

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

AUGUSTO CESAR DE ARRUDA SANTANA

**INOCULAÇÃO COM BACTÉRIAS PROMOTORAS DE
CRESCIMENTO E CONSORCIAÇÃO COM LEGUMINOSAS:
ALTERNATIVAS DE APORTE DE NITROGÊNIO PARA O CULTIVO
DE CANA-DE-AÇÚCAR**

RECIFE

2022

Augusto Cesar de Arruda Santana

Inoculação com bactérias promotoras de crescimento e consorciação com leguminosas: alternativas de aporte de nitrogênio para o cultivo de cana-de-açúcar

Tese apresentada ao programa de Pós-graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos Requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Orientadora:

Dra. Ana Dolores Santiago de Freitas

Coorientadores:

Dr. Jadson Emanuel Lopes Antunes

Dr. Vinícius Santos Gomes da Silva

RECIFE

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A923i Santana, Augusto Cesar de Arruda
INOCULAÇÃO COM BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO E CONSORCIAÇÃO
COM LEGUMINOSAS: ALTERNATIVAS DE APORTE DE NITROGÊNIO PARA O CULTIVO DE
CANA-DE-AÇÚCAR / Augusto Cesar de Arruda Santana. - 2022.
190 f. : il.

Orientadora: Ana Dolores
Santiago de Freitas.
Coorientadora: Jadson Emanuel
Lopes Antunes. Inclui referências.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo, Recife, 1.

1. Arachis hypogaea. 2. Abundância natural do 15N. 3. Vigna unguiculata. 4. Glycine max. 5.
Saccharum spp. I. Freitas, Ana Dolores Santiago de, orient. II. Antunes, Jadson Emanuel Lopes,
coorient. III. Título

CDD 631.4

AUGUSTO CESAR DE ARRUDA SANTANA

Inoculação com bactérias promotoras de crescimento e consorciação com leguminosas:
alternativas de aporte de nitrogênio para o cultivo de cana-de-açúcar

Tese apresentada ao programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Aprovado em 15 de fevereiro de 2022

BANCA EXAMINADORA

Dra. Ana Dolores Santiago de Freitas
Orientadora
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Everardo Valadares de Sa Barreto Sampaio
Universidade Federal de Pernambuco

Dr. Paulo Ivan Fernandes Junior
Embrapa Semiárido

Prof. Dr. Arthur Prudêncio de Araújo Pereira
Universidade Federal do Ceará

Dr. Pedro Henrique Neves de Souza
Usina Miriri

“O que é impossível para os homens é possível para Deus”

Lucas 18:27

DEDICO

Ao meu Grande Deus, por sempre estar presente ao meu lado, ao meu, filho Ian Cesar, e minha esposa, Dilene Nicolau, por serem os amores da minha vida, aos meus pais, por serem minha base e meu conforto, e a meus familiares e amigos, que me apoiaram nesta longa jornada e fizeram-me sentir mais forte para concretizar este objetivo!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por tudo que fez e fará em minha vida. Sem Ele nada seria possível. Os caminhos trilhados, mesmo com dificuldades, são realizados graças à presença Dele em nossas vidas.

À minha esposa, Dilene Nicolau, e ao meu, filho Ian Cesar, que são grandes conquistas que ocorreram em minha vida, por estarem sempre presentes, dando-me forças para continuar, e por serem os amores da minha vida.

Aos meus pais, Lenivaldo e Maria Aparecida, por serem minha base e fortaleza. Grandes conquistas devo aos meus pais, por sempre acreditarem e apoiarem na luta por dias melhores em minha vida.

À toda minha família paterna e materna, que aconselha, ajuda e traz momentos repletos de felicidades.

À minha orientadora Ana Dolores, que, além de uma grande profissional, é de fato uma verdadeira amiga, que sabe o momento certo para tudo. Te agradeço muito por fazer parte do meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus Coorientadores, Jadson Emanuel e Vinícius Santos, por sempre estarem presentes, aconselhando nas atividades diárias.

Aos pesquisadores Maria do Carmo Lyra e Paulo Ivan Fernandes, pelo apoio que deram nesta grande jornada.

À professora Emília Arruda, por ceder seu tempo e espaço de trabalho em prol da minha pesquisa.

Aos meus amigos de Universidade e que fazem parte do Grupo de Pesquisa em Fixação Biológica de N (GFBN), Dra. Carolina Etienne, Edilândia, Leandro, Jéssica Rafaela, Sueide, Layane, Ítalo, Juscélia, Maryana, Aline, Cleiton, Pablo, Andressa, Jessyca Adriana, Laura, Flaviano e Aleksandro, que sempre estão firmes e fortes me ajudando a conquistar cada degrau.

A todos os meus amigos de pós-graduação em Ciência do Solo da UFRPE, que participaram de momentos de felicidade comigo.

Ao grupo de pesquisa GNAF, por ter me dado a oportunidade de estar junto com todos durante dois anos, que foi o período de meu mestrado, em especial à minha amiga Magda, pelo companheirismo e todo o carinho. Vocês ainda fazem parte da minha vida.

Aos meus amigos do dia-a-dia, em especial a Eliabe, Iliane, Marcones, Dane, Irmã Cristina, Sergio, Lene e outros que não foram mencionados. Eu tenho grande admiração por todos.

Ao meu Pastor Aprígio por ser um exemplo de pessoa e por estar sempre ao meu lado, trabalhando por dias melhores.

Aos funcionários da UFRPE, em especial a Sra. Maria do Socorro, pela grande pessoa que é, e por ser uma mulher dedicada, guerreira e amiga.

À Usina Miriri, pela oportunidade de executar minhas atividades, dando apoio e orientações para que tudo fosse alcançado com sucesso.

À Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC), representada pelo coordenador Dr. Djalma Simões Neto e pelo técnico Evanilson Silva, pela contribuição e apoio no experimento de campo e no laboratório.

A todos os laboratórios da UFRPE pelo apoio na execução das análises químicas.

À CAPES, pela concessão da bolsa.

À Terra Soluções Agrícolas e à Microgeo, em especial a Ricardo, Thiago e o Leandro, pessoas por quem tenho grande admiração e que sempre estão juntos comigo. Vocês são diferenciados e merecem todo o meu respeito.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, tornaram tudo isso possível!

Muito obrigado!

INOCULAÇÃO COM BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO E CONSORCIAÇÃO COM LEGUMINOSAS: ALTERNATIVAS DE APORTE DE NITROGÊNIO PARA O CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO

A adoção de tecnologias que utilizem o processo de fixação biológica de nitrogênio (FBN) pode contribuir para uma agricultura de baixo carbono, por garantir aportes desse nutriente com substituição ou redução do uso de insumos dependentes de energia fóssil para sua produção. Consórcios com leguminosas nodulantes e inoculação com bactérias promotoras de crescimento em plantas (BPCP) são práticas que têm potencial de aportar N aos sistemas de cultivo, possibilitando ganhos produtivos e ambientais. Com base nisto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o efeito da adoção dessas duas tecnologias sobre o desenvolvimento, a produtividade, o balanço de N e a renda de cultivos de cana-de-açúcar em duas regiões produtoras do Nordeste do Brasil. Foram avaliados: o efeito da inoculação com diferentes bactérias promotoras de crescimento sobre o desenvolvimento e as características histológicas das raízes de mudas de cana-de-açúcar (variedade RB92579); o efeito da inoculação com diferentes BPCP e do consórcio com leguminosas nodulantes sobre o balanço de N (quantidades fixadas versus quantidades exportadas de N) e sobre o desenvolvimento e a produtividade agrícola e industrial da cana-de-açúcar; a produtividade de grãos das leguminosas consorciadas com a cana; e os benefícios econômicos dos diferentes sistemas de cultivo em duas regiões produtoras do Nordeste do Brasil. Três experimentos foram montados, um em casa de vegetação e dois em campo em dois locais, a Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC), no município de Carpina, PE, e outro Usina Miriri, no município de Rio Rinto, PB. No primeiro experimento, a cana-de-açúcar foi cultivada em tubetes contendo substrato inerte e estéril, com ou sem inoculações com bactérias diazotróficas endofíticas previamente isoladas de cana-de-açúcar, em condições monoxênicas e com ou sem adubação nitrogenada mineral. As estirpes bacterianas utilizadas foram IPA CC23- (*Paenibacillus* sp.), IPA CF62 (*Paenibacillus* sp.) e IPA CC44 (*Burkholderia* sp.). Os tratamentos foram distribuídos em blocos casualizados com quatro repetições, sendo avaliados atributos biométricos e histológicos das mudas. Os experimentos em campo foram conduzidos em arranjo fatorial, utilizando um delineamento em blocos casualizados; em que os tratamentos corresponderam ao consórcio da cana-de-açúcar com diferentes espécies de leguminosas produtoras de grãos (feijão-caupi e amendoim em ambos os experimentos, e também soja, apenas em um dos experimentos) e diferentes fontes de N para a cultura da cana-de-açúcar (inoculação com a estirpe de bactéria diazotrófica IPA CF62, inoculação com o mix de bactérias diazotróficas da Embrapa e fertilizante mineral). Foram incluídos tratamentos controle sem leguminosas consorciadas (cultivo solteiro) e controle sem aplicação de N na cana-de-açúcar. Nesses experimentos em campo foram avaliados a simbiose das leguminosas (nodulação natural e quantidade de N fixado), a produção de grãos, o balanço de N e o rendimento econômico das leguminosas, nos diferentes sistemas. Também foram avaliados atributos biométricos no decorrer do tempo de cultivo, contribuições da FBN e da transferência de N fixado, produção de biomassa, produtividade agrícola e industrial da cana-de-açúcar, além do retorno econômico dos manejos adotados. As mudas de cana que receberam adubação nitrogenada produziram mais biomassa, seguidas pelas mudas inoculadas com as estirpes IPA CF62 e IPA CF44. A densidade de pelos radiculares aumentou pela inoculação das estirpes IPA CF62 e IPA CF44. Em relação às leguminosas, o feijão-caupi teve maior contribuição da FBN, maior produção de biomassa e de grãos e, conseqüentemente, maior retorno econômico. Na cultura da cana-de-açúcar o consórcio com feijão-caupi associado com a inoculação com a estirpe IPACF62 apresentou maiores retornos econômicos. A utilização das tecnologias estudadas é promissora para um cultivo mais sustentável da cana-de-açúcar.

Palavras-chaves: *Arachis hypogaea*. Abundância natural do ^{15}N . Balanço de nitrogênio. *Glycine max*. *Saccharum* spp. Retorno econômico. *Vigna unguiculata*.

INOCULATION WITH GROWTH PROMOTING BACTERIA AND INTEROCOCIATION WITH LEGUMINOUS: NITROGEN SUPPLY ALTERNATIVES FOR SUGAR CANE CULTIVATION

ABSTRACT

The adoption of technologies that use the process of biological nitrogen fixation (BNF) can contribute to a low carbon agriculture, by guaranteeing inputs of this nutrient with substitution or reduction of the use of inputs dependent on fossil energy for its production. Intercropping with nodulating legumes and inoculation with plant growth-promoting bacteria (GPCP) are practices that have the potential to add N to cropping systems, enabling productive and environmental gains. Based on this, the objective of this research was to evaluate the effect of adopting these two technologies on the development, productivity, N balance and income of sugarcane crops in two producing regions in Northeast Brazil. The following were evaluated: the effect of inoculation with different growth-promoting bacteria on the development and histological characteristics of the roots of sugarcane seedlings (variety RB92579); the effect of inoculation with different BPCP and intercropping with nodulating legumes on the N balance (fixed amounts versus exported amounts of N) and on the development and agricultural and industrial productivity of sugarcane; grain yield of legumes intercropped with sugarcane; and the economic benefits of different cropping systems in two producing regions in Northeast Brazil. Three experiments were set up, one in a greenhouse and two in the field at two locations, the Carpina Sugarcane Experimental Station (EECAC), in the municipality of Carpina, PE, and another Usina Miriri, in the municipality of Rio Rinto, PB. In the first experiment, sugarcane was cultivated in tubes containing an inert and sterile substrate, with or without inoculation with endophytic diazotrophic bacteria previously isolated from sugarcane, under monoxenic conditions and with or without mineral nitrogen fertilization. The bacterial strains used were IPA CC23-(*Paenibacillus* sp.), IPA CF62 (*Paenibacillus* sp.) and IPA CC44 (*Burkholderia* sp.). The treatments were distributed in randomized blocks with four replications, being evaluated biometric and histological attributes of the seedlings. Field experiments were carried out in a factorial arrangement, using a randomized block design; in which the treatments corresponded to the intercropping of sugarcane with different grain-producing leguminous species (cowpea and peanut in both experiments, and also soybean, only in one of the experiments) and different N sources for the crop from sugarcane (inoculation with the diazotrophic bacteria strain IPA CF62, inoculation with Embrapa's mix of diazotrophic bacteria and mineral fertilizer). Control treatments without intercropped legumes (single cultivation) and control without N application on sugarcane were included. In these field experiments, legume symbiosis (natural nodulation and amount of fixed N), grain yield, N balance and legume economic yield were evaluated in different systems. Biometric attributes were also evaluated during the time of cultivation, contributions of FBN and the transfer of fixed N, biomass production, agricultural and industrial productivity of sugarcane, in addition to the economic return of the adopted managements. The sugarcane seedlings that received nitrogen fertilization produced more biomass, followed by the seedlings inoculated with the strains IPA CF62 and IPA CF44. Root hair density was increased by inoculation of IPA CF62 and IPA CF44 strains. In relation to legumes, cowpea had a greater contribution of FBN, greater biomass and grain production and, consequently, greater economic return. In sugarcane, intercropping with cowpea associated with inoculation with the IPACF62 strain showed higher economic returns. The use of the technologies studied is promising for a more sustainable cultivation of sugarcane.

Keywords: *Arachis hypogaea*. Natural abundance of ^{15}N . Nitrogen balance. *Glycine max*. *Saccharum* spp. Economic return. *Vigna unguiculata*.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	15
1.1 Hipóteses	17
1.2 Objetivo geral	17
1.3 Objetivos específicos	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 A cultura da cana-de-açúcar	18
2.2 O N e sua importância para a cana-de-açúcar	20
2.3 Uso da adubação nitrogenada na cana-de-açúcar	21
2.4 Efeito nocivo da adubação nitrogenada para o meio ambiente	23
2.5 Alternativas para cultivos mais sustentáveis	24
2.6 Consórcios com leguminosas como alternativa sustentável para os cultivos	26
2.6.1 O Amendoim	28
2.6.2 A Soja.....	30
2.6.3 O Feijão-caupi	32
2.7 Inoculação com bactérias promotoras de crescimento em plantas (BPCPs)	34
2.8 Características morfoanatômicas das raízes das plantas	36
2.9 Políticas públicas sustentáveis para o setor sucroenergético	37
REFERÊNCIAS	38
3 INOCULAÇÃO COM BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO AFETA PARÂMETROS BIOMÉTRICOS E HISTOLÓGICOS DE MUDAS PRÉ-BROTADAS DE CANA-DE-AÇÚCAR	51
Resumo	51
Abstract	52
3.1 Introdução	53
3.2 Material e métodos	53
3.2.1 Delineamento experimental	54
3.2.2 Estirpes utilizadas e preparo do inoculante.....	55
3.2.3 Confeção de MPBs e condução do experimento.....	55
3.2.4 Parâmetros avaliados	56
3.2.5 Análise estatística	57
3.3 Resultados e discussão	57
3.3.1 Parâmetros biométricos das MPBs de cana-de-açúcar	57
3.3.2 Análises morfoanatômicas das raízes	59

3.3.3 Teor e acúmulo de N na parte aérea das MBP	64
3.4 Conclusão	64
Referências	66
4 PRODUTIVIDADE, APORTES DE N E DE RENDA POR LEGUMINOSAS DE GRÃOS CULTIVADAS NAS ENTRELINHAS DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	71
Resumo	71
Abstract	72
4.1 Introdução	73
4.2 Material e métodos	75
4.2.1 Descrição e caracterização das áreas experimentais	75
4.2.2 Caracterização química e física dos solos das áreas experimentais.....	76
4.2.3 Desenho experimental e tratamentos aplicados	78
4.2.4 Estimativa da nodulação, produção de biomassa aérea e quantidade de N fixado nos restos culturais das leguminosas.	81
4.2.5 Avaliação da produtividade de grãos	83
4.2.6 Balanço de N no sistema.....	83
4.2.7 Estimativa da renda obtida pela comercialização dos grãos nos cultivos consorciados	83
4.2.7 Análise estatística	84
4.3 Resultados e discussão.....	84
4.3.1 Avaliação da nodulação e da produção de biomassa da parte aérea das leguminosas de grãos.....	84
4.3.2 Estimativa do N fixado nas leguminosas	90
4.3.3 Produtividade de grãos das leguminosas	97
4.3.4 Levantamento econômico dos cultivos no sistema consorciado	100
4.3.5 Balanço de N.....	106
4.4 Conclusão	110
Referências	110
5 CONTRIBUIÇÃO DA INOCULAÇÃO COM BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO E DO CONSÓRCIO COM LEGUMINOSAS PARA O DESENVOLVIMENTO E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	117
Resumo	117
Abstract	118
5.1 Introdução	119
5.2 Material e métodos	120

5.2.1	Descrição e caracterização da área	120
5.2.2	Caracterização química e física dos solos das áreas de estudo.....	122
5.2.3	Desenho experimental e tratamentos aplicados	123
5.2.4	Avaliações biométricas da cana-de-açúcar	126
5.2.5	Estimativa da FBN na cana-de-açúcar	126
5.2.6	Avaliação da transferência do N das leguminosas para a cana-de-açúcar.....	127
5.2.7	Avaliação da produção de biomassa aérea.....	128
5.2.8	Avaliação da produtividade e dos atributos tecnológicos.....	128
5.2.9	Análises estatísticas	128
5.3	Resultados e discussão.....	129
5.3.1	Biometria da cana-de-açúcar no decorrer do tempo	129
5.3.1.2	Diâmetro médio dos colmos.....	136
5.3.1.3	Perfilhamento da cana-de-açúcar	137
5.3.2	Estimativa da contribuição do N atmosférico para a cana-de-açúcar.....	139
5.3.3	Biomassa aérea da cana-de-açúcar aos 335 DAP	142
5.3.5	Produtividade agrícola e industrial	147
5.4	Conclusão	156
	REFERÊNCIAS	157
6	LEVANTAMENTO ECONÔMICO DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES CONSÓRCIOS COM LEGUMINOSAS DE GRÃOS E DIFERENTES FONTES DE N	163
	Resumo	163
	Abstract	164
6.1	Introdução	165
6.2	Material e métodos	166
6.2.1	Descrição e caracterização da área	166
6.2.2	Caracterização química e física do solo em estudo	167
6.2.3	Desenho experimental e tratamentos aplicados	169
6.2.4	Avaliação da produtividade e dos atributos tecnológicos.....	172
6.2.5	Avaliação da Margem de contribuição agrícola	172
6.3	Resultados e discussão.....	172
6.3.1	Margem de contribuição agrícola em relação a produção de açúcar na EECAC	172
6.3.2	Margem de contribuição agrícola para a produção de álcool na EECAC	173
6.3.3	Margem de contribuição agrícola para a produção da cachaça na EECAC	174

6.3.4 Margem de contribuição agrícola em relação a venda da cana bruta na EECAC	175
6.3.5 Margem de contribuição agrícola para a produção de açúcar na Usina Miriri.....	180
6.3.6 Margem de contribuição agrícola para a produção de álcool na Usina Miriri.....	181
6.3.7 Margem de contribuição agrícola para a produção da cachaça na Usina Miriri.....	181
6.3.8 Margem de contribuição agrícola em relação a venda da cana bruta na Usina Miriri.....	182
6.4 Conclusão	187
Referências	187
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	190

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é o maior produtor mundial e exportador de derivados da cana-de-açúcar, que é considerada uma das culturas de maior importância para a economia do país. A importância econômica da cultura vem desde o século XVI quando foi introduzida pelos portugueses. A produção da cultura vem enfrentando diversas dificuldades que acarretam perdas de produtividade, principalmente as relacionadas ao clima. O Nordeste vem enfrentando anos com secas severas, que afetam os cultivos da região, e o Sudeste, além da seca, enfrentou geadas que afetaram os canaviais no ano de 2021.

A busca por novas tecnologias é essencial para se obter maiores desempenhos dos cultivos. O melhoramento genético foi uma das tecnologias adotadas no Brasil, que levou à disponibilização de novas variedades mais produtivas e adaptadas às diferentes regiões produtoras. No Nordeste, a variedade RB92579 apresenta bons desempenhos, sendo firmada, atualmente, como a variedade mais cultivada na região. Ela pode atingir produtividades superiores a 140 Mg ha^{-1} , quando cultivada em plena irrigação e sob equilíbrio nutricional. No entanto, pode-se observar produtividades inferiores a 60 Mg ha^{-1} para esta variedade, quando cultivada em ambientes de baixa fertilidade e com déficit de pluviosidade.

As exigências nutricionais, principalmente de nitrogênio (N), das novas variedades demonstram a dependência de adubações nitrogenadas para garantir maiores desempenhos. No entanto, a busca por tecnologias sustentáveis converge para a manutenção da produtividade com menor impacto ambiental.

Em relação à nutrição mineral da cana-de-açúcar, o N é segundo elemento mais absorvido pela cultura, desempenhando funções na divisão e expansão celular, síntese de aminoácidos, ácidos nucleicos e clorofila. A adubação nitrogenada responde apenas por uma fração da absorção deste nutriente, e pode causar impacto negativo no meio ambiente. O uso de fertilizantes nitrogenados pode trazer problemas ambientais que estão associados à produção de N_2O , que consiste em um composto mais danoso que o CO_2 na atmosfera e acúmulos de NO_3^- em rios e lagos que acarretam em eutrofização. Além disso, boa parte dos fertilizantes são fabricados usando energia fóssil, que resulta em emissões de CO_2 para a atmosfera.

A busca por tecnologias sustentáveis, que visem diminuir o uso de insumos na agricultura e garantam a sustentabilidade dos ecossistemas, é de grande importância e está se tornando uma realidade em todo o mundo. Práticas agrícolas como adubação verde, uso de inoculantes que potencializam a fixação biológica de nitrogênio (FBN) e o uso de bactérias

promotoras de crescimento das plantas são alternativas sustentáveis cada vez mais necessárias para garantir a manutenção dos cultivos com baixo uso de insumos.

