

O Nitrogênio e a importância da sua fixação no solo

*Por Samia Maciel, SergipeTec

Contextualização

O nitrogênio (N_2) é um macronutriente, essencial para a vida, encontrado em diversos compostos orgânicos, como aminoácidos e ácidos nucleicos, faz parte do DNA, da água que bebemos, do ar que respiramos, bem como, responsável pelo crescimento das plantas [1, 2]. O nitrogênio gasoso está presente no ar atmosférico, apresentando um percentual na composição de 78%, sendo o gás mais abundante se comparado aos outros gases que compõem o ar, como oxigênio (21%), gás carbônico (0,03%) e gases nobres (0,91%) [3].

Apesar de sua grande disponibilidade na atmosfera, não significa dizer que se poderá utilizá-lo em sua totalidade. O nitrogênio não pode ser utilizado pela maioria dos organismos. Animais e plantas não aproveitam o nitrogênio, pois não conseguem converter o N_2 em uma forma metabolizável, uma vez que não apresentam enzimas adequadas para capturar ou fixar o nitrogênio atmosférico [4]. Poucas espécies são capazes de empregá-lo dessa forma, sendo essa uma capacidade atribuída a alguns tipos de bactérias e cianobactérias [5].

O Ciclo do Nitrogênio é um ciclo biogeoquímico que garante que esse elemento circule pelos seres vivos e pelo ambiente. A capacidade de capturar o N_2 é primordial para garantir que esse elemento consiga completar seu ciclo entre os componentes vivos e físico-químicos do planeta [5]. As plantas necessitam do nitrogênio em maior quantidade e sua indisponibilidade, torna-se um limitante para a produtividade das mesmas em ecossistemas naturais e agrícolas [1].

A baixa fertilidade natural dos solos aliada a deficiência hídrica de determinadas regiões são fatores que impactam negativamente na produção agrícola e em todos os aspectos relacionados ao desenvolvimento vegetal trazendo consequências nefastas para a agricultura.

A fixação biológica do nitrogênio no solo é uma alternativa eficiente e de baixo custo para melhorar a produtividade de uma cultura. Além disso, possui baixo impacto ambiental, dispensando o uso de adubos nitrogenados, contribuindo para a proteção e conservação dos solos. Para tal, são utilizadas bactérias para fixar nitrogênio no solo, promovendo, além do aumento da produtividade, a redução da emissão dos gases de efeito estufa, e por conseguinte, atenuando os impactos das mudanças climáticas [5].

Ciclo do nitrogênio

O Ciclo do Nitrogênio assegura que esse elemento interaja com os organismos vivos e com o ambiente físico-químico [1]. Algumas espécies de bactérias fixadoras do nitrogênio são organismos de vida livre no solo ou na água, enquanto outras são simbiontes benéficos (seres simbiontes são seres que convivem numa relação interespecífica) que vivem dentro de plantas [4]. Na Figura 1 é apresentada uma ilustração da fixação do nitrogênio realizada por bactérias onde é possível identificar a presença de três processos neste importante ciclo, a amonificação, a nitrificação e a desnitrificação [6]. Vale destacar que as bactérias são definidas como seres procariontes possuir uma estrutura simples e ausência de núcleo na sua estrutura celular [7].

vivos ou de restos de animais mortos em amônio (NH_4^+) por certas bactérias e fungos [8].

A amônia é convertida em nitritos (NO_2^-) e nitratos (NO_3^-) [6] na etapa de nitrificação, sendo esta subdividida em dois processos distintos: nitrosação e nitratação [7]. A nitrosação é o processo em que as bactérias *Nitrossomonas* transformam a amônia em nitrito e a nitratação, quando ocorre a conversão do nitrito (obtido na nitrosação) em nitrato por bactérias conhecidas como *Nitrobacter*. Essa transformação de nitrito em nitrato é fundamental, pois a maioria das plantas só conseguem absorver o nitrogênio quando este se encontra na forma de nitrato [6, 8].

Por fim, ocorre o processo de desnitrificação, no qual bactérias, como a *Pseudomonas* e *Clostridium*, que convertem os nitratos são degradados em nitrogênio gasoso por procariotos desnitrificantes, onde o elemento é devolvido, permitindo a sua reentrada na atmosfera, tornando o processo cíclico [1, 6].

