



Fixação biológica de nitrogênio na produção sustentável de forragem

Biological nitrogen fixation in sustainable forage production

Jaisson dos Santos Branco^{1*}
Paulo Prates Júnior¹

¹ Instituto Federal de Rondônia,
78960-000, Ariquemes, Brasil.

* Autor Correspondente:
jaissonbranco20@gmail.com

Palavras-chave:

Nitrogenase
Bactérias diazotróficas
BNF
Sustentabilidade.

Keywords:

Nitrogenase
Diazotrophic bacteria
FBN
Sustainability

Histórico do artigo:

Recebido: 02/12/2021
Aceito: 13/06/2022

RESUMO: A presente revisão aborda a Fixação biológica de nitrogênio (FBN) na produção de forragem, e como esse processo natural pode ser um aliado na melhoria de sistemas de pastagens, evitando a estagnação devido a perda da fertilidade do solo, decorrente do manejo extrativista inadequado em muitas áreas. No Brasil, a criação extensiva do gado é apontada como uma das principais causas de ocupação, modificação e uso de terras, com a maioria das pastagens sendo constituídas pela cultivar *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, com áreas somadas em 80%, em pleno processo de degradação. Uma das alternativas para recuperação da fertilidade do solo e produtividade das forragens é a aplicação de fertilizantes químicos como a ureia $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, que sofre grandes perdas resultantes das atividades de alguns microrganismos presentes no solo. Entretanto, a exploração das relações de interação entre plantas e bactérias fixadoras de nitrogênio se mostra como uma alternativa economicamente viável e sustentável capaz de suprir cerca de 17% da necessidade de N requerida pelas gramíneas, colaborando com a manutenção da capacidade produtiva das pastagens.

ABSTRACT: This review addresses biological nitrogen fixation (BNF) in forage production, and how this natural process can be an ally in the improvement of pasture systems, avoiding their stagnation due to the non-maintenance of soil fertility, resulting in inadequate extractive management in many areas. In Brazil, extensive cattle raising is identified as one of the main causes of occupation, modification and land use, with most pastures being constituted by the cultivar *Brachiaria Brizantha* cv. marandu, with areas totaling 80% in full degradation process. One of the alternatives for soil fertility recovery and fodder productivity is the application of chemical fertilizers such as urea $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, which suffers great losses resulting from the activities of some microorganisms present in the soil. However, the exploration of the interaction relationships between plants and nitrogen-fixing bacteria is shown as an economically viable and sustainable alternative capable of supplying about 17% of the n need required by grasses, helping to maintain the productive capacity of the pastures.

1. INTRODUÇÃO

A busca pela maximização da produção dentro do sistema de produção agropecuário tem levado ao uso insustentável dos recursos naturais, com alterações nos ciclos biogeoquímico, degradação do solo e desmatamento de novas áreas, visto o uso excessivo do solo e de outros bens naturais em seus processos produtivos (SAMBUICHI et al., 2012). Além disso, o manejo adotado para atingir altas produtividades no contexto da agropecuária podem afetar de forma negativa as interações existentes entre os componentes dos agroecossistemas, incluindo plantas, solo e os organismos que nele habitam (HANISCH et al., 2017).

O Brasil conta hoje com aproximadamente 21% de seu território - cerca de 168 milhões de hectares - ocupadas pela atividade pecuária, 6.089.262 hectares de pastagem somente no estado de Rondônia (MAPA, 2020; IBGE, 2021), das quais mais de 50% encontra sob forte estágio de degradação, 30% em estágio moderado e apenas 20% em bom estado de conservação, afetando diretamente a produção de gado e tornando a atividade cada vez mais insustentável (DIAS-FILHO, 2017).

Nas últimas décadas, o aumento na conscientização acerca das questões ambientais tem levado a mudanças no paradigma de produção animal a pasto no Brasil, fazendo com que cada vez mais produtores busquem a eficiência e a sustentabilidade na forma de produzir, sem ser necessário abrir novas áreas (DIAS-FILHO, 2011).

Vieira Filho (2016) destaca que a melhoria do desempenho animal na pecuária, está correlacionado à melhoria genética, nutrição balanceada assim como à qualidade das pastagens, na qual a taxa de lotação está associada à fertilidade do solo, refletindo assim os custos de oportunidade, tais como o preço da carne e a competição com a produção de alimentos.

Os agroecossistemas em questão, formados pela transformação de ecossistemas naturais em pastagens, são responsáveis pelas maiores mudanças de uso e cobertura de terras no Brasil. A produtividade desses agroecossistemas está baseada na interferência humana, caracterizado muitas vezes pelo uso ineficiente de recursos, decorrente de práticas convencionais de produção que afetam toda a microbiota do solo (SILVA JUNIOR; GUIMARÃES, 2013).

Dentre as práticas de manejo capazes de proporcionar maior eficiência do sistema de produção está a fixação biológica de nitrogênio (FBN), realizada por bactérias diazotróficas. Essas bactérias são habitantes naturais dos solos e podem suprir até 100% a necessidade de nitrogênio da planta através de relações mutualistas nodulíferas, a exemplo da soja, ou associativas estabelecidas com gramíneas, contribuindo com 17% do N, entre a bactéria e a planta hospedeira (EMBRAPA, 2019). Tal processo ocorre porque esses microrganismos possuem a enzima nitrôgenase, caracterizada como um complexo enzimático responsável pela quebra da ligação tripla do N₂, usando energia celular na forma de adenosina trifosfato (ATP), reduzindo o N₂ atmosférico a NH₃⁺ assimilável pelas plantas (REIS; TEIXEIRA, 2006).

Destaca-se que a atividade dos microrganismos que habitam a rizosfera afeta diretamente os atributos químicos e físicos do solo através da ciclagem de nutrientes, tendo influência tanto na transformação da matéria orgânica, quanto na estocagem de carbono e nutrientes. Nesse contexto, a presente revisão buscou destacar a interação e a contribuição da FBN em sistemas de produção agropecuária, cuja exploração pode levar a sistemas de produção mais sustentáveis.

2. AGROPECUÁRIA E A PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL

A agricultura itinerante praticada pelo agronegócio em solos amazônicos tem sido responsável por promover várias modificações em suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Nesse sistema de manejo empregado, o sistema natural é modificado e abandonado logo após a queda de produtividade decorrente da contínua retirada de nutrientes e ausência de correção e fertilidade do solo (MAGALHÃES et al., 2013). Entretanto, no setor agropecuário, a preocupação com o meio ambiente tem levantado questionamentos acerca do modo de produção, que apesar dos aumentos de produtividade obtidos, vem apresentando problemas associados à degradação da capacidade produtiva dos solos e a contaminação dos alimentos, além de contribuir negativamente com as mudanças climáticas a partir da emissão de gases do efeito estufa (GEE), evidenciando a fragilidade dos sistemas de produção agrícola modernos (ESPINDOLA; GUERRA; ALMEIDA,

2005), cada vez mais dependentes das adubações químicas.