O uso de leguminosas nodulantes em consórcio com a cana-de-açúcar pode trazer inúmeros benefícios, desde aspectos diretos como a diminuição da utilização de fertilizantes nitrogenados devidos aos aportes de N simbioticamente fixado e da emissão de poluentes, até aspectos indiretos, como benefícios na microbiota do solo, na ciclagem de nutrientes e nas propriedades físicas do solo, entre outros. Ganhos produtivos e econômicos também podem ser observados ao serem utilizadas leguminosas de grãos, que, além de contribuírem com os nutrientes deixados em seus restos culturais, propiciando menor uso de insumos para a cultura intercalada, trazem retorno econômico, pela venda dos grãos.

Outra tecnologia de grande potencial para a cana-de-açúcar é o uso de inoculantes com bactérias promotoras de crescimento de plantas. Benefícios dessa tecnologia já foram observados, no sentido de promover diminuição no uso de insumos e manutenção da produtividade. Com isto, atualmente, tecnologias que visem aprimorar o uso de inoculantes são de fato reconhecidas no mundo todo como sendo um manejo que pode garantir maior sustentabilidade da agricultura.

O uso de tecnologias que utilizam o processo de FBN estão alinhadas com a obtenção de uma agricultura de baixo carbono, inclusive sendo preconizado pelo Plano ABC do Ministério da Agricultura do Brasil. Com isto, esta pesquisa propõe o uso de duas tecnologias que podem contribuir para uma maior sustentabilidade dos cultivos de cana-de-açúcar, por garantir a manutenção da produtividade com menor custo econômico e menor impacto ambiental.

1.1 Hipóteses

i) A inoculação da variedade RB92579 de cana-de-açúcar, com bactérias promotoras de crescimento previamente selecionadas, propicia melhor desenvolvimento e suprimento de N para as plantas, por provocar modificações em características morfoanatômicas e histológicas em suas raízes e por disponibilizar N biologicamente fixado.

ii) O consórcio com leguminosas nodulantes produtoras de grãos garante um balanço de N favorável em cultivos de cana-de-açúcar.

iii) A inoculação da variedade RB92579 com bactérias promotoras de crescimento previamente selecionadas e o consórcio com leguminosas nodulantes propicia economia de fertilizantes nitrogenados e obtenção de uma nova fonte de renda no cultivo da cana-de-açúcar em duas regiões produtoras do Nordeste do Brasil.

1.2 Objetivo geral

Avaliar o efeito da adoção da inoculação com bactérias promotoras de crescimento e do consórcio com leguminosas nodulantes sobre o desenvolvimento, a produtividade, o balanço de N e a renda de cultivos de cana-de-açúcar em duas regiões produtoras do Nordeste do Brasil.

1.3 Objetivos específicos

- Avaliar o efeito da inoculação com diferentes bactérias promotoras de crescimento sobre o desenvolvimento e características histológicas das raízes de mudas de cana-de-açúcar (variedade RB92579);
- Estimar o efeito da inoculação com diferentes bactérias promotoras de crescimento e do consórcio com leguminosas nodulantes sobre o balanço de N (quantidades fixadas versus quantidades exportadas de N) em cultivos de cana-de-açúcar em duas regiões produtoras do Nordeste do Brasil;
- Avaliar o efeito da inoculação com diferentes bactérias promotoras de crescimento e do consórcio com leguminosas nodulantes sobre o desenvolvimento da cana-de-açúcar (variedade RB92579) cultivada em duas regiões produtoras do Nordeste do Brasil;
- Estimar a produtividade agrícola e industrial da variedade RB92579 de cana-de-açúcar cultivada sob diferentes manejos em duas regiões produtoras do Nordeste do Brasil;
- Fazer estimativas dos benefícios econômicos dos diferentes manejos da cana-de-açúcar produzida com os diferentes manejos em duas regiões produtoras do Nordeste do Brasil.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma cultura de grande destaque no setor agrícola do país e que é considerada uma alternativa para o setor de biocombustível devido ao grande potencial de produção de etanol e seus derivados (CONAB, 2019).

A cana é uma monocotiledônea pertencente à família das *Poaceae*, com origem na Ásia meridional, tem sido trazida para o Brasil pelos colonizadores portugueses no ano de 1515. De acordo com Daniels e Roach (1987) a cana de açúcar pertence ao gênero *Saccharum*, com seis espécies distintas (*S. officinarum*, *S. barberi*, *S. robustum*, *S. spontaneum*, *S. sinensis* e *S. edule*), porém a *Saccharum officinarum* é a mais utilizada, com diversas variedades cultivadas no Brasil (RIDESA, 2010).

A importância econômica da cultura, que vem, cada vez mais, tendo um grande destaque na economia brasileira, veio desde o século XVI, quando foi instalada no país pelos portugueses e expandida para diferentes regiões do país (DIAS et al., 2015). Atualmente o Brasil é o maior produtor mundial da cultura e de seus derivados, açúcar e álcool, tendo grande importância para o Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio brasileiro (CONAB, 2018).

A produção de cana-de-açúcar e seus derivados vem enfrentando diferentes desafios, sendo as condições climáticas e financeiras de algumas regiões, fatores que vem afetando a produção. O levantamento da safra de 2019/20 demonstrou uma área colhida aproximadamente 8,4 milhões de hectares, correspondendo a uma retração de 1,7% em relação à safra anterior. Essa retração está relacionada com a substituição de algumas áreas por outras culturas de destaque econômico no país, como também por problemas econômicos na região Nordeste do Brasil (CONAB, 2020). Para a safra de 2020/2021 a estimativa de área colhida equivale a 8,605 milhões de hectares, com um incremento de 1,9% em relação à safra anterior. Esse aumento aconteceu com maior expressividade devido ao Sudeste ter aumentado sua área de cultivo.

A estimativa para a safra de 2019/20 correspondeu a 615,98 milhões de toneladas de cana, sendo que para a safra de 2020/21 espera-se um incremento na ordem de 3,5% que corresponderá a uma produção de 665,1 milhões de toneladas (CONAB, 2020). A região Sudeste é considerada a maior produtora de cana-de-açúcar no país com produção estimada equivalente a 436,4 milhões de toneladas. Já o Nordeste é a terceira região com maior produção do país, com estimativa de produção de 50,9 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. O estado nordestino com maior produção é Alagoas com produção estimada de 18.134,6 mil toneladas,

seguido pelos estados de Pernambuco, com 12.314,3 mil toneladas, e Paraíba, com 6.726,5 mil toneladas de cana-de-açúcar. A produção de açúcar atinge valores equivalentes a 1505, 912 e 131 mil toneladas e de álcool a 444.078, 347.492 e 436.633 mil litros, respectivamente, para os estados nordestinos citados (CONAB, 2020).

Para alcançar avanços na produtividade da cana-de-açúcar, melhoramentos genéticos vêm sendo realizados para se obter variedades mais produtivas e adaptadas às diferentes condições edafoclimáticas. A busca por novas variedades vai muito mais além da produtividade agrícola, mas são observados também efeitos positivos na resistência a pragas e doenças e bons indicadores de qualidade das variáveis tecnológicas, como: teor de fibra e açúcar recuperável da cana; pureza, sólidos solúveis, açúcares redutores, e percentagem de sacarose aparente no caldo (LIMA NETO et al., 2013).

Censo varietal realizado no ano de 2017/18 mostra as dez variedades de cana-de-açúcar mais cultivadas no Brasil, sendo metade das dez variedades pertencentes a Rede Interuniversitária para Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro-RIDESA (Tabela 1).

Tabela 1. Censo varietal brasileiro na safra 2017/18

Variedade	Cultivo	
	Área (ha)	%
RB867515	1.250.023	25
RB966928	608.006	12
RB92579	491.753	10
CTC4	235.267	5
RB855156	233.575	5
RB855453	207.566	4
SP81-3250	178.386	4
SP83-2847	137.604	3
CTC15	106.848	2
RB855536	101.530	2

Fonte: Adaptado da RIDESA, 2017

A variedade RB92579 surgiu a partir do cruzamento biparental (RB75126 x RB72199) no ano de 1992 e foi lançada em Alagoas pela Universidade Federal de Alagoas. Atualmente é a variedade mais cultivada na região Nordeste, com uma área correspondente a 39,97% (RIDESA, 2015). Esta variedade tem como características morfológicas: hábito de crescimento ereto com alto perfilhamento, colmos com entrenós cilíndricos de comprimento e diâmetro médio com cor roxa ao sol e amarelo verde sob a palha. Em relação às características agroindustriais, é uma variedade com alta produtividade agrícolas e industrial, com alto teor de

açúcar total recuperado (ATR) nas quatro primeiras folhas, que podem ter média acima de 80 t ha⁻¹ e elevadíssima produtividade quando sob irrigação plena com médias acima de 140 t ha⁻¹. No entanto, podem ser observadas produtividades inferiores a 60 t ha⁻¹ quando associam cultivos dessas variedades a ambientes de baixa fertilidade com déficit de pluviosidade (RIDESA, 2015).

O melhoramento genético da cana-de-açúcar alcançou resultados expressivos no aspecto de variedades produtivas com alta adaptações a diferentes ambientes, aumentando assim sua integração nos diferentes canaviais do Brasil. No entanto, as variedades melhoradas ainda são muito responsivas a adubação nitrogenada, como também em relação a condições ótimas de um regime hídrico. A necessidade do uso de insumos para atingir metas produtivas, torna os cultivos menos sustentáveis; portanto há uma necessidade global de buscas de novas tecnologias sustentáveis para diminuir os impactos ambientais ocorridos pelas práticas agrícolas (GARIBALDI et al., 2017). Com isto, os programas de melhoramento genético de plantas associados a diferentes pesquisadores em outras linhas de pesquisas devem aprimorar os cultivos da cana-de-açúcar tornando-os mais sustentáveis.

2.2 O N e sua importância para a cana-de-açúcar

O N é um dos elementos mais abundantes na planta, por fazer parte de vários compostos, destacando-se aminoácidos, ácidos nucléicos e clorofila (CANTARELLA, 2007). Por fazer parte das principais reações bioquímicas nas plantas e por estar presente no processo de divisão e expansão celular, o N é o elemento mais absorvido, com grande importância no desenvolvimento das culturas (LEGHARI et al., 2016).

A absorção de N pelas plantas é realizada preferencialmente pelas formas inorgânicas com os íons NH₄⁺ e NO₃⁻ (JARVIS et al., 1996), que podem ser oriundos de processos da decomposição da matéria orgânica, que corresponde à maior fração de N no solo (AGREN et al., 2013), das ações da deposições atmosférica, da adubação mineral e, de grande importância ambiental, pela ação da fixação biológica de N (FBN), no solo (bactérias de vida livre) e em plantas (bactérias associativas) (MARQUES et al., 2017; CANTARELLA, 2007).

A deficiência do N resulta em baixo desenvolvimento da cultura, presença de folhas amareladas evoluindo para necróticas, com manchas observadas inicialmente nas folhas mais velhas por ser um elemento altamente móvel na planta (BIANCO et al., 2015). Já o excesso do N nas culturas provoca mudanças na coloração das folhas de verde claro para um verde mais intenso, podendo alterar o status vegetativo da planta (LEGHARI et al., 2016). Para a produção

agrícola, O N é um nutriente de grande importância e sua disponibilidade refleti diretamente na produção final das culturas (SANTANA et al., 2020).

Na cultura da cana-de-açúcar, o N é considerado o segundo maior nutriente absorvido pela planta, perdendo só para o K. Sua extração equivale em média a 179 kg ha⁻¹ de N (OLIVEIRA et al., 2010) e sua exigência nutricional varia em relação às variedades utilizadas, como visto por Santana (2017), que obteve valores médios de 1,35 kg t⁻¹ de colmo utilizando duas variedades referências para a região Nordeste (RB92579 e a RB867515) com diferentes doses de N (0, 30, 60, 90, 120, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N).

Os benefícios da adubação nitrogenada podem ser vistos em cana planta com menor expressividade que em cana soca. No entanto, em ambas as condições podem ser verificados efeitos diretos na produtividade agrícola e industrial (SANTANA et al., 2020; FORTES et al., 2013). Outro benefício da adubação que contribui para uma maior produtividade da cultura é o efeito direto na produção das raízes, que pode aumentar a absorção dos nutrientes (OTTO et al., 2009).

Baixa eficiência da nutrição nitrogenada na cana-de-açúcar reflete-se em baixa produtividade. Por outro lado, doses excessivas de N podem promover impactos industriais negativos (FORTES et al., 2013), como também impactos ambientais (BORDANAL et al., 2018).

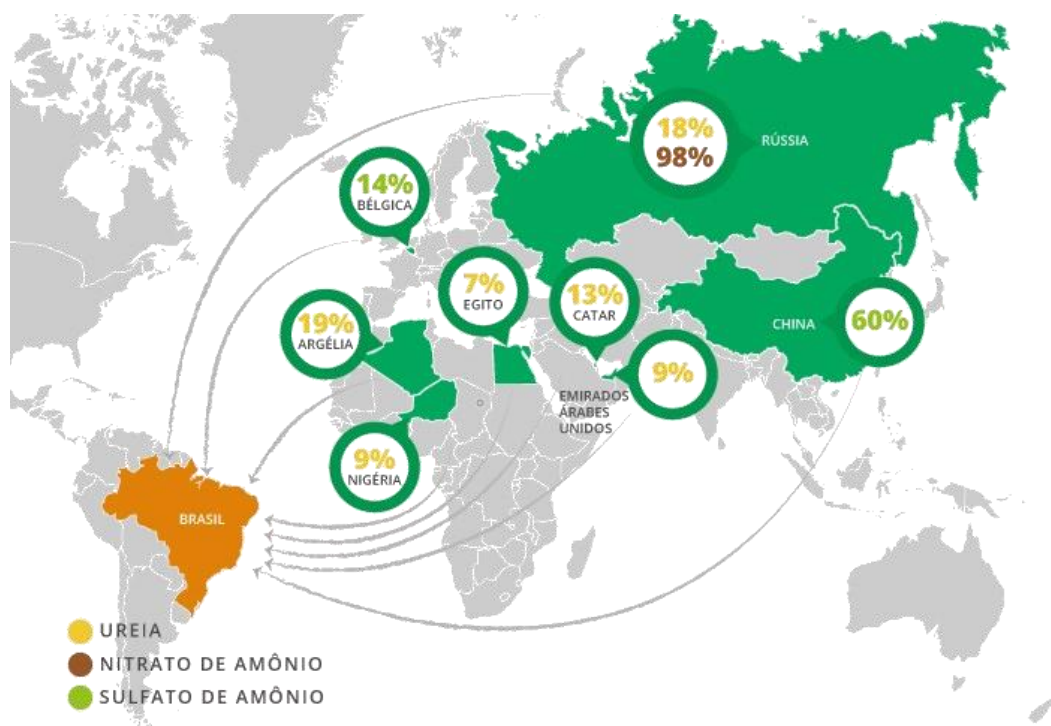
2.3 Uso da adubação nitrogenada na cana-de-açúcar

As diferentes culturas agrícolas de destaque econômico do Brasil ainda têm grande dependência do uso de fertilizantes para a obtenção de resultados significativos na produção. Dados levantados em 2018 relatam a importação, de, aproximadamente, 25 milhões de toneladas de fertilizantes, sendo 35% correspondente a adubos nitrogenados (ANDA, 2019; GLOBALFERT, 2019). Em 2020 os valores ultrapassam a casa dos 26 milhões de toneladas, uma alta de 8,6% em relação ao ano anterior. Já a exportação nacional de fertilizantes correspondeu a 364.458 toneladas de fertilizantes equivalendo a 1,35% em relação ao total de fertilizante importado. Com isto, o Brasil é considerado o 4º país com maior consumo de fertilizantes no mundo, estando atrás somente da China, Índia e EUA (ANDA,2020).

Entre os fertilizantes nitrogenados, a ureia corresponde à maior quantidade importada pelo Brasil, com 62% do volume total, que representa 5,4 milhões de toneladas, seguida por sulfato de amônio, com 26% e com valores equivalentes a 2,3 milhões de toneladas, e por,

último o nitrato de amônio, com 1 milhão de toneladas, correspondendo a uma proporção de 12% de todo o fertilizante nitrogenado importado pelo país (GLOBALFERT, 2019), oriunda, basicamente, da Rússia (Figura 1):

Figura 1: Principais locais de origem e proporções em relação ao total dos fertilizantes nitrogenados importados pelo Brasil (Fonte: Globalfert, 2019).



As doses dos fertilizantes nitrogenados aplicadas na cultura da cana-de-açúcar no Brasil, 60 e 100 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N são consideradas baixas em relação aos principais países produtores de cana-de-açúcar do mundo. Na Austrália, por exemplo, está dose pode variar entre 160 e 200 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N, na Índia entre 150 a 400 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N, e na China entre 100 e 755 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N (ROBINSON et al., 2011).

Em estudo realizado por Santana et al. (2020) no Nordeste brasileiro, com diferentes doses de N e duas variedades de cana-de-açúcar (RB92579 e a RB867515), foi possível observar uma dose de máxima eficiência agrônômica de 129 kg ha⁻¹ de N com uma produção estimada de 117 Mg ha⁻¹ de colmos. No entanto, a dose de máxima eficiência econômica correspondeu a 60 kg ha⁻¹ de N, que é a recomendação para cana planta na região Nordeste.

No centro sul do país, que concentra a maior produção da cana-de-açúcar, as recomendação da adubação nitrogenada em cana planta não ultrapassam os 60 kg ha⁻¹ de N e variam entre 45 a 60 kg ha⁻¹ de N. Há incertezas da resposta da adubação nitrogenada nesta primeira fase da cultura (OTTO et al., 2013), devido à possibilidade de haver diferentes fontes

de N, como a FBN, mineralização da matéria orgânica do solo e reservas de N nas próprias sementes, que diminuem a absorção do N dos fertilizantes (TRIVELIN et al., 2002).

Em relação à eficiência da absorção do N do fertilizante pela cana-de-açúcar, que pode ser influenciada por fontes secundárias, estudos revelam que 26% de todo o N aplicado é absorvido pela cultura, 32% são imobilizados no solo e os 42% restantes são perdidos pelos processos de volatilização NH_3 (19%), lixiviação (5,6%), emissões de N_2O (1,8%) e outras vias que equivalem a 16% (OTTO et al., 2016).

Essas perdas de N para o ambiente podem caracterizar perdas econômicas para o produtor, pois não há uma resposta positiva em relação à produtividade final, e também possuem um grande impacto ambiental, decorrente do seu poder de contaminação do ar pelo N_2O (HEIL et al., 2015) e dos rios e lagos, com acúmulo de NO_3^- (ZHANG et al., 2014). Com isto, há uma necessidade global de aumentar a eficiência da absorção do N pelas plantas e consequentemente, diminuir as quantidades utilizadas na agricultura para fins de diminuição dos impactos ambientais.

2.4 Efeito nocivo da adubação nitrogenada para o meio ambiente

Com o aumento da população, o uso de combustíveis fósseis para a produção de fertilizantes, de modo geral, tem aumentado a emissão de gases tóxicos para a atmosfera. Quando se leva em consideração as contribuições nas emissões de CO_2 em escala continental, a América do Sul é responsável por apenas 2,5% (0,25 Pg de C) das emissões globais totais anuais (9,8 Pg de C) de CO_2 . No entanto, o continente contribui com 31,3% (0,34 Pg C) de emissões anuais globais de gases de efeito estufa (1,1 Pg C) por causa do uso do solo e da mudança de uso da terra (SÁ et al., 2017).

Além da mudança no uso da terra, diversas práticas agrícolas contribuem para o desequilíbrio do meio ambiente e emissão de gases do efeito estufa para a atmosfera. Dentre essas práticas, o uso de fertilizantes nitrogenados em grande quantidade e sob cultivos com palhada, como ocorre para a cana-de-açúcar, pode levar à liberação de óxido nitroso (N_2O), que é oriundo do processo de desnitrificação promovido por micro-organismos em ambiente redutor. O N_2O é um composto mais danoso que o CO_2 na atmosfera (HEIL et al., 2015) e que pode gerar em torno de 0,033 Mg CO_2 e M Kcal^{-1} de emissões pela ação do uso de fertilizantes nitrogenados na agricultura (CARLSON et al., 2016).

O manejo do cultivo é crucial para promover o aumento ou a mitigação da poluição. Por exemplo, Silva et al. (2017) observaram que a combinação de fertilizantes nitrogenados e aplicação da vinhaça na cana-de-açúcar leva a uma liberação maior de N_2O , correspondendo a quatro vezes mais do que a aplicação da vinhaça e do fertilizante separados.

O N do fertilizante pode ser transformado no processo de nitrificação, que corresponde à mudança do NH_4^+ para NO_3^- por ação dos micro-organismos do solo. O acúmulo dessa espécie mineral, juntamente com a ação da irrigação, pode levar este nutriente para os corpos hídricos, acarretando eutrofização (ZHANG et al., 2014). Segundo Zhang et al. (2014) os valores encontrados em 46,7% das águas superficiais e 10% das águas subterrâneas na região do norte da China encontravam-se com teor de NO_3^- acima do recomendado pela organização mundial de saúde.

2.5 Alternativas para cultivos mais sustentáveis

Nos dias atuais, a busca por uma agricultura sustentável, que garanta a manutenção da produtividade agrícola juntamente com a diminuição no uso de insumos, tornou-se uma necessidade global para a preservação da qualidade de vida da população e dos ecossistemas (GARIBALDI et al., 2017). Essa necessidade vem em contrapartida aos grandes impactos ao meio ambiente que foram trazidos pela expansão agrícola, em meados do século XX, historicamente denominada revolução verde, que, unidos à introdução de novas tecnologias, triplicou a produção das culturas, período este, historicamente denominado Revolução Verde (ZHANG et al., 2014).

Para o século XXI, a projeção da população humana é de 11 bilhões de pessoas, com maiores aumentos nos países em desenvolvimento, em sua maioria localizados em regiões tropicais (LAURANCE et al., 2014). O aumento na demanda de alimentos para esta população poderá acarretar maiores impactos ao meio ambiente, caso não se busquem novas tecnologias agrícolas mais sustentáveis.

Para promover a diminuição desses impactos, práticas agrícolas que visem à sustentabilidade dos cultivos, estão sendo cada vez mais apreciadas pelo mundo todo. Algumas práticas como plantio direto, adubação verde, potencialização da FBN e utilização de bactérias promotoras de crescimento em plantas (BPCP) contribuem para uma agricultura de baixo carbono. Essas práticas podem minimizar os impactos ambientais decorrentes da contaminação do ambiente terrestre, como também as emissões de CO_2 e outros gases nocivos. Estimativas

apontam para a possibilidade de uma mitigação de 8,24 Pg de C no período de 2016 a 2050 pela adoção de uma agricultura de baixo carbono (SÁ et al., 2017).