O Ciclo do Nitrogênio por seres procariontes é somente um exemplo das diferentes formas de se fixar o elemento no solo. O Ciclo, como visto, inicia-se com a transformação do N_2 da atmosfera em outros compostos nitrogenados, podendo ser capturado por uma complexa rede de reações químicas, físicas e biológicas. A quantidade de nitrogênio no solo, conforme apresentado na Figura 2, é proveniente da deposição atmosférica, da fixação biológica, dos fertilizantes, amonificação, absorção das plantas, retorno ao solo por meio de urina e fezes, entre outros.

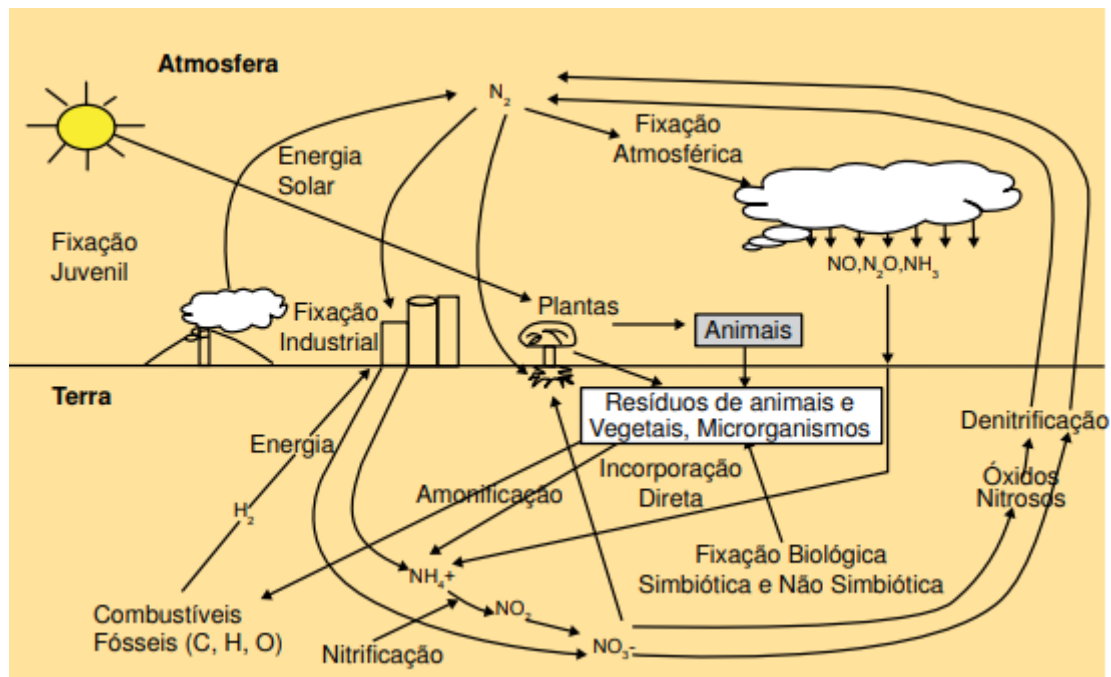


Figura 2- Ciclo do Nitrogênio [9].

A fixação física do nitrogênio ocorre quando faíscas elétricas ou relâmpagos entram em contato com o nitrogênio, o que causa a formação de amônia. A fixação industrial é realizada em fábricas. A fixação biológica ou biofixação, por sua vez, é a fixação de nitrogênio por microrganismos, sendo essa a forma mais comum de fixação do nitrogênio [10]. Após ser reveladas as inúmeras formas de fixação do nitrogênio no solo, iremos abordar sobre a fixação biológica do nitrogênio (FBN) de modo mais detalhado.

Fixação biológica do nitrogênio

A fixação biológica de nitrogênio, conforme comentado brevemente, é uma prática conservacionista, utilizada como alternativa tecnológica para aumentar a produtividade agropecuária e auxiliar na descarbonização do planeta que estuda há muitos anos as interações entre plantas e microrganismos, onde determinadas bactérias são capazes de fixar o nitrogênio atmosférico e torná-lo disponível para o uso pelas plantas. Além dos benefícios ambientais,

a FBN promove uma redução de custos com fertilizantes nitrogenados [11].

