fase compreende a partida da planta, melhorias e otimizações nos processos, inovações e busca de novos mercados consumidores com expansão da operação. É reportado na literatura que a fase de pré-investimento é a que menos onera os custos totais de implantação de uma indústria, representando aproximadamente 5% do investimento total. É nesta etapa, contudo, que se definem condições críticas para o projeto, tais como: localização da planta, disponibilidade de matérias-primas, demanda mercado consumidor pelo produto, redes logísticas de escoamento de produção, estudos de impacto ambiental,

entre outras (BEHRENS e HAWRANEK, 1991).

Segundo o Stanford Research Institute, a estrutura de custos de uma indústria química compreende os principais fatores descritos na Tabela 10. O peso de cada componente no investimento total pode, notadamente, variar dependendo do produto produzido e do nível de tecnologia empregado.

Tabela 10 - Estrutura típica do investimento em uma indústria química. Fonte: Stanford Research Institute.

1 - Investimento Fixo

1.1 – ISBL – Unidades de processo

1.1.1 Máquinas e equipamentos de processo

1.1.2 Materiais de processo

1.1.3 Fundações e estruturas

1.1.4 Engenharia básica e de detalhamento das unidades de processo

1.1.5 Montagem

1.2 - OSBL

1.2.1 Geração e distribuição de utilidades

1.2.2 Tancagem e estocagem para matérias-primas e produtos

1.2.3 Tratamento de efluentes

1.2.4 Instalações complementares

1.3 - Outros investimentos

1.3.1 Terreno e melhorias

1.3.2 Despesas administrativas

1.3.3 Tecnologia

1.3.4 Despesas financeiras

1.3.5 Pré-operação e partida

2 - Capital de Giro

2.1 (+) Caixa mínimo

2.2 (+) Estoques de matérias-primas, outros insumos e produtos

2.3 (+) Estoques de peças de reposição

2.4 (+) Financiamento das vendas

2.5 (-) Crédito de fornecedores

2.6 (-) Desconto de duplicatas

O ISBL, sigla em inglês para *inside battery limits*, representa os custos do processo principal da unidade. Apesar de atenderem às unidades produtivas e serem essenciais para elas, as centrais de utilidades não são contabilizadas neste quesito. O ISBL, ademais, engloba os gastos no projeto de engenharia, aquisição de equipamentos e instrumentação, construção e montagem da unidade produtiva, interligações de matérias-primas (BEHRENS e HAWRANEK, 1991).

O OSBL, isto é, *outside battery limits*, é a área do complexo industrial auxiliar à unidade produtiva, incorporando a geração de utilidades, tais como ar comprimido e

vapor, para o processo principal, estocagem de matérias-primas e produtos finais, tratamento de efluentes industriais, brigada de incêndio, enfermaria, refeitório, entre outras unidades auxiliares. O OSBL contém aqueles equipamentos que não estão ligados diretamente ao processamento principal da planta (BEHRENS e HAWRANEK, 1991).

Além dos fatores apresentados e descritos acima, devem ser considerados outros gastos essenciais para a operação da planta, como por exemplo: com a aquisição e adequação do terreno, onde os equipamentos irão ser instalados e a unidade vai operar; licenciamento de tecnologias para o processo, que permite a produção otimizada com menores perdas de produto, de matéria-prima e maior eficiência mássica e energética; despesas com pessoal administrativo, gastos com a partida da planta, entre outros. A soma do ISBL com o OSBL e os outros investimentos resulta no investimento fixo (BEHRENS e HAWRANEK, 1991).

O capital de giro é a parte do capital dispendido na implantação da indústria que permite sua operação comercial. Esta parcela do investimento está relacionada à compra dos estoques de matérias-primas e outros insumos, que permitem uma operação perene da indústria; o dinheiro em caixa na empresa, necessário em situações emergenciais para solucionar problemas durante a operação, por exemplo; crédito e financiamento das vendas, dando mais tempo para os compradores dos produtos pagarem suas obrigações à indústria, entre outros (BEHRENS e HAWRANEK, 1991).

Mais especificamente, a indústria de fertilizantes é classificada como de capital intensivo e, levando em conta a incerteza das safras e dos preços internacionais dos produtos produzidos, é necessária uma cuidadosa avaliação econômica para definir sua possível viabilidade (IFDC - UNIDO, 1998).

Com base na discussão das seções anteriores, serão apresentadas a seguir avaliações de viabilidade econômica para uma de planta de amônia e uma planta integrada de amônia e ureia, na qual toda amônia e dióxido de carbono produzido na primeira são aproveitados na segunda. A referência utilizada para a avaliação econômica foi a Unidade de Fertilizantes Nitrogenados III da Petrobras, localizada na cidade de Três Lagoas, Mato Grosso do Sul, que entraria em operação em 2014, com capacidade diária de produção de 2243 toneladas de amônia e 3600 toneladas de ureia granulada.

A memória dos cálculos dos valores que estão apresentados encontra-se nas planilhas digitais que seguem anexadas a este trabalho.

4.1. Planta de amônia

A estrutura do investimento na planta de amônia seguiu a metodologia apresentada na terceira edição do livro Fertilizer Manual da Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento da Indústria (UNIDO) e do Centro Internacional para o Desenvolvimento de Fertilizantes (IFDC) de 1998. Neste caso, a referência é uma planta de amônia com 1500 toneladas/dia de produção, usando como matéria-prima o gás natural e localizada na região do Golfo dos Estados Unidos, conforme apresentado na Tabela 11. Com base no valor do ISBL, originalmente de US\$ 170 milhões, pode-se calcular a contribuição dos outros fatores do investimento fixo, uma vez que eles representam frações específicas deste valor, de acordo com a metodologia apresentada na referência. No cálculo do capital de giro, o procedimento é semelhante, no entanto, alguns aspectos que contribuem para o seu valor total têm origem nos custos variáveis do processo, como as vendas e o valor das matérias-primas.

