

Revista Brasileira de Geografia Física



Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Fixação biológica de nitrogênio no Semiárido Brasileiro

Ana Dolores Santiago de Freitas¹, Everardo Valadares de Sá Barretto Sampaio², Carolina Etienne de Rosália e Silva Santos³, Aleksandro Ferreira da Silva⁴, Renata Janaína Carvalho de Souza⁵

¹Engenheira Agrônoma da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE/DEPA). ² Professor Titular da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE/DEN). ³Zootecnista da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE/DEPA). ⁴ Doutorando em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE/DEPA). ⁵Doutoranda em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE/DEN)

Artigo recebido em 09/10/2015 e aceito em 10/12/2015.

RESUMO

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) é a principal forma de entrada de N em ecossistemas naturais e em sistemas agrícolas de subsistência, como os praticados predominantemente no Semiárido brasileiro. Estimativas dos aportes de N na Caatinga e em cultivos de importância para a região ainda são escassas, em parte pela dificuldade de medir simultaneamente as proporções de N derivadas da atmosfera (%Ndda) e as produções de biomassa no mesmo sistema. Estudos pioneiros indicam que diversas espécies de leguminosas, herbáceas e arbóreas, nativas e/ou cultivadas, podem fixar elevadas proporções de seu N. Em Caatinga bem preservada, os aportes de N em leguminosas arbóreas foram estimados em 11 kg ha⁻¹ ano⁻¹, um valor relativamente baixo devido à baixa densidade de plantas fixadoras. Entretanto, a densidade de leguminosas fixadoras na vegetação não é o único fator definindo o aporte de N, pois há observações de ausência de FBN em áreas de Caatinga em regeneração, dominadas por espécies fixadoras. No estrato herbáceo, os aportes de N podem chegar a 6 kg ha⁻¹ ano⁻¹, nas áreas com menor cobertura de arbóreas. As quantidades de N fixadas nos diferentes sistemas de cultivo são pouco conhecidas. Para o feijão-caupi, a FBN pode se aproximar dos 30 kg ha⁻¹, em cultivos consorciados com milho, chegando a 45 kg ha⁻¹, em cultivos solteiros. Em cultivos irrigados, adubos verdes podem adicionar 185 kg ha⁻¹, superando a quantidade exportada nas colheitas. Em sistemas agroflorestais, a adição anual de N pode chegar a 40 kg ha⁻¹. Não existem estimativas do N fixado em gramíneas na região, mas algumas espécies apresentem potencial de FBN.

Palavras-chave: abundância natural do N-15, agricultura de corte e queima, micro-organismo diazotróficos, rizóbios, simbiose.

Biological nitrogen fixation in the Brazilian Semiarid

ABSTRACT

Biological nitrogen fixation (BNF) is the main N input in natural ecosystems and in subsistence agricultural systems, such as those commonly practiced in the Brazilian semiarid region. Estimates of N inputs in Caatinga and the main regional crops are still scarce, partly due to the difficulty in measuring concomitantly the proportion of plant N derived from the atmosphere (%Ndfa) and the amount of biomass produced in the same system. Pioneer studies indicate that several legume species, herbs and trees, native and/or cultivated, can fix large proportions of their N. In mature Caatinga, N inputs in tree legumes were estimated at 11 kg ha⁻¹ year⁻¹, a relatively low value due to the low plant density of the legume species. However, plant density is not the only factor defining N input, since absence of fixation has been reported in regenerating Caatinga, even in those dominated by potentially fixing species. In the herb stratum, N input up to 6 kg ha⁻¹ year⁻¹ has been reported in areas with lower tree cover. Inputs in crop systems are largely unknown. Fixation in cowpea can reach 30 kg ha⁻¹, in plants consortiated with corn, and 45 kg ha⁻¹, in single crop. Under irrigation, green manure crops can add 185 kg ha⁻¹ of fixed N, more than the amounts exported by the main crop. In agroforest systems, the annual input may reach 40 kg ha⁻¹. There are no publish reports on N biologically fixed by Poaceae species growing in the semiarid region but it is known that some species have the potential to fix. Keywords: N-15 natural abundance, slash and burn agriculture, diazotrophic microorganism, rhizobia, symbiosis.

Introdução

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) é a conversão do N₂ atmosférico em formas

^{*}E-mail para correspondência: ana.freitas@depa.ufrpe.br

assimiláveis pelos organismos vivos, sendo considerada o segundo processo biológico mais importante do planeta, depois da fotossíntese (Moreira e Siqueira, 2006). A FBN é realiza por meio de um complexo enzimático denominado nitrogenase, presente apenas em alguns microorganismos procarióticos, conhecidos como diazotróficos.

Os micro-organismos diazotróficos podem apresentar diversos estilos de vida que vão desde a vida livre até associações simbióticas muito específicas. De acordo com o tipo de relação que os micro-organismos diazotróficos estabelecem com as plantas, eles podem ser classificados em simbióticos (que desenvolvem associação mutualística com hospedeiros) ou associativos (que habitam o interior ou a superfície dos tecidos) (Moreira e Sigueira, 2006). Dentre eles, a associação espécies da família simbiótica entre leguminosas as bactérias diazotróficas e (conhecidas como rizóbios) é o sistema mais bem estudado. Nesta associação, as bactérias invadem as raízes das plantas, formando nódulos onde o nitrogênio livre no ar é convertido em nitrogênio fixado para assimilação ou estoque pela planta. Embora presente em um grande número de espécies, a capacidade de FBN não é comum a todas as leguminosas, variando entre sub-famílias, gêneros e até mesmo entre espécies dentro de um mesmo gênero (Allen e Allen, 1981; Sprent, 2009).

A FBN é a principal forma de entrada de N em ecossistemas naturais (Cleveland et al., 1999) e em sistemas agrícolas de subsistência, como os praticados predominantemente no Semiárido brasileiro. Esses sistemas são baseados na conversão de áreas nativas em áreas de cultivo, com corte e queima da vegetação nativa, plantio das culturas e subsequente abandono (pousio), antes de novo ciclo de derrubada e queima. O alto custo do insumo e as incertezas climáticas, que prejudicam as respostas das culturas à sua aplicação, reduzem a viabilidade da aplicação de fertilizantes nitrogenados nestes (Sampaio et al., 2004). Assim, as culturas são dependentes do N mineralizado dos restos vegetais e da matéria orgânica do solo, que são rapidamente degradados em consequência das altas temperaturas médias anuais e da alta incidência de raios ultravioleta (Parton et al., 2007), típicas da região. Nos cultivos irrigados, o aumento da disponibilidade de água no solo pode acelerar ainda mais as taxas de decomposição da matéria orgânica e as perdas de N (Lee et al., 2014), levando à rápida perda da capacidade produtiva dos solos. Nas áreas em pousio, a regeneração da vegetação nativa depende, entre outros fatores, do restabelecimento dos estoques de N da vegetação primária (Tiessen et al., 1992).