Bactérias do gênero *Rhizobium*, conhecidas como bactérias diazotróficas, tem sido exploradas quanto a sua elevada eficácia na fixação de nitrogênio e na inoculação de estirpes, especialmente, em culturas, como soja, feijão-caupi, arroz e cana-de-açúcar [12, 13, 14], Essas bactérias são benéficas às plantas e possuem a capacidade de colonizar as raízes e outros tecidos internos do vegetal e promoverem o crescimento das plantas, onde fixam o N₂ da atmosfera, disponibilizando-o para o vegetal na forma de subprodutos de natureza amoniacal [15].

Na 26^a Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP26), o presidente da Embrapa, Celso Moretti, no dia 3 de novembro de 2021, divulgou o potencial inovador em soluções para produzir de forma sustentável na agricultura do Brasil e minimizar o impacto das mudanças climáticas, apresentando mapas de carbono orgânico do solo e, em paralelo, revelou os resultados positivos obtidos com a FBN. Moretti ainda destacou que “Ao mesmo tempo em que economizamos, na ordem de R\$ 28 bilhões por ano, deixamos de emitir 100 milhões de toneladas de CO₂ equivalente na atmosfera com a fixação biológica de nitrogênio” [16], mostrando, desta forma, o impacto positivo da FBN para a sustentabilidade do planeta e a economia. A atuação da Embrapa em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P,D & I) é uma referência em processos que visam reduzir o impacto da atividade agrícola sobre o meio ambiente e, especificamente sobre FBN, a empresa tem promovido inúmeras soluções tecnológicas para diferentes tipos de culturas desde 1964, sendo uma grande referência brasileira nesse segmento. Para conhecer mais sobre os seus trabalhos ver a referência [16.1].

No Brasil, as culturas mais importantes, como a soja, cana-de-açúcar, milho, café, algodão, arroz e trigo, tanto pela extensão da área que ocupam como pelo alto consumo de fertilizantes (Figura 3) [17], são culturas que podem ser beneficiadas por processos biológicos, como a FBN. Juntas, a estimativa é de que em 2030 a área cultivada com estas culturas ultrapasse 70 milhões de hectares (Mha) e o consumo de fertilizante nitrogenado será superior a 2,5 milhões de toneladas (Mt), com a aplicação da FBN pode ser que se ultrapasse uma economia na ordem de R\$ 30 bilhões anuais [18].