Tabela 11 - Estrutura do investimento em uma planta de amônia. Fonte: adaptado de Fertilizer Manual, 1998

Estrutura do investimento	
a) Investimento Fixo	US\$ 10⁶
1. ISBL	170,0
2. Estrutura de estocagem (5% de 1)	8,5
3. Utilidades (10% de 1)	17,0
4. Serviços gerais (5% de 1, 2 e 3)	9,8
5. Investimento fabril	205,3
6. Equipamentos de reposição (4% de 1 e 3)	7,5
7. Pré-operação e partida (6% de 1 e 3)	11,2
8. Gestão do projeto (5% de 5)	10,3
9. Juros durante a construção (18% de 5)	36,9
10. Investimento fixo (IF)	271,2
b) Capital de giro	US\$ 10⁶
1. (-) Financiamento das compras (30 dias de matéria-prima)	-14,0
2. Estocagem de matérias primas (20 dias)	9,3
3. Estocagem de produtos (15 dias)	14,5

4. Estocagem de peças de reposição (3% do IF)	8,1
5. Financiamento das vendas (30 dias de vendas)	29,0
6. Disponibilidade de caixa (5% de 2, 3, 4 e 5)	3,1
7. Capital de giro (CG)	50,1
Investimento total (IT)	321,3

Com base na estrutura de investimento apresentada acima foram feitas adequações para ajustar o investimento pelo tempo, localização e capacidade de produção. Primeiramente, foi realizado o ajuste de localização. Para países em desenvolvimento que já têm experiência industrial é adicionado o fator de 10% sobre o valor do ISBL. Além disso, levando-se em conta a localização da cidade de Três Lagoas (MS), o manual sugere um aumento de mais 10% relacionado à longa distância de portos e outras zonas industriais importantes. Desta forma, tem-se:

$$ISBL_{Três\ Lagoas} = ISBL_{original} \times 1,2$$

Logo:

$$ISBL_{Três\ Lagoas} = 170 \times 10^6 \times 1,2 = 204 \times 10^6$$

A correção do investimento pelo tempo é feita com base em dados da revista Chemical Engineering que todos os anos publica o Chemical Engineering Plant Cost Index, um fator de atualização de preços de plantas químicas, conforme mostrado na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores dos índices CEPCI usados na atualização do ISBL da planta de amônia. Fonte: Chemical Engineering, 2019

Ano	Índice CEPCI
1994	368,1
2018	603,1

Com estes dados, é possível descobrir o valor atual de um investimento com base num valor do passado, pela seguinte fórmula:

$$ISBL_{presente} = ISBL_{original} \times \frac{\text{Índice CEPCI presente}}{\text{Índice CEPCI original}}$$

Logo:

$$ISBL_{presente} = 204 \times 10^6 \times \frac{603,1}{368,1} = 334,2 \times 10^6$$

Finalmente, o ajuste de capacidade é feito para o valor de 2243 toneladas/dia

usando a seguinte equação:

$$ISBL_{nova\ capacidade} = ISBL_{capacidade\ original} \times \left(\frac{Capacidade\ nova}{Capacidade\ original} \right)^{0,6}$$

Logo:

$$ISBL_{nova\ capacidade} = 204 \times 10^6 \times \left(\frac{2243}{1500} \right)^{0,6} = 425,5 \times 10^6$$

Para calcular a distribuição dos custos da indústria, devem-se ter os valores praticados de matérias-primas e insumos, mão de obra, utilidades, entre outros, a mão. Com eles, além de se calcular os custos variáveis, pode-se também recalcular a estrutura global de investimento, apresentada anteriormente na Tabela 11, com base nos novos valores de ISBL, vendas e matérias-primas. Apresentam-se nas Tabelas 13, 14 e 15, os valores dos insumos utilizados na produção de amônia, a estrutura dos custos variáveis da manufatura da amônia; a reestruturação dos custos tendo em vista o ISBL adequado às novas condições de tempo, local e capacidade; os resultados anuais financeiros de operação da planta; e, por fim, o fluxo de caixa.

Tabela 13 - Preços dos principais insumos utilizados na produção de amônia.

Item	Preço	Referência	Fonte
Gás Natural	US\$ 11 / MM Btu	Preço médio do gás natural vendido às indústrias brasileiras em 2018, sem impostos	EPE, 2019
Catalisadores e produtos químicos	US\$ 6,87 / tonelada	Valor atualizado pela inflação americana com base no valor original de 1986	Fertilizer Manual, 1998
Energia elétrica	US\$ 0,12 / kWh	Energia elétrica para o consumidor industrial brasileiro em 2018	EPE, 2019
Água de resfriamento	US\$ 0,05 / tonelada	Valor corrigido pela inflação americana com base no valor de 2007	Intratec, 2019
Água de caldeira	US\$ 0,53 / tonelada	Valor corrigido pela	Intratec, 2019

		inflação americana com base no valor de 2007	
Custo de mão de obra	US\$ 50400 / operador ano	Custo da mão de obra brasileira em 2016	ABIQUIM, 2018

Tabela 14 - Custos variáveis da produção de amônia. Fonte: elaborado pelo autor.

Resumo dos Custos de Produção							
CUSTOS VARIÁVEIS		Unidade	Coef. Tec.	Preço	Custo Unitário	Custo Anual	Distribuição
			un./t	US\$/un.	US\$/t	US\$ 10 ⁶	%
Matérias-primas	Gás natural	MMBtu	20,25	11,00	222,75	169,87	48,1%
	Catalisadores e Produtos Químicos	US\$/t			6,87	5,24	1,5%
	Total de matérias-primas					229,62	175,1
Utilidades	Energia elétrica	kwh	35,0	0,120	4,20	3,20	0,9%
	Água de resfriamento	t	166,0	0,050	8,30	6,33	1,8%
	Água de caldeira	t	2,3	0,530	1,22	0,93	0,3%
	Combustível	MMBtu	7,5	11,00	82,94	63,25	17,9%
	Total de utilidades					96,66	73,71
TOTAL DOS CUSTOS VARIÁVEIS					326,28	248,8	70,4%
CUSTOS FIXOS							
Custos fixos caixa	Operadores e supervisores	Turnos	Número/Turno	Fator de cálculo	Custo da mão de obra (US\$/ano)		
		4,5	5	22,5	50.400	1,49	1,13
	Manutenção,	% do IF		4,0		33,52	25,56
	Taxas e seguros	% Investimento fabril		2,5		16,84	12,84
	Administração	Equivalente aos operadores e supervisores				1,49	1,13
Total dos custos fixos caixa					53,34	40,67	11,5%
Custos fixos não-caixa	Depreciação	Investimento Fixo	10 anos	10,00%	639,0	83,80	63,90
	Total dos custos fixos não caixa					83,80	63,90
TOTAL DOS CUSTOS FIXOS					137,13	104,58	29,6%
CUSTO TOTAL					463,41	353,4	100,0%

Tabela 15 - Recálculo dos valores da estrutura de investimento da planta de amônia. Fonte: elaborado pelo autor.

Recálculo dos valores do investimento				
Capacidade de produção	2.243	t/dia	762.620	t/ano
Investimento no ISBL			425,5	US\$ 10 ⁶
Estrutura do Investimento				
a) Investimento Fixo			US\$ 10⁶	
1. ISBL				425,5
2. Estrutura de estocagem (5% de 1)				21,3
3. Utilidades (10% de 1)				42,5
4. Serviços gerais (5% de 1, 2 e 3)				24,5
5. Investimento fabril				513,8
6. Equipamentos de reposição (4% of 1 e 3)				18,7
7. Pre-operação e partida (6% de 1 e 3)				28,1
8. Gestão do projeto (5% of 5)				25,7
9. Juros durante a construção (9% de IF - juros)				52,8
10. Investimento Fixo (IF)				639,0
b) Capital de Giro			US\$ 10⁶	
1. Financiamento das compras (30 dias)				-14,0
2. Estocagem de matérias primas (20 dias)				9,3
3. Estocagem de produtos (15 dias)				14,5
4. Estocagem de peças de reposição (3% do IF)				19,2
5. Financiamento das vendas (30 dias de vendas)				29,0
6. Disponibilidade de caixa (5% de 2, 3, 4 e 5)				3,6
7. Capital de Giro - CG				61,7
Investimento Total (IT)				700,7

Tabela 16 – Fluxo de caixa anual da planta de amônia. Período de implantação – 3 anos Fonte: elaborado pelo autor.