Nas áreas cultivadas, a inclusão de espécies fixadoras de N ou o manejo adequado da FBN em culturas fixadoras (principalmente leguminosas, mas também gramíneas) podem desempenhar um papel crucial na manutenção de estoques adequados de nitrogênio no solo. Nas matas e pastos nativos, o aporte de N por meio da FBN, particularmente a simbiótica, garante a reposição do N perdido com a queima da biomassa vegetal cortada ou consumida pelos animais. As quantidades de nitrogênio fixadas em ecossistemas naturais ou agrícolas influenciadas por diversos fatores ambientais e práticas de manejo e, para estabelecer manejos adequados e a máxima realização dos benefícios planta-micro-organismo, associação necessário estimar quanto de nitrogênio é fixado em diferentes condições.

Diversos grupos de pesquisa vêm se dedicando a estudar diferentes aspectos relacionados à FBN no Semiárido brasileiro. Como resultado desse esforço, existe uma literatura crescente sobre a diversidade de rizóbios nativos de solos da região, principalmente os capazes de nodular feijão-caupi (Martins et al., 1997; Fernandes Jr. et al., 2012) e algumas espécies nativas, principalmente arbóreas do gênero Mimosa (Teixeira et al., 2010; Freitas et al., 2014; Martins et al., 2015a). Também são encontrados estudos de seleção de estirpes eficientes para inoculação de feijão-caupi (Martins et al., 2003; Marinho et al., 2014). Apesar de fundamentais para a compreensão e o manejo da FBN no Semiárido, esses trabalhos não serão abordados neste texto, limitado pela necessidade de abordar outros temas.

Neste artigo, serão revisados os principais resultados de estimativas das quantidades de N fixadas nos diferentes agroecossistemas e fragmentos de vegetação nativa do grande núcleo semiárido da região Nordeste do Brasil. Ainda é baixo o número dessas estimativas na literatura científica e as informações disponíveis se restringem ao sistema simbiótico das leguminosas. Não existem estimativas publicadas para a FBN em gramíneas, nem estudos do processo realizado por micro-organismos de vida livre.

Técnica da abundância natural do ¹⁵N para estimativa da FBN

Para estimar as quantidades de N adicionadas a um sistema por meio da associação

entre plantas e micro-organismos, são necessárias determinações simultâneas das quantidades de N acumuladas nas plantas e da proporção deste N que é derivado da atmosfera (%Ndda). A determinação da quantidade de N nas plantas requer a medição de sua biomassa e da concentração de N nesta biomassa. Para estimar o % Ndda, a técnica da abundância natural do ¹⁵N é a mais adequada em ecossistemas naturais, porque produz quantificações rápidas e seguras, não perturba o ambiente (nada precisa ser adicionado ou destruído) e integra o efeito do processo de FBN ao longo do tempo, também podendo ser utilizada para plantas cultivadas (Freitas et al., 2010b). Esta metodologia baseia-se comparação entre a abundância de ¹⁵N de uma espécie fixadora de N, que obtém esse elemento do N₂ atmosférico por meio da atividade da nitrogenase dos micro-organismos em associação em adição às fontes de N do solo, e a abundância de uma espécie referência não fixadora, que conta apenas com o elemento derivado do solo (Shearer e Kohl, 1986). Normalmente, os solos são enriquecidos em ¹⁵N em relação ao N₂ atmosférico e, por isso, espera-se que plantas não-fixadoras (que retiram todo seu N do solo) sejam mais abundantes em 15N que plantas fixadoras (que retiram parte de seu N do ar).

A abundância natural é analisada por espectrometria de massa e expressa em unidades de "delta" (δ^{15} N), que representa o desvio por mil (‰), em relação ao N_2 atmosférico, da razão entre as massas de 15 N e 14 N do N contido na amostra:

$$\delta = (R_{amostra}/R_{padrão} - 1) \times 1000$$

Onde: $R_{amostra}$ e $R_{padrão}$ são as razões $^{15}N:^{14}N$ da amostra e do padrão (N_2 atmosférico), respectivamente.

Para calcular a proporção do N da planta que é derivado da atmosfera (ou seja, fixado via FBN) é feita uma interpolação entre as abundâncias de ¹⁵N do N fixado e do N de outras fontes disponíveis para a planta, por meio da seguinte equação (Shearer e Kohl, 1986):

$$\%Ndda = (\delta^{15}N_{(referência)} - \delta^{15}N_{(fixadora)} / \delta^{15}N_{(referência)} - B) \times 100$$

Em que: %Ndda é o percentual de N da planta fixadora que é derivado do ar, $\delta^{15}N_{(referência)}$ é a abundância de ^{15}N da planta controle não fixadora, $\delta^{15}N_{(fixadora)}$ é a abundância de ^{15}N da planta fixadora e B (também chamado valor B) é a abundância de ^{15}N do N fixado na planta fixadora.

O valor B é incluído na fórmula de %Ndda para corrigir o fracionamento isotópico durante o processo de fixação do N. Para estimativas da FBN em leguminosas, esse valor é determinado cultivando plantas inoculadas com estirpes efetivas de rizóbios em substratos livres de N. Devido às complicações metodológicas para determinação do valor B, diversas estimativas são feitas utilizando valores disponíveis na literatura (Höberg, 1997; Boddey et al., 2000; Unkovich et al., 2008). No caso de leguminosas para as quais não existe valor B determinado, como é o caso da maioria das espécies nativas da Caatinga, recomenda-se que seja testada a importância potencial de valores extremos reportados na literatura - a maioria dos valores de B determinados para leguminosas oscilam entre -2,0 e + 1.0 %.

O sucesso da quantificação da FBN utilizando a técnica da abundância natural do 15 N depende do padrão isotópico do N no sistema. Estimativas precisas requerem uma grande diferença nos sinais de δ^{15} N das espécies referência e das espécies fixadoras. Diferenças menores que 2‰ entre espécies devem ser discutidas com cautela, mesmo que sejam estatisticamente significativas (Högberg, 1997).

No Semiárido brasileiro, as plantas que não se associam com bactérias diazotróficas (não fixadoras) apresentam valores de $\delta^{15}N$ altos e pouco variáveis dentro de um mesmo local, tanto espacialmente quanto entre espécies (Freitas et al., 2010a). Este padrão isotópico não é encontrado em outros ambientes do Nordeste (Freitas et al., 2015) e é ideal para estudos da FBN, facilitando a seleção de plantas referência e os procedimentos de amostragem.

FBN em vegetação natural de Caatinga

No Semiárido brasileiro, a vegetação nativa (Caatinga) faz parte do ciclo de agricultura itinerante, além de ser a principal forma de pasto nativo da extensa atividade pecuária da região. Neste sistema, uma infinidade de áreas é abandonada após sofrer desmatamento, queima, cultivo e/ou superpastejo. Como resultado, a vegetação atual do Semiárido é um imenso mosaico de pequenas áreas com distintos tempos de regeneração e/ou graus de pastejo, entremeadas a poucas áreas preservadas por tempos superiores a 50 anos.