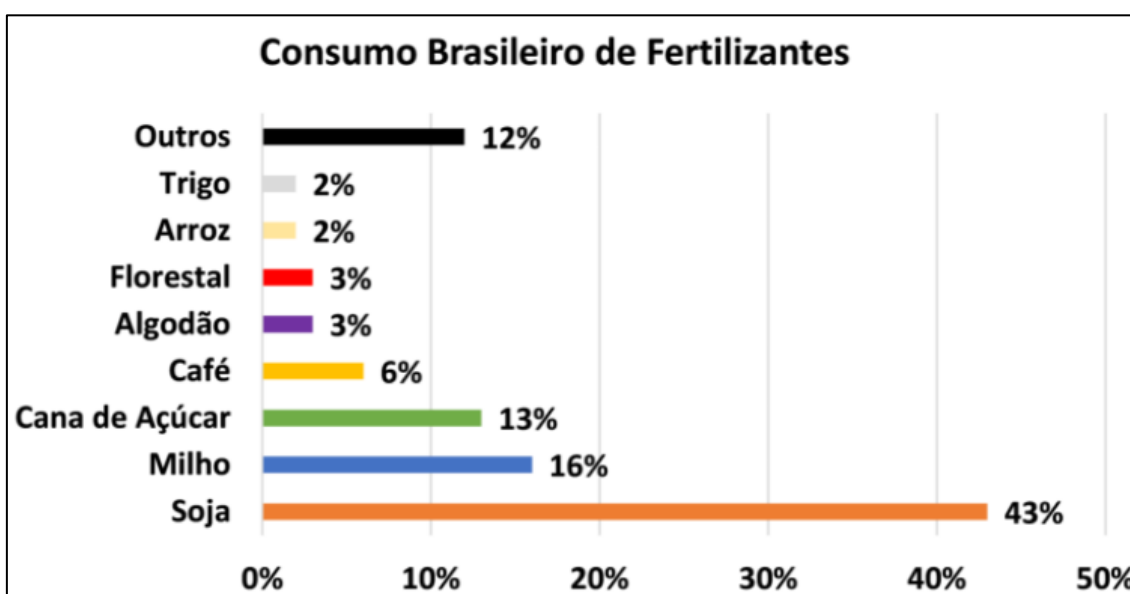


Figura 3- Consumo Brasileiro de Fertilizantes. **Fonte:** Agropós, 2020 [17].

Para culturas de leguminosas, o maior exemplo é a soja, esta interação já é amplamente consolidada e conhecida, gerando uma economia anual de US\$ 8 bilhões de dólares. Contudo, para gramíneas, como a cana-de-açúcar, estudos estão sendo realizados visando o melhor entendimento deste processo [19, 20].

O manejo do nitrogênio na cultura da cana-de-açúcar (Figura 4) é um assunto recorrente, devido ao seu complexo ciclo, além da sua importância para a produção agrícola mundial. Em virtude disso,

novas formas de manejo ou tecnologias, são necessárias para aumentar a eficiência de uso deste nutriente, assim como a sustentabilidade de produção. A inoculação de bactérias diazotróficas em cana-de-açúcar tem mostrado resultados interessantes, principalmente no estímulo ao crescimento radicular, o que tem resultado, em alguns casos, em incrementos de produtividade da cultura [19].



Figura 4- Plantação de cana-de-açúcar [18].

Além disso, um estudo da Embrapa Meio Ambiente (SP) [20], mostrou que a FBN reduziu em até 16% a intensidade das doenças foliares em cana-de-açúcar, forneceu maior ciclagem de nutrientes no solo, promoveu o sequestro de carbono e, conseqüentemente, diminuiu a emissão de gases de efeito estufa. Vale destacar que o sequestro de carbono refere-se a remoção do CO₂ da atmosfera e transformação em O₂, essa técnica é realizada espontaneamente pelas florestas, rios, oceanos e a redução no uso de fertilizantes nitrogenados, auxiliam na captação do CO₂ [20.1].

Alguns pesquisadores [21, 22] tem estudado o uso do molibdênio (Mo) para potencializar a fixação biológica de nitrogênio atmosférico em diferentes culturas. O Mo é um micronutriente

essencial para o crescimento das plantas, principalmente, leguminosas. A importância deste micronutriente deve-se à sua participação como constituinte das enzimas nitrogenase, responsável pela FBN por rizóbios. O efeito da aplicação do Mo aumentou o acúmulo de nitrogênio na biomassa das cultivares, alcançando um percentual de até 20% e no plantio de cana-de-açúcar, aumentou 22% [22].

Diante do exposto, foi possível revelar a essencialidade do estudo de bactérias que promovam a fixação de nitrogênio no solo em diversos tipos de cultivares. Essas pesquisas se destacam pela inovação biotecnológica, por exemplo, nos avanços relacionados à formulação de inoculantes com elevada eficiência, sendo previstas grandes demandas para os próximos anos, incluindo o desenvolvimento de inoculantes múltiplos, seleção de novas estirpes, pesquisas para o avanço no conhecimento básico e geração de tecnologias, como a nanobiotecnologia [18].

Cases de Startups e Investimentos internacionais

Empresários preocupados com a questão energética em função da célere e constante mudança climática mundial, têm investido e incentivado o desenvolvimento de projetos e startups que objetivam propor soluções inovadoras para melhor fixar o nitrogênio no solo.

Um exemplo disso é a startup americana **Pivot Bio**, que recebeu um investimento de US\$ 70 milhões da Breakthrough Energy Ventures, fundo este criado por Bill Gates, Jeff Bezos e outros bilionários, para desenvolver, por meio da engenharia genética, um método em que as bactérias melhorassem sua capacidade de produção de nitratos na cultura de milho, possibilitando aos

agricultores a pulverizarem as bactérias em forma líquida na própria semente [23].