Dentre essas práticas, o uso da adubação verde em rotação com cultivos comerciais promove, além da diminuição das quantidades de fertilizantes utilizados, outros benefícios, como o aporte de carbono ao solo (THOMAZINI et al., 2015). A liberação de grande quantidade de nutrientes, principalmente o nitrogênio, pela adubação verde está relacionada com o uso, na grande maioria, de leguminosas que são capazes de realizar simbiose com bactérias diazotróficas, o que garante um aporte de N mineralizado para os cultivos subsequentes (COUËDEL et al., 2018; SORATTO et al., 2012; ZOTARELLI et al., 2012). A ciclagem dos nutrientes em geral pode ser aumentada significativamente quando se utilizam adubos verdes, no entanto a qualidade do resíduo influenciará na quantidade de nutrientes (ADEKIYA et al., 2017) e no tempo de disponibilização dos mesmos no solo, que neste caso depende do teor de N e também de componentes como lignina, hemicelulose e celulose presentes nos tecidos vegetais (SORATTO et al., 2012).

Consórcios de adubos verdes com culturas comerciais pode potencializar a liberação de nutrientes como N, P e K, que contribuem para a nutrição da cultura principal. He et al. (2018), em consórcio de feijão mungo e cana, observaram aumento no crescimento e na produção da cana e na melhoria na disponibilidade dos nutrientes ao solo.

A FBN em leguminosas propicia a substituição parcial ou total da adubação nitrogenada, como é o caso da cultura da soja no Brasil (PERIN et al., 2018). No Semiárido de Pernambuco, o cultivo de leguminosas como adubos verdes em manejo irrigado possibilita um aporte de N que pode alcançar valores equivalentes a 185 kg ha^{-1} , por meio do processo de FBN (FREITAS et al., 2015).

O manejo escolhido para a utilização de adubos verdes influencia na quantidade de N derivado do ar (%N_{dda}) por meio da FBN. Kermah et al. (2018), ao utilizar leguminosas de grãos como adubos verdes (feijão-caupi, soja e amendoim) em consórcio com milho, obtiveram valores menores de %N_{dda} comparáveis aos das leguminosas solteiras. Além do efeito do consórcio, a fertilidade do solo contribui para uma maior produção de biomassa das leguminosas e, conseqüentemente, um maior estoque de N derivado do ar.

Outra técnica que possibilita ganhos significativos na produção de gramíneas é a utilização de bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP). Por exemplo, Rodrigues et al. (2016) observaram promoção de crescimento do milho devido à inoculação com uma mistura de BPCPs que estavam em associação com a cultura da cana-de-açúcar. A utilização das BPCPs pode diminuir o uso de fertilizantes que apresentam custos crescentes e que podem

trazer impactos ambientais (KAUR; REDDY, 2015; SOUZA et al., 2015). Além de promover o crescimento das plantas, BPCPs podem proteger contra doenças e estresses abióticos por meio de mecanismos como FBN, produção de enzimas com ACC deaminase, produção de sideróforos e fitormônios e solubilização de fosfato e potássio (SOUZA et al., 2015).

2.6 Consórcios com leguminosas como alternativa sustentável para os cultivos

O uso de leguminosas como fonte de matéria orgânica e de ciclagem de nutrientes é de grande importância para a manutenção da agricultura considerada de baixo carbono, podendo ser utilizadas em rotação de cultura ou até mesmo em consórcios com culturas comerciais (THOMAZINI et al., 2015; SÁ et al., 2017). Na utilização de leguminosas em consórcios com culturas comerciais são observados diferentes benefícios que vão desde aspectos macroscópicos, que levam em consideração a diminuição de emissão de CO₂ e N₂O para a atmosfera (THOMAZINI et al., 2015; LUO et al., 2016; STAGNARI et al., 2017), a aspectos microscópicos, que envolvem aumento da diversidade do microbioma do solo (LI et al., 2013).

Quando se trata dos benefícios para o solo, podem ser observados efeitos positivos na fertilidade do solo pelo incremento de nutrientes e matéria orgânica (HE et al., 2018; LALOY; BIELDERS, 2010), redução na perda do solo por aumentar a capacidade de infiltração e diminuir consequentemente o escoamento superficial (SALAH et al., 2016; LATATI et al., 2016; LI et al., 2013), além de melhorar o manejo de pragas, doenças e ervas daninhas (NAVNEFT et al., 2016; SIKIROU; WYDRA, 2008).

Levando em consideração os benefícios estabelecidos para as culturas que estão consorciadas com as leguminosas, podem ser observado efeitos positivos em relação a maior disponibilidade de nutrientes para as plantas, oriunda da ciclagem de nutrientes (HE et al., 2018). Dentre os nutrientes, o N é de grande importância para as culturas e pode entrar no sistema por diferentes mecanismos, sendo alguns deles a decomposição da matéria orgânica, como também pela FBN, mecanismos sustentáveis para o meio ambiente (AGREN et al., 2013; FREITAS et al., 2015).

As leguminosas que são usados em sistemas consorciados, por sua vez, exercem papel importantíssimo nos sistemas agrícolas, por fazerem simbiose com bactérias fixadoras de nitrogênio com elevada eficiência na FBN, o que garante um aporte de N para as culturas em consórcio ou subsequentes (COUËDEL et al., 2018; SORATTO et al., 2012; ZOTARELLI et al., 2012).

Trabalho realizado por Dantas et al. (2019), utilizando diferentes consórcios de leguminosas (crotalária juncea, feijão de porco e feijão guandú) com a cultura do maracujazeiro observou maior contribuição do feijão de porco na disponibilidade de N, oriundo da FBN, resultando em saldo positivo de N para o solo, visto que a exportação média de $49 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N pelos frutos foi inferior a quantidade fixada pela leguminosa que correspondeu a $158 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N, dando assim um balanço médio de $109 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N para o solo.

Para a cultura da cana-de-açúcar, a contribuição no aumento da produtividade agrícola e industrial, como também contribuições no acúmulo de nutrientes na matéria seca da planta, são observados em diversos trabalhos. Em pesquisa realizada por He et al. (2018), utilizando cana-de-açúcar em um consórcio com feijão mungu (*Vigna radiata*), foi relatado incremento na produtividade de colmos, em média, de $12,75 \text{ t ha}^{-1}$ em relação ao tratamento com a cana solteira.

Pesquisa realizada em território indiano por Geetha et al. (2018), utilizando as culturas da soja, feijão-caupi, crotalária, grama verde e grama preta em consórcios com a cana-de-açúcar, encontrou que o consorcio cana+ soja teve a maior produtividade de colmos ($122,82 \text{ t ha}^{-1}$), seguido pela cana + crotalária ($117,31 \text{ t ha}^{-1}$) e grama preta ($116,38 \text{ t ha}^{-1}$). Nessa pesquisa, o cultivo solteiro teve produtividade equivalente a $74,30 \text{ t ha}^{-1}$. Em relação ao sufocamento de ervas daninhas, os tratamentos com consórcio com feijão-caupi (36,3%), crotalária (32,3%) e soja (32,02%) tiveram maiores eficiências que a cana solteira. De modo geral, neste trabalho foi possível observar ganhos econômicos na ordem de 78% para o cultivo consorciado com soja em relação ao cultivo da cana solteira.

Retornos econômicos em sistemas de consorciação de diferentes culturas com a cana-de-açúcar também tinham sido observados na Índia por Kaur et al. (2016), que conseguiram obter um ganho econômico de US\$ 1.674,00 ha^{-1} comparado com o cultivo da cana solteira.

Efeitos indiretos na nutrição mineral das culturas também podem ser vistos quando se utiliza sistema de consórcios de culturas vegetais. Em trabalho realizado por Tian et al. (2020), foi possível observar um aumento na transformação enzimática de P orgânico da rizosfera e a aquisição de P pela cana-de-açúcar em um sistema consorciado com soja com baixa entrada de N-fertilizante, podendo assim contribuir para a produção sustentável da cultura.

De modo geral, a disponibilidade de nutrientes no solo e conseqüentemente para as plantas podem ser aumentadas quando se utilizam adubos verdes em sistemas consorciados ou até mesmo em rotação de cultura. Além dos benefícios agrônômicos, podem ser mencionados ganhos econômicos para o produtor com o aumento da receita líquida na venda da cana-de-açúcar, por exemplo, como também na venda dos grãos das leguminosas que possuem destaque

econômico. Dentre as leguminosas de grande destaque econômico e nutricional podem ser destacaas a soja, o amendoim e o feijão-caupi, que podem ser utilizados em consórcio com a cultura da cana-de-açúcar.

2.6.1 O amendoim

O amendoim é uma leguminosa cujas sementes, ricas em óleo e proteína, são produzidas abaixo da superfície do solo. É originada da América do Sul e disseminada para outros continentes através dos exploradores portugueses e espanhóis. Trata-se de um dos alimentos mais nutritivos e de fácil digestão, sendo considerada uma oleaginosa. Por este motivo, é uma planta altamente cultivada no mundo (FREITAS; PEÑALOZA; VALLS, 2003).

O amendoim pertence à família Fabaceae sendo a espécie *Arachis hypogaea* L. a mais cultivada e consumida no mundo (NOGUEIRA et al., 2013). O amendoim cultivado apresenta diferentes variedades botânicas, sendo elas: *hypogaea*, *hirsuta*, *fastigiata*, *peruviana*, *aequatoriana* e *vulgares*, sendo as duas primeiras variedades pertencentes à subespécie *hypogaea* e as quatro últimas pertencentes à subespécie *fastigiata*. Entre os amendoins cultivados são encontrados três grupos vegetativos que correspondem ao grupo Virgínia, ao Valência e ao Spanish (HE et al., 2005).

O amendoim é uma planta herbácea, ramificada, com hábito de crescimento ereto ou rasteiro. Essas características podem variar conforme são observadas as diferentes cultivares estabelecida na atualidade. A cultivar BR1, que é bastante utilizada no Nordeste brasileiro, pertence ao grupo Valência, de porte ereto, possuindo haste principal com 35 cm, arroxeadada, com seis ramos laterais. As vagens são de tamanho médio, com pouca reticulação e bico quase ausente, possuindo de três a quatro sementes vermelhas de tamanho médio e arredondado (EMBRAPA, 2009). Outras características agrônômicas e tecnológicas da cultivar BR1 podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2. Características agrônômicas e tecnológicas da cultivar de amendoim BR1

Características	Valor Correspondente
Ciclo da cultura (dias após a emergência)	89
Início da floração (dias)	22
Números de vagens/planta	27
Peso de 100 sementes (g)	148
Peso de 100 vagens (g) (Vazias)	48
Vagem chocha (%)	15
Sementes perfeitas (%)	84
Rendimento em casca (kg/ha)	1.200
Rendimento em semente (kg/ha)	800
Rendimento em semente (%)	70
Teor de óleo (%)	49
Teor de proteína (%) (N x 6,25)	35
Teor de carboidrato (%)	5,6
Teor de fibra (%)	2,7
Teor de cinzas (%)	2,7

(Fonte: Embrapa, 2009)

Além de ser utilizado como fonte de alimento, o amendoim por ser utilizado como fonte alternativa para biocombustível (RODRIGUES et al., 2016; ARAUJO et al., 2014). De modo geral, os maiores produtores de amendoim são encontrados na região asiática, sendo a China o maior produtor mundial e o maior consumidor. Na América do Sul, a Argentina é considerada o 7º maior produtor mundial (FLETCHER; SHI, 2016). Já o Brasil é considerado o segundo maior produtor e exportador da América Latina, com 466 mil toneladas, ficando apenas atrás da Argentina com 1 milhão de toneladas. No Brasil, a produção do amendoim concentra-se no estado de São Paulo, com 90% de toda a produção nacional (EMBRAPA, 2019).

No estado de São Paulo, o plantio de amendoim utiliza as mesmas áreas destinadas para o cultivo da cana-de-açúcar, em sistema de rotação de cultura (CONAB, 2020). Neste estado também se utiliza um sistema denominado MEIOSE, que consiste no plantio de cana-de-açúcar, oriunda de mudas pré brotadas (MPB) e leguminosas em mesmo ambiente, numa proporção de 2:8, ou seja, 2 linhas de cana e um espaço intercalado por 8 linhas de leguminosas, que podem ser exploradas com fins para a produção de grãos ou de biomassa para ser utilizada como adubo verde (PERIN, 2017).

A região Nordeste não possui expressividade na produção do amendoim, sendo que a grande maioria do consumo interno do grão se baseia em produto oriundo de outras regiões produtoras no Brasil. No mercado nordestino, o amendoim pode ser encontrado em feiras livres,

Ceasas e até mesmo na forma beneficiada para confeitarias. Seu valor estimado (amendoim cru com casca) no ano de 2020 correspondia a R\$ 125,00 a saca de 25 kg, já no primeiro semestre do ano de 2021 houve uma valorização do produto, chegando a atingir R\$ 210,00 a saca com 25 kg (CEASA-PE, 2021).

A utilização da cultura do amendoim em consórcio ou rotação de culturas pode ser considerada como adubo verde, por apresentar contribuições na entrada de N no sistema e, conseqüentemente, sua transferência para a cultura comercial. Trabalho realizado por Cadisch et al., (2000) utilizando a técnica da abundância natural para quantificar a FBN em amendoim cultivado em um Argissolo verificou contribuição numa ordem entre 21 a 24 kg de N ha⁻¹. O amendoim em consórcio com a cultura da cana-de-açúcar pode favorecer as características químicas do solo, como também aumentar a diversidade de microrganismos capazes de fixar N no solo, em relação ao cultivo solteiro da cana-de-açúcar. (SOLANKI et al., 2017).

2.6.2 A soja

A soja (*Glycine max* (L) Merrill) é uma cultura de grande destaque mundial, oriunda do continente Asiático, especificamente no leste chinês (APROSOJA, 2020) e que se espalhou pelo mundo tornando-se uma commodity nos dias atuais. A chegada da cultura da soja no Brasil ocorreu no século XIX, pelo estado da Bahia, passando após a ser cultivada no estado de São Paulo e, em seguida, nas demais regiões (EMBRAPA, 2014).

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, atrás apenas dos EUA e o primeiro maior exportador, com produções calculadas de 113,92 milhões de toneladas na safra de 2016/17 e ocupando uma área equivalente de 33,89 milhões de hectares (EMBRAPA, 2020).

Para a safra de 2020, a estimativa da produção de soja no Brasil foi de 122,4 milhões de toneladas de grãos, um acréscimo de 7,8%, sendo o estado do Mato Grosso o maior produto nacional com produção equivalente a 26,9% do total produzido pelo país. O rendimento médio estimado é de 3.340 kg ha⁻¹, aumento de 5,4% em relação à safra anterior (IBGE, 2020).

A estimativa de uma produção recorde é levantada pela Conab (2021) para a safra de 2020/21 com estimativa de 133,7 milhões de toneladas, sendo observado também um aumento na área de cultivo na ordem de 3,4% com uma área estimada de cultivo de 38.192,8 mil ha. O custo médio da saca (60 kg) de grãos da soja está estimado em torno dos R\$ 166,36, segundo levantamento da CEPEA/ESALQ, com dados da segunda quinzena de janeiro de 2021 (CEPEA/ESALQ, 2021).

Com a crescente demanda mundial de grãos de soja, houve uma crescente comercialização no Brasil nas décadas de 1940 como uma opção de rotação com o trigo (BROWN et al., 2005). Com investimentos pelo governo brasileiro, a soja foi aumentando seu destaque nacional e instituições de pesquisas melhoraram geneticamente a soja para uma melhor adaptação às diferentes regiões do país (ANDERSEN et al., 2002; BROWN et al., 2005). Esses avanços proporcionaram aumento da produtividade agrícola e expansão na área cultivada do país, favorecendo a ascensão do Brasil no cenário mundial de maiores produtores de soja do mundo (MORTON et al., 2016).

Variedades melhoradas, como a M 8372 IPRO, adaptaram-se em diferentes regiões no país, tornando-a a variedade mais plantada no Brasil e que possui tolerância a diferentes doenças, além de alta produtividade (MONSOY, 2021).

Um dos maiores avanços do melhoramento vegetal que ocorreu com a soja foi o aperfeiçoamento da afinidade com bactérias com alta eficiência em fixar nitrogênio atmosférico. A FBN no caso da soja no Brasil propicia a substituição parcial ou total da adubação nitrogenada, o que torna o cultivo mais sustentável, com altas produtividades e preços competitivos em relação a todos os cultivos do mundo (PERIN et al., 2018; SANTACHIARA et al., 2019; HUNGRIA et al., 2001).

Segundo Hungria et al. (2001), em diversos ensaios avaliando a contribuição da FBN na soja utilizando a técnica do ^{15}N marcado, foi possível verificar a contribuição com taxas em entre 60 e 250 kg de N ha⁻¹. Em outros ensaios realizados no Brasil, foram encontradas contribuições de 109 a 250 kg de N ha⁻¹, que correspondem a 70 e 85% do N total acumulado pela cultura. A exportação de N pelos grãos é da ordem de 155 kg de N ha⁻¹ quando inoculada, podendo atingir valores superiores a 200 kg de N ha⁻¹ (HUNGRIA et al., 2015). O N é considerado o segundo nutriente com maior acúmulo na cultura da soja (ALMEIDA et al., 2017), sendo inferior apenas ao potássio. Sua deficiência, que pode estar relacionada à baixa eficiência da FBN, como também, em outros países, à baixa disponibilidade do N pela fertilização, resulta em baixos teores de N na parte aérea e raiz da planta, conseqüentemente com baixa produtividade de biomassa e de grãos.

O uso de inoculantes com base em estirpes de *Bradyrhizobium* permitiu alcançar produtividades superiores a 4200 kg ha⁻¹ de grãos, com aumento médio de 89% em relação ao tratamento não inoculado e tratamento não inoculado com adubação nitrogenada (HUNGRIA et al., 2015). Em Moçambique, a inoculação com estirpes do gênero *Bradyrhizobium* causou incrementos médios de grãos em torno de 20-29% sobre o tratamento não inoculado (CHIBEBA et al., 2018).

Trabalhos mais recentes abordam contribuições de co-inoculação de diferentes estirpes na cultura da soja, não pertencentes ao gênero *Bradyrhizobium*, e que podem aumentar a eficiência da FBN como também da produtividade de biomassa total e grãos (MORETTI et al., 2020; SILVA et al., 2019; HUNGRIA et al., 2015). A co-inoculação com *Azospirillum brasilense* pode melhorar o crescimento das plantas, aumentar a nodulação (JUGE et al. 2012; BULEGON et al. 2017), além de aumentar a quantidade de pelos radiculares, que ajudará a cultura a suportar efeitos edafoclimáticos (CHIBEBA et al. 2015; BULEGON et al. 2017). Trabalho realizado por Silva et al. (2019) observou uma melhora na nodulação em condições severa de estresse hídrico quando foi utilizada a co-inoculação com *B. japonicum* e *Azospirillum brasilense*.

No Brasil, como soja é uma cultura de grande destaque econômico e apresenta um cultivo mais sustentável que os demais produtores mundiais do grão, seu uso em rotação ou consorciação com a cultura da cana-de-açúcar pode ser considerada uma alternativa sustentável que garantirá disponibilidade de M.O e nutrientes para o solo, com baixa emissão de gases do efeito estufa, como também em uma nova fonte de renda para o setor sucroenergético (WANG et al., 2020; LUO et al., 2016; LI et al., 2013).

Li et al. (2013), utilizando consórcio de soja com a cultura da cana-de-açúcar em território chinês, observaram aumento da disponibilidade de N e P na ordem de 66 e 312%, respectivamente, na rizosfera do solo em consórcio em relação aos cultivos solteiros da soja e da cana-de-açúcar. Além disso, os autores mencionaram o impacto significativo dos números de microrganismos presentes nestes solos em consórcio, podendo ser observado aumento na quantidade de bactérias, fungos e actinomicetos de 43, 14 e 78%, respectivamente.

Pesquisa mais recente realizada por Wang et al. (2020), utilizando consórcio com a soja e cana-de-açúcar, evidenciou contribuição na produtividade da cana-de-açúcar com menor entrada de N do fertilizante, tornando assim um cultivo mais sustentável nos campos agrícolas de cana-de-açúcar da China.

2.6.3 O feijão-caupi

O feijão é a leguminosa mais consumida na alimentação dos brasileiros, chegando a atingir valores estimados de 3.144 mil toneladas de grãos (CONAB, 2021; COPERAGUAS, 2015), sendo a espécie *Phaseolus vulgaris* (L) a mais consumida. O feijão-caupi é uma Dicotyledonea da ordem Fabales, família Fabaceae, subfamília Faboideae, tribo Phaseoleae, subtribo Phaseolineae, gênero *Vigna*, subgênero *Vigna*, secção *Catyang*, espécie *Vigna*

unguiculata (L.) Walp. e subespécie *unguiculata*, subdividida em quatro cultigrupos *Unguiculata*, *Sesquipedalis*, *Biflora* e *Textilis* (FREIRE FILHO, 2011).

O feijão-caupi é uma cultura de origem africana, sendo introduzida pela primeira vez no Brasil pelo estado da Bahia no século XVI por intermédio dos colonizadores portugueses. Atualmente está bastante presente na culinária baiana, pelo fato de ser um produto base para a produção do acarajé (FREIRE FILHO, 1988). Já no século XXI a produção do feijão-caupi apresentou crescimento em diferentes regiões do país, sendo observado uma produção equivalente a 20% de toda a produção de feijão do Brasil (FREIRE FILHO, 2011).

Essa cultura apresenta rusticidade bastante elevada, especialmente em relação a demanda hídrica, sendo facilmente cultivada em regiões com menor disponibilidade hídrica e por esse motivo ganhou destaque em áreas agrícolas Nordestinas. De maneira geral, para a safra de 2020/21 a expectativa de área plantada é em torno dos 387,4 mil hectares, com produção estimada de 201 mil toneladas (CONAB, 2021).

Segundo a Conab (2021), a maior produção da cultura está concentrada nos estados do Piauí e Bahia, correspondendo 86% de toda a área estimada para a produção do feijão-caupi no país. Com base nisto, fica evidente a necessidade de expansão do cultivo do feijão-caupi para outros estados brasileiros, visto que a cultura vem ganhando espaço no mercado nacional.