Na Caatinga, Fabaceae é uma das famílias botânicas mais importantes, com 320 espécies, pertencentes a 86 gêneros, e com alto grau de endemismo (Queiroz, 2009). Embora não seja uma característica comum a todas as espécies, a

capacidade de fixar nitrogênio em simbiose com bactérias do grupo dos rizóbios é a grande particularidade ecológica das leguminosas (Allen e Allen, 1981). Apesar disto, o conhecimento sobre a capacidade de nodulação das espécies nativas e, especialmente, sobre as quantidades de N aportadas pela FBN nas diferentes condições edafoclimáticas e de regeneração da Caatinga ainda são escassas. Um dos problemas da falta de dados sobre as quantidades de N fixadas é a dificuldade de medir simultaneamente a produção de biomassa e as proporções de N derivadas da fixação (%Ndda), nesta biomassa (Boddey et al., 2000).

Em regiões áridas e semiáridas, leguminosas fixadoras frequentemente obtêm mais que a metade de seu N por meio da FBN (Andrews et al., 2011), mas a quantidade fixada varia muito, dependendo da especificidade da simbiose e das características ambientais, que afetam a produção de biomassa vegetal (Stahl et al., 2002; Raddad et al., 2005).

Estudos pioneiros para as florestas secas da região nordeste do Brasil indicam que a FBN pode ser responsável por uma proporção alta do N absorvido por espécies nativas, como: cratília, Cratylia mollis Mart. Ex Benth. (Teixeira et al., 2006); jurema preta, Mimosa tenuiflora (Willd.) Poir., unha-de-gato, Mimosa arenosa (Willd.) Poir. e jurema branca, Piptadenia stipulacea (Benth.) Ducke (Freitas et al., 2010c). As contribuições da FBN para o nitrogênio das plantas nestas espécies podem superar os 80 %. Com base nestas estimativas de %Ndda, a quantidade de N adicionada anualmente em uma Caatinga bem preservada pode ser estimada em pouco mais de 11 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (Freitas et al., 2010c), devido à baixa proporção de plantas fixadoras geralmente encontrada ambientes. Embora esta quantidade de N possa ser considerada pequena, é da mesma ordem de grandeza de estimativas feitas em florestas tropicais úmidas (Roggy et al., 1999), nas quais as plantas crescem em condições mais favoráveis de disponibilidade de água.

A proporção de leguminosas potencialmente fixadoras na vegetação é um dos parâmetros utilizados para estimativas das quantidades de N fixadas anualmente em florestas utilizando métodos de modelagem e/ou balanço de N (Cleveland et al., 2010). Como a regeneração da vegetação nativa da Caatinga é dominada por espécies fixadoras durante grande parte do processo de sucessão (Sampaio et al., 1998; Pereira et al., 2003), as quantidades de N fixadas pelas plantas arbustivas e arbóreas poderiam

chegar a 130 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (Freitas et al., 2010c). Entretanto, esforços devem ser feitos para realização de estimativas simultâneas da biomassa acumulada, %Ndda e quantidades de N fixado, pois ausência de FBN pode ser observada em leguminosas nodulantes, e os fatores que restringem a simbiose ainda não são bem compreendidos (Ndiaye e Ganry, 1997; Faye et al., 2007).

estimativas do N fixado leguminosas arbustivas e arbóreas em diferentes estádios de regeneração da Caatinga feitas por Souza et al. (2012), em áreas localizadas no município de Santa Terezinha (Sertão da Paraíba), demonstram a necessidade de se fazer medições diretamente em campo. De maneira contrária à hipótese de Freitas et al. (2010c), a FBN foi ausente ou muito baixa em áreas com menos tempos de regeneração, apesar da dominância de leguminosas nodulantes (principalmente jurema preta). Por outro lado, no fragmento com vegetação madura, as espécies potencialmente fixadoras apresentaram grande proporção de N derivado da atmosfera (%Ndda > 60 %), mas com pouca frequência de indivíduos, resultando em aporte de N em torno de 6 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 1). Nas espécies herbáceas, a FBN representou proporções muito altas do N das plantas nas áreas em regeneração e na Caatinga madura, mas com aportes relativamente baixos de N (Tabela 2), devido às baixas biomassas (Freitas et al., 2012a).

Esta ausência ou quantificação muito baixa da FBN em leguminosas nativas de áreas em regeneração desafia a visão tradicional da vantagem ecológica da capacidade de nodulação de leguminosas e as causas do baixo desempenho da simbiose ainda não foram esclarecidas. Como não existem estimativas da FBN para outras áreas, ainda não é possível determinar a importância do processo em outros fragmentos de Caatinga. Uma melhor compreensão do papel da FBN na regeneração dessas matas secas demanda a geração de mais dados sobre a produção de biomassa de leguminosas e quantidades de N fixadas em diferentes condições edafoclimáticas.

Nitrogênio fixado em sistemas de cultivo

As quantidades de N fixadas nos diferentes sistemas de cultivo encontrados no Semiárido são pouco conhecidas. Estas quantidades são determinadas pela eficiência da simbiose entre plantas e micro-organismos e pela produtividade de biomassa, sendo ambos os fatores extremamente dependentes das condições ambientais (Mokgehleet al., 2014). Existem algumas estimativas publicadas para o feijão-

caupi, leguminosas forrageiras, sistemas agroflorestais e espécies herbáceas utilizadas para adubação verde, que cobrem poucas espécies e/ou variedades, assim como práticas de manejo e condições edafoclimáticas. Para as gramíneas cultivadas na região, o conhecimento sobre o potencial da FBN é ainda mais incipiente.

Em leguminosas, um fator que pode limitar a simbiose é a ausência de bactérias compatíveis e eficientes nos solos, que pode ser corrigida por meio da inoculação com rizóbios selecionados. A prática da inoculação não é comum no Semiárido, por falta de difusão da tecnologia e de respostas na produtividade das culturas (Freitas et al., 2012b). Nesta situação, em que a FBN depende da simbiose com bactérias nativas, é importante identificar práticas de manejo que potencializem a FBN. Por exemplo, em solos típicos do Semiárido, a adição de esterco ao solo pode condicionar maiores %Ndda em leguminosas forrageiras (Freitas et al., 2011).

Tabela 1. Proporção de N derivado da atmosfera (%Ndda) em leguminosas arbóreas nativas da Caatinga e estimativas do aporte de N fixado na vegetação.