A C&L Biotech de Piracicaba, uma startup brasileira de base biotecnológica que oferece soluções sustentáveis e inovadoras para o setor agrícola. A primeira inovação desenvolvida foi um inoculante contendo bactérias fixadoras de nitrogênio capaz de reduzir em mais de 50% o uso de fertilizantes nitrogenados solúveis na cultura de cana-de-açúcar, gerando economia e sustentabilidade para a cadeia canavieira [24]. Atualmente, desenvolve novas tecnologias para a formulação de inoculantes para as principais culturas agrícolas, contribuindo com a produtividade e a sustentabilidade da agricultura. Piracicaba, cidade do interior paulista que hospeda a renomada escola de agronomia ESALQ, é um celeiro de grandes desenvolvimentos em pesquisa e inovação nessa área [24.1].

A Rizobacter, multinacional em microbiologia agrícola, que desenvolve também inoculantes líquidos para produção agrícola sustentável, se instalou no Brasil em 1998 e, no final de setembro de 2021, anunciou que terá uma nova fábrica em Londrina com investimento de 40 milhões, ampliando a sua capacidade de produção [25].

Em agosto de 2021, a Fast Agro, do grupo brasileiro Nitro, lançou o produto, *Support*, que combina efeitos bioestimulantes e de nutrição adequadas para o tratamento de sementes de soja e feijão. O produto apresenta bactérias fixadoras de nitrogênio e além de ter um ótimo recobrimento e secagem nas sementes, traz comodidade e segurança para que as plantações suportem adversidades do campo e melhorem a produtividade. A Nitro possui uma estrutura robusta em infraestrutura, processos e equipes para a condução de projetos de

Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação. Só em 2020, foram investidos mais de R\$ 20 milhões em projetos de inovação na companhia [26].

Aplicações do Nitrogênio

O foco deste artigo consiste em abordar sobre a relevância da fixação biológica do nitrogênio no solo para promover a descarbonização na agricultura através da redução no impacto ambiental dos processos não conservacionistas aplicados, bem como gerar uma economia expressiva nos custos com fertilizantes. Para conhecer mais sobre a fixação de nitrogênio no solo ver a referência [26.1]. Contudo, é importante ressaltar que a partir da obtenção do nitrogênio atmosférico, no qual é submetido a um processo de separação dos outros componentes do ar, é possível direcioná-lo a uma infinidade de aplicações, destacando a importância deste elemento no cotidiano.

O nitrogênio é um gás inerte adequado para uma ampla gama de aplicações, abrangendo fabricação, processamento, manuseamento e transporte de produtos químicos. Devido às suas propriedades, pode ser usado para proteção de produtos valiosos contra contaminantes nocivos e também permite o armazenamento seguro de compostos inflamáveis [27].

Dois terços do nitrogênio produzido pela indústria são vendidos como o gás e o restante um terço como o líquido [27]. O gás nitrogênio e o nitrogênio líquido são utilizados em inúmeros setores, dentre elas:

- **Indústria alimentar e de bebidas:** preservar, resfriar, refrigerar e congelar alimentos, pressurização de barris de cerveja;

- **Indústria de lâmpadas:** agente de cobertura para separar produtos sensíveis e processos do ar;
- **Sistemas de supressão de incêndio;**
- **Siderurgia / Metalurgia:** fabricação de aço inoxidável;
- **Indústria automotiva e de transporte:** sistema de enchimentos de pneus;
- **Análises químicas:** cromatografia, adsorção multimolecular, termogravimetria;
- **Saúde:** congelar e preservar sangue, tecidos e outros materiais biológico;
- **Petróleo e Gás:** injeção do método de elevação para produção de petróleo e gás natural;
- **Indústria química:** como corantes, nylon, explosivos, fertilizantes, ácido nítrico, entre outros [27, 28, 29]. Vale destacar que a mais importante aplicação comercial do nitrogênio é na obtenção da amônia que é utilizada para a fabricação de fertilizantes e ácido nítrico.