A busca por novas variedades, que expressem aumento na produtividade e maior adaptação a ambientes com baixo regime hídrico, levou as instituições de pesquisa em melhoramento vegetal a novas variedades com destaques em sua produção. O Programa de Melhoramento Genético de Plantas, instalado no Instituto de Pesquisa Agronômica de Pernambuco (IPA), desenvolveu duas variedades de grande destaque regional (IPA207 e o IPA206) com alta produtividade em relação às demais variedades, sendo estudadas e avaliadas em diferentes regiões do Nordeste (COSTA et al., 2013; SANTOS et al., 2009). A média da produção de grãos corresponde a 1.187 e 1.018 kg ha⁻¹ para a variedade IPA207 e IPA206, respectivamente (SANTOS et al., 2009). Dados mais recente mostram a existência do efeito regional na produção final dos grãos, podendo ser observada produtividade entre 1.362 à 3.359 kg ha⁻¹ entre regiões da zona da Mata Norte e do Agreste pernambucanos (COSTA et al., 2013).

A comercialização do feijão-caupi no Nordeste é baseada mais em feijão verde, sendo o preço estimado em torno de R\$ 5,70 a 6,00 kg⁻¹ (CEASA-PE, 2021), com preços superiores a R\$ 10,00 quando é comercializado o grão debulhado em feiras livres locais. O feijão-caupi, além da importância para a nutrição humana (FIORENTIN et al., 2019) e econômica (SILVA et al., 2018), pode trazer contribuições em relação a ciclagem de nutrientes para o solo e consequentemente beneficiar outras culturas em cultivos posteriores ou até mesmo em

consórcios (SINGH et al., 2021; WHITE JR. et al., 2020; WEBBER III et al., 2016; MUÑOZ et al., 2016). Geetha et al. (2019), utilizando um sistema consorciado de cana-de-açúcar com leguminosas de grãos em cultivos na Índia, verificaram contribuições significativas na produtividade da cana-de-açúcar consorciada em relação ao cultivo solteiro e que, ao utilizar feijão-caupi, foi observada uma contribuição na supressão de ervas daninhas, sendo obtida uma eficiência de sufocamento de plantas daninhas equivalente a 36%. Com isto, fica evidente a possibilidade de um cultivo mais sustentável da cana-de-açúcar utilizando leguminosas de grãos como alternativa de manejo consorciado.

As contribuições da utilização do feijão-caupi para diferentes culturas comerciais em sistema consorciado têm um efeito expressivo pelo fato de realizar associações simbióticas com bactérias diazotróficas que garanta um aporte de N para o sistema solo-planta (CASTRO et al., 2017; MARINHO et al., 2017).

2.7 Inoculação com bactérias promotoras de crescimento em plantas (BPCPs)

Outra tecnologia sustentável e que vem sendo bastante difundida nos dias atuais é a utilização de inoculantes contendo microrganismos benéficos para as culturas. Os inoculantes contendo estirpes selecionadas de rizóbios para culturas leguminosas são utilizados há mais tempo e apresentam maior eficiência, porém, diversos estudos têm resultado na obtenção de inoculantes também para gramíneas.

Diversos estudos sugerem que a manutenção da produtividade da cana pode ser obtida através da inoculação de bactérias diazotróficas endofíticas, principalmente espécies como *Gluconacetobacter diazotrophicus* e *Herbaspirillum* spp, (RODRIGUEZ-ANDRADE et al., 2015; SCHULTZ et al., 2012). A contribuição da FBN para a nutrição da cana é bastante variável, podendo atingir valores de N_{dda} maiores que 50 % em variedades cultivadas no Uruguai (TAULÉ et al., 2012). Estima-se que as variedades mais cultivadas no Brasil podem obter 40 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N por meio da FBN (URQUIAGA et al., 2012), sendo observado que ainda necessitam absorver alta quantidade de N derivado do solo e de fertilizantes (BAPTISTA et al., 2014).

A introdução de BPCPs em cana-de-açúcar pode ser realizada em mudas pré-brotadas (GÍRIO et al., 2015) e em cultivos comerciais com a utilização de rebolos e minirrebolos como sementes (CHAVES et al., 2015). O uso dessas bactérias possibilita obter ganhos no desenvolvimento da cultura e na produção agrícola e industrial (CHAVES, et al., 2015; GÍRIO et al., 2015; SHULTZ et al., 2012). Os benefícios da inoculação podem muitas vezes não estar

associados à FBN, mas sim à ação de diferentes mecanismos de promoção de crescimento em planta (ETESAMI; MAHESHWARI, 2018; OLANREWAJU et al., 2017; SANTOYO et al., 2016).

A contribuição da FBN para a cana ainda é um assunto muito controverso e, quando comprovada, com baixa eficiência, o que demanda complementação com adubação nitrogenada (BAPTISTA et al., 2014). Por exemplo, Rodrigues et al. (2016) observaram promoção de crescimento do milho devido à inoculação com um mix de BPCPs que estavam em associação com a cultura da cana-de-açúcar. A utilização das BPCPs pode garantir uma redução significativa na utilização de insumos agrícolas, mantendo e até mesmo aumentando a produção vegetal (RODRIGUES et al., 2016; MOHAMMADI, 2012). O uso de fertilizantes, que apresentam custos crescentes e que podem trazer impactos ambientais, pode diminuir com a utilização das BPCPs (KAUR & REDDY, 2015; SOUZA et al., 2015). Além de promover o crescimento das plantas, BPCPs podem proteger contra doenças e estresses abióticos por meio de mecanismos como FBN, produção de enzimas com ACC deaminase, produção de sideróforos e fitormônios e solubilização de fosfato e potássio (SOUZA et al., 2015).

Solos tropicais normalmente tendem a ser mais propensos a uma menor disponibilidade de fósforo que os temperados (MARANGUIT et al., 2017; MARGENOT et al., 2016). Neste caso, a utilização de bactérias solubilizadoras de fosfato garante uma maior disponibilidade de P lábil, melhorando o desenvolvimento das culturas (KAUR & REDDY, 2015; MANTA et al., 2010).

Pesquisa realizada por Pereira et al. (2020) utilizando a cultura da cana-de-açúcar (variedade RB92579) inoculada com cinco estirpes de bactérias diazotróficas observou o aumento no rendimento produtivo equivalente a 15% e um teor de N na parte aérea 18% a mais que o tratamento que não recebeu inoculante. A contribuição do N na planta derivado da FBN foi, em média, de 31%.

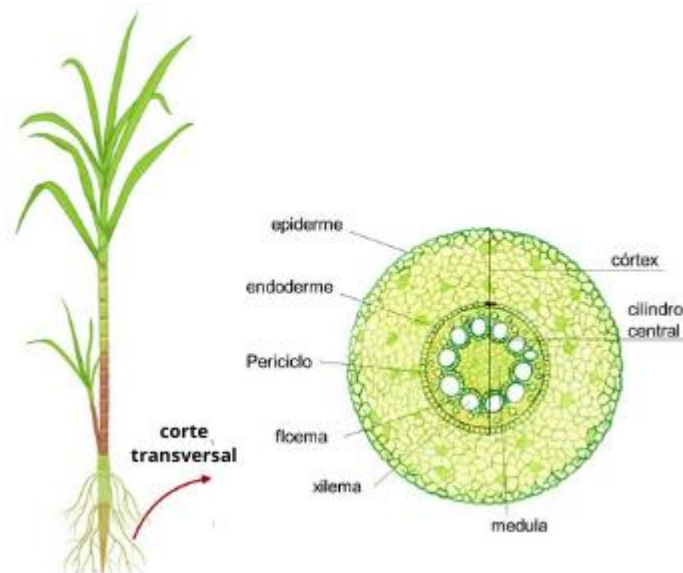
Antunes et al. (2017) realizaram uma prospecção de BPCP em cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil e encontraram diferentes gêneros de bactérias potencialmente promotoras de crescimento em planta: *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Burkholderia*, *Herbaspirillum*, *Methylobacterium*, *Pseudomonas* e *Brevibacillus*. A utilização de BPCPs associadas com a aplicação de N via fertilizante pode ser resultar em contribuições significativas na produção de biomassa e produtividade de colmos da cana-de-açúcar. Rosa et al. (2020) obtiveram um aumento expressivo na produção da biomassa, acúmulo total de P e produtividade de colmos na variedade RB92579 ao utilizar inoculação com *A. brasilense* e *B. subtilis* em conjunto com aplicação de 45 kg ha⁻¹ de N. A contribuição das BPCP para a cultura da cana-de-açúcar pode

estar relacionada com a solubilização de fosfato, produção de hormônios vegetais (auxina, giberelina e citocinina), ACC deaminase, produção de sideróforos e ações indiretas como produção de antibióticos, entre outros (OLANREWAJU et al., 2017; SANTOYO et al., 2016).

2.8 Características morfoanatômicas das raízes das plantas

As características morfo-anatômicas das raízes correspondem a estruturas internas que formam os tecidos e vasos vegetais (Rosa et al., 1985). As estruturas características de monocotiledôneas são: epiderme, córtex, endoderme, periciclo, cilindro central, floema, xilema, medula central e pelos radiculares como mostra a (Figura 2).

Figura 2. Ilustração das características morfoanatômicas de monocotiledôneas. Fonte: Própria.



As modificações nas características morfo-anatômicas das plantas podem estar relacionadas com diferentes fatores bióticos e abióticos. Trabalho realizado por Yang et al. (2019) observou que a diferença entre genótipos e a disponibilidade de N afetam a anatomia das raízes, aumentando seu diâmetro quando apresenta uma maior disponibilidade de N, como também a densidade de vasos do metaxilema.

Além do N, hormônios como AIA, hormônio vegetal que está ligado ao crescimento e desenvolvimento das plantas e que desempenha um papel na divisão e alongamento celular, desenvolvendo das raízes, folhas e flores, podem afetar as características morfo-anatômicas das raízes (MCSTEEN, 2010).

Quando se trata de influência na capacidade de transportar seivas brutas e elaboradas na planta, a densidade de vasos condutores é de suma importância, sendo o hormônio vegetal AIA um dos potenciais contribuintes para este efeito, visto que o hormônio pode aumentar a espessura da parede secundária, desenvolver vasos condutores com também atuar no aumento das células do xilema (UGGLA et al., 1996). Essas modificações na anatomia das raízes podem favorecer o aumento da absorção de nutrientes, como também a resistência física das raízes no solo. Potenciais tecnologias que utilizem o aumento da disponibilidade de hormônios podem tornar o sistema de cultivo mais eficiente e sustentável.

2.9 Políticas públicas sustentáveis para o setor sucroenergético

Em meio à necessidade de utilizar novas fontes renováveis de energia no mundo, o Brasil adotou em 2016 uma política pública que visa estimular a produção e o uso de combustíveis renováveis. Neste contexto, foi lançado o RenavaBio, que consiste em uma política pública do governo federal e instituída pela Lei nº 13.576/2017, que tem como objetivos a expansão de biocombustíveis na matriz energética, assegurando previsibilidade para o mercado de combustíveis, induzindo ganhos de eficiência energética e de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa na produção, comercialização e uso dos combustíveis. Este foi um dos programas do país para o cumprimento dos compromissos determinados no Acordo de Paris (Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustível-ANP, 2019).

O programa iniciou em 2019 com metas anuais de descarbonização para o setor de combustíveis, de forma a incentivar o aumento da produção de biocombustíveis e sua participação na matriz energética do país. Segundo a ANP, serão emitidas certificações para os produtores e importadores dos biocombustíveis com validade de três anos e que visam valorizar os produtores que aderirem às metas de descarbonização pela RenovaBio, podendo gerar lastro para emissão primária de crédito de descarbonização (CBIOS), que poderá ser comercializado na bolsa de valores Brasil Bolsa Balcão [B3].

As associações dos fornecedores de cana-de-açúcar de Pernambuco (AFCP) e Paraíba irão aderir ao CBIOS. No entanto, toda a cadeia produtiva terá que adaptar seus processos para obter certificação ambiental, que exigirá dos produtores que desde a plantação até a entrega da cana nas usinas, deverão se preocupar e estabelecer metas para a redução da emissão de gás carbônico, causador do efeito estufa (AFCP, 2019).

Com base nisto, fica evidente a necessidade de estabelecer novos manejos sustentáveis para o cultivo da cana-de-açúcar, enquadrando-se às exigências do RenovaBio, possibilitando

uma menor emissão de CO₂ e, conseqüentemente, um maior retorno econômico pela garantia do CBIOs. A utilização de consórcios com leguminosas e a utilização de inoculantes na cana-de-açúcar são possibilidades para o estabelecimento de manejos mais sustentáveis, por serem práticas agrícolas consideradas de baixo carbono.

2.10 REFERÊNCIAS

ADEKIYA, A.O.; AGBEDE, T.M.; ABOYEJI, C.M.; DUNSIN, O.; UGBE, J.O. Green manures and NPK fertilizer effects on soil properties, growth yield, mineral and vitamin C composition of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench). **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, p.1-6, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.05.005>

AGÊNCIA IBGE DE NOTÍCIAS. **IBGE prevê safra recorde de grãos em 2020**. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/26537-ibge-preve-safra-recorde-de-graos-em-2020>>. Acesso em 12 de junho de 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEL-ANP. Renovabio. Disponível em: < <https://www.gov.br/anp/pt-br/search?SearchableText=RENOVABIO>>. Acesso em 12 de junho de 2020.

AGREN, G.I.; HYVÖNEN, R.; BERGLUND, S.L.; HOBBIE, S.E. Estimating the critical N:C from litter decomposition data and its relation to soil organic matter stoichiometry. **Soil Biology & Biochemistry**. v. 67, p.312-318, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.09.010>

AGRO BAYER BRASIL. **Monsoy: M 8372 IPRO**. Disponível em: <<https://www.agro.bayer.com.br/essenciais-do-campo/sementes/monsoy/m-8372-ipro>>. Acesso em 20 de janeiro de 2021.

ALMEIDA, T.B.F.; FLORES, R.A.; ALMEIDA, H.J.; PRADO, R.M.; MARANHÃO, D.D.C.; POLITI, L.S. Development and Nutrition of Soybeans with Macronutrients Deficiencies. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.48, n. 13, p. 1616-1625, 2017. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1374402>

ANDERSEN, L. E.; GRANGER, C. W. J.; REIS, E. J.; WEINHOLD, D.; WUNDER, S. **The dynamics of deforestation and economic growth in the Brazilian Amazon**. Cambridge: Cambridge University Press. p. 14-99, 2002.

ANTUNES, J.E.L.; LYRA, M.C.C.P; OLLERO, F.J.; FREITAS, A.D.S.; OLIVEIRA, L.M.S.; ARAÚJO, A.S.F.; FIGUEIREDO, M.V.B. Diversity of plant growth-promoting bacteria associated with sugarcane. **Genetics and Molecular Research**, v. 16, n. 2, p. 1-10, 2017. <http://dx.doi.org/10.4238/gmr16029662>

APROSOJA. A História da Soja. Disponível em <<http://www.aprosoja.com.br/sobre-soja/ahistoria-da-soja/>>. Acessado em dez. 2020.

ARAUJO, W.D.; GONELI, A.L.D.; SOUZA, C.M.A.; GONÇALVES, A.A.; VILHASANTI, H.C.B. Propriedades físicas dos grãos de amendoim durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n. 3, p.279-286, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000300006>

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário Estatístico 2019 [da] ANDA**. São Paulo, 2019, Anual.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário Estatístico 2020 [da] ANDA**. São Paulo, 2020, Anual.

BAPTISTA, R.B.; MORAIS, R.F.; LEITE, J.M.; SCHULTZ, N.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. Variations in the ¹⁵N natural abundance of plant-available N with soil depth: their influence on estimates of contributions of biological N₂ fixation to sugar cane. **Applied Soil Ecology**, v.73, p.124-129, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.08.008>

BIANCO, M.S.; CECÍLIO FILHO, A.B.; CARVALHO, L.B. Nutritional Status of the Cauliflower Cultivar ‘Verona’ Grown with Omission of out Added Macronutrients. **Plos One**, v. 10(4), p. 1-17, 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123500>

BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B.; OLIVEIRA, B. G.; SCALA JR, N. L. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 38, p. 13, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0490-x>

BROWN, J. C.; KOEPPE, M.; COLES, B.; PRICE, K. P. Soybean production and conversion of tropical forest in the Brazilian Amazon: the case of Vilhena, Rondônia. **AMBIO: A Journal of the Human Environment**, v. 34, p. 462-469, 2005. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-34.6.462>

BULEGON, L.G.; GUIMARÃES, V.F.; KLEIN, J.; BATISTTUS, A.G.; INAGAKI, A.M.; OFFMANN, L.C.; SOUZA, A.K.P. Enzymatic activity, gas exchange and production of soybean co-inoculated with *Bradyrhizobium japonicum* and *Azospirillum brasilense*. **Australian Journal Crop Science**, v. 11, p. 888–896, 2017. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2020v41n6Supl2p2937>

CADISCH, G.; HAIRIAH, K.; GILLER, K.E. Applicability of the natural ¹⁵N abundance technique to measure N₂ fixation in *Arachis hypogaea* grown on an Ultisol. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, v.48, p.31-45, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1573-5214\(00\)80003-2](https://doi.org/10.1016/S1573-5214(00)80003-2)

CANTARELLA, H. **Nitrogênio**. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). Fertilidade do solo. Viçosa: SBCS, p. 375-470, 2007.

CARLSON, K.M.; GERBER, J.S.; MUELLER, N.D.; HERRERO, M.; MCDONALD, G.K.; BRAUMAN, K.A.; HAVLIK, P.; O’CONNELL, C.S.; JOHNSON, J.A.; SAATCHI, S.; WEST, P.C. Greenhouse gas emissions intensity of global croplands. **Nature Climate Change**, p. 1-9, 2016. <https://doi.org/10.1038/nclimate3158>

CASTRO, J.L.; SOUZA, M.G.; RUFINI, M.; GUIMARÃES, A.A.; RODRIGUES, T.L.; MOREIRA, F.M.S. Diversity and efficiency of rhizobia communities from iron mining areas using cowpea as a trap plant. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.41, p.1-20, 2017. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20160525>

CHAVES, V.A.; SANTOS, S.G.; SCHULTZ, N.; PEREIRA, W.; SOUSA, J.S.; MONTEIRA, R.C.; REIS, V.M. Desenvolvimento inicial de duas variedades de cana-de-açúcar inoculadas com bactérias diazotróficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.1595-1602, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20151144>

CHIBEBA, A.M.; KYEI-BOAHEN, S.; GUIMARÃES, M.F.; NOGUEIRA, M.A.; HUNGRIA, M. Feasibility of transference of inoculation-related technologies: A case study of evaluation of soybean rhizobial strains under the agro-climatic conditions of Brazil and Mozambique. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 216, p. 230-240, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.037>

CONAB — Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2018/19**. v. 5, n.1, p. 66 , 2018.

CONAB — Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2019/20**. v. 6, p. 58 , 2019.

CONAB — Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2020/21**. v. 7, p. 62 , 2020.

CONAB- Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2021**. v. 1, n. 1, p. 85 . 2021.

COPERAGUAS. **O feijão na alimentação dos brasileiros**. Disponível em: <<http://coperaguas.com.br/noticia/o-feijao-na-alimentacao-do-brasileiro>>,2015. Acesso em 29 de janeiro de 2021.

COSTA, A.F.; SOUZA, M.C.M.; CANUTO, V.T.B.; COITINHO, R.L.B.C.; TAVARES, J.A.; FONSECA, M.A.C. Miranda IPA 207, nova cultivar de feijão-caupi para o Nordeste brasileiro. **Pesquisa Agropecuária de Pernambuco**, v. 18, n. 1, p. 39-43, 2013. <http://dx.doi.org/10.12661/pap.2013.008>

COUËDEL, A.; ALLETTO, L.; TRIBOUILLOIS, H.; JUSTES, E. Cover crop crucifer-legume mixtures provide effective nitrate catch crop and nitrogen green manure ecosystem services. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 254, p. 50-59, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.017>

DANTAS, E.F.; FREITAS, A.D.S.; LYRA, M.C.C.P.; SANTOS, C.E.R.E.S.; CARVALHO NETA, S. J.; SANTANA, A.C.A.; BESERRA, R.V.; SAMPAIO, E.V.S. B. Biological fixation, transfer and balance of nitrogen in passion fruit (*Passiflora edulis* Sims) orchard intercropped with different green manure crops. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, p. 465-471, 2019. <http://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.03.p1559>

DANIELS, J.; ROACH, B.T. Taxonomy and evolution. In: **Sugarcane improvement through breeding**. Heinz, D.J. (Ed.) Amsterdam: Elsevier. Cap 2, 1987. p. 7-84.

DIAS, M.O.S.; MACIEL FILHO, R.; MANTELATO, P.E.; CAVALETT, O.; ROSSELL, C.E.V.; BONOMI, A.; LEAL, M.R.L.V. Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil. **Environmental Development**, v. 15, p. 35-51, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.03.004>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-Embrapa. **Soja**. Disponível em <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1>>. Acesso em Jan. 2020.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- Embrapa. **Tecnologias de Produção de Soja: Região Central do Brasil 2004**. Disponível em <<http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/SojanoBrasil.htm>>. Acesso em dez. 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- Embrapa. **Amendoim BR1**. 4ª ed. Campina Grande, Centro Nacional de Pesquisa de Algodão, p. 2, 2009.

ETESAMI, H.; MAHESHWARI, D.K. Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and future prospects. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 156, p. 225-246, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.013>

FLETCHER, S.M.; SHI, Z. **An overview of world peanut markets**. Peanuts: genetics, Processing and Utilization, AOCS Press. p. 267-287, 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-1-63067-038-2.00010-1>

FIORENTIN, S.D.; TEIXEIRA, F.R.; SILVA, S.Z.; BERNADI, D.M.; SANTOS, S.M.V.; LOVATO, F.R. Desenvolvimento de formulações biscoitos tipo cookies com adição de farinha de feijão-caupi BRs xiquexique. **Fag Journal of Health**, v. 1, n. 2, p. 1-36, 2019.
<https://dx.doi.org/10.35984/fjh.v1i2.85>

FORTES, C.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OTTO, R.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E. Stalk and sucrose yield in response to nitrogen fertilization of sugarcane under reduced tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, p. 88-96, 2013.
<https://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X13000100012>

FREIRE FILHO, F.R. Feijão-caupi no Brasil: produção, melhoramento genético, avanços e desafios. Embrapa Meio-Norte. 21 ed., p. 84, 2011.