Espécies	Ndda (%)	Local	N fixado (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Referência
Cratylia mollis	37 a 76	Diferentes locais em Petrolina	-	Teixeira et al. (2006)
Piptadenia stipulacea	26 a 34	Caatinga madura em Santa Teresinha, PB	-	Freitas et al. (2010c)
Mimosa tenuiflora	28 a 37			
Anadenanthera colubrina				
Anadenanthera colubrina	58 a 76		2,5 a 3,3	Freitas et al. (2010c)
Mimosa tenuiflora	53 a 69			
Mimosa sp1	49 a 64			
Mimosa sp2	48 a 63			
Mimosa sp3	58 a 76	Caatinga madura em		
Mimosa paraibana	45 a 54	Serra Talhada, PE		
Mimosa arenosa	36 a 43	Serra Tamada, PE		
Mimosa sp4	38 a 45			
Mimosa sp5	48 a 58			
Mimosa tenuiflora	54 a 65			
Piptadenia viridiflora	-			
Piptadenia stipulacea	23 a 28			
Mimosa paraibana	45 a 54	Caatinga madura em Remígio, PB	9,3 a 11,2	Freitas et al. (2010c)
Mimosa arenosa	36 a 43			
Mimosa sp4	38 a 45			
Mimosa sp5	48 a 58			
Mimosa tenuiflora	54 a 65			
Piptadenia viridiflora	-			
Piptadenia stipulacea	23 a 28			
Anadenanthera colubrina	33 a 41			
Pithecellobium parviflorum	34 a 42	Caatinga madura em Caruaru, PE	-	Freitas et al. (2010c)
Mimosa arenosa	72 a 88			
Piptadenia stipulacea	70 a 86			
тришени виришеси	70 4 00	Caatinga em		
Mimosa tenuiflora	0	regeneração há 16, em	0	Souza et al. (2012)
		Santa Teresinha, PB		50uzu et al. (2012)
Anadenanthera colubrina	0	Caatinga em		
machaninera comornia	U	regeneração há 38	0	Souza et al. (2012)
Mimosa tenuiflora	0	anos, em Santa		
митоѕа тепициога		Teresinha, PB		
Anadenanthera colubrina	47	Caatinga em		
				Souza et al. (2012)
Mimosa tenuiflora	62	regeneração há mais de	6	
Piptadenia stipulacea	62	50 anos, em Santa		
1		Teresinha, PB		

Feijão-caupi

O feijão-caupi (Vigna unguiculata (L.) cultivo de importância Walp.) um socioeconômica em regiões tropicais, por apresentar tolerância às adversidades edafoclimáticas (Freire Filho, 2011). Em consórcio com o milho e integrado à pecuária, é o sistema dominante na agricultura familiar do Semiárido brasileiro, apresentando produtividade, determinada principalmente pela irregularidade e deficiência das chuvas. Como os solos da região, em geral, são pobres em matéria orgânica e raramente são utilizados fertilizantes nitrogenados, a FBN tem um papel fundamental na manutenção da produtividade destes cultivos. inoculação com estirpes de rizóbios selecionadas não é uma prática comum na região e a literatura demonstra que, muitas vezes, as bactérias nativas dos solos são tão eficientes quanto às inoculadas em termos de produtividade e parâmetros de nodulação (Martins et al., 2003; Silva et al., 2008; Freitas et al., 2012b; Marinho et al., 2014). O feijão-caupi é um macrossimbionte considerado promíscuo, o que pode explicar a falta de resposta à inoculação também observada em outros países (Osunde et al., 2003; Otieno et al., 2009).

Em geral, a contribuição da FBN é alta para a nutrição do feijão-caupi, mas pode variar em função do genótipo da planta, microssimbionte e das diferentes condições de clima e solo das regiões produtoras, que afetam a planta hospedeira, o rizóbio e a própria fixação. Em regiões semiáridas a quantidade de N adicionada (kg ha⁻¹) dependente da produção de biomassa (Nyemba e Dakora, 2010) que é controlada, principalmente, pela disponibilidade de água (Mokgehle et al., 2014). Do N fixado pela planta, parte é exportada do sistema pela colheita de grãos. O N que permanece nos restos culturais é reciclado, e a parte deste N que é fixada representa o aporte líquido de N ao sistema. A proporção do N exportado é determinada pelo índice de colheita das variedades utilizadas e pelas concentrações de N nos grãos e na palhada (Belane et al., 2011; Freitas et al., 2012b).

Um dos objetivos principais do programa brasileiro de melhoramento genético do feijão-caupi, coordenado pela Embrapa Meio-Norte, é a disponibilização de cultivares mais produtivas, com maior resistência a estresses hídricos e com boa qualidade visual e culinária dos grãos (Freire Filho, 2011). Entretanto, existe uma lacuna com relação ao potencial de benefício da FBN nestas cultivares, que pode ser variável e influenciar o

balanço entre as quantidades de N fixadas e exportadas nos cultivos. Entre alguns progenitores dessas cultivares, Alcantara et al. (2014) observaram uma variação de 49 a 65 % de N derivado da fixação biológica.

No Semiárido brasileiro, variedades locais, que apresentam grande diversidade genética (Freire Filho et al., 2005), são preferidas pelos agricultores familiares. Além de bem adaptadas ao regime de chuvas, estas variedades apresentam características valorizadas de paladar e cozimento. A FBN pode representar entre 51 % e 79% do N absorvido por diferentes variedades feijão-caupi cultivadas por agricultores familiares no Agreste da Paraíba (Freitas et al., 2012b). De acordo com o potencial de produção biomassa da variedade. a simbiose. estabelecida com bactérias nativas do solo, chega a ser responsável por até 45 kg de N por hectare de cultivo (Tabela 2). Em consórcio com milho, a produtividade do feijão-caupi diminui e a fixação pode se aproximar dos 30 kg ha⁻¹, dos quais 18 kg permanecem na palhada (Martins et al., 2015a).

<u>Leguminosas herbáceas utilizadas como adubos verdes ou forrageiras</u>

O potencial de FBN de leguminosas herbáceas nativas é uma característica importante para avaliar seu potencial de uso como forrageiras e/ou adubos verdes (Mapfumo et al., 2005; Nezomba et al., 2009; Tauro et al., 2009; Onyeonagu e Asiegbu, 2011). Esta característica é pouco conhecida para as espécies nativas do Semiárido brasileiro, mas as poucas já estudadas demonstram capacidade de absorver altas proporções de N atmosférico (Freitas et al., 2011: Freitas et al., 2012a). O desempenho de espécies exóticas, bastante estudadas em outras regiões (Paulino et al., 2009; Carvalho et al., 2013), também tem sido pouco pesquisado nos solos da região, mas algumas demonstram potencial para formar simbiose efetiva quando cultivadas como adubos verdes (Ferreira Neto, 2013; Dantas, 2014). Com essa tendência de apresentar alto %Ndda, as quantidades de N fixadas pelas leguminosas são definidas pela capacidade de produção de biomassa.

As primeiras estimativas da FBN em leguminosas herbáceas nativas (Tabela demonstraram que essa fixação contribui com proporções altas da nutrição nitrogenada da jureminha (Desmantus pernambucanus (L.) feijão-de-rolinha (Macroptilium Thell.), lathyroides (L.) Urb.) e orelha-de-onca (Macroptilium martii (Benth.) Maréchal e

Baudet), podendo chegar a mais de 85% (Freitas et al., 2011). Estes dados foram gerados em casade-vegetação, mas permitem uma estimativa inicial da capacidade das espécies de fixar entre 10 e 30 kg ha⁻¹ de N em campo.

Em pastagens naturais, a produção de biomassa normalmente é limitada pela baixa disponibilidade de água para as plantas, consequência das baixas médias de precipitação anual, pelo caráter errático das chuvas e predominância de solos rasos. Na Caatinga, a produção de biomassa de herbáceas varia muito entre áreas (Moreira et al., 2006; Santana et al., 2011). Embora a proporção de leguminosas espontâneas capazes de realizar FBN nesta biomassa seja baixa (em torno de 4% do total de herbáceas), a contribuição da simbiose é alta (Ndda > 80%), resultando em aportes de até 6 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N fixado em áreas sem vegetação arbórea (Freitas et al., 2012b). Em parcelas com plantas espontâneas utilizadas como adubos verdes (Dantas, 2014), a proporção de biomassa de leguminosas pode chegar a 23 % e o alto desempenho simbiótico (Ndda >89 %) resulta em adições de N (29 kg ha⁻¹ em 90 dias) que podem ser comparáveis às de espécies tradicionalmente utilizadas com adubos verdes, como crotalária (Crotalaria juncea (L.)) e feijão-guandu (Cajanus cajan (L.) Mill).