Considerações finais

O nitrogênio é um nutriente essencial para organismos vivos e sua fixação biológica é um processo fundamental para a sustentabilidade agrícola devido ao seu reduzido impacto no ambiente em relação à utilização de fertilizantes sintéticos à base de nitrogênio. Estes fertilizantes produzidos por meio da síntese química da amônia, gera grandes quantidades de dióxido de carbono (CO₂), gás de efeito estufa e, além de serem tóxicos aos humanos e poluírem rios, ainda liberam óxido nitroso (N₂O), gás com potencial de toxicidade 300 vezes maior que o CO₂.

Pesquisas com aplicação a fixação de nitrogênio com bactérias vem apresentando bons resultados em diversos cultivares, pois auxiliam na descarbonização, estimulam o crescimento das raízes e desenvolvimento das plantas, reduzem os custos com fertilizantes e, por ser uma prática conservacionista, mantém a “saúde” do solo, uma vez que a degradação do solo resultante de práticas não conservacionistas pode acarretar prejuízos irreparáveis às propriedades químicas e biológicas.

As pesquisas em FBN remontam muitos anos e atualmente influencia o investimento de empresas e startups que visam atuar no cenário climático (“climate change”) promovendo o desenvolvimento e a difusão de novas rotas tecnológicas que sejam ambientalmente amigáveis, seja no uso da engenharia genética para criar novos gêneros de bactérias ou nas diferentes formas de aplicação das bactérias nas diversas culturas e, até mesmo, na adição de micronutrientes no solo que ampliem a fixação do nitrogênio.

O Parque Tecnológico de Sergipe (SergipeTec) por meio da unidade de produção de inimigos naturais, UPIN, do projeto Estruturante II financiado pela FINEP, irá ampliar suas pesquisas para absorver o tema de fixação biológica de nitrogênio através de parcerias tecnológicas nacionais, sendo este mais um grande passo em contribuição para a sustentabilidade no agronegócio, posicionando-se em prol da sociedade e do meio ambiente.

Referências Bibliográficas

- [1] J. S. Souza, A. F. Martins, L. M. Pedrosa, 2021, 14, 19-24, 20 de novembro de 2021.
<https://bit.ly/3I7LnEZ>
- [2] What is the Nitrogen cycle and why is it key to life?, Frontiers for Your minds, 20 de novembro de 2021.
<https://bit.ly/3xZnH1a>
- [3] Composição do ar, Só Química, 24 de novembro de 2021.
<https://bit.ly/3pqZ3lX>
- [4] Biogeochemical cycles, Concept of Biology, 24 de novembro de 2021.
<https://bit.ly/3okig9J>
- [5] Agricultura de baixa emissão de carbono, 07 de novembro de 2021.
<https://bit.ly/31vJYaJ>
- [6] O ciclo do nitrogênio, Khan Academy, 24 de novembro de 2021
<https://bit.ly/3EtwiM4>
- [7] Diferenças entre célula eucarionte e procarionte, R7 Ensina, 24 de novembro de 2021
<https://bit.ly/3diiUOK>
- [8] Ciclo do nitrogênio, Stoodi, 07 de novembro de 2021.
<https://bit.ly/3rxWfpP>
- [9] Nutrientes vegetais no meio ambiente: ciclos biogeoquímicos, fertilizantes e corretivos, Embrapa Meio Ambiente, 25 de novembro de 2021.
<https://bit.ly/3okaWLi>
- [10] Fixação Biológica de Nitrogênio, Embrapa, 07 de novembro de 2021. <https://bit.ly/3GbS9bb>
- [11] Aplicação de bactérias diazotróficas via sistema de irrigação para fixação biológica de nitrogênio na cana-de-açúcar, Energia na Agricultura, 20 de novembro de 2021.
<https://bit.ly/3DlayjS>