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1. Entradas	87,94	146,57	86,39	187,16	207,95	207,95							
1.1 Receita de vendas	0,00	0,00	0,00	187,16	207,95	207,95	207,95	207,95	207,95	207,95	207,95	207,95	207,95
1.1.1 Amônia	0,00	0,00	0,00	187,16	207,95	207,95	207,95	207,95	207,95	207,95	207,95	207,95	207,95
1.2 Recursos próprios													
1.3 Financiamento	87,94	146,57	86,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2. Saídas	177,20	297,98	181,11	323,25	342,25	341,29	340,33	339,36	338,40	337,44	336,48	335,51	334,55
2.1 Custos de Produção	0,00	0,00	0,00	268,36	293,66	293,66	293,66	293,66	293,66	293,66	293,66	293,66	293,66
2.1.1 Variáveis	0,00	0,00	0,00	223,94	248,83	248,83	248,83	248,83	248,83	248,83	248,83	248,83	248,83
Matérias-primas:	0,00	0,00	0,00	157,60	175,11	175,11	175,11	175,11	175,11	175,11	175,11	175,11	175,11
Utilidades:	0,00	0,00	0,00	66,34	73,71	73,71	73,71	73,71	73,71	73,71	73,71	73,71	73,71
2.1.2 Fixos	0,00	0,00	0,00	40,67	40,67	40,67	40,67	40,67	40,67	40,67	40,67	40,67	40,67
Mão-de-obra	0,00	0,00	0,00	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
Outros custos fixos	0,00	0,00	0,00	39,54	39,54	39,54	39,54	39,54	39,54	39,54	39,54	39,54	39,54
2.1.3 Tecnologia	0,00	0,00	0,00	3,74	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16
2.2 Despesas - ex-juros	0,00	0,00	0,00	7,49	8,32	8,32	8,32	8,32	8,32	8,32	8,32	8,32	8,32
2.2.1 Vendas	0,00	0,00	0,00	1,87	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
2.2.2 Administrativas	0,00	0,00	0,00	1,87	2,08	2,08							
2.2.3 P & D	0,00	0,00	0,00	1,87	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
2.2.4 Conservação Ambiental	0,00	0,00	0,00	1,87	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
2.3 Encargos financeiros	0,00	0,00	0,00	41,24	40,27	39,31	38,35	37,39	36,42	35,46	34,50	33,53	32,57
2.3.1 Juros	0,00	0,00	0,00	9,15	8,18	7,22	6,26	5,29	4,33	3,37	2,41	1,44	0,48
2.3.2 Amortização do financiamento	0,00	0,00	0,00	32,09	32,09	32,09	32,09	32,09	32,09	32,09	32,09	32,09	32,09
2.4 Investimento	177,20	297,98	181,11	6,17	0,00	0,00							
2.4.1 Investimento Fixo	175,88	293,14	117,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2.4.2 Capital de Giro	0,00	0,00	55,52	6,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2.4.3 Juros durante a implantação	1,32	4,84	8,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2.5 Impostos diretos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3. Recuperação do Capital													362,07
3.1 Valor residual													300,38
3.2 Capital de giro													61,69
4. Saldo	-89,26	-151,41	-94,72	-136,10	-134,30	-133,34	-132,38	-131,41	-130,45	-129,49	-128,52	-127,56	235,48

Obs.: o saldo negativo durante a implantação deverá ser coberto com os recursos próprios

Tabela 17 – Cálculo do lucro líquido da planta de amônia. Fonte: elaborado pelo autor

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1. Vendas líquidas	0,00	0,00	0,00	187,16	207,95	207,95							
1.1 Amônia	0,00	0,00	0,00	187,16	207,95	207,95	207,95	207,95	207,95	207,95	207,95	207,95	207,95
Mercado interno	0,00	0,00	0,00	187,16	207,95	207,95	207,95	207,95	207,95	207,95	207,95	207,95	207,95
Mercado externo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2. Custo Total	0,00	0,00	0,00	328,44	353,74	353,74							
2.1 Matérias-primas	0,00	0,00	0,00	157,60	175,11	175,11	175,11	175,11	175,11	175,11	175,11	175,11	175,11
Gás Natural	0,00	0,00	0,00	152,89	169,87	169,87	169,87	169,87	169,87	169,87	169,87	169,87	169,87
Cat.e Prod.Quim.	0,00	0,00	0,00	4,72	5,24	5,24	5,24	5,24	5,24	5,24	5,24	5,24	5,24
2.2 Utilidades	0,00	0,00	0,00	66,34	73,71	73,71	73,71	73,71	73,71	73,71	73,71	73,71	73,71
Energia elétrica	0,00	0,00	0,00	2,88	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20
Água de resfriamento	0,00	0,00	0,00	5,70	6,33	6,33	6,33	6,33	6,33	6,33	6,33	6,33	6,33
Água de caldeira	0,00	0,00	0,00	0,84	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
Combustível	0,00	0,00	0,00	56,93	63,25	63,25	63,25	63,25	63,25	63,25	63,25	63,25	63,25
2.3 Mão-de-obra	0,00	0,00	0,00	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
2.4 Outros custos fixos	0,00	0,00	0,00	39,54	39,54	39,54	39,54	39,54	39,54	39,54	39,54	39,54	39,54
2.5 Depreciação	0,00	0,00	0,00	60,08	60,08	60,08	60,08	60,08	60,08	60,08	60,08	60,08	60,08
2.6 Tecnologia	0,00	0,00	0,00	3,74	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16
3. Despesas	0,00	0,00	0,00	16,63	16,50	15,54	14,58	13,61	12,65	11,69	10,72	9,76	8,80
3.1. Vendas	0,00	0,00	0,00	1,87	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
3.2 Administrativas	0,00	0,00	0,00	1,87	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
3.3 Financeiras - juros	0,00	0,00	0,00	9,15	8,18	7,22	6,26	5,29	4,33	3,37	2,41	1,44	0,48
3.4. P & D	0,00	0,00	0,00	1,87	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
3.5 Conservação ambiental	0,00	0,00	0,00	1,87	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
4. Lucro tributável (prejuízo)	0,00	0,00	0,00	-157,91	-162,29	-161,32	-160,36	-159,40	-158,44	-157,47	-156,51	-155,55	-154,59
5. Ajuste de prejuízos anteriores	0,00	0,00	0,00	0,00	-157,91	0,00	-161,32	-321,69	-481,09	-639,52	-797,00	-953,51	-1109,05
6. Base para cálculo dos impostos	0,00	0,00	0,00	-157,91	0,00	-161,32	-321,69	-481,09	-639,52	-797,00	-953,51	-1109,05	-1263,64
7. Impostos diretos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8. Lucro líquido após os impostos	0,00	0,00	0,00	-157,91	-162,29	-161,32	-160,36	-159,40	-158,44	-157,47	-156,51	-155,55	-154,59

Primeiramente, deve-se notar na Tabela 14 que o custo do gás natural usado como matéria-prima e combustível corresponde a 66% do custo total da fabricação da amônia. Este custo é muito expressivo frente aos outros custos de produção.