O cultivo de adubos verdes (ou plantas de cobertura) é uma prática utilizada para, entre outros benefícios, adicionar nitrogênio aos sistemas (Torres et al., 2005; Paulino et al., 2009; Zotarelli et al., 2012; Carvalho et al., 2013), mas que ainda é pouco utilizada no Semiárido brasileiro (Pimentel et al., 2011; Xavier et al., 2013). As primeiras estimativas do potencial de FBN nessa região demonstram que as quantidades de N fixadas por diferentes adubos verdes podem ser maiores que as quantidades exportadas na fruticultura irrigada, como demonstrado recentemente por Dantas (2014) e Ferreira Neto (2013).

Este balanço de nitrogênio favorável foi observado em cultivos de maracujá, com leguminosas cultivadas nas entrelinhas, e de melão, com cultivo prévio de coquetéis de leguminosas e gramíneas, com aportes de N comparáveis aos obtidos em outras regiões (Tabela 2).

Os benefícios que podem ser obtidos pela utilização de adubos verdes são dependentes da correta escolha da espécie fixadora e dos manejos dessas espécies. Estas informações ainda são escassas no Semiárido e são necessários esforços para gerar estimativas dos potenciais de FBN para

condições edafoclimáticas. Por diversas exemplo, a crotalária e o feijão-de-porco (Canavalia ensiformis (L.) DC.) apresentaram comportamentos diferenciados quando cultivados no Agreste, em consórcio com maracujá (Dantas, 2014), ou na região do submédio São Francisco, compondo misturas de espécies (denominadas de coquetéis) utilizadas como abubos verdes em cultivo prévio ao melão irrigado (Ferreira Neto, 2013). Nas duas regiões, a crotalária apresentou capacidade de obter a maior parte de seu N da atmosfera (Ndda > 87%), mas a produção de biomassa reduzida limitou a fixação desse elemento no Agreste. O feijão-de-porco chegou a fixar 158 kg ha⁻¹ de N no Agreste, mas quando utilizado juntamente com outras espécies no Sertão não apresentou um sinal isotópico de FBN, provavelmente por característico ausência de nodulação com bactérias nativas eficazes. Em casos como este, é possível que a inoculação com bactérias previamente selecionadas melhore o desempenho simbiótico da associação rizóbio-leguminosa.

Sistemas agroflorestais

O plantio de fileiras de árvores ou arbustos em cultivos agrícolas pode ser uma opção para minimizar a fragilidade dos sistemas de produção (Ngegba et al., 2007; Lima et al., 2011). No caso de serem utilizadas leguminosas capazes de FBN, o N fixado nas árvores pode representar uma fonte adicional desse elemento para as culturas comerciais consorciadas. Por estes motivos, os sistemas agroflorestais são adotados há bastante tempo em diversas regiões semiáridas (Pérez-Marin et al., 2007; Maia et al., 2007; Lima et al., 2011; Martins et al., 2013; Siriri et al., 2013).

No Semiárido brasileiro, os sistemas agroflorestais aumentam e estabilizam a produção de biomassa (Perez-Marin et al., 2007; Martins et al., 2013) e podem ainda trazer outros benefícios, como a proteção contra erosão, apesar de requererem estratégias efetivas para limitar a competição entre as árvores e as espécies anuais (Siriri et al., 2013). Além disto, a adição de N ao sistema, quando se utilizam leguminosas arbóreas, é uma alternativa à aplicação de fertilizantes.

Embora a produtividade de biomassa total seja maior em sistemas agroflorestais que em cultivos mais tradicionais, a produtividade das espécies herbáceas é menor (Pérez-Marin et al., 2007; Martins et al., 2013), por isso a quantificação dos aportes via FBN nestes agroecossistemas é fundamental para seu planejamento e manejo. Recentemente foram

feitas quantificações do N fixado em leguminosas (Martins et al., 2015a) em sistemas agroflorestais conduzidos em Taperoá, PB. Em sistemas com cultivo de capim buffel e palma entre ruas de gliricidia (*Gliricidia sepium* Jacq.) e maniçoba (*Manihot glaziovii* Muel Arg), a adição anual de N fixado em simbiose com as bactérias nativas do solo pode chegar a 40 kg ha⁻¹. Por outro lado, quando o consórcio feijão-caupi + milho foi cultivado entre as ruas de árvores, a gliricídia não apresentou fixação e a produção de biomassa do feijão-caupi foi baixa, resultando em pequena quantidade de N fixado no sistema (2,7 kg ha⁻¹).

Gramíneas

A ocorrência de bactérias diazotróficas nos tecidos de gramíneas já é conhecida há algum tempo, sugerindo que estas plantas são capazes de se beneficiar com a FBN (Moreira e Siqueira, 2006). Levando em consideração o potencial de produção de biomassa, a capacidade de FBN em gramíneas significa um alto potencial de incremento de N aos sistemas de cultivo. A principal gramínea cultivada no Semiárido é o milho, mas também existem cultivos de cana-deaçúcar, sorgo e capins diversos utilizados como pasto ou para corte para forragem. Para as

condições dessa região, ainda não existem evidências isotópicas de FBN em gramíneas e, consequentemente, não existem estimativas do N fixado nessas plantas. Em outras regiões, sinais de δ^{15} N próximos do sinal do N_2 atmosférico, evidenciando FBN, foram relatadas para cana-deaçúcar (Urquiaga et al., 2012), milho (Montañez et al., 2009) e capim elefante (Morais et al., 2012), mas não para o sorgo e muitas outras espécies.

Agradecimentos

Ao CNPq e à FACEPE pela concessão de bolsa aos autores. Aos projetos "Produção de biomassa e aportes de nitrogênio por plantas de pomares cobertura em do Agreste Pernambuco", "Qual a importância da fixação simbiótica do nitrogênio na regeneração da Caatinga? Quantidades fixadas e condições ambientais" e "Geração de dados e modelagem subsidiar políticas de adaptação variabilidade climática em sistemas agropecuários na região Nordeste", pelo apoio financeiro nas pesquisas que geraram os resultados apresentados nesta revisão.