FREIRE FILHO, F. R. Origem, evolução e domesticação do caupi. In: ARAÚJO, J. P. P. de; WATT, E. E. (Org.). O caupi no Brasil. Brasília, DF: IITA: EMBRAPA, 1988. p. 26-46.

FREITAS, A.D.S.; SAMPAIO, E.V.S.; SANTOS, C.E.R.S.; SILVA, A.F.; SOUZA, R.J.C. Fixação biológica de nitrogênio no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 8, n. 4, p. 585-597, 2015.

FREITAS, F.O.; PEÑALOZA, A.P.S.; VALLS, J.F.M. **Amendoim contador de história**. Brasília: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnológicos, 2003, p. 12.

GARIBALDI, L.A.; GEMMILL-HERREN, B.; D'ANNOLFO, R.; GRAEUB, B.E.; CUNNIGHAM, S.A.; BREEZE, T.D. Farming Approaches for Greater Biodiversity, Livelihoods, and Food Security. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 32, n. 1, p. 68-80, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.017>

GEETHA, P.; TAYADE, A.S.; CHANDRASEKAR, C.A.; SELVAN, T.; RAJESH, K. Agronomic response, weed smothering efficiency and economic feasibility of sugarcane and legume intercropping system in tropical India. **Sugar Tech**, v. 21, p. 838-842, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0689-9>

GLOBALFERT. **Vendas de adubos estão aquecidos no Brasil**. Disponível em: <<https://www.globalfert.com.br/>> Acesso em: 20 de agosto de 2020.

GÍRIO, L.A.S.; DIAS, F.L.F.; REIS, V.M.; URQUIAGA, S.; SHULTZ, N.; BOLONHEZI, D.; MUTTON, M.A. Bactérias promotoras de crescimento e adubação nitrogenada no crescimento inicial de cana-de-açúcar proveniente de mudas pré-brotadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 1, p. 33-43, 2015. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000100004>

HE, T.; SU, L.; LI, Y.; SU, T.; QIN, F.; LI, Q. Nutrient decomposition rate and sugarcane yield as influenced by mung bean intercropping and crop residue recycling. **Sugar Tech**, v. 20, n. 2, p. 154-162, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12355-017-0548-0>

HE, G.; MENG, R.; GAO, H.; GUO, B.; GAO, G.; NEWMAN, M.; PITTMAN, R.N.; PRAKASH, C.S. Simple sequence repeat markers for botanical varieties of cultivated peanut (*Arachis hypogaea* L.). **Euphytica**, v. 142, p. 131-136, 2005. <https://doi.org/10.1007/s10681-005-1043-3>

HEIL, J.; VERECKEN, H.; BRÜGGEMANN, N. A review of chemical reactions of nitrification intermediates and their role in nitrogen cycling and nitrogen trace gas formation in soil. **European Journal of Soil Science**, v. 67, n. 1, p. 23-39, 2016. <https://doi.org/10.1111/ejss.12306>

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M.A.; ARAUJO, R.S. Alternative methods of soybean inoculation to overcome adverse conditions at sowing. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 3, p. 2329-2338, 2015. <https://doi.org/10.5897/ajar2014.8687>

HUNGRIA, M.; CAMPO, R.J.; MENDES, I.C. Fixação biológica de nitrogênio na soja. **Londrina: Embrapa Soja**, 2001. p.48. (Circular técnico/ Embrapa soja, ISSN 1516-7860; n.35).

JARVIS, S. C.; STOCKDALE, E. A.; SHEPHERD, M. A.; POWLSON, D. S. Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils: processes and measurement. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 57, p. 187-235, 1996.

JUGE, C.; PRÉVOST, D.; BERTRAND, A.; BIPFUBUSA, M.; CHALIFOUR, F.P. Growth and biochemical responses of soybean to double and triple microbial associations with Bradyrhizobium, Azospirillum and arbuscular mycorrhizae. **Applied Soil Ecology**, v. 61, p. 147-157, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.05.006>

KAUR, N.; BHULLAR, M.S.; GILL, G. Weed management in sugarcane-canola intercropping systems in northern India. **Field Crop Research**, v. 188, p. 1-9, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2016.01.009>

KAUR, G.; REDDY, M.S. Effects of Phosphate-Solubilizing Bacteria, Rock Phosphate and Chemical Fertilizers on Maize-Wheat Cropping Cycle and Economics. **Pedosphere**, v. 25, n. 3, p. 428-437, 2015. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)30010-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)30010-2)

KERMAR, M.; FRANKE, A.C.; ADJEI-NSIAH, S.; AHIABOR, B.D.K.; ABAIDOO, R.C.; GILLER, K.E. N₂-fixation and N contribution by grain legumes under different soil fertility status and cropping systems in the Guinea savanna of northern Ghana. **Agriculture, ecosystems and environment**, v. 261, p. 201-210. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2017.08.028>

LALOY, E.; BIELDERS, C.L. Effect of intercropping period management on runoff and erosion in a maize cropping system. **Journal of Environmental Quality**, v. 39, p. 1001-1008, 2010. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0239>

LATATI, M.; BARGAZ, A.; BERLARBI, B.; LAZALI, M.; BENLAHRECH, S.; TELLAH, S.; KACI, G.; DREVON, J.J.; OUNANE, S.M. The intercropping common bean with maize improves the rhizobial efficiency, resource use and grain yield under low phosphorus availability. **European Journal of Agronomy**, v. 72, p. 80-90, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.015> 1161-0301

LAURANCE, W.F.; SAYER, J.; CASSMAN, K.G. Agricultural expansion and its impacts on tropical nature. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 29, n. 2, p.107-116, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2013.12.001>

LEGHARI, S.J.; WAHOCHO, A.; LAGHARI, G.M.; LAGHARI, A.H.; MUSTAFABHABHAN, G.; TALPUR, K.H.; BHUTTO, T.A.; WAHOCHO, S.A.; LASHARI, A.A. Role of nitrogen for plant growth and development: A review. **Advances in Environmental Biology**, v. 10, p. 209-218, 2016. <https://www.researchgate.net/publication/309704090>

LI, X.; MU, Y.; CHENG, Y.; LIU, X.; NIAN, H. Effects of intercropping sugarcane and soybean on growth, rhizosphere soil microbes, nitrogen and phosphorus availability. **Acta Physiol Plant**, v. 35, p. 1113-1119, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/s11738-012-1148-y>

LIMA NETO, J.F.; DUTRA FILHO, J.A.; SIMÕES NETO, D.E.; SILVA, A.E.P.; SILVA, L.J.; FERREIRA, G.E. Avaliação agroindustrial e parâmetros genéticos de clones UFRPE de cana-de-açúcar no litoral norte de Pernambuco. **Pesquisa Agropecuária Pernambucana**, v.18, n.1, p. 8-13, 2013. <https://doi.org/10.12661/pap.2013.003>

LUO, S.; YU, L.; LIU, Y.; ZHANG, Y.; YANG, W.; LI, Z.; WANG, J. Effects of reduced nitrogen input on productivity and N₂O emissions in a sugarcane/soybean intercropping system. **European Journal of Agronomy**, v. 81, p. 78-85, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.002>

MAMTA; RAHI, P.; PATHANIA, V.; GULATI, A.; SINGH, B.; BHANWRA, R.K.; TEWARI, R. Stimulatory effect of phosphate-solubilizing bacteria on plant growth, stevioside and rebaudioside-A contents of *Stevia rebaudiana* Bertoni. **Applied Soil Ecology**, v. 46, p. 222-229, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.08.008>

MARANGUIT, D.; GUILLAUME, T.; KUZYAKOV, Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. **Catena**, v. 149, p. 385-393, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.10.010>

MARGENOT, A.J.; PAUL, B.K.; SOMMER, R.R.; PULLEMAN, M.M.; PARIKH, S.J.; JACKSON, L.E.; FONTE, S.J. Can conservation agriculture improve phosphorus (P) availability in weathered soils? Effects of tillage and residue management on soil P status after 9 years in a Kenyan Oxisol. **Soil & Tillage Research**, v. 166, p. 157-166, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.09.003>

MARINHO, R.C.N.; FERREIRA, L.V.M.; SILVA, A.F.; MARTINS, L.M.V.; NÓBREGA, R.S.A.; FERNANDES JUNIOR, P.I.; Symbiotic and agronomic efficiency of new cowpea rhizobia from Brazilian Semi-Arid. **Bragantia**, v. 76, n. 2, p. 273-281, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.003>

MARQUES, A.C.R., OLIVEIRA, L.B., NICOLOSO, F.T., JACQUES, R.J.S., GIACOMINI, S.J., QUADROS, F.L.F. Biological nitrogen fixation in C₄ grasses of different growth strategies of South America natural grasslands. **Applied Soil Ecology**, v. 113, p. 54-62, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.01.011>

MCSTEEN, P. Auxin and monocot development. **Cold Spring Harbor perspectives in biology**, v. 2, n. 3, p. 1-18, 2010. <http://dx.doi.org/10.1101/cshperspect.a001479>

MOHAMMADI, K. Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop production. **Resources and Environment**, v. 2, n. 1, p. 80-85, 2012.

MORETTI, L.G.; CRUSCIOL, C.A.C.; KURAMAE, E.E.; BOSSOLANI, J.W.; MOREIRA, A.; COSTA, N.R.; ALVES, C.J.; PASCOALOTO, I.M.; RONDINA, A.B.L.; HUNGRIA, M. Effects of growth-promoting bacteria on soybean root activity, plant development, and yield. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 1, p. 418-428, 2019. <https://doi.org/10.1002/agj2.20010>

MORTON, D. C.; NOOJIPADY, P.; MACEDO, M. M.; GIBBS, H.; VICTORIA, D. C.; BOLFE, E. L. Reevaluating suitability estimates based on dynamics of cropland expansion in the Brazilian Amazon. **Global Environmental Change**, v. 37, p. 92-101, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.02.001>

NAVNEET, K.; MAKHAN, S.B.; GURJEET, G. Weed management in sugarcane-canola intercropping systems in northern India. **Field Crops Research**, v. 188, p. 1-9, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.01.009>

NOGUEIRA, R.J.M.C.; TÁVORA, F.J.A.F.; ALBUQUERQUE, M.B.; NASCIMENTO, H.H.C.; SANTOS, R.C. Ecofisiologia do amendoim (*Arachis hypogaea* L.). In: Santos, R.C.; FREIRE, R.M.M.; LIMA, L.M., eds. **O agronegócio do amendoim no Brasil**. 2 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013. Cap. 3, p. 71-113.

OLANREWAJU, O.S.; GLICK, B.R.; BABALOLA, O.O. Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. **World Journal Microbiology Biotechnology**, v. 33, n. 197, p. 1-16, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2364-9>

OLIVEIRA, E.C.A.; FREIRE, F.J.; OLIVEIRA, R.I.; FREIRE, M.B.G.S.; SIMÕES NETO, D.E.; SILVA, S.A.M. Extração e exportação de nutrientes por variedade de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 34, p. 1343-1352, 2010.

OTTO, R.; TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C. Root system distribution of sugar cane as related to nitrogen fertilization evaluated by two methods: monolith and probes. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 33, p. 601-611, 2009a. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000300013>

OTTO, R.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O. Fitomassa de raízes e da parte aérea da cana-de-açúcar relacionada à adubação nitrogenada de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 4, p. 398-405, 2009b. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000400010>

OTTO, R.; FREITAS Jr., J. C. M.; ZAVASCHI, E.; FARIA, I. K. P.; PAIVA, L. A.; BAZANI, J. H.; MIRA, A. B.; & KAMOGAWA, M. Y. Combined Application of Concentrated inasse and Nitrogen Fertilizers in Sugarcane: Strategies to Reduce Ammonia Volatilization Losses. **Sugar Tech**, v. 19, p. 248-257, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12355-016-0463-9>

OTTO, R.; MULVANEY, R. L.; KHAN, S. A.; TRIVELIN, P. C. O. Quantifying soil nitrogen mineralization to improve fertilizer nitrogen management of sugarcane. **Biology and Fertility of Soils**, v. 49, n. 7, p. 893-904, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00374-013-0787-5>

PEREIRA, W.; OLIVEIRA, R.P.; PEREIRA, A.; SOUSA, J.S.; SCHULTZ, N.; URQUIAGA, S.; REIS, V.M. Nitrogen acquisition and ¹⁵N-fertiliser recovery efficiency of sugarcane cultivar RB92579 inoculated with five diazotrophs. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.19, p. 37-50, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10100-x>

PERIN, J.G.; BERTÉLI, M.B.D.; VALLE, J.S.; LINDE, G.A.; PACCOLA-MEIRELLES, L.D.; COLAUTO, N.B.; BARELLOS, F.G. Characterization of *aapP* and *nopP* genes related to the biological nitrogen fixation efficiency with soybean in contrasting strains of *Bradyrhizobium japonicum*. **Genetics and Molecular Research**, v.17, n.1, p. 1-7, 2018. <http://dx.doi.org/10.4238/gmr16039867>

PERIN, J.G.; BARTÉLI, M.B.D.; VALLE, J.S.; LINDE, G.A.; PACCOLA-MEIRELLES, L.D.; COLAUTO, N.B.; BARCELLOS, F.G. Characterization of *aapP* and *nopP* genes related to the biological nitrogen fixation efficiency with soybean in contrasting strains of *Bradyrhizobium japonicum*. **Genetics and Molecular Research**, v.17, n. 1, p.1-7, 2017. <http://dx.doi.org/10.4238/gmr16039867>

REDE INTERUNIVERSITÁRIA DE DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO- RIDESA. Catálogo nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar. **RIDESA**, 136p. 2010.

REDE INTERUNIVERSITÁRIA DE DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO- RIDESA. Liberação nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar. **RIDESA**, 72p. 2015.

ROBINSON, N.; BRACKIN, R.; VINALL, K.; SOPER, F.; HOLST, J.; GAMAGE, H.; PAUNGFUO-LONHIENNE, C.; RENNENBERG, H.; LAKSHMANAN, P.; SCHMIDT, S. Nitrate paradigm does not hold up for sugarcane. **Plos One**, v. 6, n. 4, p.1-9, 2011. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019045>

RODRÍGUEZ-ANDRADE, O.; FUENTES-RAMÍREZ, L. E.; MORALES GARCÍA, Y. E.; MOLINA-ROMERO, D.; BUSTILLOS-CRISTALES, M. R.; et al. The decrease in the population of *Gluconacetobacter diazotrophicus* in sugarcane after nitrogen fertilization is related to plant physiology in split root experiments. **Revista Argentina de Microbiología**, v. 47, n. 4, p. 335-343, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.09.004>

RODRIGUES, A.A.; FORZANI, M.V.; SOARES, R.S.; SIBOV, S.T.; VIEIRA, J.D.G. Isolation and selection of plant growth-promoting bacteria associated with sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 46, n. 2, p. 149-158, 2016. <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4639526>

ROSA, P.A.L.; MORTINHO, E.S.; JALAL, A.; GALINDO, F.S.; BUZETTI, S.; FERNANDES, G.C.; BARCO NETO, M.; PAVINATO, P.S.; TEXEIRA FILHO, M.C.M. Inoculation With Growth-Promoting Bacteria Associated With the Reduction of Phosphate Fertilization in Sugarcane. **Frontiers in Environmental Science**, v.8, p. 1-18, 2020. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00032>

ROSA, M.P.; MOREIRA, I.; MONTEIRO, R. **Atlas de anatomia vegetal**. Castelo Branco: Escola Superior Agrária, 1985. p. 54.

SÁ, J.C.M.; LAL, R.; CERRI, C.C.; LORENZ, K.; HUNGRIA, M.; CARVALHO, P.C.F. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, v. 98, p. 102-112, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.020>

SALAH, A.M.A.; PRASSE, R.; MARSCHNER, B. Intercropping with native perennial plants protects soil of arable fields in semi-arid lands. **Journal of Arid Environments**, v. 130, p. 1-13, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.02.015>

SANTANA, A. C. A., OLIVEIRA, E. C. A., SILVA, V. S. G., SANTOS, R. L., SILVA, M. A., & FREIRE, F. J. Critical Nitrogen dilution curves and productivity assessments for plant cane. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 4, p. 244-251, 2020. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n4p244-251>

SANTANA, A.C.A. **Estimativa dos teores de nitrogênio na folha diagnóstico e biomassa da cana-de-açúcar por espectrorradiometria**. Recife:UFRPE, 2017. p 114. Tese (Doutorado)- Universidade Federal Rural de Pernambuco.

SANTOS, J.F.; GRANGEIRO, J.I.T.; BRITO, L.M.P.; OLIVEIRA, M.M.; OLIVEIRA, M.E.C. Novas variedades de caupi para a microrregião do brejo da Paraíba. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, João Pessoa. v. 3, n. 3, p.7-12, 2009.

SANTACHIARA, G.; SALVAGIOTTI, F.; ROTUNDO, J.L. Nutritional and environmental effects on biological nitrogen fixation in soybean: A meta-analysis. **Field Crops Research**, v.240, p. 106-115, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.05.006>

SANTOYO, G.; MORENO-HAGELSIEB, G.; OROZCO-MOSQUEDA, M.D.C.; GLICK, B.R. Plant growth-promoting bacterial endophytes. **Microbiological Research**, v.183, p.92-99, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.008>

SHULTZ, N.; SILVA, J.A.; SOUSA, J.S.; MONTEIRO, R.C.; OLIVEIRA, R.P.; CHAVES, V.A.; PEREIRA, W.; SILVA, M.F.S.; BALDANI, J.I.; BODDEY, R.M., URQUIAGA, S.; XAVIER, R.P.; MORAIS, R.F.; BATISTA, R.B.; SHULTZ, N.; LEITE, J.M.; SÁ, J.M.; BARBOSA, K.P.; RESENDE, A.S.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M. Evidence from field nitrogen balance and ¹⁵N natural abundance data for the contribution of biological N₂ fixation to Brazilian sugarcane varieties. **Plant Soil**, v. 356, p. 5-21, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1016-3>

SIKIROU, R.; WYDRA, K. Effect of intercropping cowpea with maize or cassava on cowpea bacterial blight and yield. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v. 115, n. 4 p. 145–151, 2008. <https://doi.org/10.1007/BF03356262>

SILVA, A.C.; VASCONCELOS, P.L.R.; MELO, L.D.F.A.; SILVA, V.S.G.; ANDRADE JUNIOR, J.L.M.A.; SANTANA, M.B. Diagnóstico da produção de feijão-caupi no Nordeste brasileiro. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 16, n. 2, p. 1-5, 2018. <http://dx.doi.org/10.5892/ruvrd.v16i2.4380>

SILVA, E.R.; ZOZ, J.; OLIVEIRA, C.E.; ZUFFO, A.M.; STEINER, F.; ZOZ, T.; VENDRUSCOLO, E.P. Can co-inoculation of Bradyrhizobium and Azospirillum alleviate adverse effects of drought stress on soybean (*Glycine max* L. Merrill.)? **Archives of Microbiology**, v. 201, p. 325-335, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00203-018-01617-5>

SILVA, J.F.; CARVALHO, A.M.; REIN, T.A.; COSER, T.R.; RIBEIRO JÚNIOR, W.Q.; VIEIRA, D.L.; COOMES, D.A. Nitrous oxide emissions from sugarcane fields in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 246, p. 55-65, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.019>

SOLANKI, M.K.; WANG, Z.; WANG, F.; LI, C.; LAN, T.; SINGH, R.K.; SINGH, P.; YANG, L.; LI, Y. Intercropping in sugarcane cultivation influenced the soil properties and enhanced the diversity of vital diazotrophic bacteria. **Sugar Tech**, v. 19, p.136-147, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12355-016-0445-y>

SORATO, R.P.; CRUSCIOL, C.A.C.; COSTA, C.H.M.; FERRARI NETO, J.; CASTRO, G.S.A. Produção, decomposição e ciclagem de nutrientes em resíduos de crotalária e milheto, cultivados solteiros e consorciados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n.10, p.1462-1470, 2012.

SOUZA, R.; AMBROSINI, A.; PASSAGLIA, L.M.P. Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. **Genetics and Molecular Biology**, v.38, n.4, p.401-419, 2015. <https://doi.org/10.1590/S1415-475738420150053>

STAGNARI, F.; MAGGIO, A.; GALIENI, A.; PISANTE, M. Multiple benefits of legumes for agriculture sustainability: an overview. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 4, n. 2, p. 1-13, 2017. <https://doi.org/10.1186/s40538-016-0085-1>

TAULÉ, C.; MAREQUE, C.; BARLOCCO, C.; HACKEMBRUCH, F.; REIS, V.M.; SICARDI, M.; BATTISTONI, F. The contribution of nitrogen fixation to sugarcane 34 (*Saccharum officinarum* L.), and the identification and characterization of part of the associated diazotrophic bacterial community. **Plant Soil**, v. 356, p. 35-49, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1023-4>

THOMAZINI, A.; MENDONÇA, E.S.; SOUZA, J.L.; CARDOSO, I.M.; GARBIN, M.L. Impact of organic no-till vegetables systems on soil organic matter in the Atlantic Forest biome. **Scientia Horticulturae**, v. 182, p. 145-155, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2014.12.002>

TIAN, J.; TANG, M.; XU, X.; LUO, S.; CONDRON, L.M.; LAMBERS, H.; CAI, K.; WANG, J. Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) intercropping with reduced nitrogen input influences rhizosphere phosphorus dynamics and phosphorus acquisition of sugarcane (*Saccharum officinarum*). **Biology and Fertility of Soil**, v. 56, p. 1063-1075, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01484-7>

TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, M.W.; GAVA, G.J.C.; SARRIÉS, G.A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solos arenosos com incorporação de resíduos da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 637-646, 2002.