Na Amazônia, a extensa área cultivada e a predominância de clima tropical na maior parte do ano são características favoráveis à sobrevivência e multiplicação de pragas, mesmo no inverno. Tais fatores colocam o Brasil como um dos principais usuários de agroquímicos no mundo, utilizados na tentativa de conter seus avanços na lavoura. Por exemplo, estudos realizados pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) em 2011 indicou que um terço dos alimentos consumidos cotidianamente pelos brasileiros contém algum nível de contaminação por agroquímicos (EMBRAPA, 2021).

A aplicação de fertilizantes minerais para suprir as necessidades nutricionais da planta é prática comum entre os produtores, o que eleva o custo da produção e pode acarretar prejuízos ao produtor e ao meio ambiente, caso ocorra uso ineficiente da água em sistemas de fertirrigação ou uso inadequado de defensivos químicos considerados altamente tóxicos.

Contudo, o setor pecuário se destaca perante os demais devido à vasta extensão de áreas ocupadas por pastagens nativas e plantadas (aproximadamente 200 milhões de ha), dos quais cerca de 70% se encontram sob algum estágio de degradação, reduzindo significativamente o potencial produtivo da pecuária nacional (DIAS-FILHO, 2011; EMBRAPA, 2017; FABRICE et al., 2015; UFG, 2021), com baixa capacidade de sequestro de carbono no solo e ineficiência das adubações nitrogenadas.

Nesse sentido, a exploração da FBN é uma alternativa tecnológica surgida a partir das pesquisas para adaptação de espécies cultivadas às condições tropicais, capaz de aumentar a produtividade agropecuária e minimizar a emissão dos gases de efeito estufa (GEE); contribuir para atenuar os efeitos das mudanças climáticas, tornando a produção mais sustentável econômica e ecologicamente (GOVERNO FEDERAL, 2021).

Essa é uma alternativa mais sustentável para a substituição do uso de fertilizantes nitrogenados, considerando os custos e as condicionantes ambientais. Em um processo natural de interação planta/bactéria, o processo torna nitrogênio inorgânico presente no ar atmosférico em nitrogênio orgânico que será assimilado pelas plantas. Esse processo biológico mediado por procaríotos

(bactérias e arqueias) ocorre porque possuem um complexo enzimático denominado nitrogenase, no qual ocorre a transformação do nitrogênio do ar (N_2), forma quimicamente estável do nitrogênio (N), em estruturas assimiláveis por outros organismos, especialmente os vegetais (EMBRAPA, 2003).

A fixação biológica de nitrogênio é realizada naturalmente por alguns grupos específicos de bactérias e arqueias, sendo elas de vida livre (sem relações simbióticas) e endofíticas mutualistas obrigatórias ou facultativas (simbiose), que existem naturalmente no solo. No entanto, para favorecer o processo da FBN, é comum a prática da inoculação das sementes pré-plantio com o uso de inoculantes comerciais, produto que contém grande quantidade de bactérias benéficas e intensifica o processo natural da fixação biológica de nitrogênio (FBN). Isso aumenta a interação das bactérias fixadoras de nitrogênio com as plantas (EMBRAPA, 2017).

As bactérias fixadoras de nitrogênio que estabelecem relação simbiótica com as plantas leguminosas (Fabaceae), instalam-se nos pelos radiculares e multiplicam-se rapidamente, formando nódulos resultantes da íntima interação entre bactéria/planta, o que possibilita converter o nitrogênio atmosférico (N_2) em amônia (NH_3), que é dividido com a planta hospedeira, que o utiliza para seu desenvolvimento (GOYAL; SCHIMIDT; HYNES, 2021).

Cabe destacar que Agroecossistemas exigem um eficiente manejo da cobertura vegetal e ciclagem de nutrientes, uma vez que a vegetação determina em grande parte o estabelecimento das comunidades biológicas do solo (CORREIA; OLIVEIRA, 2006). Os agroecossistemas em comparação ao ambientes naturais têm redução acentuada no aporte de biomassa ocasionado pela transformação antrópica da área e implantação de culturas mais exigentes em nutrientes que as florestais.

Nesse contexto, microrganismo existentes no solo associados às plantas são uma ferramenta indispensável para potencializar os processos naturais de agroecossistemas. Além de atuarem como promotores do crescimento vegetal, são capazes de capturar e degradar moléculas danosas às plantas assim como protegê-las de compostos fitotóxicos por mecanismos de

degradação enzimática, promovendo a eficiente ciclagem de nutrientes (EMBRAPA, 2003).

O sistema integrado lavoura-pecuária-floresta (ILPF), assim como o sistema de plantio direto, por exemplo, são apontados por Balbino et al. (2011) como alternativas de produção sustentável que, por intermédio da integração de atividades agrícolas, pecuárias e florestais, obtém efeitos sinérgicos entre os componentes dos ambientes produtivos, promovendo a recuperação do solo e da capacidade produtiva da pastagem.

Mesmo com a grande quantidade de informações acerca dos problemas gerados por pastagens degradadas, muitos produtores ainda não adequaram seu sistema produtivo à tal realidade, uma vez que pecuaristas tradicionais acreditam que a pecuária extrativista é mais viável, pois envolve menos riscos econômicos por necessitar pouco investimento financeiro e técnico (VERDI, 2018), problema agravado se considerarmos a falta de assistência técnica estadual aos agropecuaristas de Rondônia.

3. CENÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO FORRAGEIRA

O Brasil detém o segundo maior rebanho bovino do mundo. Um efetivo de 218,2 milhões de cabeças, faz do país o maior exportador da proteína (IBGE, 2020a), e vetor crucial do desenvolvimento econômico, responsável por 8,6 % do PIB nacional (CNA, 2020).

De acordo com dados publicados no Anuário Leite da Embrapa (2021) e da Sociedade Nacional de Agricultura SNA (2020), o Brasil se destaca como o 5º maior produtor de leite do mundo, com produção de aproximadamente 34 bilhões de litros/ano, em um sistema de criação de bovino quase que exclusivamente a pasto. A alta recente dos custos de produção tendem a eliminar do mercado os produtores menos eficientes. Neste cenário, o uso adequado de forrageiras pode significar a permanência dos produtores leiteiros na atividade.

As áreas de pastagens constituem a maior classe de uso e cobertura de terras do Brasil, o que contribui para a seguridade da posição do país como grande produtor e maior exportador de carne bovina, responsável por 8,5% do Produto Interno Bruto (PIB) (ABIEC, 2020).