Tabela 2: Proporção de nitrogênio derivado da atmosfera (%Ndda) e estimativas do aporte de N fixado em

leguminosas herbáceas nativas e/ou cultivadas no Semiárido brasileiro.

leguminosas herbaceas nati	vas e/ou cultīv	adas no Semiárido brasileir	.	
			N fixado	
Espécies/nome popular	Ndda (%)	Local	(kg ha ⁻¹)	Referência
Centrosema brasilianum Centrosema pascuorum Macroptilium gracile Stylosanthes humilis	72 a 99 69 a 95 70 a 96 79 a 100	Caatinga em regeneração há 2 anos, Santa Teresinha, PB	6,42*	Freitas et al. (2012 a)
Arachis pusilla Centrosema pascuorum Macroptilium gracile Espécie não identificada	63 a 99 68 a 100 45 a 71 64 a 100	Caatinga em regeneração há 17 anos, Santa Teresinha, PB	0,30*	Freitas et al. (2012 a)
Arachis pusilla Centrosema brasilianum Centrosema pascuorum Chamaecrista serpens Macroptilium gracile Espécie não identificada	63 a 90 43 a 61 56 a 81 47 a 67 46 a 66 55 a 78	Caatinga em regeneração há 39 anos, PB	0,43*	Freitas et al. (2012 a)
Arachis pusilla Centrosema brasilianum Centrosema pascuorum Chamaecrista nictitans Chamaecrista serpens Macroptilium gracile Stylosanthes humilis Espécie não identificada	58 a 86 66 a 98 59 a 88 63 a 95 70 a 100 47 a 70 46 a 69 71 a 100	Caatinga em regeneração há 50 anos, Santa Teresinha, PB	3,00*	Freitas et al. (2012 a)
Desmanthus pernambucanus (jureminha)	6 a 50	Diferentes solos coletados nos	-	
Macroptilium martii (orelha-de-onça) Macroptilium lathyroides	16 a 86	municípios de Esperança, Areia e Remígio, PB	-	Freitas et al. (2011)
(feijão-de-rolinha)	19 a 73	-	-	
Vigna unguiculata (Feijão-caupi, variedade Moitinha)	62 - 68	Taperoá, PB	1,08 a 18,41	Martins et al. (2015a)
Vigna unguiculata, variedades:				
Cariri	46		24.88	
Sedinha	58		26.82	
Corujinha	44	Esperança, PB	22.18	Freitas et al.
Canapu	20	¥ 3 /	16.14	(2012b)
Sempre Verde	43		31.02	
Azul	47		33.26	
Costela de Vaca	79		40.54	

^{*} Quantidade total de N fixado por todas as espécies.

Referências

- Alcantara, R.M.C.M., Xavier, G.R., Rumjanek, N.G., Rocha, M.M., Carvalho, J.S., 2014. Eficiência simbiótica de progenitores de cultivares brasileiras de feijão-caupi. Revista Ciência Agronômica 45, 1-9.
- Allen, O.N., Allen, E.K., 1981. The Leguminosae: a source book of characteristics use and nodulation. University of Wisconsin Press, Wisconsin.
- Andrews, M., James, E.K., Sprent, J.I., Boddey, R.M., Gross, E., Reis Jr, F B., 2011. Nitrogen fixation in legumes and actinorhizal plants in natural ecosystems: values obtained using ¹⁵N natural abundance. Plant Ecology and Diversity 4, 131-140.
- Belane, A.K., Asiwe, J., Dakora, F.D., 2011. Assessment of N₂ fixation in 32 cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) genotypes grown in the field at Taung in South Africa, using ¹⁵N natural abundance. African Journal of Biotechnology 10, 11450-11458.
- Boddey, R.M., Peoples, M.B., Palmer, B., DART, P., 2000. Use of the ¹⁵N natural abundance technique to quantify biological nitrogen fixation by woody perennials. Nutrient Cycling in Agroecosystems 57, 235-270.
- Carvalho, H.P., Carvalho, G.J., Abbade Neto, D.O., Teixeira, L.G.V., 2013. Desempenho agronômico de plantas de cobertura usadas na proteção do solo no período de pousio. Pesquisa Agropecuária Brasileira 48, 157-166.
- Cleveland, C.C., Houlton, B.Z., Neil, C., Reed, S.C., Townsend, A.R., Wang, Y., 2010. Using indirect methods to constrain symbiotic nitrogen fixation rates: a case study from an Amazonian rain forest. Biogeochemistry 99, 1-13.
- Cleveland, C.C., Townsend, A.R., Schimel, D.S., Fisher, H., Howarth, R.W., 1999. Global patterns of terrestrial biological nitrogen (N_2) fixation in natural ecosystems. Global Biogeochemical Cycles 13, 623-645.
- Dantas, E.F., 2014. Produção de biomassa, fixação biológica de nitrogênio e decomposição de adubos verdes em pomar de maracujá no agreste Pernambucano. Dissertação (Mestrado). Recife, UFPE.
- Faye, A., Sall, S., Chotte, J.L., Lesueur, D., 2007. Soil bio-functioning under *Acacia nilotica* var. *tomentosa* protected forest along the Senegal River. Nutrient Cycling in Agroecosystems 79, 35-44.

- Fernandes Jr, PI., Silva Jr, E.B., Silva Jr, S., Santos, C.E.R.S., Oliveira, P.J., Rumjanek, N.G., Martins, L.M.V., Xavier, G.R., 2012. Performance of polymer compositions as carrier to cowpea rhizobial inoculant formulations: survival of rhizobia in pre-inoculated seeds and field efficiency. African Journal of Biotechnology 11, 2945-2951.
- Ferreira Neto, R., 2013. Nitrogênio fixado em cultivo de melão sob adubação verde no município de Juazeiro, Bahia. Dissertação (Mestrado). Recife, UFPE.
- Freire Filho, F.R., 2011. Feijão-caupi no Brasil: produção, melhoramento genético, avanços e desafios. Embrapa Meio-Norte, Teresina.
- Freire Filho, F.R., Ribeiro, V.Q., Barreto, P.D., Santos, A.A., 2005. Melhoramento genético, in: Freire Filho, F.R., Lima, J.A.A., Ribeiro, V.Q. (Eds.), Feijão-caupi, Avanços Tecnológicos. Embrapa Informação tecnológica, Brasília, pp. 29-92.
- Freitas, A.D.S., Sampaio, E.V.S., Menezes, R.S.C., Tiessen, H., 2010a. ¹⁵N natural abundance of non-fixing woody species in the Brazilian dry forest (Caatinga). Isotopes in Environmental and Health Studies 46, 210-218.
- Freitas, A.D. S., Sampaio, E.V.S.B., Santos, C.E.R.S., 2010b. Abundância natural do ¹⁵N para quantificação da fixação biológica do nitrogênio em plantas, in: Figueiredo, M.V.B., Burity, H.M., Oliveira, J.P., Santos, C.E.R.S, Stamford, N.P. (Eds.), Biotecnologia Aplicada à Agricultura Textos de Apoio e Protocolos Experimentais. Embrapa Informação Tecnológica; Instituto Agronômico de Pernambuco (IPA), Brasília, pp.505-517.
- Freitas, A.D.S., Sampaio, E.V.S.B., Santos, C.E.R.S., Fernandes, A.R., 2010c. Biological nitrogen fixation in tree legumes of the Brazilian semi-arid Caatinga. Journal of Arid Environments 74, 344-349.
- Freitas, A.D.S., Sampaio, E.V.S.B., Silva, B.L.R., Almeida Cortez, J.S., Menezes, R.S.C., 2012a. How much nitrogen is fixed by biological symbiosis in tropical dry forests? 2. Herbs. Nutrient Cycling in Agroecosystems 94, 181-192.
- Freitas, A.D.S., Silva, A.F., Sampaio, E.V.S.B., 2012b. Yield and biological nitrogen fixation of cowpea varieties in the semi-arid region of Brazil. Biomass and Bioenergy 45, 109-114.
- Freitas, A.D.S., Borges, W.L., Andrade, M.M.M., Sampaio, E.V.S.B., Santos, C.E.R.S., Passos, S.R., Xavier, G.R., Mulato, B.M., Lyra,