Com os dados de custos e as premissas estabelecidas na planilha Amônia – Versão Final em anexo, gerou-se o fluxo de caixa desta planta, que compreende o fluxo de entrada e saída de capitais relacionados à operação da planta. De posse deste fluxo, apresentado na Tabela 17, podem-se calcular importantes indicadores de viabilidade econômica, como o valor presente líquido (VPL) e a taxa interna de retorno (TIR).

O VPL, no entanto, está associado à outra taxa de desconto, a taxa mínima de atratividade (TMA), e por isso, é importante conceituá-la primeiro. Segundo Clemente e Souza (1998), a TMA é a taxa que deixa de ser obtida na melhor aplicação alternativa quando há emprego de capital próprio ou é a menor taxa de juros que se obtém quando recursos de terceiros são utilizados. Em outras palavras, a TMA relaciona-se a uma taxa de referência de mercado, com por exemplo a taxa SELIC, usada como base no mercado financeiro brasileiro.

O VPL é a diferença entre o valor investido e o valor dos benefícios esperados, levando em conta a data de origem do projeto e usando a TMA como taxa de desconto. Já a TIR é um parâmetro que mostra quanto um investimento dá de retorno à empresa. A TIR também pode ser definida como a taxa de desconto que zera o valor presente líquido (VPL).

Neste exemplo, a taxa interna de retorno (TIR) do investimento não pode ser calculada por causa dos valores de lucro todos negativos. O elevado preço do gás no país não permite que haja lucro no horizonte de operação de 10 anos desta indústria. A título de curiosidade, para que esta planta de amônia apresentasse uma TIR de 15%, o preço do gás natural deveria ser US\$ 1,20 / MM Btu.

4.2. Planta de integrada de ureia

Para a avaliação econômica da planta de ureia foi utilizada a metodologia de Chauvel e Lefevbre (1989). Os autores também estabelecem pesos para os variados aspectos de constituem o custo de uma indústria química se baseando no ISBL. Esta estrutura de custos está apresentada na Tabela 18. O custo relacionado à partida seguiu o maior valor obtido dentre os seguintes cálculos: valor de três meses de custos variáveis e custos de mão

de obra das plantas, subtraindo-se os custos com matérias-primas ou o valor de quinze dias de custos com mão de obra, custos variáveis e matérias-primas.

Tabela 18 - Estrutura de custos de uma indústria química. Fonte: Chauvel e Lefebvre, 1989

Componentes	Relações
ISBL	I_1
OSBL	$I_2 = 0,4 \times I_1$
Total das unidades industriais	$I_1 + I_2$
Engenharia	$I_3 = 0,12 \times (I_1 + I_2)$
Peças de reposição	$I_4 = 0$
Custo da tecnologia	$I_5 = 0,05 \text{ a } 0,10 (I_1 + I_2)$
Investimento na fábrica	If = soma de I_1 até I_5
Catalisadores e outros insumos	I_6
Juros do financiamento	$I_7 = 0,09 \text{ If}$
Partida	I_8
Investimento fixo	IF = soma de I_1 até I_8
Capital de giro	CG = $2 \times I_8$ + metais preciosos
Investimento total	IT = IF + CG

Nas Tabelas 19, 20 e 21 mostram-se os cálculos do custo de partida, estrutura de custos para uma planta de ureia e custos variáveis, respectivamente. Segundo Chauvel e Lefebvre, são necessários 0,57 tonelada de amônia para produção de uma tonelada de ureia. Desta forma, este fator foi incorporado aos cálculos, que também levaram em conta o fornecimento de dióxido de carbono a custo zero, isto é, reaproveitado do efluente da planta de amônia. Nas Tabelas 22, 23 e 24 são apresentados os custos variáveis da planta integrada de ureia, os resultados financeiros anuais e o fluxo de caixa respectivamente.

Tabela 19 - Dados gerais da planta de ureia e cálculo dos custos de partida. Fonte: elaborado pelo autor.

Referência dos custos de produção:	Petrochemical Processes, V. 1, Chauvel & Lefebvre, 1989, p. 115		
Localização:	França, 1986		
Processo:	Evaporação		
Tecnologia típica:	Stamicarbon II		
Capacidade de produção original:	t/ano	500.000	Dado
Preço da ureia - Argus FMB Price Guide - Anuário ANDA 2017	US\$/t	208	Dado
Investimento no "ISBL" - França/meados 1986:	US\$ 10 ⁶	42	Original
		80	Calculado
Atualização do investimento fixo para 2018, segundo o CE Plant Cost Index Chemical Engineering, Plant Cost Index- CE Index			
	CE 1986	318,3	
	CE 2018	603,1	
Referência para cálculo dos gastos na partida da fábrica com 500.000 t/ano:	US\$ 10 ⁶	11,2	Cálculo
Critério 3 meses de custo variável anual mais operadores menos matérias-primas	Cálculo auxiliar	11,2	
Critério 15 dias de custo variável anual mais operadores	Cálculo auxiliar	10,5	

Tabela 20 - Estrutura do investimento original e recálculo utilizando as novas premissas de capacidade e tempo. Fonte: elaborado pelo autor.

Capacidade original (t/ano)		500.000	Dado
Capacidade nova (t/ano)		1.389.474	Premissa
Relação capacidade nova / capacidade original		278%	Cálculo
Nível de utilização da capacidade		100%	Cálculo
Obs.: não utilizável nas projeções, apenas para cálculo do custo total e unitário			
Nível de produção (t/ano)		1.389.474	Cálculo
Fator de economia de escala (expoente da expressão)		$I_2 = I_1 \cdot (C_2 / C_1)^e$	
	ISBL, OSBL e Juros	0,70	Premissa
	Engenharia e Tecnologia	0,00	Premissa
Cálculo do investimento:	Partida e Capital de Giro		Cálculo
Componentes	US\$ 10 ⁶	Recálculo dos valores do investimento	US\$ 10 ⁶
ISBL	79,6	Cálculo	162,7
OSBL	31,8	Cálculo	65,1
Engenharia	13,4	Cálculo	13,4
Tecnologia	11,1	Cálculo	11,1
Juros	12,2	Cálculo	25,0
Partida	11,2	Cálculo	10,5
Investimento Fixo (IF)	159,4	Cálculo	287,9
Capital de Giro (CG)	22,4	Cálculo	22,4
Investimento Total (IT)	181,8	Cálculo	310,3

Tabela 21 - Estrutura de custos de uma planta de ureia. Fonte: elaborado pelo autor.