Uma particularidade da pecuária brasileira está no sistema de produção do rebanho, em que

cerca de 95% são criados exclusivamente a pasto (EMBRAPA, 2020). Para garantir a longevidade produtiva, este sistema depende de um eficiente manejo nutricional do solo, cuja ausência ocasiona a perda de vigor e produtividade das forrageiras.

Segundo Dias-Filho (2014), fatores como a possibilidade da produção extensiva, baixo investimento em tecnologia e mão de obra, e a capacidade do gado em se autotransportar sem que haja a necessidade de estradas, fazem da pecuária desenvolvida a pasto atividade pioneira na ocupação da terra, sendo a forma menos onerosa e mais eficiente para ocupar e assegurar a posse de grandes extensões de terra.

Tais características permitem à atividade pecuária certas vantagens como a possibilidade de se obter retorno econômico mesmo com pouco investimento e produzindo com baixa eficiência. Porém, do ponto de vista ambiental, esses aspectos contribuem para o desenvolvimento de sistemas de manejo nos quais o baixo investimento tanto em tecnologia como em insumos para manutenção produtiva da pastagem, sejam fatores contribuintes no elevado número de pastagens degradadas e pela estigmatização da pecuária desenvolvida a pasto no país.

O manejo inadequado em áreas sob atividades pecuárias e a histórica cultura extrativista adotada pelos pecuaristas têm sido apontados como principais responsáveis pelo pouco investimento na produção forrageira, resultando no declínio da fertilidade do solo e capacidade de suporte das pastagens devido insuficiente aporte de nutrientes e baixo grau de matéria orgânica presente no solo, levando a degradação dessas áreas e, consequentemente, do próprio solo (VOGEL; MARTINKOSKI; RUZICKI, 2014).

Em termos globais, uma das principais causas de degradação de é o manejo inadequado, em particular o uso sistemático de taxas de lotação que afetam a capacidade do pasto de se recuperar do pastejo e do pisoteio causados pela elevada lotação nas áreas, o que no Brasil é agravado pela ausência de adubações periódicas, falhas no estabelecimento da pastagem e problemas bióticos, como o ataque de insetos-praga, a exemplo da cigarrinha das pastagens (*Deois flavopicta*) (FAO, 2009; DIAS-FILHO, 2011).

Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura FAO (2009), a

produção de gado está colocando pressões crescentes sobre os recursos naturais face às mudanças climas, afetando a biodiversidade e o ecossistema como um todo. De acordo com a FAO, o setor pode ter um papel fundamental na mitigação das mudanças climáticas através da redução das emissões de gases de efeito estufa, o que pode ser incentivado pela adoção de melhores tecnologias, estimuladas por incentivos econômicos apropriados aos pecuaristas.

As pastagens assumem papel de grande importância em relação à estocagem de carbono no solo, que é o maior reservatório de carbono orgânico terrestre, contendo aproximadamente quatro vezes mais o teor de carbono presente na biomassa da comunidade vegetal e na atmosfera, atuando como fonte ou depósito de CO₂ atmosférico (ASSEFA et al., 2017; SOUZA et al., 2018).

Araújo et al. (2011) destacam que os estoques de C no solo tendem a decrescer nos primeiros anos de implantação da pastagem, e aumentar nos anos seguintes, até atingir valores próximos ou superiores aos existentes antes da conversão da área.

A conversão da floresta em pastagens com *Brachiaria brizantha* no bioma amazônico aumentou significativamente os estoques de carbono no solo, o que pode ser explicado pela contribuição do sistema radicular das gramíneas forrageiras e do maior aporte de matéria orgânica, tanto em superfície quanto em profundidade, aliados à rápida mineralização do C biodegradável proveniente da floresta e de fatores que influenciam a taxa de mineralização do carbono orgânico que está relacionado à atividade biológica do solo (ARAÚJO et al., 2011; SOUZA et al., 2018).

Dias-Filho (2011), destaca que, a adoção de práticas preventivas para a degradação, como a adubação, é fator essencial para recuperação da produtividade dessas áreas sob estágios de degradação, refletindo ainda na redução dos custos, redução de riscos por pragas, aumento na eficiência da mão de obra aplicada, eficiência no uso dos recursos de produção, otimizando o uso do solo que sofre com as práticas inadequadas de manejo.

Estudos conduzidos por Souza et al. (2009) avaliando três níveis de intensidade de pastejo (10, 20 e 40 cm), demonstraram que as adições de C e N, variam em função da intensidade do

pastejo e com o tempo, no qual as maiores intensidades de pastejo tenderam a maiores acúmulos de C nos primeiros anos. No entanto o quadro se inverte com a maior intensidade de pastejo no decorrer do tempo, verificando queda no estoque de C e redução da qualidade da MOS nos tratamentos com altura de (10 cm), que podem ser provenientes da ausência da correção da fertilidade do solo.

O desenvolvimento e exploração da pecuária de forma eficiente depende diretamente do fornecimento de nutrientes, especialmente o nitrogênio. O elemento é indispensável no sistema fotossintético das plantas, e altamente requerido pelas gramíneas forrageiras, compondo aminoácidos e proteínas, garantindo o rendimento nas áreas de pastagens (SANTOS, 2018; CASSIMIRO, 2020). Porém, apesar de estar em abundância na atmosfera, O N não pode ser assimilado diretamente pelas plantas, o que leva ao uso de sua forma sintetizada quimicamente, cuja dependência contribui para a insustentabilidade do agroecossistema, mas quando não aplicado, pode reduzir significativamente o potencial produtivo da pecuária nacional (UFG, 2021; DIAS-FILHO, 2011; FABRICE et al., 2015).

Apesar de a falta de nitrogênio ser limitante ao desenvolvimento das plantas, sua aplicação na forma de compostos químicos pode trazer prejuízos tanto ao produtor, devido ao auto custo, quanto ao meio ambiente, causando a eutrofização de ecossistemas aquáticos e poluição atmosférica. Nesse contexto, práticas de manejo que possibilite o aproveitamento de N₂ atmosférico por microrganismos diazotróficos se mostra como caminho para chegar a sistemas de produção mais sustentáveis e equilibrados ecologicamente (SAMPAIO, 2020).

Assim, áreas sob cultivo de pastagens ou culturas anuais, quando bem manejadas, proporcionam uma maior cobertura vegetal do solo e favorece o aproveitamento da água presente no solo pelas raízes das plantas, e maior absorção de nutrientes.

4. BACTÉRIAS FIXADORAS DE NITROGÊNIO

O nitrogênio está presente na composição das mais importantes biomoléculas, tais como ATP, NADH, NADPH, clorofila, proteínas e inúmeras enzimas diretamente relacionadas à manutenção

da produtividade, com efeito no valor nutricional das forragens (BREDEMEIER; MUNDSTOCK, 2000).