- M.C.C.P., 2014. Characteristics of nodule bacteria from *Mimosa* spp grown in soils of the Brazilian semiarid region. African Journal of Microbiology Research 8, 788-796.
- Freitas, A.D.S., Sampaio, E.V.S.B., Ramos, A.P.S., Barbosa, M.R.V., Lyra, R.P., Araújo, E.L., 2015. Nitrogen isotopic patterns in tropical forests along a rainfall gradient in Northeast Brazil. Plant and Soil 391, 109-122.
- Freitas, A.D.S., Silva, T.O., Menezes, R.S.C., Sampaio, E.V.S.B., Araújo, E.R., Fraga, V.S., 2011. Nodulação e fixação de nitrogênio por forrageiras da Caatinga cultivadas em solos do Semiárido paraibano. Revista Brasileira de Zootecnia 40, 1856-1861.
 - Högberg, P., 1997. ¹⁵N natural abundance in soil-plant systems. New Phytologist 137, 179-203.
 - Lee, H., Fitzgerald, J., Hewins, D.B., Mcculley, R. L., Archer, S.R., Rahn, T., Throop, H.L., 2014. Soil moisture and soil-litter mixing effects on surface litter decomposition: A controlled environment assessment. Soil Biology & Biochemistry 72, 123-132.
 - Lima, S.S., Leite, L.F.C., Oliveira, F.C., Costa, D.B., 2011. Atributos químicos e estoques de carbono e nitrogênio em argissolo vermelho-amarelo sob sistemas agroflorestais e agricultura de corte e queima no norte do Piauí. Revista Árvore 35, 51-60.
 - Maia, S.M.F., Xavier, F.A.Z., Oliveira, T.S., Mendonça, E.S., Araújo Filho, J.A., 2007. Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil. Agroforestry Systems 71, 127-138.
 - Mapfumo, P., Mtambanengwe, F., Giller, K.E., Mpepereki, S., 2005. Tapping indigenous herbaceous legumes for soil fertility management by resource-poor farmers in Zimbabwe. Agriculture, Ecosystems & Environment 109, 221-233.
 - Marinho, R.C.N., Nóbrega, R.S.A., Zilli, J.E., Xavier, G.R., Santos, C.A.F., Aidar, S.T., Martins, L.M.V., Fernandes, P.I., 2014. Field performance of new cowpea cultivars inoculated with efficient nitrogen-fixing rhizobial strains in the Brazilian Semiarid. Pesquisa Agropecuária Brasleira 49, 395-402.
 - Martins, J.C.R., Freitas, A.D.S., Menezes, R.S.C., Sampaio, E.V.S.B., 2015a. Nitrogen symbiotically fixed by gliricidia and cowpea in an agroforestry system in semiarid Northeast Brazil. Pesquisa Agropecuária Brasileira 50, 178-184.

- Martins, J.C.R., Menezes, R.S.C., Sampaio, E.V.S. B., Santos, A.F., Nagai, M.A., 2013. Produtividade de biomassa em sistemas agroflorestais e tradicionais no Cariri Paraibano. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 17, 581-587.
- Martins, L.M.V., Neves, M.C.P., Rumjanek, N.G., 1997. Growth characteristics and symbiotic efficiency of rhizobia isolated from cowpea nodules of the north-east region of Brazil. Soil Biology and Biochemistry 29, 1005–1010
- Martins, L.M.V., Xavier, G.R., Rangel, F.W., Ribeiro, J.R.A., Neves, M.C.P., Morgado, L.B., Rumjanek, N.G., 2003. Contribution of biological nitrogen fixation to cowpea: a strategy for improving grain yield in the semi-arid region of Brazil. Biology and Fertility of Soils 38, 333-339.
- Martins, PG. S., Lira Jr, M.A., Bastos, M.L.R., Vicentin, R.P., Lyra, M.C.C.P., Fracetto, G.G.M., 2015b. *Mimosa caesalpiniifolia* rhizobial isolates from different origins of the Brazilian Northeast. Archives of Microbiology 197, 459-469.
- Mokgehle, S.N., Dakora, F.D., Mathews, C., 2014. Variation in N₂ fixation and N contribution by 25 groundnut (*Arachis hypogaea* L.) varieties grown in different agroecologies, measured using ¹⁵N natural abundance. Agriculture, Ecosystems & Environment 195, 161-172.
- Montañez, A., Abreu, C., Gill, P.R., Hardarson, G., Sicardi, M., 2009. Biological nitrogen fixation in maize (*Zea mays* L.) by ¹⁵N isotopedilution and identification of associated culturable diazotrophs. Biology and Fertility of Soils 45, 253-263.
- Morais, R. F., Quesada, D.M., Reis, V.M., Urquiaga, S., Alves, B.J.R., Boddey, R.M., 2012. Contribution of biological nitrogen fixation to Elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum.). Plant Soil 349, 1-12.
- Moreira, F.M.S., Siqueira, J.O., 2006. Microbiologia e Bioquímica do Solo, 2.ed. UFLA, Lavras.
- Moreira, J.N., Lira, M.A., Santos, M.V.F., Ferreira, M. A., Araújo, G.G.L., Ferreira, R.L.C., Silva, G.C., 2006. Caracterização da vegetação de Caatinga e da dieta de novilhos no Sertão de Pernambuco. Pesquisa Agropecuária Brasileira 41, 1643-1651.
- Ndiaye, M., Ganry, F., 1997. Variation in the biological N₂ fixation by tree legumes in three ecological zones from the North to the south of

- Senegal. Arid Soil Research and Rehabilitation 11, 245-254.
- Nezomba, H., Tauro, T.P., Mtambanengwe, F., Mapfumo, P., 2009. Indigenous legumes biomass quality and influence on C and N mineralization under indigenous legume fallow systems. Symbiosis 48, 78-91.
- Ngegba, M.S., Mugasha, A.G., Chamshama, S.A.O., Kimaro, A.A., 2007. *Tephrosia* biomass yield and soil fertility in one season relay intercropping with mayze in semiarid Gairo, Tanzania. Discovery and Innovation 19, 25-35.
- Nyemba, R.C., Dakora, F.D., 2010. Evaluating N₂ fixation by food grain legumes in farmers' fields in three agro-ecological zones of Zambia, using ¹⁵N natural abundance. Biology and Fertility of Soils 46, 461-470.
- Onyeonagu, C.C., Asiegbu, J.E., 2011. Preliminary study of the contribution of native legumes to the nitrogen economy of natural grasslands. African Journal of Biotechnology 10, 9600-9605.
- Osunde, A.O., Gwam, S., Bala, A., Sanginga, N., Okogun, J.A., 2003. Responses to rhizobial inoculation by two promiscuous soybean cultivars in soils of the Southern Guinea savanna zone of Nigeria. Biology and Fertility of Soils 37, 274-279.
- Otieno, P.E., Muthomi, J.W., Chemining'wa, G.A., Nderitu, J.H., 2009. Effect of rhizobia inoculation, farm yard manure and nitrogen fertilizer on nodulation and yield of food grain legumes. Journal of Biological Sciences 9, 326-332.
- Parton, W., Silver, W.L., Burke, I.C., Grassens, L., Harmon, M.E., Curre, W.S., King, J.Y., Adair, E.C., Brandt, L.A., Hart, S.C., Fasth, B., 2007. Global scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. Science 135, 361-364.
 - Paulino, G.M., Alves, B.J.R., Barroso, D.G.,
 Urquiaga, S., Espindola, J.A.A., 2009.
 Fixação biológica e transferência de nitrogênio por leguminosas em pomar orgânico de mangueira e gravioleira.
 Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília 44, 1598-1607.
 - Pereira, I.M., Andrade, L.A., Sampaio, E.V.S.B., Barbosa, M.R.V., 2003. Use-history effects on structure and flora of Caatinga. Biotropica 35, 154-165.
 - Pérez-Marin, A.P., Menezes, R.S.C., Salcedo, I.H., 2007. Produtividade de milho solteiro ou em aléias de gliricídia adubado com duas