- [12] A. M. M. Almeida, P. F. M. Filho, K. G. V. Garcia, V. F. F. Gomes, C. L. Almeida, 2018, 13, 1, 16-21, 20 de novembro de 2021.
<https://bit.ly/3E5gpLo>
- [13] M. L. T. Mattos, W. B. Scivittaro, R. A. Valgas, I. S. Melo, M. Hungria, 2020, 210, ISSN 1516-8832, 20 de novembro de 2021.
<https://bit.ly/2ZCc1EC>
- [14] W. L. Simões, A. R. Oliveira, V. M. Reis, W. Pereira, J. A. Lima, 2018, 33, 1, 45-51, 20 de novembro de 2021.
<https://bit.ly/3doZe1P>
- [15] A. A. Rodrigues, M. V. Forzani, R. S. Soares, S. T. Sibov, J. D. G. Vieira, 2016, 183, 92-99, 20 de novembro de 2021.
<https://bit.ly/3pd5zwK>
- [16] Embrapa apresenta soluções para agricultura sustentável na COP26, Embrapa, 29 de novembro de 2021.
<https://bit.ly/3olaNaD>
- [16.1] Soluções tecnológicas na Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN), Embrapa, 04 de dezembro de 2021.
<https://bit.ly/3lzmDfe>
- [17] O que são fertilizantes? Saiba a Importância para a Agricultura, Agropós, 30 de novembro de 2021.
<https://bit.ly/3rxfQqg>
- [18] Fixação biológica de nitrogênio, Embrapa, 29 de novembro de 2021.
<https://bit.ly/3Dn2tvh>
- [19] A fixação biológica de nitrogênio em cana-de-açúcar, Agroadvance, 27 de novembro de 2021.
<https://bit.ly/3prYbNV>
- [20] Fixação biológica de nitrogênio reduz em até 16% doenças foliares da cana-de-açúcar, 27 de novembro de 2021.
<https://bit.ly/3IglECY>
- [20.1] Brasil faz 1º embarque de café carbono neutro, produtor recebe prêmio em dobro, Forbes, 4 de dezembro de 2021.
<https://bit.ly/2ZTQE1T>

[21] Bactérias fixadoras de nitrogênio e molibdênio no cultivo do amendoim em solo do cerrado, Revista Agricultura Neotropical, 27 de novembro de 2021.

<https://bit.ly/3ry8RgX>

[22] Changes in biological nitrogen fixation and natural-abundance N isotopes of sugarcane under molybdenum fertilization, Sugar Tech, 27 de novembro de 2021.

<https://bit.ly/3psaIku>

[23] Startup que usa bactérias para fertilizar o solo recebe US\$ 70 milhões de fundo de Bill Gates e Jeff Bezos, Época Negócios, 03 de dezembro de 2021.

<https://glo.bo/3dfiR6e>

[24] C&L Biotech, 03 de dezembro de 2021.

<https://bit.ly/3pmvbqV>

[24.1] Especial do Globo Rural: Vale do Piracicaba é polo de empresas inovadoras do agronegócio, G1, 30.mai.2021

<https://glo.bo/3yMmmut>

[25] Rizobacter terá nova fábrica em Londrina com investimento de R\$ 40 milhões, Rizobacter, 03 de dezembro de 2021.

<https://bit.ly/31sh37g>

[26] Fast Agro lança bioestimulante vegetal e amplia o portfólio de fertilizantes para o produtor, Jornal dia-a-dia, 03 de dezembro de 2021.

<https://bit.ly/3ppmZGr>

[26.1] Nitrogen Fixation, Wikipedia

<https://bit.ly/3IciAiG>

[27] Usos e aplicações do Nitrogênio, Omega Air, 30 de novembro de 2021.

<https://bit.ly/3oiCVen>

[28] Nitrogênio, White Martins, 30 de novembro de 2021.

<https://bit.ly/3xPnmOu>

[29] Nitrogênio – gases industriais, Air Liquide, 30 de novembro de 2021.

<https://bit.ly/3ptkiE1>

[*] SAMIA TÁSSIA ANDRADE MACIEL, Doutora em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos (UFRJ.2020), Mestra (UFS.2015) e Bacharela em Engenharia Química (UFS.2013). Atualmente é Pesquisadora do Núcleo de Energias Renováveis e Eficiência Energética de Sergipe (SergipeTec) e Professora Substituta do Curso de Petróleo e Gás do Instituto Federal de Sergipe (IFS). Tem ampla experiência em projetos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, financiados por diferentes agências de fomento (CAPES, CNPq, FINEP, FAPITEC/SE), atuando em energias renováveis com ênfase em energia da biomassa para produção de hidrocarbonetos renováveis e bioprodutos, aplicada, principalmente, as técnicas de pirólise, catálise, hidrotratamento e caracterização de compostos orgânicos em misturas complexas.