UGGLA, C.; MORITZ, T.; SANDBERG, G.; SUNDBERG, B. Auxin as a positional signal in pattern formation in plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 93, n. 17, p. 9282-9286, 1996. <https://doi.org/10.1073/pnas.93.17.9282>

URQUIAGA, S.; XAVIER, R.P.; MORAIS, R.F.; BATISTA, N.S.; LEITE, J.M.; SÁ, J.M.; BARBOSA, K.P.; RESENDE, A.S.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M. Evidence from field nitrogen valance and ¹⁵N natural abundance data for the contribution of biological N₂ fixation to Brazilian sugarcane varieties. **Plant Soil**, v. 356, p. 5-21, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1016-3>

WANG, X.; FENG, Y.; YU, L.; SHU, Y.; TAN, F.; GOU, Y.; LUO, S.; YANG, W.; LI, Z.; WANG, J. Sugarcane/soybean intercropping with reduced nitrogen input improves crop productivity and reduces carbon footprint in China. **Science of the Total Environment**, v.719, p. 1-11, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137517>

YANG, Y.; GAO, S.; JIANG, Y.; LIN, Z.; LUO, J.; LI, M.; GUO, J.; SU, Y.; XU, L.; QUE, Y. The physiological and agronomic responses to nitrogen dosage in different sugarcane varieties. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 1-18, 2019. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00406>

ZHANG, N.; ZHAO, F.; COLLATZ, G.J.; KALNAY, E.; SALAWITCH, R.J.; WEST, T.O.; GUANTER, L. Agricultural green revolution as a driver of increasing atmospheric CO₂ seasonal amplitude. **Nature**, v. 515, p. 394-409, 2014. <https://doi.org/10.1038/nature13893>

ZOTARELLI, L.; ZATORRE, N.P.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; JANTALIA, C.P.; FRANCHINI, J.C.; ALVES, B.J.R. 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**, v. 132, p.185-195, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.12.013>

3 Capítulo 1: INOCULAÇÃO COM BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO AFETA PARÂMETROS BIOMÉTRICOS E HISTOLÓGICOS DE MUDAS PRÉ-BROTADAS DE CANA-DE-AÇÚCAR

3 Inoculação com bactérias promotoras de crescimento afeta parâmetros biométricos e histológicos de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar

RESUMO

O uso de inoculantes com bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP) vem contribuindo para uma agricultura de baixo carbono. Os efeitos da promoção de crescimento podem estar relacionados a diferentes mecanismos, sendo os mais conhecidos a fixação biológica de nitrogênio (FBN), a produção de sideróforos e fitormônios e a solubilização de fosfato e potássio. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da inoculação com BPCP sobre o desenvolvimento e parâmetros histológicos em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (MPB). Em condições de ambiente protegido, foi realizado um experimento utilizando um substrato inerte para cultivo de MPBs, em tubetes. Os tratamentos foram inoculações com bactérias diazotróficas endofíticas previamente isoladas de cana-de-açúcar, comparadas a dois tratamentos controle sem inoculação, sendo um com e outro sem adubação nitrogenada mineral. As estirpes bacterianas utilizadas foram IPA CC23- (*Paenibacillus* sp.), IPA CF62 (*Paenibacillus* sp.) e IPA CC44 (*Burkholderia* sp.). Os tratamentos foram distribuídos em blocos casualizados com quatro repetições, sendo a unidade experimental composta por 4 tubetes contendo o substrato estéril, totalizando. A variedade RB92579 foi utilizada, por ser a mais cultivada no Nordeste do Brasil. Foram realizadas avaliações biométricas ao longo do cultivo das mudas (altura da planta, diâmetro do colmo, produção de biomassa aérea e de raízes) e avaliações das características morfoanatômicas das raízes aos 87 dias. Efeitos na produção de biomassa foram observados no tratamento nitrogenado seguido pelas mudas inoculadas com as estirpes IPA CF62 e IPA CF44 no substrato inerte. A densidade de pelos radiculares aumentou com a inoculação com as estirpes IPA CF62 e IPA CF44. A densidade de vasos do metaxilema foi maior no tratamento nitrogenado, seguido pelos tratamentos inoculados. As plantas inoculadas apresentaram maior crescimento que as que receberam os demais tratamentos. Portanto, as estirpes podem ser consideradas potenciais para a utilização de inoculantes para a cultura da cana-de-açúcar, após a testagem das suas contribuições em campo.

Palavras-chave: *Saccharum* spp. inoculante. produção de biomassa aérea e raiz. morfoanatomia da raiz.

3 Inoculation with growth-promoting bacteria affects biometric and histological parameters of pre-sprouted sugarcane seedlings

ABSTRACT

The use of inoculants with plant growth promoting bacteria (BPCP) has contributed to low carbon agriculture. The effects of growth promotion may be related to different mechanisms, the best known being biological nitrogen fixation (FBN), production of siderophores and phytohormones, and solubilization of phosphate and potassium. In this sense, the objective of this research was to evaluate the effects of inoculation with BPCP on the development and histological parameters of pre-sprouted sugarcane (MPB) seedlings. For this, under protected environment conditions, two experiments were carried out, one cultivating MPB in an inert substrate and the other in a commercial substrate. The treatments were inoculations with endophytic diazotrophic bacteria previously isolated from sugarcane, compared to two control treatments without inoculation with mineral nitrogen fertilization and another without fertilization. The bacterial strains used were IPA CC23 (*Paenibacillus* sp.), IPA CF62 (*Paenibacillus* sp.) and IPA CC44 (*Burkholderia* sp.). The treatments were distributed in randomized blocks with 4 replications, the experimental unit being composed of 4 tubes containing sterile or commercial substrate, totaling 160 sample units. The sugarcane variety used was RB92579, as it is the most cultivated in the Northeast of Brazil. Biometric evaluations were carried out during seedling cultivation (plant height, stem diameter, aboveground and root biomass production) and evaluations of the morphoanatomical characteristics of the roots at 87 days. Effects on biomass production were observed in the nitrogen treatment followed by seedlings inoculated with IPA CF62 and IPA CF44 strains in the inert substrate. Histological aspects such as root hair densities were influenced by the inoculation of the IPA CF62 and IPA CF44 strains, whereas in relation to the density of metaxylem vessels, the nitrogen treatment presented a higher density followed by the inoculated treatments. The strains studied showed greater growth rate compared to the other treatments. Thus, the strains under study can be considered potential for the use of inoculants for sugarcane cultivation. For this, it is necessary to test their contributions in the field.

Keywords: *Saccharum* spp. inoculant. aboveground and root biomass production. root morphoanatomy.

3.1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma gramínea C4 com alta eficiência fotossintética e potencial de alta produção de biomassa (BURNER et al., 2009; GORLITSKY et al., 2015; MORAIS et al., 2009; PEDROSO et al., 2014), apresentando grande importância para utilização como cultura energética (LIMA et al., 2014) para produção de etanol e outros biomateriais, em regiões de clima tropical. Na busca por economia nos custos e diminuição nos impactos ambientais em cultivos de cana-de-açúcar, diversas tecnologias vêm sendo desenvolvidas. Na implantação do canavial, por exemplo, a utilização de mudas pré-brotadas (MPB) (STOLF; TOKESHI, 1990) possibilita o aumento da qualidade fitossanitária e de brotamento (GÍRIO et al., 2015; GIROTTO et al., 2016), reduzindo o número de sementes em até 80% em relação ao plantio convencional (MAWLA et al., 2014, LANDELL et al., 2012). Em consequência, há diminuição da queima de combustíveis fósseis e de insumos agrícolas decorrentes de cortes e transporte de grandes quantidades de cana-semente.

A possibilidade de produção de grande quantidade de biomassa utilizando práticas que contribuam para uma agricultura de baixo carbono, como plantio direto, adubação verde e potencialização da fixação biológica de N (FBN) (SÁ et al., 2017), tem realçado a importância de se desenvolver tecnologias com inoculação de bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP) (RODRIGUES et al., 2016; MOHAMMADI, 2012). O uso dessas bactérias possibilita ganhos no desenvolvimento da cultura e na produção agrícola e industrial (CHAVES, et al., 2015; GÍRIO et al., 2015; SHULTZ et al., 2012; ANTUNES et al., 2019).

Na literatura, são encontradas evidências de que microrganismos endofíticos realizam fixação biológica de nitrogênio (FBN) em associação com a cana-de-açúcar, mas os resultados são variáveis, sugerindo forte influência de fatores ambientais e/ou do genótipo da planta. Por exemplo, resultados demonstram que algumas variedades cultivadas no Brasil (MARTINS et al., 2020; ANTUNES et al., 2019; BAPTISTA et al., 2014; URQUIAGA et al., 2012) e no Uruguai (TAULÉ et al., 2012) podem obter quantidades consideráveis de N atmosférico, mas para a cana-de-açúcar cultivada em outros países, como na Austrália (BIGGS et al., 2002) e na África do Sul (HOEFSLOOT et al., 2005), não foram encontradas evidências de FBN. Desta forma, ainda não está estabelecido se, e em que extensão, a cana-de-açúcar beneficia-se do N fixado pelos diazotróficos endofíticos ou se os benefícios são devidos a outros mecanismos de promoção de crescimento das plantas (ETESAMI; MAHESHWARI, 2018; OLANREWAJU et al., 2017; SANTOYO et al., 2016). É possível que a produção de ácido indol-3-acético (AIA) e outras substâncias promotoras de crescimento, que provocam alterações morfológicas na raiz

(como o aumento das raízes laterais e dos pelos radiculares), aumentando a absorção de nutrientes (ALVES et al., 2015; BENEDUZI et al., 2013; STEENHOUDT; VANDEREYDEN, 2000; VIDEIRA et al., 2012), seja responsável pelas respostas positivas à inoculação encontrada por alguns autores (YANG et al. 2019; SOUZA et al., 2015; HUNGRIA et al., 2011; SILVA et al., 2004; CAVALLET et al., 2000). Além da produção de fitormônios, BPCPs podem promover o crescimento das plantas e proteger contra doenças e estresses abióticos por meio de mecanismos como FBN, produção de enzimas como ACC deaminase, produção de sideróforos e solubilização de fosfato e potássio (SOUZA et al., 2015).

A contribuição da FBN para a cana-de-açúcar aparenta ser menor que a estimada para as leguminosas, sendo provável que para se alcançar grandes produtividades seja sempre necessária uma complementação com adubação nitrogenada (BAPTISTA et al., 2014). A eficiência de uso de fertilizantes nitrogenados em cana-de-açúcar é muito baixa, raramente ultrapassando 40 % (OTTO et al., 2016). A indução de modificações no sistema radicular da planta por BPCPs pode contribuir para aumentar a absorção do nutriente. A inoculação de BPCPs em cana-de-açúcar pode ser realizada em mudas pré-brotadas (MPB) (GÍRIO et al., 2015) e em cultivos comerciais com a utilização de rebolos e minirrebolos como sementes (CHAVES et al., 2015). O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da inoculação com BPCPs previamente selecionadas sobre o crescimento, produção de biomassa e parâmetros morfoanatômicos de raízes de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Delineamento experimental

Foi conduzido um experimento em casa de vegetação da Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC), no qual as mudas de cana-de-açúcar foram cultivadas em tubetes com capacidade de 280 cm³. Foi utilizado um delineamento experimental em blocos casualizados, com cinco tratamentos e quatro repetições, sendo cada unidade experimental representada por quatro tubetes. Os tratamentos consistiram em inoculações com bactérias endofíticas e dois tratamentos controle sem inoculação, sendo um recebendo nitrogênio mineral e outro não. A variedade utilizada foi a RB92579, a mais plantada no Nordeste do Brasil, e o substrato utilizado para preencher os tubetes foi uma mistura de areia e vermiculita autoclavadas, na proporção de 2:1.

3.2.2 Estirpes utilizadas e preparo do inoculante

Foram utilizadas três estirpes de bactérias endofíticas de cana-de-açúcar, isoladas e caracterizadas por Antunes et al. (2017): IPA CC23 (*Paenibacillus* sp.), IPA CF62 (*Paenibacillus* sp) e IPA CC44 (*Burkholderia* sp.). Estes isolados foram selecionados para o estudo por apresentarem características bioquímicas relacionadas ao potencial de promover crescimento das plantas, como capacidade de FBN (estimada por capacidade de redução de acetileno em meio de cultura), de produção de ácido-indol 3-acético, de solubilização de fosfato, de produção de ACC deaminase, catalase, quitinase e proteinase (ANTUNES et al 2017).

Para o preparo dos inoculantes, as bactérias foram crescidas, em condições monoxênicas, em meio DYGS líquido (RODRIGUES NETO et al., 1986), em agitador rotatório (4 G-Força), por 48 horas a 31°C. Após o crescimento bacteriano, os inoculantes foram submetidos a leitura da densidade ótica para estimar a quantidade de células bacterianas. Todas as estirpes foram diluídas com o próprio meio DYGS para se obter uma concentração de 10^8 células ml^{-1} e armazenadas a 8°C até o procedimento de inoculação dos minirrebolos.

3.2.3 Confeção de MPBs e condução do experimento

Para se obter uma estrutura de multiplicação vegetal da cana-de-açúcar no tamanho considerado de um minirrebolo (3-5 cm) contendo uma gema (ARAMAKI et al., 2010), foi utilizada uma guilhotina com lâminas cortantes espaçadas em 3,7 cm. Este equipamento foi fabricado para esta pesquisa.

Foram utilizadas gemas mais novas, desprezando a base mais lignificada, de plantas coletadas em campo, 10 meses após o plantio. Após o corte, 10 % dos minirrebolos foram separados para determinação de biomassa, diâmetro próximo à gema e diâmetro próximo à estrutura de reserva, para avaliação da uniformidade da estrutura de multiplicação utilizada. Os minirrebolos destinados ao plantio foram acondicionados sob refrigeração (8 °C) por 12 horas.

O plantio dos minirrebolos foi feito em calhas de brotação, utilizando substrato inerte autoclavado (areia e vermiculita na proporção de 2:1). Para cada tratamento, foram utilizadas três calhas com 20 minirrebolos. A inoculação foi realizada utilizando 2 ml do inoculante por minirrebolo. Os tratamentos sem inoculação receberam 2 ml do meio DYGS sem crescimento de bactérias. Após a inoculação, os minirrebolos foram cobertos com substrato e receberam 25

ml de solução nutritiva de Hoagland & Arnon (1950), sendo que apenas nos correspondentes ao controle com N foi aplicada a solução completa, e nos demais a solução sem adição de N. A umidade do substrato foi mantida com adições periódicas de água destilada.

O transplante das mudas para os tubetes foi realizado aos 25 dias após a brotação. Durante a condução do experimento, as mudas foram irrigadas com 25 ml solução nutritiva de Hoagland & Arnon (1950) sem N, a cada 2 dois dias, e água destilada nos intervalos da aplicação da solução. As mudas que receberam o tratamento nitrogenado receberam a solução completa. O experimento foi conduzido por 87 dias.

3.2.4 Parâmetros avaliados

Ao final do experimento, foram determinados a altura da planta (medida da base até a folha + 1), o diâmetro da base das mudas e o comprimento das raízes. Para a determinação da biomassa, as amostras foram secas em estufa de circulação forçada a uma temperatura de 65 °C até atingirem peso constante.

Amostras de raízes frescas das mudas de um dos tubetes de cada parcela experimental foram coletadas a partir de 5 cm da ponta (meristema apical) e fixadas em FAA50 (JOHANSEN, 1940) por 48 h, sendo, em seguida, conservadas em etanol 70%. Para a observação dos parâmetros morfoanatômicos, as amostras conservadas em etanol 70% foram submetidas a série etanol/butanol 50-100%, infiltradas e emblocadas em parafina histológica, e então seccionadas transversal e longitudinalmente com auxílio do micrótomo rotativo (LUPETEC MRP09), calibrado em uma espessura de 12 micrometros. Os cortes obtidos foram desparafinados, corados com azul de Alcina e safranina e montados de modo permanente em bálsamo do Canadá (Kraus & Arduin, 1997).

A partir das lâminas confeccionadas, foram avaliadas alterações em aspectos como: espessura da epiderme, do aerênquima, do córtex, do cilindro vascular, da parede celular, do diâmetro da raiz e de vasos do metaxilema (μm), além de densidade de pelos radiculares e de vasos do metaxilema (n° de células/ mm^2) e comprimento dos pelos radiculares (μm). Imagens dos cortes histológicos foram feitas utilizando câmera CCD Sony acoplada ao microscópio óptico Olympus. As imagens foram analisadas no programa Image Tool (WILCOX et al., 2002).

3.2.5 Análise estatística

Os resultados das avaliações foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e teste de normalidade e homocedasticidade. As médias foram comparadas utilizando o teste de Tukey ($P \leq 0,05$), com o software SAS.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Parâmetros biométricos das MPBs de cana-de-açúcar

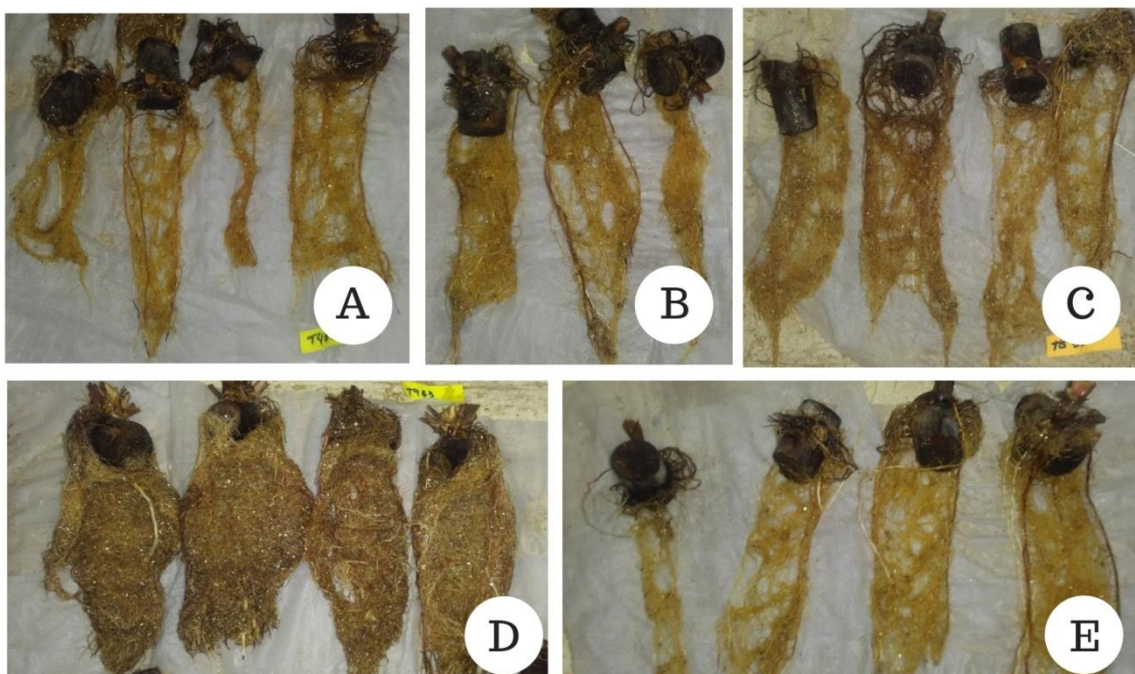
Os parâmetros biométricos das MPBs de cana-de-açúcar, aos 87 dias após o plantio, foram influenciados pelos tratamentos (Tabela 1). As mudas que receberam adubação nitrogenada apresentaram o maior tamanho e acúmulo de biomassa. No entanto, as raízes dessas mudas apresentaram-se encurtadas em relação às das mudas inoculadas com a estirpe IPA CC23. A maior produção de biomassa de raiz das mudas com N foi devida à formação de maior quantidade de raízes secundárias (Figura 1D). É importante observar que a inoculação com as estirpes utilizadas causou efeitos diferenciados na biomassa da parte aérea e raízes das MPBs quando comparadas com as plantas não inoculadas. As mudas inoculadas com as estirpes IPA CF44 e IPA CF62 apresentaram um acréscimo superior a 100% na produção de biomassa de raízes em relação ao tratamento controle absoluto. Essa maior produção de raízes foi acompanhada de maior produção de biomassa aérea nas mudas inoculadas com a estirpe IPA CF62, que foi significativamente diferente do controle absoluto, embora menor que a do controle com N (Tabela 1).

Tabela 1: Biometria da parte aérea e da raiz de mudas pré-brotadas da variedade RB92579 em relação à inoculação de bactérias promotoras de crescimento e controles nitrogenados e não nitrogenados, aos 87 DAP sob cultivo em substrato inerte.

Tratamento	Comprimento raiz (cm)	Biomassa raiz g/planta	Altura planta (cm)	Biomassa aérea g/planta
IPA CC23	16,89 a	0,64 c	6,38 c	0,6 bc
IPA CF44	16,05 ab	1,10 b	7,26 bc	0,66 bc
IPA CF62	16,28 ab	1,05 b	7,98 b	0,81 b
Com N	14,32 b	3,39 a	10,57 a	3,44 a
Sem N	15,98 ab	0,51 c	6,02 c	0,55 c
	F	F	F	F
Tratamento	3,69**	35,44***	29,31***	97,89***
CV	1,26	4,67	1,67	2,91

Médias seguidas de mesma letra minúsculas na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade. Os dados foram submetidos a transformação utilizando a potência de 0,2.

Figura 1. Quantidade de biomassa de raízes no tratamento controle nitrogenado: (A) tratamento IPACC23; (B) tratamento IPACC44; (C) tratamento IPACF62; (D) tratamento sem inoculação com N; (E) tratamento sem inoculação e sem nitrogênio.



O alongamento das raízes das mudas inoculadas e das não inoculadas sem receber N pode estar relacionado com a baixa nutrição nitrogenada na planta. Em contrapartida, a concentração de N no substrato provoca o acúmulo de biomassa das raízes, evitando seu

alongamento (DREW, 1975; OTTO et al., 2009a). Por outro lado, o uso de bactérias potencialmente promotoras de crescimento em plantas, também podem estimular o desenvolvimento das raízes por mecanismos de produção de hormônios, aprimorando a absorção de nutrientes e água pelas plantas e conseqüentemente aumentará a produção de biomassa total (SANTOS et al., 2018; GÍRIO et al., 2015).

Gírio et al. (2015) utilizando BPCP em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar observou contribuição no aumento da aceleração da germinação, como também na produção de biomassa da raiz e da parte aérea ao ser submetida a inoculação com BPCP. Este efeito na promoção de crescimento relacionado a produção de biomassa também foi observado por Chaves et al. (2015) sob cultivo de cana-de-açúcar em campo.

3.3.2 Análises morfoanatômicas das raízes

Os parâmetros morfoanatômicos das raízes das MPBs (diâmetro da raiz, diâmetro dos vasos, densidade dos pelos radiculares e de vasos) também foram influenciados (vago; colocar diretamente o resultado) pela inoculação com as BPCPs e pela nutrição nitrogenada (Tabela 2). As mudas MPBs que receberam solução nutritiva com N mineral apresentaram raízes com maiores diâmetros, com vasos de maiores diâmetros e densidade maior densidade de pelos (Tabela 2, Figura 2).