<u>Resumo dos Custos de Produção</u>					Unidade	Coef. Tec. un./t	Preço US\$/un.	Custo Unitário US\$/t	Custo Anual US\$ 10 ⁶	Distribuição %
<u>CUSTOS VARIÁVEIS</u>										
Matérias-primas		Amônia	t	0,570	267	ComexStat.201	152,19	211,46	70,2%	
		Dióxido de carbono	t	0,750	0		0,00	0,00	0,0%	
		Total de matérias-primas					<u>152,19</u>	<u>211,46</u>	<u>70,2%</u>	
Utilidades		Energia elétrica	kwh	65	0,120	EPE, 2018	7,80	10,84	3,6%	
		Água de resfriamento	m3	65	0,050	Intratec.	3,25	4,52	1,5%	
		Vapor de baixa	t	0,6	34,0	Intratec.	20,40	28,35	9,4%	
		Total de utilidades					<u>31,45</u>	<u>43,70</u>	<u>14,5%</u>	
		<u>TOTAL DOS CUSTOS VARIÁVEIS</u>					<u>183,64</u>	<u>255,16</u>	<u>84,8%</u>	
<u>CUSTOS FIXOS</u>										
Custos fixos caixa	Operadores	Turnos	5	4,5	US\$/ano	50.400	0,82	1,13	0,4%	
		Manutenção, impostos e seguros, despesas gerais			% do ISBL+OSI	7,0%	11,48	15,95	5,3%	
		Total dos custos fixos caixa					<u>12,29</u>	<u>17,08</u>	<u>5,7%</u>	
Custos fixos não-caixa	Depreciação	Investimento Fixo	10 anos	10,00%			20,72	28,79	9,6%	
		Total dos custos fixos não caixa					<u>20,72</u>	<u>28,79</u>	<u>9,6%</u>	
		<u>TOTAL DOS CUSTOS FIXOS</u>					<u>33,02</u>	<u>45,87</u>	<u>15,2%</u>	
		<u>CUSTO TOTAL</u>					<u>216,66</u>	<u>301,04</u>	<u>100,0%</u>	

Tabela 22 - Custos variáveis da planta integrada de ureia. Fonte: elaborado pelo autor

Resumo dos Custos de Produção											
CUSTOS VARIÁVEIS											
						Unidade	Coef. Tec.	Preço	Custo Unitário	Custo Anual	Distribuição
							un./t	US\$/un.	US\$/t	US\$ 10⁶	%
Matérias-primas	Gás Natural					MMBtu	11,543	11	126,97	169,87	38,6%
	Catalisadores e Produtos Químicos					US\$			3,92	5,24	1,2%
	Total de matérias-primas								130,88	175,11	39,8%
Utilidades	Energia elétrica					kwh	85	0,120	10,19	13,64	3,1%
	Água de resfriamento					m3	160	0,050	7,98	10,68	2,4%
	Água de caldeira					m3	1	0,530	0,69	0,93	0,2%
	Vapor de baixa					m3	1	34,000	20,40	27,29	6,2%
	Combustível					MMBtu	4,3	11,0	47,03	62,92	14,3%
Total de utilidades								86,29	115,46	26,2%	
TOTAL DOS CUSTOS VARIÁVEIS								217,18	290,57	66,1%	
CUSTOS FIXOS											
Custos fixos caixa											
	Amônia	Operadores	Tumos	5	4,5						
	Ureia	Operadores	Tumos	4,5	5	45	US\$/ano	50.400	1,70	2,27	0,5%
	Amônia	Manutenção,	% do IF		4,0			639	19,11	25,56	5,8%
		Taxas e seguros	% Investimento fabril		2,5			514	9,60	12,84	2,9%
		Administração	Equivalente aos operadores e supervisores						0,85	1,13	0,3%
	Ureia	Manutenção, impostos e seguros, despesas gerais					% do ISBL+OSBL	7,0%	11,61	15,53	3,5%
Total dos custos fixos caixa								42,86	57,34	13,0%	
Custos fixos não-caixa											
	Depreciação	Investimento Fixo				10 anos		10,00%	68,76	92,00	20,9%
Total dos custos fixos não caixa								68,76	92,00	20,9%	
TOTAL DOS CUSTOS FIXOS								111,62	149,34	33,9%	
CUSTO TOTAL								328,80	439,91	100,0%	

Tabela 23 – Cálculo do lucro líquido da planta integrada. Fonte: elaborado pelo autor.

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1. Vendas líquidas	0,00	0,00	0,00	428,07	475,63								
1.1 Ureia	0,00	0,00	0,00	428,07	475,63	475,63	475,63	475,63	475,63	475,63	475,63	475,63	475,63
Mercado interno	0,00	0,00	0,00	428,07	475,63	475,63	475,63	475,63	475,63	475,63	475,63	475,63	475,63
Mercado externo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2. Custo Total	0,00	0,00	0,00	413,78	443,79								
2.1 Matérias-primas	0,00	0,00	0,00	157,60	175,11	175,11	175,11	175,11	175,11	175,11	175,11	175,11	175,11
Gás Natural	0,00	0,00	0,00	152,89	169,87	169,87	169,87	169,87	169,87	169,87	169,87	169,87	169,87
Catalisadores e Produtos Químicos	0,00	0,00	0,00	4,72	5,24	5,24	5,24	5,24	5,24	5,24	5,24	5,24	5,24
2.2 Utilidades	0,00	0,00	0,00	103,91	115,46	115,46	115,46	115,46	115,46	115,46	115,46	115,46	115,46
Energia elétrica	0,00	0,00	0,00	12,27	13,64	13,64	13,64	13,64	13,64	13,64	13,64	13,64	13,64
Água de resfriamento	0,00	0,00	0,00	9,61	10,68	10,68	10,68	10,68	10,68	10,68	10,68	10,68	10,68
Água de caldeira	0,00	0,00	0,00	0,84	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
Vapor de baixa	0,00	0,00	0,00	24,56	27,29	27,29	27,29	27,29	27,29	27,29	27,29	27,29	27,29
Combustível	0,00	0,00	0,00	56,62	62,92	62,92	62,92	62,92	62,92	62,92	62,92	62,92	62,92
2.3 Mão-de-obra	0,00	0,00	0,00	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27
2.4 Outros custos fixos	0,00	0,00	0,00	55,07	55,07	55,07	55,07	55,07	55,07	55,07	55,07	55,07	55,07
2.5 Depreciação	0,00	0,00	0,00	86,36	86,36	86,36	86,36	86,36	86,36	86,36	86,36	86,36	86,36
2.6 Tecnologia	0,00	0,00	0,00	8,56	9,51	9,51	9,51	9,51	9,51	9,51	9,51	9,51	9,51
3. Despesas	0,00	0,00	0,00	30,20	30,73	29,35	27,97	26,60	25,22	23,84	22,47	21,09	19,71
3.1. Vendas	0,00	0,00	0,00	4,28	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76
3.2 Administrativas	0,00	0,00	0,00	4,28	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76
3.3 Financeiras - juros	0,00	0,00	0,00	13,08	11,70	10,33	8,95	7,57	6,20	4,82	3,44	2,07	0,69
3.4 P & D	0,00	0,00	0,00	4,28	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76
3.5 Conservação ambiental	0,00	0,00	0,00	4,28	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76
4. Lucro tributável (prejuízo)	0,00	0,00	0,00	-15,91	1,12	2,50	3,87	5,25	6,63	8,00	9,38	10,76	12,13
5. Ajuste de prejuízos anteriores	0,00	0,00	0,00	0,00	-15,91	-14,79	-12,29	-8,42	-3,16	0,00	0,00	0,00	0,00
6. Base para cálculo dos impostos	0,00	0,00	0,00	-15,91	-14,79	-12,29	-8,42	-3,16	3,46	8,00	9,38	10,76	12,13
7. Impostos diretos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,18	2,72	3,19	3,66	4,13
8. Lucro líquido após os impostos	0,00	0,00	0,00	-15,91	1,12	2,50	3,87	5,25	5,45	5,28	6,19	7,10	8,01