Entretanto, sua eficiência pode ser reduzida diante da dificuldade de incorporação do fertilizante ao solo, ocasionando perdas do elemento por volatilização da amônia $N-NH_3$, emissão de N_2 ou lixiviação do NO_3^- , resultando em prejuízos devido ao alto custo dos fertilizantes nitrogenados, além de impactos negativos ao meio ambiente e a saúde humana, evidenciados pelo alto teor de nitrato (NO_3^-) encontrado em corpos d'água (SAMPAIO, 2020; BARBOSA; CONSALTER; VARGAS, 2012).

Apesar da grande importância do nitrogênio na produção das pastagens, as fertilizações nitrogenadas tendem a elevar os custos de implantação e manutenção das mesmas. Diante de tal condição, um fator importante a ser considerado refere-se ao aproveitamento do nitrogênio disponibilizado por bactérias diazotróficas em associação às espécies de *Brachiaria* através da FBN, processo pelo qual esses microorganismos convertem o N_2 atmosférico em formas de N assimiláveis pelas plantas (GUIMARÃES et al., 2011).

A introdução do N_2 atmosférico, via FBN, no circuito dos ciclos biogeoquímicos do nitrogênio tem efeitos positivos no ambiente e na economia, reduzindo as doses de aplicação nas lavouras, favorecendo um ecossistema em equilíbrio.

As bactérias fixadoras de nitrogênio podem ser divididas em três grupos, sendo eles: de vida livre que fixam o nitrogênio para uso próprio; as associativas, que contribuem com o desenvolvimento da planta sem que haja a necessidade de infecção (simbiose); e as simbióticas, que interagem mais intimamente com a planta, formando estruturas denominadas nódulos (REIS; BALDANI; BALDANI, 2006).

Atualmente, destacam-se no meio de produção os grupos das bactérias associativas (endofíticas obrigatórias ou facultativas) e as simbióticas.

5. BACTÉRIAS ASSOSSIATIVAS, ENDOFÍTICAS E SIMBIÓTICAS

As bactérias são habitantes comuns da superfície e do interior da maioria dos vegetais. Quando habitam o interior da planta hospedeira

são chamadas de endofíticas, podendo ser obrigatórias ou facultativas, a depender do seu grau de interação com a planta.

As bactérias endofíticas residem nos tecidos internos das plantas em pelo menos uma etapa do seu ciclo de vida, sem causar danos à planta. São representadas por uma grande diversidade bacteriana com representantes Gram positivas e Gram negativas dos filos Alfa, Beta e Gama Proteobacteria, Actinobacteria, Firmicutes e Bacteroidete, e em geral se originam de comunidades bacterianas das raízes e são abrigadas na maioria das plantas vasculares (BACON; HINTON, 2007).

A FBN é realizada por procariotos que possuem a enzima nitrogenase, capaz de romper a tripla ligação do N_2 e reduzi-lo à amônia, em forma assimilável pela planta, o que representa economia quando se trata de termos agrícolas.

As bactérias associativas podem ser divididas em dois grupos de acordo com suas especificidades e grau de relação com a planta, sendo elas endofíticas facultativas, quando colonizam tanto a rizosfera quando o interior das raízes, e endofíticas obrigatórias, quando habitam o interior das raízes e nichos mais específicos da planta, onde passam a fixar o N_2 atmosférico através do processo da FBN e compartilha-lo com a planta (REIS; BALDANI; BALDANI, 2006).

As interações endófitos/plantas ainda não são muito bem compreendidas, mas de acordo com Rodrigues (2009) podem ser simbióticas, neutras ou antagônicas.

5.1 BACTERIAS ENDOFÍTICAS FACULTATIVAS

Bactérias endofíticas são encontradas naturalmente na endorrizosfera, região do tecido epidermal e cortical da rizosfera que abriga a maior parte dos microrganismos simbióticos e dos patógenos.

Azevedo e Araújo (2007), definem endofíticos, como todo microrganismo cultivado ou não, que colonizam o interior da planta hospedeira, habitando em geral suas partes aéreas, sem causar danos aparentes e nem formar estruturas externas visíveis, penetrando e colonizando a planta por estômatos e ferimentos.

O grupo das bactérias associativas é composto por diversos gêneros entre eles *Azotobacter*, *Bei-*

jerinckia, *Derxia*, *Herbaspirillum*, *Burkholderia*, *Gluconacetobacter* e *Azospirillum*, entre outros, capazes de realizar a fixação biológica.

Na associação não simbiótica não há penetração da bactéria nas células das raízes, nem formação de nódulos, mas ocorre colonização da rizosfera por esses microrganismos, onde a promoção do crescimento vegetal, em especial do sistema radicular, tem sido apontado como uma das vantagens dessa associação, principalmente com bactérias do gênero *Azospirillum*.

Apesar de a relação rizóbio-leguminosa ser a mais explorada devido a sua maior contribuição em termos de fixação biológica, estudos realizados por Döbereiner e Day (1975) demonstraram a capacidade de haver FBN em um gênero de bactérias denominadas posteriormente de *Azospirillum*, um diazotrófico capaz de associar-se com gramíneas. Apesar de a fixação não ser tão significativa quanta a simbiótica, é capaz de suprir em média cerca de 17 % das demandas de N das culturas produtoras de grãos como arroz, milho e trigo, e apesar de baixa, tal quantidade representa uma grande economia em termos de custos de produção (MOREIRA et al., 2010).

A descoberta do potencial de *Azospirillum* na FBN despertou o interesse de cientistas do mundo todo em estudar a associação entre gramíneas e bactérias diazotróficas, fazendo desse gênero composto basicamente por endofíticos associativos o grupo mais estudado. As bactérias deste gênero associam-se às raízes de diversas plantas de importância agrícola como o trigo, milho, sorgo, arroz e também braquiárias.

Ao contrário da relação simbiótica, bactérias associativas excretam apenas parte do nitrogênio fixado diretamente para planta, suprimindo parcialmente suas necessidades.

O gênero *Azospirillum* abrange as chamadas bactérias promotoras do crescimento de plantas (BPCP) e é constituído de microrganismos procariotos, denominados Eubacteria ou bactérias verdadeiras, e possui atualmente 14 espécies identificadas: *A. lipoferum*, *A. brasilense*, *A. amazonense*, *A. halopraeferens*, *A. irakense*, *A. largomobile*, *A. doebereineriae*, *A. oryzae*, *A. melinis*, *A. canadense*, *A. zae*, *A. rugosum*, *A. picis* e *A. thiophilum* (EMBRAPA, 2010).