A inoculação das MPBs com qualquer das estirpes condicionou raízes mais finas e com vasos de menor diâmetro, mesmo em comparação com as raízes das mudas do tratamento controle absoluto (Tabela 2, Figura 2). No tratamento que recebeu inoculação com a estirpe IPA CC23 não foi possível observar pelos radiculares, o que pode estar relacionado com a posição dos pelos radiculares mais acima do ponto em que foi realizado o corte. As BCPs inoculadas com esta estirpe também apresentaram menor altura e biomassa de raiz que as inoculadas com as outras duas estirpes (Tabela 1). É importante observar que as inoculações com as estirpes IPA-CF62 e IPA-CF44 resultaram em mudas com maiores densidades de pelos e vasos que as mudas não inoculadas e não fertilizadas com N mineral.

O efeito da inoculação de BPCP sobre a densidade de pelos radiculares pode estar relacionado com a capacidade de produção de hormônios de promoção de crescimento. Em condições *in vitro*, as estirpes IPA-CF62 e IPA-CF44 são capazes de produzir 0,40 e 3,08 mg de AIA L⁻¹, respectivamente (Antunes, 2016). O ácido indol-acético (AIA) é um hormônio vegetal que está ligado ao crescimento e desenvolvimento das plantas e que desempenha um

papel na divisão e alongamento celular e no desenvolvimento de raízes, folhas e flores (MCSTEEN, 2010; MALHOTA; SRIVASTANA, 2008).

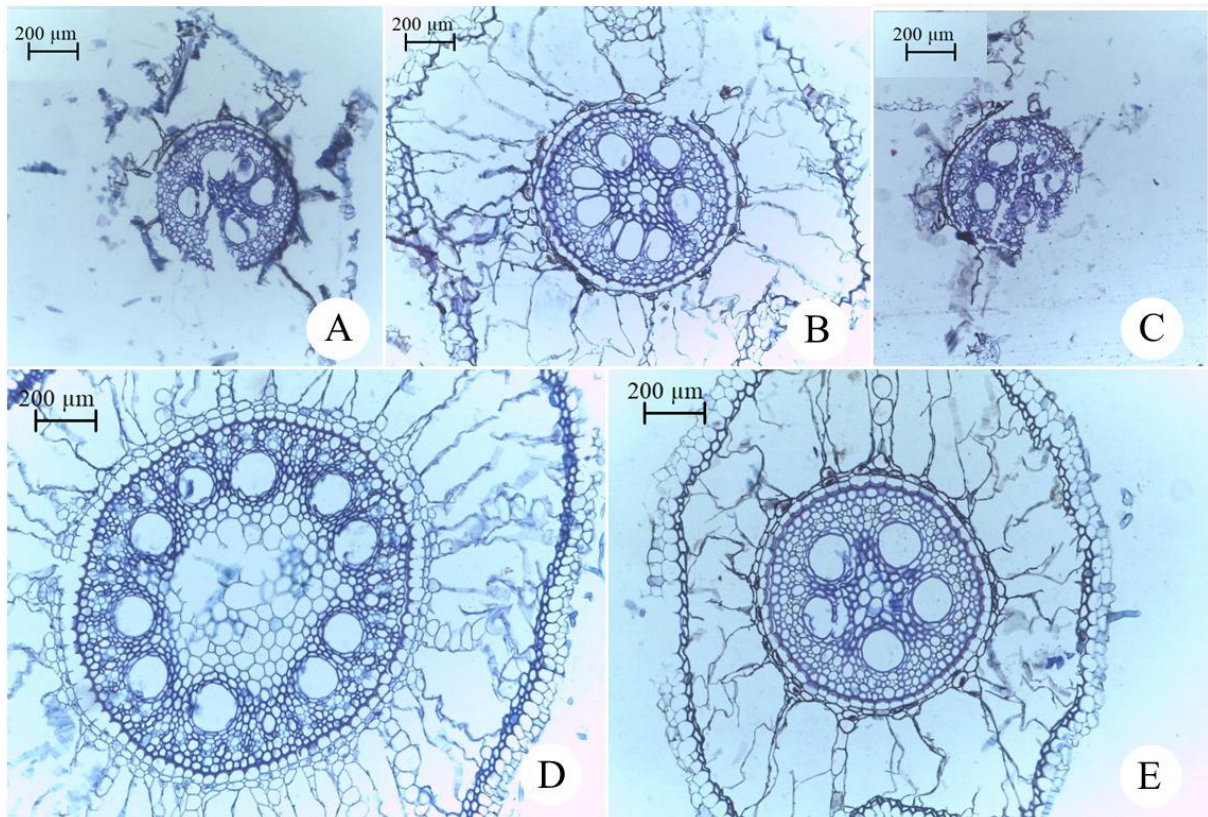
Tabela 2. Medidas histológicas de cortes transversais das raízes de MPB de cana-de-açúcar submetidas a diferentes inoculantes e com e sem nitrogênio.

Tratamentos	Diâmetro da raiz	Diâmetro dos vasos	Densidades dos pelos	Densidade dos vasos
	-----µm-----	-----µm-----	-----n° de células/ mm ² -----	-----n° de células/ mm ² -----
IPA CC23	1317,7 d	112,9 c	0 c	3,9 d
IPA CF44	1575,5 c	132,8 b	4,8 a	7,9 b
IPA CF62	872,0 e	87,9 d	5,1 a	7,4 b
Com N	2154,5 a	140,4 a	4,0 ab	15,9 a
Sem N	1763,2 b	144,4 a	3,0 b	5,3 c
Teste F	582,62***	479,05***	20,93***	331,16***
CV	4,09	2,73	27,51	10,33

Médias seguidas de mesma letra minúsculas na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade. Os dados foram submetidos a retirada de outliers para se enquadrar nas premissas da ANOVA.

As modificações nas características morfoanatômicas das plantas podem estar relacionadas com diferentes fatores bióticos e abióticos (YANG et al., 2019). Quando se trata de influências na capacidade de transportar seivas brutas e elaboradas na planta, a densidade de vasos condutores é de suma importância, sendo o hormônio vegetal AIA um dos potenciais contribuintes para este efeito, visto que o hormônio pode aumentar a espessura da parede secundária, promover o desenvolvimento de vasos condutores e aumentar o tamanho das células do xilema (UGGLA et al., 1996). Com isto, o aumento da densidade dos vasos promovido pelas estirpes IPA CF62 e IPA CF44 deve estar relacionado com sua capacidade de promoção de crescimento em plantas por via da produção do AIA.

Figura 2: Cortes transversais de raízes de cana dos diferentes tratamentos: (A) tratamento IPACC23; (B) tratamento IPACC44; (C) tratamento IPACF62; (D) tratamento sem inoculação + N; (E) tratamento sem inoculação e sem nitrogênio.



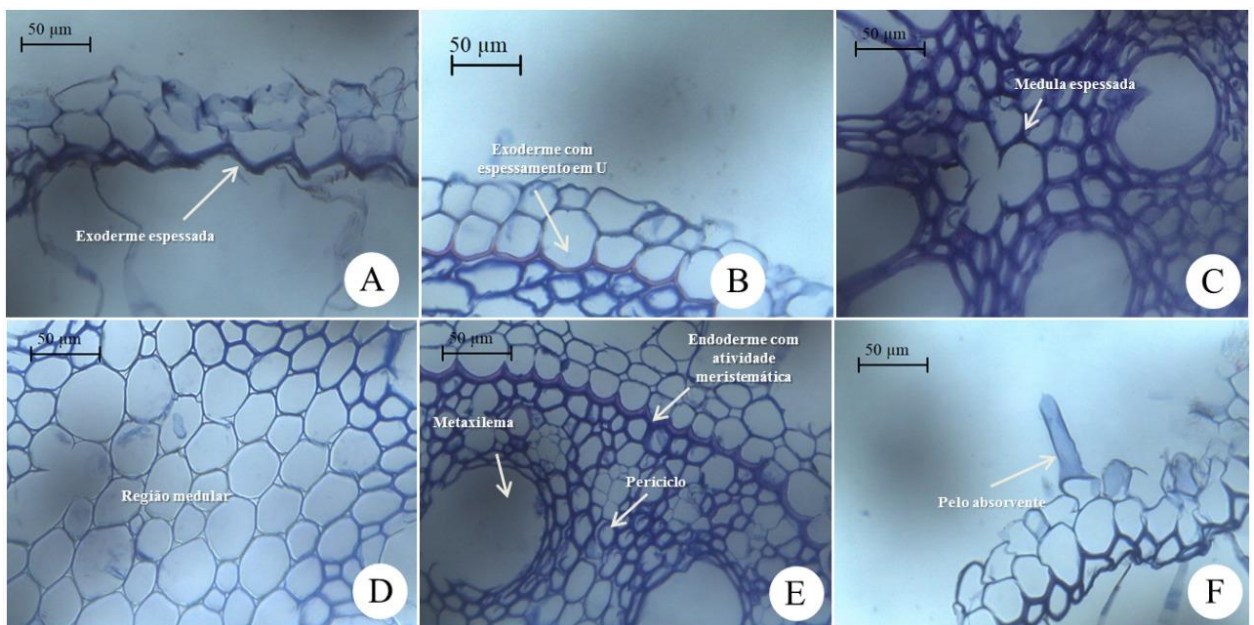
Em todos os tratamentos, as raízes apresentaram epiderme unisseriada, seguida da exoderme. Internamente a esta, notou-se a região cortical contendo aerênquima bastante desenvolvido, e a camada mais interna representada pela endoderme apresentando espessamento em U (Figura 3B). Adjacente a esta, encontram-se 1-2 camadas resultantes da atividade meristemática da endoderme. A infecção foi verificada na região cortical; no entanto, nos tratamentos IPACC23, IPACC44 e IPACF62, esta infecção encontra-se apenas na endoderme (Figura 2B).

No tratamento nitrogenado, além de mais numerosos, os elementos de metaxilema apresentaram maiores cavidades. Já nos tratamentos infectados, o IPACC44 apresentou menor cavidade. Em todos os tratamentos, não houve variação significativa entre o número de camadas de células do periciclo e da epiderme, apresentando de 1 a 2 camadas no periciclo com parede espessada, tendo apenas o tratamento nitrogenado apresentado até 3 camadas e 1 camada na epiderme.

Quanto à exoderme, os tratamentos não diferiram em relação ao número de camadas de células, possuindo 1 camada de células espessadas. O tratamento IPA-CC44 apresentou

espessamento na periclinal interna, e o tratamento nitrogenado apresentou formatos variados de células (Figura 3 A, B, E, F). Já em relação ao aerênquima, no tratamento IPA-CC23 observaram-se 10 camadas de células, com estrutura semelhante nos demais tratamentos. No entanto, no tratamento IPA-CC44 havia cavidades mais amplas e no tratamento nitrogenado células diferenciadas, com aerênquima mais externo. O tratamento controle sem inoculação e sem nitrogênio apresentou o aerênquima cortical diferenciado.

Figura 3: Cortes transversais e longitudinais das raízes dos diferentes tratamentos com detalhes histológicos das estruturas. (A) exoderme espessada, (B) exoderme com formato U, (C) medula espessada, (D) região medular, (E) metaxilemas, (F) pelos radiculares.



Nos tratamentos que receberam as bactérias, não houve avanço da infecção para a região cortical da raiz. Os tratamentos IPA-CC23, IPACC44, IPACF62 apresentaram a parede celular medular espessada, o tratamento sem inoculação e sem nitrogênio apresentou região medular reduzida e células com pouca diferenciação (Figura 3 C), já no tratamento que recebeu nitrogênio, o parênquima medular estava mais desenvolvido, com células de cavidades mais amplas e parede menos lignificada que nos demais tratamentos (Figura 3 D), o que pode trazer menor resistência das raízes após o transplantes das mudas para o campo.

A baixa produção de biomassa da parte aérea da estirpe IPA-CC23 pode estar relacionada com a pouca existência de pelos radiculares e das características morfoanatômicas das raízes. No tratamento nitrogenado o diâmetro do córtex era maior (Tabela 3). O menor

diâmetro do córtex pode estar relacionado com estresses abióticos na planta (YANG et al., 2019; POTOCKA; SZYMANOWSKA-PULKA, 2018).

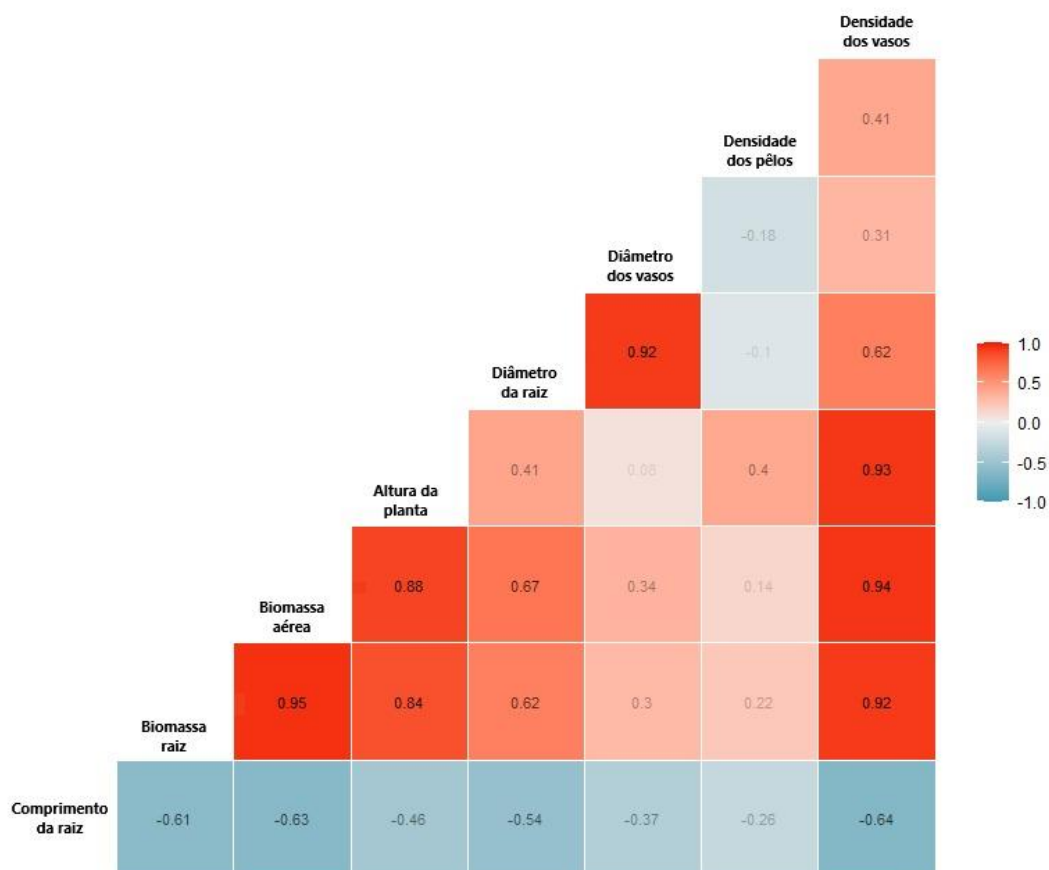
Com os dados morfoanatômicos correlacionados com a biometria das mudas pré-brotadas foi possível observar o parâmetro que mais se correlacionou com as medidas biométricas (Tabela 3). A densidade de vasos foi responsável pela maior produção de biomassa, com correlação superior a 90% (figura 4). Quanto maior os números de vasos condutores, maior é a translocação de seivas para a parte aérea da planta e, conseqüentemente, maior a assimilação dos nutrientes e maior a produção de biomassa.

Tabela 3. Medidas histológicas de córtex e pelos radiculares de raízes de cana-de-açúcar submetidas à diferentes inoculações de bactérias promotoras de crescimento.

Tratamento	Espessura do Córtex	Comprimento dos pêlos radiculares
	(μm)	(μm)
IPA CC23	39,63 b	-
IPA CF44	43,77 b	15,76 a
IPA CF62	36,28 b	9,8 a
Controle N	69,7 a	27,73 a
Controle sem N	45,67 b	10,57 a
	F	F
Tratamento	18,21***	11,32***
CV	10,11	26,00

Médias seguidas de mesma letra minúsculas na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

Figura 4. Correlação de Pearson dos dados biométricos e histológicos das raízes de mudas pré-brotadas submetidas a diferentes inoculantes com BPCP.



3.3.3 Teor e acúmulo de N na parte aérea das MBP

Os teores de N na parte aérea e na raiz das MPBs com N mineral foram maiores que os dos demais tratamentos, que não diferiram entre si (Figura 5). Conseqüentemente, as mudas que receberam este tratamento também apresentaram maior acúmulo de N, com uma média de 90 mg planta⁻¹ (Figura 6). Os tratamentos com os inoculantes e a testemunha absoluta não ultrapassaram 7 mg planta⁻¹.

O acúmulo médio do N nos minirrebolos foi de 23,99 mg de N, sendo que todos os tratamentos, exceto o controle nitrogenado, tiveram acúmulos inferiores aos da reserva da semente, mostrando pouca ou nenhuma ocorrência de aporte de N às plantas pelo processo de fixação biológica. Desta forma, fica evidente que os efeitos observados nas MPBs inoculadas estão relacionados com outros mecanismos de promoção de crescimento (SOUZA et al., 2015; ETESAMI & MAHESHWARI, 2018; OLANREWAJU et al., 2017; SANTOYO et al., 2016).

De fato, as estirpes utilizadas possuem atividade de produção de enzimas, como ACC deaminase, de sideróforos e de fitormônios, além de atividade de solubilização de fosfato e potássio (ANTUNES et al., 2017).

Figura 5. Teor (g kg^{-1}) de N na parte aérea e raiz de mudas pré-brotada de cana-de-açúcar.

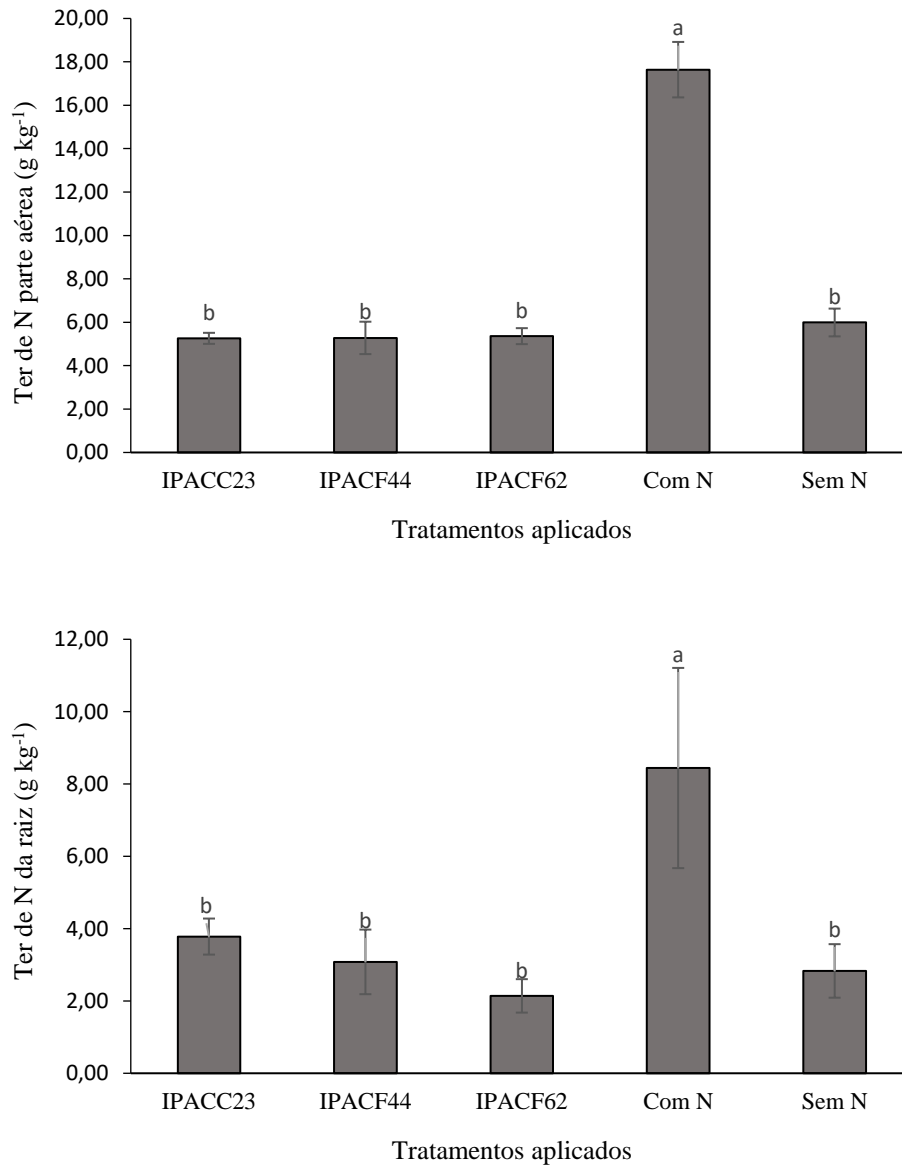
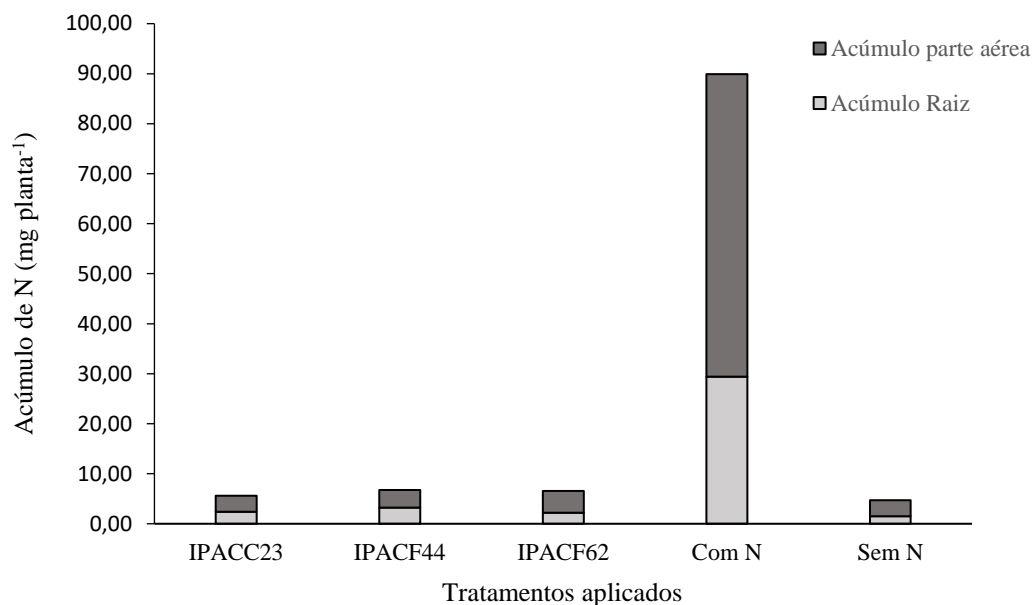


Figura 6. Acúmulo de N na parte aérea e raiz de mudas pré-brotada de cana-de-açúcar.