Tabela 24 - Fluxo de caixa da planta integrada de ureia. Fonte: elaborado pelo autor.

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1. Entradas	126,43	210,71	121,77	428,07	475,63								
1.1 Receita de vendas	0,00	0,00	0,00	428,07	475,63	475,63	475,63	475,63	475,63	475,63	475,63	475,63	475,63
1.1.1 Ureia	0,00	0,00	0,00	428,07	475,63	475,63	475,63	475,63	475,63	475,63	475,63	475,63	475,63
1.2 Recursos próprios													
1.3 Financiamento	126,43	210,71	121,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2. Saídas	254,75	428,37	255,47	424,92	434,04	432,66	431,29	429,91	429,71	429,88	428,97	428,06	427,15
2.1 Custos de Produção	0,00	0,00	0,00	327,42	357,42	357,42	357,42	357,42	357,42	357,42	357,42	357,42	357,42
2.1.1 Variáveis	0,00	0,00	0,00	261,51	290,57	290,57	290,57	290,57	290,57	290,57	290,57	290,57	290,57
Matérias-primas:	0,00	0,00	0,00	157,60	175,11	175,11	175,11	175,11	175,11	175,11	175,11	175,11	175,11
Utilidades:	0,00	0,00	0,00	103,91	115,46	115,46	115,46	115,46	115,46	115,46	115,46	115,46	115,46
2.1.2 Fixos	0,00	0,00	0,00	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34
Mão-de-obra	0,00	0,00	0,00	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27
Outros custos fixos	0,00	0,00	0,00	55,07	55,07	55,07	55,07	55,07	55,07	55,07	55,07	55,07	55,07
2.1.3 Tecnologia	0,00	0,00	0,00	8,56	9,51	9,51	9,51	9,51	9,51	9,51	9,51	9,51	9,51
2.2 Despesas - ex-juros	0,00	0,00	0,00	17,12	19,03	19,03	19,03	19,03	19,03	19,03	19,03	19,03	19,03
2.2.1 Vendas	0,00	0,00	0,00	4,28	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76
2.2.2 Administrativas	0,00	0,00	0,00	4,28	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76
2.2.3 P & D	0,00	0,00	0,00	4,28	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76
2.2.4 Conservação Ambiental	0,00	0,00	0,00	4,28	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76
2.3 Encargos financeiros	0,00	0,00	0,00	58,97	57,59	56,22	54,84	53,46	52,09	50,71	49,33	47,96	46,58
2.3.1 Juros	0,00	0,00	0,00	13,08	11,70	10,33	8,95	7,57	6,20	4,82	3,44	2,07	0,69
2.3.2 Amortização do financiamento	0,00	0,00	0,00	45,89	45,89	45,89	45,89	45,89	45,89	45,89	45,89	45,89	45,89
2.4 Investimento	254,75	428,37	255,47	21,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2.4.1 Investimento Fixo	252,85	421,42	168,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2.4.2 Capital de Giro	0,00	0,00	74,97	8,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2.4.3 Juros durante a implantação	1,90	6,95	11,94	13,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2.5 Impostos diretos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,18	2,72	3,19	3,66	4,13
3. Recuperação do Capital													515,11
3.1 Valor residual													431,81
3.2 Capital de giro													83,30
4. Saldo	-128,32	-217,66	-133,71	3,16	41,59	42,97	44,35	45,72	45,92	45,76	46,66	47,57	563,59

Pode-se observar a discrepância entre os resultados financeiros da planta de amônia isolada e da planta integrada. A produção de ureia ajuda a agregar mais valor ao nitrogênio e torna, nas condições estudadas, o empreendimento viável. A Figura 41 apresenta a análise de sensibilidade dos preços do gás natural, da ureia e do investimento fixo, com variação frente ao valor básico de -30% a +30%, e seu comportamento em relação à TIR da indústria. É possível observar que, neste estudo, a variação do preço da ureia, assim como a do gás, foram os únicos fatores que levaram a valores de TIR negativos. Desta forma, pode-se concluir que as decisões de investimentos em plantas integradas de amônia/ureia dependem da variação do preço do gás, que veio aumentando fortemente nos últimos anos no Brasil, que não variam significativamente em função de sua origem.

A viabilidade da implantação de uma fábrica integrada de amônia/ureia no Brasil dependerá, portanto, do preço do gás natural que será consumido nesta fábrica. Para que a TIR alcance o valor em torno de 13% a.a., e possa tornar atrativo o investimento, será necessário que o preço desse gás para a fábrica seja reduzido em cerca de 30%, ou seja se situe em torno de US\$ 7,7 / MMBtu.