A grande maioria das espécies do gênero *Azospirillum* são encontradas colonizando a zona

de alongação das raízes e pelos radiculares, porém, algumas estirpes são encontradas habitando nichos internos mais específicos na planta, dando a elas a característica de serem endofíticas facultativas (CARDOSO, 2008).

Os efeitos benéficos da associação entre *Azospirillum* com as plantas podem ser caracterizados como: estímulo ao aumento dos pelos absorventes radiculares, gerando o crescimento da área de contato das raízes e aumentando a absorção de nutrientes; produção de nitritos; além da produção de hormônios vegetais reguladores das atividades das plantas, como giberelinas, citocininas e auxinas, envolvidos em vários estágios de crescimento e desenvolvimento das plantas, como alongamento e divisão celular, diferenciação tecidual e dominância apical (AMARAL et al., 2017).

5.2 BACTÉRIAS ENDOFÍTICAS OBRIGATÓRIAS

Além da parte aérea, microrganismos endofíticos podem ser encontrados também habitando as raízes da planta, sua principal porta de entrada. A distinção entre endofíticos que habitam as raízes das plantas e microrganismos epifíticos ou endofíticos que vivem em simbiose ocorre pela separação das fixadoras de N₂ das formadoras de nódulos, que constituem um grupo mais amplamente estudado.

Entre o grupo das endofíticas obrigatórias está a bactéria *Herbaspirillum seropedicae*, uma diazotrófica endofítica obrigatória que foi isolada da rizosfera e superfície de plantas como milho, arroz e sorgo, sendo posteriormente descrita colonizando também bananeira e abacaxizeiro (LOPES, 2019). Evidências mostram que plantas de arroz inoculadas com *H. seropedicae* apresentaram aumentos no peso seco (22 % a 50 %), conteúdo total de carbono (15 % a 50 %) e no conteúdo total de nitrogênio (29 % a 85 %) em 30 dias, mostrando que esse organismo endofítico se apresenta como um potencial biofertilizante (GYANESHWAR et al., 2002).

Os endofíticos são capazes de colonizar a planta de forma sistêmica ou localizada, assim como os fungos, habitando ativamente o apoplasto, que é a via de comunicação da planta com o ambiente, vasos condutores, e também vias intracelulares. E assim, por ocuparem os mesmos nichos que fitopatógenos, esses microrganismos

são vistos como importantes agentes no controle biológico de doenças, agindo diretamente sobre o patógeno (FERREIRA, 2008).

Por serem capazes de colonizar os tecidos internos das plantas, os endofíticos detêm certas vantagens sobre outros microrganismos por poderem sobreviver em um ambiente mais uniforme, em que são menos afetados por fatores biótico e abióticos.

Os estudos relacionados ao potencial das bactérias endofíticas obrigatórias ou associativas no cenário agrícola tem visões focadas na fixação de nitrogênio, solubilização de fosfatos e controle biológico de doenças e insetos praga, destacando-se como potenciais controladores biológicos, além de promover o crescimento vegetal (FERREIRA, 2008; ANDRADE et al., 2014).

5.3 BACTÉRIAS SIMBIÓTICAS

A capacidade de fixar nitrogênio simbioticamente é encontrada em vários grupos de microrganismos e, em alguns casos, observa-se a formação de estruturas diferenciadas, como as formadas pelos rizóbios devido à alta sensibilidade ao O₂ que tem esses microrganismos (FAGAN et al., 2007).

Na agricultura, a maior contribuição do processo de fixação biológica do N₂ ocorre pela associação simbiótica de plantas da família Leguminosae (Fabaceae) com bactérias pertencentes a diversos gêneros e que são denominadas de modo popular e coletivo como rizóbios (EMBRAPA, 2011), que realizam associações simbióticas com a planta, facilmente identificadas através da formação de nódulos nas raízes, no quais a amônia é sintetizada e incorporada a íons H⁺ que estão em abundância nas células bacterianas, formando amônio NH₄, posteriormente disponibilizado para a planta hospedeira.

Na associação simbiótica, a fixação biológica do N₂ ocorre principalmente com bactérias do gênero *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Bradyrhizobium japonicum* e *Bradyrhizobium elkanii* (HUNGRIA, CAMPO e MENDES, 2007).

As bactérias pertencentes ao gênero *Rhizobium* são aeróbicas, gram negativas, usualmente produzem poli-b-hidroxibutirato, são móveis, e sua temperatura ótima de crescimento está entre 25-30 °C, com faixa ótima de pH entre 6-7, porém, valores ideais de temperatura e pH

podem variar de acordo com as estirpes. São quimiorganotróficas, utilizando uma série de carboidratos e sais de ácidos orgânicos como fontes de carbono, sem a formação de gás (MARIM et al., 1999).

Nas interações simbióticas, os microrganismos produzem ou induzem a produção de metabólitos primários e secundários que podem conferir diversas vantagens às plantas, tais como: a diminuição da herbívoros e do ataque de insetos, o aumento da tolerância a estresses abióticos e o controle de fitopatógenos por meio de competição ou produção de compostos antagônicos, sendo uma alternativa altamente eficaz perante o tratamento químico (RODRIGUES, 2009).

Como contribuição às aplicações desses organismos na agricultura, Evangelista (2019) destaca o ganho de resistência em condições adversas e alterações nas condições fisiológicas, como a produção de fitohormônios, produção de enzimas e substâncias bioativas.

6. A NITROGENASE

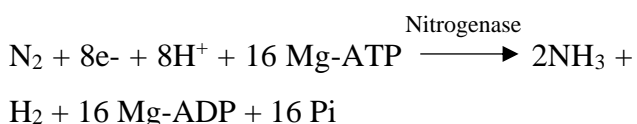
O dinitrogênio (N₂) é o mais abundante entre os compostos que contém nitrogênio e, ao mesmo tempo, o menos reativo. É uma fonte atrativa para a obtenção de compostos nitrogenados necessários na indústria, como a amônia, empregada na produção industrial de fertilizantes (NUNES; RAIMONDE; NIEDWIESKI, 2003).

As bactérias diazotróficas possuem a capacidade de fixação de N₂ atmosférico em virtude da presença de uma metaloenzima que catalisa a conversão de N₂ a NH₃ em temperatura e pressão ambientes que exige um elevado gasto energético na forma de adenosina trifosfato (ATP), estimulando o crescimento vegetal e desenvolvimento radicular, aumentando a produtividade e concentrações de nitrogênio em diversas plantas de interesse agrônômico (VOGEL; MARTINKOSKI; RUZICKI, 2014).

A nitrogenase, responsável pela redução de N₂ molecular a NH₃ durante a principal etapa da FBN, comumente é composta por duas unidades proteicas, a dinitrogenase redutase, uma ferroproteína contendo centros de ferro-enxofre (FeS) do tipo [4Fe-4S], e a (di)nitrogenase, composta por um centro de ferro-molibdênio (FeMo), uma que coleta a força redutora e a energia, e a outra que coleta e reduz o substrato, respectivamente

(MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; OLIVEIRA, 2015).