- fontes orgânicas. Pesquisa Agropecuária Brasileira 42, 669-677.
- Pimentel, M.S., Carvalho, R.S., Martins, L.M.V., Silva, A.V.L., 2011. Seasonal response of edaphic bioindicators using green manure in Brazilian semi-arid conditions. Revista Ciência Agronômica 42, 829-836.
- Queiroz, L.P., 2009. Leguminosas da Caatinga. UEFS, Feira de Santana.
- Raddad, A.Y., Salih, A.A., El Fadl, M., Kaarakka, V., Luukkanen, O., 2005. Symbiotic nitrogen fixation in eight *Acacia senegal* provenances in dryland clays of the Blue Nile Sudan estimated by the ¹⁵N natural abundance method. Plant Soil 275, 261-269.
- Roggy J.C., Prévost, M.F., Garbaye, J., Domenach, A.M., 1999. Nitrogen cycling in the tropical rain forest of French Guiana: comparison of two sites with contrasting soil types using $\delta^{15}N$. Journal of Tropical Ecology 15, 1-22.
- Sampaio, E.V.S.B., Araújo, E.L., Salcedo, I.H., Tiessen, H., 1998. Regeneração da vegetação de Caatinga após corte e queima, em Serra Talhada, PE. Pesquisa Agropecuária Brasileira.33, 621-632.
- Sampaio, E.V.S.B., Tiessen, H., Antonino, A.C.D., Salcedo, I.H., 2004. Residual N and P fertiolizer effect and fertilizer recovery on intercropped and sole-cropped corn and beans in semiarid northeast Brazil. Nutrient Cycling in Agroecosystems 70, 1-11.
- Santana, D.F.Y., Lira, M.A., Santos, M.V.F.,
 Ferreira, M.A., Silva, M.J.A., Marques, K.A.,
 Mello, A.C.L., Santos, D.C., 2011.
 Caracterização da Caatinga e da dieta de novilhos fistulados, na época chuvosa, no Semiárido de Pernambuco. Revista Brasileira de Zootecnia 40, 69-78.
- Shearer, G., Kohl, D.H., 1986. N₂ fixation in field settings: estimations based on natural ¹⁵N abundance. Australian Journal of Plant Physiology 13, 699-756.
- Silva, R.P., Santos, C.E.R.S., Lira Júnior, M.A., Stamford, N.P., 2008. Efetividade de estirpes selecionadas para feijão caupi em solo da região semi-árida do sertão da Paraíba. Revista Brasileira de Ciências Agrárias 3, 105-110.
- Siriri, D., Wilson, J., Coe, R., Tenywa, M.M., Bekunda, M.A., Ong, C.K., Black, C.R., 2013. Trees improve water storage and reduce soil evaporation in agroforestry systems on bench terraces in SW Uganda. Agroforestry Systems 87, 45-58.

- Souza, L.Q., Freitas, A.D.S., Sampaio, E.V.S.B., Moura, P.M., Menezes, R.S.C., 2012. How much nitrogen is fixed by biological symbiosis in tropical dry forests? 1. Trees and shrubs. Nutrient Cycling in Agroecosystems 94, 171-179.
- Sprent, J.I., 2009. Legume nodulation: a global perspective. Wiley-Blackwell, Chichester.
- Stahl, L., Nyberg, G., Högberg, P., Buresh, R.J., 2002. Effects of planted tree fallows on soil nitrogen dynamics, above-ground and root biomass, N₂-fixation and subsequent maize crop productivity in Kenya. Plant and Soil 243, 103-117.
- Tauro, T.P., Nezomba, H., Mtambanengwe, F., Mapfumo, P., 2009. Germination, field establishment patterns and nitrogen fixation of indigenous legumes on nutrient-depleted soils. Symbiosis 48, 92-101.
- Teixeira, F.C.P., Borges, W.L., Xavier, R.B., Rumjanek, N.G., 2010. Characterization of indigenous rhizobia from Caatinga. Brazilian Journal of Microbiology 41, 201-208.
- Teixeira, F.C.P., Reinert, F., Rumjanek, N.G., Boddey, R.M., 2006. Quantification of the contribution of biological nitrogen fixation to *Cratylia mollis* using the ¹⁵N natural abudance technique in the semi-arid Caatinga region of Brazil. Soil Biology and Biochemistry 38, 1989-1993.
- Tiessen, H., Salcedo, I.H., Sampaio, E.V.S.B., 1992. Nutrient and soil organic matter dynamics under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. Agriculture, Ecosystems and Environment 38, 139-151.

- Torres, J.L.R., Pereira, M.G., Andrioli, I., Polidoro, J.C., Fabian, A.J., 2005. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de Cerrado. Revista Brasileira de Ciência do Solo 29, 609-618.
- Unkovich, M., Herridge, D., Peoples, M., Cadisch, G., Boddey, R., Giller, K., Alves, B., Chalk, P., 2008. Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems. ACIAR, Canberra.
- Urquiaga, S., Xavier, R.P., Morais, R.F., Batista, R. B., Schultz, N., Leite, J.M., Maia, J.S., Barbosa, K.P.; Resende, A. S., Alves, B.J.R., Boddey, R.M., 2012. Evidence from field nitrogen balance and ¹⁵N natural abundance data for the contribution of biological N₂ fixation to Brazilian sugarcane varieties. Plant and Soil 356, 5-21.
- Xavier, F.A.S., Maia, S.M.F., Ribeiro, K.A., Mendonça, E.S., Oliveira, T.S., 2013. Effect of cover plants on soil C and N dynamics in different soil management systems in dwarf cashew culture. Agriculture, Ecosystems and Environment 165, 173-183.
- Zotarelli, L., Zatorre, N.P., Boddey, R.M., Urquiaga, S., Jantalia, C.P., Franchini, J.C., Alves, B.J.R., 2012. Influence of no-tillage and frequency of a green manure legume in crop rotations for balancing N outputs and preserving soil organic C stocks. Field Crops Research 132, 185-195.