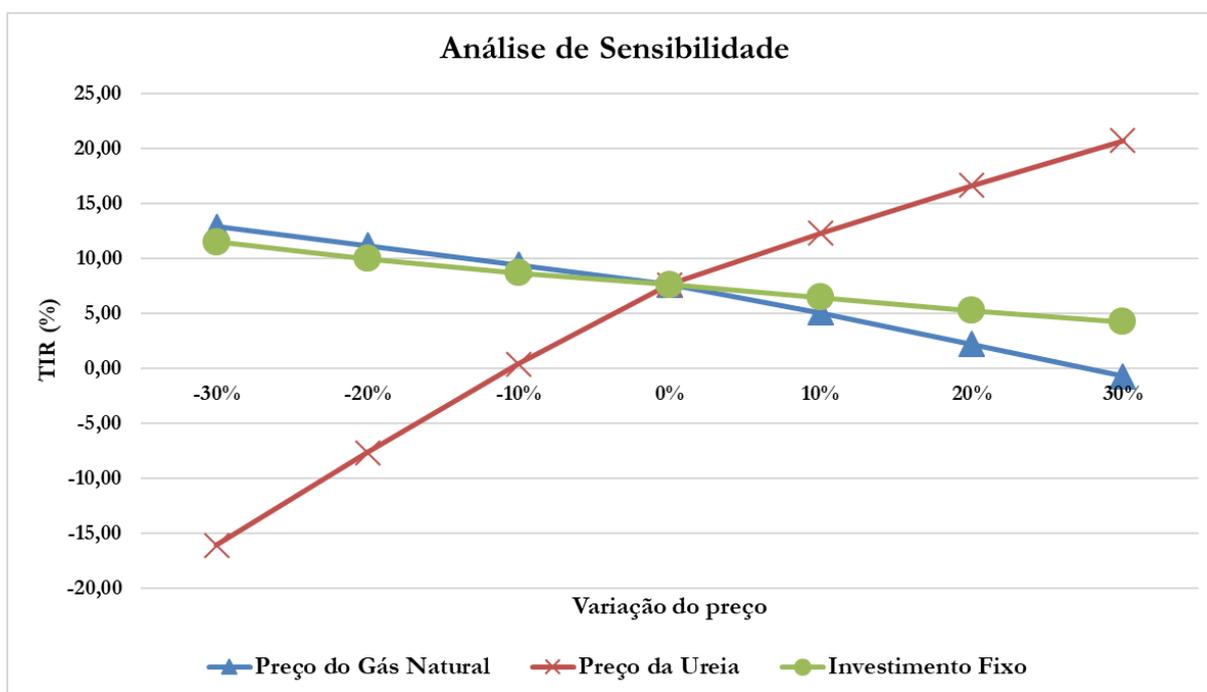


Figura 41 - Análise de sensibilidade dos preços do gás natural, ureia e custo do investimento fixo na viabilidade econômica da planta integrada. Fonte: elaborado pelo autor.

5. Conclusões

A fertilidade do solo é um assunto complexo e multidisciplinar que têm convivido com o ser humano desde os primórdios. Mesmo assim, este assunto não deixa de ser atual, sendo necessárias cada vez mais pesquisas e inovações nesta área de forma a garantir o futuro da agricultura e a oferta de alimentos para a crescente população humana.

O Brasil é uma potência agrícola na atualidade e deve se manter nesta posição pelas próximas décadas. O país tem como característica os solos pobres em nutrientes, o que torna mandatório o uso de fertilizantes para manter as plantações e aumentar a produtividade agrícola.

No entanto, vê-se ultimamente que o setor de fertilizantes nitrogenados nacional sofre com a alta do preço do gás no país, fazendo com que muitas plantas industriais diminuam sua capacidade produtiva ou até mesmo interrompam a operação.

As simulações econômicas mostraram que a produção isolada de amônia é inviável no país, no entanto, a sinergia gerada por uma integração com uma planta a jusante de ureia pode tornar este processo viável. A análise de sensibilidade mostrou que as variáveis que mais tem a possibilidade de influenciar negativamente o desempenho econômico da planta são o preço do produto e o preço do gás natural.

6. Sugestões de trabalhos futuros

O autor deixa como sugestão para trabalhos futuros a simulação da viabilidade econômica das plantas usando dados mais atualizados e mais condizentes com a estrutura empresarial brasileira.

Esses dados mais atualizados não estão disponíveis na literatura e sua obtenção, nas empresas de consultoria internacional, tem custo além das condições financeiras de um estudante ou mesmo de um profissional isolado. Somente empresas podem ter capacidade para bancar esses custos.

Além disso, seria interessante realizar simulações de custos logísticos nos principais corredores de comercialização de fertilizantes importados e fabricados no país para entender como otimizar o frete e poder fazer comparações com o custo do produto fabricado no interior do país e o custo efetivo do produto importado que precisa ser entregue em regiões do centro país, as maiores dependentes dos produtos importados.

A análise da importância estratégica de contar com a produção local de

fertilizantes merece que esse estudo seja adequadamente aprofundado para orientar as decisões de políticas industriais e de realização de investimentos empresariais, sejam de empresas públicas ou privadas.

7. Referências

- ABSOLUTE REPORTS. Global Ammonia Market Research Report 2020. **Absolute Reports**, 2020. Disponível em: <<https://www.nbc-2.com/story/41565478/ammonia-market-2020-global-players-update-gross-margin-analysis-size-development-history-business-prospect-and-forecast-2026>>. Acesso em: 18 janeiro 2020.
- ADUAN, R. E. . V. M. F. . J. F. B. R. **Os grandes ciclos biogeoquímicos do planeta**. Planaltina: Embrapa, 2004.
- AGRONEGÓCIO café: Principais contribuições de pesquisas realizadas no IAC. **O agrônomo**, Campinas, 2007. 5-11.
- ANDA. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes**. São Paulo: [s.n.], 2019.
- APPL, M. Ammonia. In: _____ **Ullmann's Encyclopedia of industrial Chemistry**. Weinheim: Wiley Verlag, 2011.
- AULAKH, M. S.; MALHI, S. S. Interactions of Nitrogen with Other Nutrients and Water: Effect on Crop Yield and Quality, Nutrient Use Efficiency, Carbon Sequestration, and Environmental Pollution. **Advances in Agronomy**, dezembro 2005. 341-409.
- BARKER, G. **The Agricultural Revolution in Prehistory: why did Foragers become Farmers?** Oxford: Oxford University Press, 2006.
- BEHRENS, W.; HAWRANEK, P. M. **Manual for the preparation of industrial feasibility studies**. Viena: [s.n.], 1991.
- BRASIL. LEI Nº 6.894, DE 16 DE DEZEMBRO DE 1980, 1980. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/1980-1988/L6894.htm>. Acesso em: 26 dezembro 2019.
- BRASIL. **DECRETO Nº 4.954, DE 14 DE JANEIRO DE 2004**, 2004. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Decreto/D4954.htm>. Acesso em: 26 dezembro 2019.
- CEKINSKI, E.; BETTIOL, W. Fosfato parcialmente acidulado: um produto promissor. **Embrapa Meio Ambiente**, 1983.
- CONAB. Veja perspectivas para os principais produtos agrícolas na safra 2019/20. **G1**, 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2019/07/01/veja->

perspectivas-para-os-principais-produtos-agricolas-na-safra-201920.shtml>. Acesso em: 02 dezembro 2019.

CUNHA, L. G. S. **CENÁRIOS E DESAFIOS DA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES**. Uberlândia: [s.n.], 2017.

DIAS, V. P.; FERNANDES, E. Fertilizantes: uma visão global sintética. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, p. 138, setembro 2006.