Nesse processo, a ferredoxina doa elétrons para a Fe-proteína (dinitrogenase redutase), que hidrolisa ATP e reduz a MoFe-proteína (sítio ativo). A MoFe-proteína pode, então, reduzir inúmeros substratos (com ligações triplas) que, sob condições naturais, reage com N_2 e H^+ , conforme indicado a seguir:



Para cada molécula de N_2 , são produzidas duas moléculas de amônio (NH_3). No total, em toda reação, são consumidos oito elétrons, oito prótons e dezesseis moléculas de ATP para gerar duas moléculas de amônio (NH_4) e uma molécula de hidrogênio (H_2).

Na reação catalisada pela nitrogenase, há uma transferência de elétrons, que são doados pelas proteínas ferredoxina, que mais a frente serão reduzidas com a oxidação do piruvato.

Em contato com o citoplasma aquoso dos bacteroides, o NH_3 é transformado em NH_4^+ , cujo acúmulo inibe a fixação de nitrogênio, fazendo com que esse seja exportado para o interior da célula hospedeira, sendo incorporado a moléculas não tóxicas às células e depois convertido em compostos assimiláveis pelas plantas, como aminoácidos.

Tal enzima é altamente sensível ao oxigênio e necessita de condições anaeróbias para a purificação de seus componentes em sua forma ativa. Por isso, na formação dos nódulos em leguminosas, o transporte de O_2 ocorre por meio de uma substância chamada leghemoglobina, semelhante à hemoglobina humana, evitando que o O_2 fique disperso no citoplasma da célula.

Dada a importância do N, o emprego de técnicas que propiciem um melhor aproveitamento por fixação biológica de N_2 utilizando bactérias diazotróficas promotoras do crescimento vegetal em gramíneas forrageiras é uma alternativa eficaz e econômica, capaz de melhorar a absorção e a metabolização do N no interior da planta, possibilitando a redução na quantidade de fertilizantes nitrogenados aplicados, aumentando a sustentabilidade e reduzindo os custos (SAMPAIO, 2020).

A eficiência na utilização do N pela planta considera os aspectos de absorção e metabolização deste elemento, que é absorvido pelo sistema radicular nas formas de nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+) gerado através da fixação biológica, que passa através da membrana plasmática das células da epiderme e do córtex das raízes da planta por dois tipos de transportadores, sendo então incorporado em aminoácidos na própria raiz ou na parte aérea da planta (BREDEMEIER; MUNDSTOCK, 2000).

Uma vez que a FBN realizada pela planta exige um elevado gasto energético (ATP), práticas de manejo que estimulem o processo da FBN por meio de bactérias diazotróficas se mostram caminho rumo a uma produção mais ecologicamente sustentável.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil apresenta grande potencial na produção de pastagens para alimentação animal. Entretanto, muitos agroecossistemas são manejados de modo inadequado, o que resulta na degradação do solo e perda de biodiversidade. Existem alternativas mais sustentáveis de manejo, que envolve, por exemplo, a exploração da relação simbiótica/associativa existente entre plantas e bactérias fixadoras de nitrogênio. Ampliar o uso dessa tecnologia representa um avanço dentro de setor agropecuário, uma vez que possibilita diminuir o uso de fertilizantes sintéticos e aumentar o desenvolvimento radicular e a produção de biomassa, refletindo diretamente na recuperação e capacidade de produção/área.

A fixação biológica de nitrogênio realizada por microrganismos diazotróficos se apresenta como uma ferramenta importante para uma produção mais sustentável, ecológica e economicamente viável, uma vez que essas bactérias irão sintetizar N_2 às plantas, permitindo maiores rendimentos na produção e reduzindo a necessidade de aplicação dos fertilizantes nitrogenados.

REFERÊNCIAS

ABIEC. Associação Brasileira de Indústrias Exportadoras de Carne. **Perfil da Pecuária Brasileira**. 50p. 2020. Disponível em: https://www.cicarne.com.br/wpcontent/uploads/2020/05/SUM%c3%81RIO-BEEF-REPORT-2020_NET.pdf. Acesso em: 16 set. 2021.

- AMARAL, M. B. *et al.* Rizobactérias promotoras de crescimento vegetal: uma revisão de literatura. *In: XXI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VII Encontro de Iniciação à Docência – Universidade do Vale do Paraíba, 2017.* Disponível em: http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2017/ais/arquivos/RE_0285_0242_01.pdf. Acesso em: 12 out. 2021.
- ARAÚJO *et al.* Impacto da conversão floresta - pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. **Acta Amazonica**, Manaus v. 41, n.1, p. 103 – 114, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/fBJjKJhJLpnKzhmMYRBVpYN/?lang=pt>. Acesso em: 30 set. 2021.
- ASSEFA, D. *et al.* **Deforestation and land use strongly effect soil organic carbon and nitrogen stock in Northwest Ethiopia.** FAO. 2017, v.153, p.89-99. Disponível em: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201700038929>. Acesso em: 30 set. 2021.
- AZEVEDO, J. L.; ARAÚJO, W. L. Diversity and applications of endophytic fungi isolated from tropical plant. *In: GANGULI, B. N.; DESHMUKH, S. K. (Eds.) Fungi: Multifaceted Microbes*, New Delhi: Anamaya Publishers, p. 189-207, 2007.
- BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A.O.; STONE, L.F. (Ed.). **Marco referencial: integração lavoura pecuária floresta.** Brasília: Embrapa, 2011. 137p. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/923530/1/balbino01.pdf>. Acesso em: 05 out. 2021.
- BALDANI, J. I. *et al.* Recent advances in BNF with non-legume plants. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 29, p. 911-922, 1997a
- BARBOSA, J. Z.; CONSALTER, R.; VARGAS, A. M. M. Fixação biológica de nitrogênio em poaceae. **Evidência**, Joaçaba, v. 12 n. 1, p. 7-18, jan/jun 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Julierme-Barbosa/publication/325253729_Fixacao_biologica_de_nitrogenio_em_Poaceae/links/5b0085f60f7e9be94bd8e10e/Fixacao-biologica-de-nitrogenio-em-Poaceae.pdf. Acesso em: 13 set. 2021.
- BACON. C.W.; HINTON, D. M. Bacterial endophytes: The endophytic niche, its occupants, and its utility. *In: Gnanamanickam, S.S. (eds) Plant-Associated Bacteria.* **Springer**, 2007. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-4538-7_5. Acesso em: 29 mai. 2022.
- BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M. Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 2, p. 365-372, 2000. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/fgh7ZhdCGrrHMSF6XZsS8ZK/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 13 set. 2021.
- CARDOSO, I. C. M. **Ocorrência e diversidade de bactérias endofíticas do gênero *Azospirillum* na cultura do arroz irrigado em Santa Catarina.** 2008. Dissertação (Mestrado em Manejo do Solo)- Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, LAGES, 2008.
- CASSIMIRO, J. B. **Volatilização, nitrogênio no solo e produtividade de capim Marandu com a aplicação de fertilizantes nitrogenados com eficiência aumentada.** 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Animal)- Universidade Estadual Paulista (UNESP), Dracena, p. 87, 2020. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/204645/cassimiro_jb_me_bdr.pdf?squence=3. Acesso em: 16 set. 2021.
- CONAB. **Pecuária leiteira: análise dos custos de produção e da rentabilidade nos anos de 2014 a 2017.** Compêndio de estudos Conab / Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília, v.16. 2018. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 06 out. 2021.

CORREA, M. E. F.; OLIVEIRA, L. C. M. **Importância da Fauna de Solo para a Ciclagem de Nutrientes**. 2006. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/biotacap4ID-QOAsuHeSsM.pdf>. Acesso em: 29 mai. 2022.

CNA. **Panorama do Agro**. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/cna/panorama-do-agro>. Acesso em: 27 mai. 2022.

DIAS-FILHO, M. B. **Degradação de pastagens o que é e como evitar**. Brasília, Embrapa Amazônia Oriental, 2017. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1070416/1/TC1117CartilhaPastagemV04.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2021.

DIAS-FILHO, M. B. **Degradação de pastagens**: processos, causas e estratégias de recuperação. 4. ed. reimp. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2011. 215 p.

DIAS-FILHO, M. B. **Diagnóstico das pastagens no Brasil**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2014. 36p. (Documentos, 402). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/986147/1/DOC402.pdf>. Acesso em: 05 out. 2021.

DÖBEREINER, J., Day, J. M. Associative symbiosis in tropical grasses: Characterization of microorganisms and nitrogen-fixing sites. 1975, *In*: Newton, W.E.; Nyman, C.J. (ed.) **Nitrogen fixation**. Washington State University, Washington, USA. p.518-538.

ESPINDOLA, J.A.A.; GUERRA, J.G.M.; ALMEIDA, D.L. Uso de leguminosas herbáceas para adubação verde. *In*: Aquino, A.M.; Assis, R.L. (Ed.). **Agroecologia: Princípios e técnicas para uma agricultura orgânica sustentável**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. p. 435-451. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/AgrobCap18ID-rODRLL1PIX.pdf>. Acesso em: 11 set. 2021.

EMBRAPA. **Anuário do Leite 2021**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1132875/anuario-leite-2021-saude-unica-e-total>. Acesso em: 25 nov. 2021.

EMBRAPA AGROSSILVIPASTORIL. **Primeiras contribuições para o desenvolvimento de uma Agropecuária Sustentável**. Brasília, 2019. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/200291/1/2019-cpamt-agrossilvipastoril-part-1-cap-9-fixacao-biologica-nitrogenio-gramineas-leguminosas-mato-grosso-p-80-84.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2021.

EMBRAPA. **Processos e Mecanismos Envolvidos na Influência de Microrganismos sobre o Crescimento Vegetal**. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/624875/1/doc161.pdf>. Acesso em: 13 set. 2021.

EMBRAPA. **Inoculante feito na propriedade rural aumenta produtividade de feijão-caupi em até 33%**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/26033659/inoculante-feito-na-propriedade-rural-aumenta-produtividade-de-feijao-caupi-em-ate-33>. Acesso em: 27 set. 2021.

EMBRAPA. **Nitrogenase**: Bioquímica do processo de FBN, 1998. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/624308/1/doc084.pdf>. Acesso em: 21 set. 2021.

EMBRAPA AGROBIOLOGIA. **Pastagens**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agrobiologia/pesquisa-e-desenvolvimento/pastagens>. Acesso em: 13 set. 2021.

EMBRAPA. **Diversidade e relação Filogenética de espécies do gênero *Azospirillum***. Documentos 273, Seropédica 2010. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/84635/1/DOC273-10.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2021.

EMBRAPA. **VISÃO 2030**: O futuro da agricultura brasileira. Disponível em: <https://www.embrapa.br/visao/trajetoria-da-agricultura-brasileira>. Acesso em: 29 set. 2021.

FABRICE, C. E. S. *et al.* Recuperação de pastagens de *Brachiaria decumbens* degradada com introdução de *Stylosanthes* e adubação fosfatada. **Revista Brasileira Saúde Produção Animal**, Salvador, v.16, n.4, p.758-771 out/dez, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbspa/a/q4mZtX6Y6Qn5d86LB8QFnCy/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 13 set. 2021.

FAGAN, E. B. *et al.* Fisiologia da fixação biológica do nitrogênio em soja – revisão. **Revista da FZVA**, Uruguaiana, v.14, n.1, p. 89-106. 2007. Disponível em: <http://www.itaya.bio.br/materiais/Fixa%C3%A7%C3%A3o%20biol%C3%B3gica%20do%20nitrogenio.pdf>. Acesso em: 29 mai. 2022.

FAO. **The State of Food and Agriculture 2009, Livestock in the balance**. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i0680e/k6960e00.pdf>. Acesso em: 05 out. 2021.

GYANESHWAR, P. *et al.* Herbaspirillum colonization increases growth and nitrogen accumulation in aluminum-tolerant rice varieties. **New Phytologist**, Lancaster, v. 154, n. p. 131-145, 2002. Disponível em: <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1046/j.1469-8137.2002.00371.x>. Acesso em: 12 out. 2021.

GUIMARÃES, S. L. *et al.* Produção de capim-marandu inoculado com *Azospirillum spp.* **Enciclopédia biosfera, Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v. 7, n. 13, p.816-825. 2011. Disponível em: <http://www.conhecer.org.br/enciclop/2011b/ciencias%20agrarias/producao%20de%20capim.pdf>. Acesso em: 12 out. 2021.

GOYAL, R. K.; SCHIMIDT, M. A.; HYNES, M. F. Molecular biology in the improvement of biological nitrogen fixation by rhizobia and extending the scope to cereals. **Microorganisms**, Rio de Janeiro v. 9, n. 24p,

2021. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7825764/>. Acesso em: 21 set. 2021.

HANISCH, A. L. *et al.* Desempenho produtivo de *Urochloa brizantha* cv. Marandu em função da inoculação com *Azospirillum* e doses de nitrogênio. **Revista Agro@ambiente On-line**, Boa Vista, v. 11, n. 3, p. 200-208, jul/set, 2017. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/165894/1/200-Desempenho-agroambiente.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2021.