DOMINGOS, A. P. **Produção de Ureia**: avaliação técnica e econômica. Uberlândia: Trabalho de Conclusão de Curso, 2018.

EMBRAPA. Solos Brasileiros. **Embrapa**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros/solos-do-brasil>>. Acesso em: 20 dezembro 2019.

FAO-ONU. **Fertilizer Use by Crop**. FAO. Roma, p. 114. 2006. (ISSN: 0259-2495).

FERRAN, A. P. N. D. **A Mnieração e a Flotação no Brasil - Uma perspectiva histórica**. [S.l.]: DNPM, 2007.

FERRI, F. **A estrutura e a estratégia concorrecial da indústria de fertilizantes no Brasil**. Porto Alegre: [s.n.], 2010.

GOMES, M. A. F. et al. **Nutrientes Vegetais no Meio Ambiente**: ciclos bioquímicos, fertilizantes e corretivos. 2. ed. Jaguariúna: Embrapa, 2008.

GROHSKOPF, M. A. . C. J. C. . F. D. M. . T. P. C. . C. C. V. . & M. S. C. A. Interaction between Phosphorus and Nitrogen in Organomineral Fertilizer. doi. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 2019. 1–14.

HALDOR TOPSOE. SynCOR Ammonia. **Haldor Topsoe**, 2019. Disponível em: <<https://www.topsoe.com/products/syncor-ammoniatm-new-process-grassroots-plants>>. Acesso em: 02 janeiro 2020.

IFDC - UNIDO. **Fertilizer Manual**. Dordrecht: Springer, 1985.

IFDC - UNIDO. **Fertilizer Manual**. 3ª. ed. Dordrecht: Kluwer, 1998.

INTRATEC. **Ammonia Production from Natural Gas**. [S.l.]. 2017.

IPNI. Nitrofosfato. **IPNI**, 2015. Disponível em: <[http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/A695CA84C9EB48A285257BBA0059C889/\\$FILE/NSS-ES-15.pdf](http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/A695CA84C9EB48A285257BBA0059C889/$FILE/NSS-ES-15.pdf)>. Acesso em: 10 janeiro 2020.

JÚNIOR, C. G. P. B.; CALLADO, A. A. C. Análise da competitividade do setor de fertilizantes na região nordeste. **Revista Brasileira de Estratégia**, Curitiba, v. 1, n. 3, p. 307-318, set./dez. 2008.

KBR. Ammonia & Fertilizer Technologies. **KBR**, 2019. Disponível em: <<https://www.kbr.com/en/solutions/technologies/process-technologies/ammonia-fertilizers->

technologies>. Acesso em: 02 janeiro 2020.

KIISKI, H. et al. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**. Weinheim: Wiley Verlag, 2015.

LOPES, A. S. **Guia de Fertilidade do Solo**. 4ª. ed. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2004.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. **Rochas & Minerais Industriais**. Rio de Janeiro: CETEM - Ministério da Ciência e Tecnologia, 2008.

MARCONATO, R. **Análise do custo de transporte de fertilizantes com uso de modelagem digital de terreno**. São Paulo: [s.n.], 2012.

MAZOYER, M.; ROUDART, L. **História das agriculturas no mundo. Do Neolítico à Crise Contemporânea**. Tradução de Cláudia F. Falluh Balduino Ferreira. Brasília: UNESP, 2010.

MAZZILLI, B.; SAUEIA, C.; NISTI, M. Radiological Implications of Using Phosphogypsum as Soil Conditioner: a case study of Brazil, 2019.

MEESEN, J. H. Urea. In: _____ **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**. Weinheim: Wiley, 2010.

NIELSSON, F. T. (Ed.). **Manual of Fertilizer Processing**. Florida: CRC Press, v. 5, 1987.

O SEMANÁRIO, 1958. Disponível em: <<http://memoria.bn.br/DocReader/Hotpage/HotpageBN.aspx?bib=149322&pagfis=1737&url=http://memoria.bn.br/docreader#>>. Acesso em: 02 janeiro 2020.

OLIVEIRA, J. V. D. **ASPECTOS TÉCNICO-ECONÔMICOS DA CADEIA DE FERTILIZANTES ORGANOMINERAIS NO BRASIL**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2015.

ONU. World Population Prospects. **United Nations**, 2019. Disponível em: <<https://population.un.org/wpp/Graphs/Probabilistic/POP/TOT/900>>. Acesso em: 20 dezembro 2019.

QUARTUCCI, J. P. **Análise da competitividade do cluster da indústria de fertilizantes do recôncavo baiano**. Salvador: [s.n.], 2008.

RICHETTI, P. Tendências da produção de fertilizantes no Brasil. **Notícias Agrícolas**, 2018. Disponível em: <<https://www.noticiasagricolas.com.br/artigos/artigos-principais/221636-tendencias-da-producao-de-fertilizantes-no-brasil-por-priscila-richetti.html#.XjTKR7fQiM9>>. Acesso em: 12 setembro 2019.

SERIGATI, F. C. A agricultura puxa o PIB? **AgroANALYSIS**, fevereiro 2013. 13-14.

SIR John Bennet Lawes. In: _____ **Encyclopaedia Britannica**. [S.l.]: [s.n.], v. 16, 1911.

SMIL, V. **Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production**. 1ª. ed. Massachusetts: MIT Press, 2000.

SMITHSONIAN. The Guano Islands Acts of 1856. **SMITHSONIAN – NATIONAL MUSEUM OF AMERICAN HISTORY**. Disponível em: <<https://americanhistory.si.edu/norie-atlas/guano-islands-act>>. Acesso em: 21 outubro 2019.

SOUZA, M. D. M. V. M. **Processos Inorgânicos**. Rio de Janeiro: Synergia, 2012.

STAMICARBON. Urea - Stamicarbon. **Stamicarbon**. Disponível em: <<https://www.stamicarbon.com/what-we-do/urea>>. Acesso em: 02 janeiro 2020.

STUCHI, J. F. (Ed.). **BIOFERTILIZANTE. Um adubo líquido de qualidade que você pode fazer**. Brasília: Embrapa, 2015.

THYSSENKRUPP. The Uhde Ammonia Processes. **ThyssenKrupp**, 2019. Disponível em: <<https://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/en/products-and-services/fertilizer-plants/ammonia-plants-by-uhde/ammonia-plants-500mtpd/the-uhde-ammonia-processes>>. Acesso em: 02 janeiro 2020.

TOYO ENGINEERING. Urea - Toyo Engineering Corporation. **Toyo Engineering Corporation**. Disponível em: <<https://www.toyo-eng.com/jp/en/products/petrochemical/urea/>>. Acesso em: 02 janeiro 2020.

USP. Potássio, 2017. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3463688/mod_resource/content/1/8.%20POTÁSSIO%20FINAL%202017.pdf>.

WEISDORF, J. From Foraging to Farming: explaining the Neolithic Revolution. **Journal of Economic Surveys**, v. 19, n. 4, p. 561-586, 2005.