IBGE. **Produção agropecuária**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/>. Acesso em: 27 mai. 2022

LOPES, E. S. Expressão e purificação de uma variante truncada da proteína GLNE de *Herbaspirillum seropedicae*. In: Encontro Anual de Iniciação Científica, 28. Encontro Anual de Iniciação Científica Junior, 8. **Anais...** 4p, 2019. Disponível em: <http://www.eaic.uem.br/eaic2019/anais/artigos/3467.pdf>. Acesso em: 12 out. 2021.

MAPA. **Dinâmica das pastagens Brasileiras**: Ocupação de áreas e indícios de degradação - 2010 a 2018. Goiás 2020. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/estudo-mostra-reducao-de-26-8-milhoes-de-hectares-de-pastagens-degradadas-em-areas-que-adotaram-o-plano-abc/Relatorio_Mapal.pdf. Acesso em: 25 nov. 2021.

MAGALHÃES, S. S. A. *et al.* Estoque de Nutrientes sob diferentes sistemas do solo de Colorado do Oeste-RO. **Acta Amazonica**, Manaus, v.43, n.1. p. 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/XMmK6z6WmRM MJLW8FFXNHsF/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 29 set. 2021.

MOREIRA, F. M. S. SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. 2 ed. atualampli. Lavras: UFLA, 2006. Disponível em: http://www.esalq.usp.br/departamentos/lso/arquivos_aula/LSO_400%20Livro%20

%20Microbiologia%20e%20bioquimica%20do%20solo.pdf. Acesso em: 27 set. 2021.

MOREIRA, F. M. S. *et al.* Bactérias diazotróficas associativas: diversidade, ecologia e potencial de aplicações. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v. 1, n.2, p. 74-99, 2010. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5022060.pdf>. Acesso em: 27 set. 2021.

OLIVEIRA, L. E. M. **Enzima Nitrogenase- Temas em Fisiologia Vegetal**. Universidade Federal de Lavras, 2015. Disponível em: <http://www.ledson.ufla.br/assimilacao-e-transporte-de-nitrogenio-2/fixacaobiologica-do-nitrogenio-fbn/nitrogenase-como-funciona-essa-enzima/>. Acesso em: 21 set. 2021.

REIS, V. M.; TEIXEIRA, K. R. S. **Fixação Biológica de Nitrogênio – Estado de Arte**. P. 151-180, 2006. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/biotacap6ID-cgUrYruYKy.pdf>. Acesso em: 21 set. 2021.

REIS, V. M. BALDANI, V. L. D. BALDANI, J. I. **Ecologia, Isolamento e Identificação de Bactérias Diazotróficas**. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/biotacap10ID-RgZGnAKxOz.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2022.

ROCHA JUNIOR, P. R. da; SILVA, V. M.; GUIMARÃES, G. P. Degradação de pastagens brasileiras e práticas de recuperação. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v.9, n.17, 17p. 2013. Disponível em: <http://www.conhecer.org.br/enciclop/2013b/CIENCIAS%20AGRARIAS/DEGRADACAO.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2021.

RODRIGUES, A. A. **Atividade antimicrobiana e produção de enzimas de interesse biotecnológico de bactérias isoladas de diferentes habitats**. 2009. Dissertação (Mestrado em microbiologia)- Universidade Federal de Goiás, Instituto de Patologia Tropical e Saúde Pública. Goiânia. 2009. Disponível em: <https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/59/o/Arian>

aAlves-dissertacaofinal.pdf. Acesso em: 12 out. 2021.

SAMPAIO, F. A. R. **Inoculação com *Azospirillum brasilense* E *Bacillus subtilis* associada à adubação nitrogenada na nutrição, desenvolvimento e produção do capim *Urochloa brizantha* cv. Marandu**. 2020. Tese (Doutorado em Agronomia)- Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/194308>. Acesso em: 16 set. 2021.

SANTOS, M. G. **Capim marandu sob lâminas de irrigação e doses de nitrogênio: resposta agrônômica e simulação do rendimento de forragem usando o modelo CROPGRO-PERENNIAL FORAGE**. 2018. Tese (Doutorado em Agronomia Ciência do Solo)- Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2018. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/154940/santos_mg_dr_jabo.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Acesso em: 16 set. 2021.

SAMBUICHI, R. H. R. *et al.* **A sustentabilidade ambiental da agropecuária brasileira: impactos, políticas públicas e desafios**. IPEA, 2012. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/1050/1/TD_1782.pdf. Acesso em: 29 mai. 2022.

SNA. **Leite tem segunda maior produção em 45 anos**. Disponível em: <https://www.sna.agr.br/leite-tem-segunda-maior-producao-em-45-anos/>. Acesso em: 25 nov. 2021.

SOUZA, M. S. *et al.* Ciclagem de nutrientes em ecossistemas de pastagens tropicais. **PUBVET**, Maringá, v.12, n.5, p.1-9, maio, 2018. Disponível em: <http://www.pubvet.com.br/artigo/4804/ciclagem-de-nutrientes-em-ecossistemas-de-pastagens-tropicais>. Acesso em: 30 set. 2021.

SOUZA, E. D. *et al.* Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto,

submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n.6, p.1829-1836, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/w5kQnGKqVwNDysfSGTSNHtJ/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 30 set. 2021.

UFG. **Atlas Digital das Pastagens Brasileiras**. Disponível em: <https://pastagem.org/map>. Acesso em: 13 set. 2021.

USDA. **United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service. Livestock and Poultry: World Markets and Trade**. 2021. Disponível em: https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/livestock_poultry.pdf. Acesso em: 05 out. 2021.

VERDI, P. H, P. **Análise da viabilidade econômica de sistemas de recuperação de pastagens degradadas em solos arenosos**.2018. Dissertação (Mestrado em Agronegócio)- Fundação Getúlio Vargas –

EESP/FGV. São Paulo, 2018. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/22064/Dissertac%cc%a7a%cc%83o%20-%20FGV%20-%20Paulo%20Henrique%20Peres%20Verdi%20-%20FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 05 out. 2021.

VIEIRA FILHO, J.E.R. **Expansão da fronteira agrícola no Brasil: Desafios e perspectivas**. Brasília: Rio de Janeiro: Ipea, 2016. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6909/1/td_2223.PDF. Acesso em: 25 nov. 2021.

VOGEL, G. F.; MARTINKOSKI, L.; RUZICKI, M. Efeitos da utilização de *Azospirillum brasilense* em poáceas forrageiras: Importâncias e resultados. **Agropecuária Científica no Semi-Árido**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 01-06, 2014. Disponível em: <http://revistas.ufcg.edu.br/acsa/index.php/ACSA/article/view/471/pdf>. Acesso em: 16 out. 2021.