3.4 CONCLUSÃO

A inoculação de bactérias promotoras de crescimento em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar aumentou a densidade de vasos e pelos nas raízes que proporcionou que uma produção de biomassa aérea e das raízes em relação a tratamento controle absoluto. Embora a nutrição com N mineral tenha resultado em melhores parâmetros biométricos das mudas, a inoculação com a estirpe IPA CF62 (*Paenibacillus* sp.) garantiu benefícios biométricos (biomassa aérea e das raízes) em relação ao cultivo das mudas sem oferta de N (tratamento controle) e pode ser considerada para a utilização de inoculantes, após testagem das suas contribuições em campo.

3.5 REFERÊNCIAS

ANTUNES, J.E.L.; LYRA, M.C.C.P; OLLERO, F.J.; FREITAS, A.D.S.; OLIVEIRA, L.M.S.; ARAÚJO, A.S.F.; FIGUEIREDO, M.V.B. Diversity of plant growth-promoting bacteria associated with sugarcane. **Genetics and Molecular Research**, v. 16, n. 2, p. 1-10, 2017. <https://doi.org/doi10.4238/gmr16029662>

ANTUNES, J.E.L. **Bactérias diazotróficas endofíticas em cana de açúcar: estratégia para uma agricultura sustentável**. Recife: UFRPE, 2016. p. 154. Tese (Doutorado)- Universidade Federal Rural de Pernambuco.

BAPTISTA, R.B.; MORAIS, R.F.; LEITE, J.M.; SCHULTZ, N.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. Variations in the ^{15}N natural abundance of plant-available N with soil depth: their influence on estimates of contributions of biological N_2 fixation to sugar cane. **Applied Soil Ecology**, v.73, p. 124-129, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.08.008>

CANTARELLA, H. **Nitrogênio**. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). Fertilidade do solo. Viçosa: SBCS, p. 375-470, 2007.

CAVALLET, L.E.; PESSOA, A.C.S.; HELMICH, J.J.; HELMICH, P.R. Produtividade do milho em resposta à aplicação de nitrogênio e inoculação das sementes com *Azospirillum* spp. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, p. 129- 132, 2000. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000100024>

CHAVES, V.A.; SANTOS, S.G.; SCHULTZ, N.; PEREIRA, W.; SOUSA, J.S.; MONTEIRA, R.C.; REIS, V.M. Desenvolvimento inicial de duas variedades de cana-de-açúcar inoculadas com bactérias diazotróficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1595-1602, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20151144>

DREW, M.C. Comparison of the effects of a localized supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on the growth of the seminal root system, and the shoot, in barley. **New Phytologist**, v. 75, p. 479-490, 1975. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1975.tb01409.x>

ETESAMI, H.; MAHESHWARI, D.K. Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and future prospects. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 156, p. 225-246, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.013>

GARIBALDI, L.A.; GEMMILL-HERREN, B.; D'ANNOLFO, R.; GRAEUB, B.E.; CUNNIGHAM, S.A.; BREEZE, T.D. Farming Approaches for Greater Biodiversity, Livelihoods, and Food Security. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 32, n. 1, p. 68-80, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.10.001>

GÍRIO, L.A.S.; DIAS, F.L.F.; REIS, V.M.; URQUIAGA, S.; SHULTZ, N.; BOLONHEZI, D.; MUTTON, M.A. Bactérias promotoras de crescimento e adubação nitrogenada no crescimento inicial de cana-de-açúcar proveniente de mudas pré-brotadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 1, p. 33-43, 2015. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000100004>

HOAGLAND, D.R.; ARNON, D.I. **The water culture method for growing plants without soils**. Berkeley: California Agricultural Experimental Station, 1950. p. 347.

HUNGRIA M. Inoculação com *Azospirillum* brasilense: inovação em rendimento a baixo custo. Londrina: **Embrapa Soja**: ISSN 1516-781X; 325, p. 36, 2011.

KRAUS JE; ARDUIN M. **Manual básico de métodos em morfologia vegetal**. (EDUR: Rio de Janeiro, Seropédica) p. 198, 1997.

LEGHARI, S.J.; WAHOCHO, A.; LAGHARI, G.M.; LAGHARI, A.H.; MUSTAFABHABHAN, G.; TALPUR, K.H.; BHUTTO, T.A.; WAHOCHO, S.A.; LASHARI, A.A. Role of nitrogen for plant growth and development: A review. **Advances in**

Environmental Biology, v. 10, p. 209-218, 2016.
<https://www.researchgate.net/publication/309704090>

MALHOTA, M.; SRIVASTANA, S. An ipdC gene knock-out of *Azospirillum brasilense* strain SM and its implications on indole-3-acetic acid biosynthesis and plant growth promotion. **Antonie van Leeuwenhoek**, v.93, p.425-433, 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2008.05.006>

MCSTEEN, P. Auxin and monocot development. **Cold Spring Harbor perspectives in biology**, v. 2, n. 3, p. 1-18, 2010. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a001479>

MOHAMMADI, K. Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop production. **Resources and Environment**, v. 2, n. 1, p. 80-85, 2012.

OLANREWAJU, O.S.; GLICK, B.R.; BABALOLA, O.O. Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. **World Journal Microbiology Biotechnology**, v. 33, n. 197, p. 1-16, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2364-9>

OTTO, R.; TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C. Root system distribution of sugar cane as related to nitrogen fertilization evaluated by two methods: monolith and probes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 601-611, 2009a. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000300013>

OTTO, R.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O. Fitomassa de raízes e da parte aérea da cana-de-açúcar relacionada à adubação nitrogenada de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 4, p. 398-405, 2009b. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000400010>

OTTO, R.; FREITAS Jr., J. C. M.; ZAVASCHI, E.; FARIA, I. K. P.; PAIVA, L. A.; BAZANI, J. H.; MIRA, A. B.; & KAMOGAWA, M. Y. Combined Application of Concentrated inasse and Nitrogen Fertilizers in Sugarcane: Strategies to Reduce Ammonia Volatilization Losses. **Sugar Tech**, v. 19, p. 248-257, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12355-016-0463-9>

POTOCKA, I.; SZYMANOWSKA-PULKA, J. Morphological responses of plant roots to mechanical stress. **Annals of Botany**, v. 122, p. 711-723, 2018. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy010>

RODRIGUES, A.A.; FORZANI, M.V.; SOARES, R.S.; SIBOV, S.T.; VIEIRA, J.D.G. Isolation and selection of plant growth-promoting bacteria associated with sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 46, n.2, p.149-158, 2016. <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4639526>

RODRIGUES NETO, J.; MALAVOLTA JÚNIOR, V. A.; VICTOR, O. Meio simples para o isolamento e cultivo de *Xanthomonas campestris* pv. citri tipo B. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 12, n. 1-2, p. 16, 1986.

SÁ, J.C.M.; LAL, R.; CERRI, C.C.; LORENZ, K.; HUNGRIA, M.; CARVALHO, P.C.F. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, v. 98, p. 102-112, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.020>

SANTOS, S.G.; CHAVES, V.A.; RIBEIRO, F.S.; ALVES, G.C.; REIS, V.M. Rooting and growth of pre-germinated sugarcane seedlings inoculated with diazotrophic bacteria. **Applied Soil Ecology**, v. 133, p. 12-23, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.08.015>

SANTOYO, G.; MORENO-HAGELSIEB, G.; OROZCO-MOSQUEDA, M.D.C.; GLICK, B.R. Plant growth-promoting bacterial endophytes. **Microbiological Research**, v. 183, p. 92-99, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.008>

SHULTZ, N.; SILVA, J.A.; SOUSA, J.S.; MONTEIRO, R.C.; OLIVEIRA, R.P.; CHAVES, V.A.; PEREIRA, W.; SILVA, M.F.S.; BALDANI, J.I.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; XAVIER, R.P.; MORAIS, R.F.; BATISTA, R.B.; SHULTZ, N.; LEITE, J.M.; SÁ, J.M.; BARBOSA, K.P.; RESENDE, A.S.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M. Evidence from field nitrogen balance and ^{15}N natural abundance data for the contribution of biological N_2 fixation to Brazilian sugarcane varieties. **Plant Soil**, v. 356, p. 5-21, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1016-3>

SOUZA, R.; AMBROSINI, A.; PASSAGLIA, L.M.P. Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. **Genetics and Molecular Biology**, v. 38, n. 4, p. 401-419, 2015. <https://doi.org/10.1590/S1415-475738420150053>

SILVA, A.P.; ARRUDA T.F.; BACH E.E. Ação do Azopirillum brasiliense nodesenvolvimento das plantas de trigo (variedade IAC-24) e cevada (variedade CEV 95033). **Conscientiae Saúde, São Paulo**, v. 3, p. 29-35, 2004.

UGGLA, C.; MORITZ, T.; SANDBERG, G.; SUNDBERG, B. Auxin as a positional signal in pattern formation in plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 93, n. 17, p. 9282-9286, 1996. <https://doi.org/10.1073/pnas.93.17.9282>

YANG, Y.; GAO, S.; JIANG, Y.; LIN, Z.; LUO, J.; LI, M.; GUO, J.; SU, Y.; XU, L.; QUE, Y. The physiological and agronomic responses to nitrogen dosage in different sugarcane varieties. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 1-18, 2019. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00406>

ZHANG, N.; ZHAO, F.; COLLATZ, G.J.; KALNAY, E.; SALAWITCH, R.J.; WEST, T.O.; GUANTER, L. Agricultural green revolution as a driver of increasing atmospheric CO_2 seasonal amplitude. **Nature**, v. 515, p. 394-409, 2014. <<https://doi.org/10.1038/nature13893>>

WILCOX, D.B., DOVE, D., MCDAVID, D.G. **Image Tool**. Texas: University of Texas Health Science Center, 2002.

4 Capítulo 2: FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE N E PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA DE LEGUMINOSAS DE GRÃOS CULTIVADAS EM CONSÓRCIOS COM CANA-DE-AÇÚCAR

4 Produtividade, aportes de N e de renda por leguminosas de grãos cultivadas nas entrelinhas de cana-de-açúcar

RESUMO

O uso de leguminosas de grãos para aporte de N, como fonte de matéria orgânica, e como fonte de renda complementar em cultivos consorciados com cana-de-açúcar é uma tecnologia que pode contribuir para uma agricultura de baixo carbono. O objetivo deste trabalho é a avaliar a fixação biológica de N, a produtividade agrícola e os retornos econômicos do cultivo de leguminosas de grãos em consórcio com a cultura da cana-de-açúcar (*Sacharum spp*) (Repete a primeira frase. Uma das duas deveria ser excluída ou modificada). Foram realizados dois experimentos com arranjo fatorial, utilizando delineamento em blocos casualizados. Os tratamentos corresponderam ao consórcio da cana-de-açúcar com diferentes espécies de leguminosas produtoras de grãos (feijão-caupi e amendoim em ambos os experimentos, e soja, que foi cultivada em apenas um dos experimentos) e a diferentes fontes de N para a cultura da cana-de-açúcar (inoculação com a estirpe de bactéria diazotrófica IPA CF62, inoculação com o mix de bactérias diazotróficas da Embrapa e fertilizante mineral). Foram incluídos tratamentos controle sem leguminosas consorciadas (cultivo solteiro) e controle sem aplicação de N na cana-de-açúcar. Foram realizadas avaliações da simbiose das leguminosas (nodulação natural e quantidade de N fixado), da produção de grãos, do balanço de N e do rendimento econômico das leguminosas, nos diferentes sistemas. Todas as leguminosas nodularam, com parâmetros que variaram de acordo com as mesmas, mas sem efeitos dos tratamentos relacionados com a fonte de N na cana-de-açúcar (frase vaga). Em ambos os experimentos, o amendoim nodulou mais (média de 61 nódulos planta⁻¹), mas com nódulos menores (média de 2,85 mg nódulo⁻¹), que o feijão e a soja. O feijão-caupi teve a maior produtividade agrícola (acima de 2,5 t ha⁻¹ de grãos), em ambos os experimentos, o maior retorno econômico (R\$ 19 mil ha⁻¹) e a maior FBN, com 57% de seu nitrogênio derivado do ar, correspondendo a 83 kg ha⁻¹. O retorno foi maior no experimento da Usina Miriri. Estatística multivariada mostrou que a massa seca específica dos nódulos possui alta relação com a produção de biomassa das plantas e a eficiência da FBN com a produtividade dos grãos. Fica evidente o potencial da consorciação da cana-de-açúcar com leguminosas de grãos, em especial ao feijão-caupi, podendo representar um sistema de cultivo mais sustentável para as condições do Nordeste do Brasil.

Palavras-chaves: *Arachis hypogaea*, *Vigna unguiculata*, *Glycine max*, abundância natural do ¹⁵N, retorno econômico.

4 Productivity, N inputs and income from grain legumes grown between sugarcane rows

ABSTRACT

The use of grain legumes to supply N, as a source of organic matter, to increase nutrient cycling and as a source of complementary income in intercropping sugarcane crops is of great importance for low-carbon agriculture. This technology can provide economic returns and the acquisition of a more sustainable model in systems with the use of grain legumes in intercropping with commercial crops. In this sense, the objective of this work is to evaluate the biological fixation of N, the agricultural productivity and the economic returns of the cultivation of grain legumes intercropped with the sugarcane (*Sacharum spp*) crop. Two experiments were carried out in a randomized block design with a factorial arrangement. The treatments corresponded to intercropping sugarcane with different species of grain-producing legumes (cowpea and peanuts in both experiments, and also soybeans, in only one of the experiments) and to different N sources for the crop. Sugarcane (inoculation with the diazotrophic bacteria strain IPA CF62, inoculation with Embrapa's mix of diazotrophic bacteria and mineral fertilizer). Control treatments without intercropped legumes (single cultivation) and control without N source application in the sugarcane furrow were included. Evaluations of legume symbiosis (natural nodulation and fixed N amount), grain production, N balance and economic yield of legumes were carried out in the different systems. Legume nodulation was present in all species, with parameters that varied according to them, but without treatment effects related to the N source in sugarcane. In both experiments the peanut crop had a higher nodule with an average of 61 plant⁻¹ nodules, however it had smaller nodules, with an average of 2,85 mg nodule⁻¹. The cowpea crop showed a greater contribution of FBN with nitrogen derived from air around 57% which corresponded to a fixed N of 83,38 kg ha⁻¹. The highest agricultural productivity among legumes was observed in cowpea with an average above 2,5 t ha⁻¹ of grains, in both experiments. The greatest economic return was observed for the cowpea, with an average of 18,998.81 R\$, with the greatest return being observed in the Usina Miriri experiment. Multivariate statistics showed that the specific dry mass of nodules has a high relationship with the production of plant biomass, as well as the efficiency of FBN in relation to grain yield. With this, it is evident the importance of using grain legumes, especially cowpea, for crops intercropped with sugarcane, making a more sustainable crop for the crop in the Northeast.

Keywords: *Arachis hypogaea*, *Vigna unguiculata*, *Glycine max*, natural ¹⁵N abundance, economic return.

4.1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das melhores opções dentre as fontes de energia renováveis atuais, com grande importância no cenário agrícola brasileiro e um futuro promissor no cenário mundial, por possuir um elevado potencial para a produção de biomassa e adaptabilidade a diversas condições edafoclimáticas (ZAMBROSI et al., 2015). O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e possui uma ampla distribuição da produção no seu território. Entre os nutrientes mais exigidos pela cana-de-açúcar, o nitrogênio (N) destaca-se pela importância na nutrição e fisiologia da planta. Fertilizantes nitrogenados, dependentes de energia fóssil para sua produção, são caros e seu uso indiscriminado pode trazer prejuízos econômicos e ambientais (ZHANG et al., 2014; HEIL et al., 2015; CARLSON et al., 2016), o que tem levado à busca de alternativas mais sustentáveis.

Um aspecto interessante do cultivo de cana no Brasil é que, em comparação com o cultivo em outros países, a utilização de fertilizantes nitrogenados é baixa e as respostas à fertilização são erráticas, incomuns na cana-planta e mais efetiva nas socas, mas as produtividades são semelhantes (ROBINSON et al., 2011; AZEREDO et al., 1986; FORTES et al., 2013).

O consórcio da cana-de-açúcar com leguminosas vem se estabelecendo em diversas regiões do Brasil, embora ainda não seja uma prática de uso generalizado. Um exemplo de tecnologia bastante difundida é o sistema MEIOSI (Método Interrotacional Ocorrendo Simultaneamente), que corresponde ao plantio de duas linhas de cana-de-açúcar intercaladas por oito linhas de leguminosas, com fins de produção de grãos ou para utilização como adubo verde (BARCELOS, 1984). Esse sistema é utilizado principalmente para produção de cana-semente, promovendo redução nos custos de cortes e transporte e uma diminuição nos impactos ambientais decorrentes da queima de combustíveis fósseis e do excesso de insumos agrícolas.

Leguminosas de grãos exercem papel importante na alimentação humana e animal, como também na economia do país. O cultivo de leguminosas de grãos, em consórcio ou em rotação com outras culturas comerciais, garante aportes extras de N e C ao agroecossistema (COUËDEL et al., 2018; SORATTO et al., 2012; ZOTARELLI et al., 2012), uma melhor ciclagem de nutrientes (HE et al., 2018) e uma fonte de renda suplementar para o agricultor, sendo uma prática de grande importância para a manutenção da agricultura considerada de baixo carbono (THOMAZINI et al., 2015; SÁ et al., 2017).

A capacidade de fixar nitrogênio atmosférico através de associações com micro-organismos diazotróficos é o atributo das leguminosas que assegura a entrada de N ao sistema, o que garante um

aporte de N para as culturas em consórcio ou subsequentes (COUËDEL et al., 2018; SORATTO et al., 2012; ZOTARELLI et al., 2012). O N fixado simbioticamente pode ser disponibilizado para as culturas principais por meio da decomposição dos restos culturais das leguminosas, pela decomposição de nódulos e raízes, pela exsudação de compostos pelas raízes e por meio da rede de micorrizas (IBRAIM, 2021).

A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp., família Poaceae), que tem um papel de grande importância na economia de diversos países, sendo de maior destaque nas economias da América Latina e do Caribe (CONAB, 2019), pode ser favorecida pelo cultivo de leguminosas em consórcio ou rotação (HE et al., 2018). Culturas como amendoim, soja e feijão-caupi, que são consideradas leguminosas de grãos, podem trazer retornos econômicos e aumentar a disponibilidade de nutrientes. Dentre essas leguminosas, no Brasil, o amendoim é o mais estudado, com registro de fixação entre 21 e 24 kg de N ha⁻¹ (CADISCH; HAIRIAH; GILLER, 2000). Mas essa quantidade é muito variável de acordo com diversos fatores bióticos e abióticos, que vão desde as condições edafoclimáticas às práticas de manejo e aos genótipos do macro e do microsimbionte. Além de aportar N, o amendoim, em consórcio com a cultura da cana-de-açúcar, pode favorecer as características químicas do solo, como também aumentar a diversidade de microrganismo capazes de fixar N no solo, em relação ao cultivo solteiro da cana. (SOLANKI et al., 2017).

Experiências de consórcio de cana-de-açúcar com outras leguminosas de grãos são escassas na literatura. Porém, tanto a soja quanto o feijão-caupi são culturas de grande importância econômica para o Brasil. Para ambas as culturas, a FBN é fundamental na nutrição nitrogenada, representando contribuições consideráveis no estoque de N na biomassa das plantas. A soja, que deve ser cultivada sem suplementação de fertilizantes nitrogenados, pode aportar 250 kg de N ha⁻¹ e a exportação de N pelos grãos é da ordem de 155,25 kg de N ha⁻¹, podendo atingir valores superiores a 200 kg de N ha⁻¹ quando inoculada (HUNGRIA et al., 2015). O feijão-caupi é considerado a leguminosa mais consumida pelos brasileiros (CONAB, 2021; COPERAGUAS, 2015), e também pode ser usada em consórcios com diferentes culturas (CASTRO et al., 2017; MARINHO et al., 2017).

No caso de diminuição da necessidade de aplicação de fertilizantes nitrogenados em cultivos de cana-de-açúcar por conta do consórcio de leguminosas de grãos, existe a possibilidade de incremento da renda do agricultor, ainda mais se for considerada a comercialização dos grãos. Na Índia, por exemplo, a consorciação de leguminosas com cana-de-açúcar pode garantir um ganho econômico de US\$ 1.674,00 ha⁻¹, comparado com o cultivo da cana solteira. Desta forma, o objetivo desta pesquisa foi estimar a produtividade, os aportes

de biomassa e a eficiência do processo de fixação biológica de N de três espécies de leguminosas produtoras de grãos em consórcio com a cultura da cana-de-açúcar. Também foram avaliados os balanços de N e o retorno econômico pela venda dos grãos, em comparação com o sistema de cultivo da cana-de-açúcar solteira.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Descrição e caracterização das áreas experimentais

Foram conduzidos dois experimentos em campo, sendo um na Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC), localizada no município de Carpina, PE, e o outro na Usina Miriri Alimentos e Bioenergia, localizada no município de Rio Tinto, PB. O município de Carpina está localizado na região da Mata Norte de Pernambuco, com altitude de 180 m e com coordenadas geográficas de 7° 51' 04'' S e 35° 14' 27'' W. O clima de Carpina, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo "As", tropical chuvoso com estação seca de verão, temperatura média de 24,2 °C (BELTRÃO et al., 2005) e precipitação média anual de 1.400 mm (CPRM, 2005). O município de Rio Tinto está localizado na região do Litoral Norte da Paraíba. O clima, de acordo com a classificação de Köppen, também é do tipo "As", mas a temperatura média é de 26 °C e a precipitação média anual é de 1500 mm (Alvares et al., 2013).

A precipitação total ocorrida durante a condução do experimento em Carpina foi de 1125,6 mm, sendo incluídas 4 lâminas de irrigação nos meses mais secos do ano (Figura 1). Em Miriri, a precipitação total ocorrida durante a condução do experimento foi de 2.149 mm e não foi aplicada irrigação (Figura 2). (Deve informar o período dos experimentos. Um ano? Mais?).

Figura 1. Regime hídrico (mm) durante o experimento na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina, em Pernambuco.

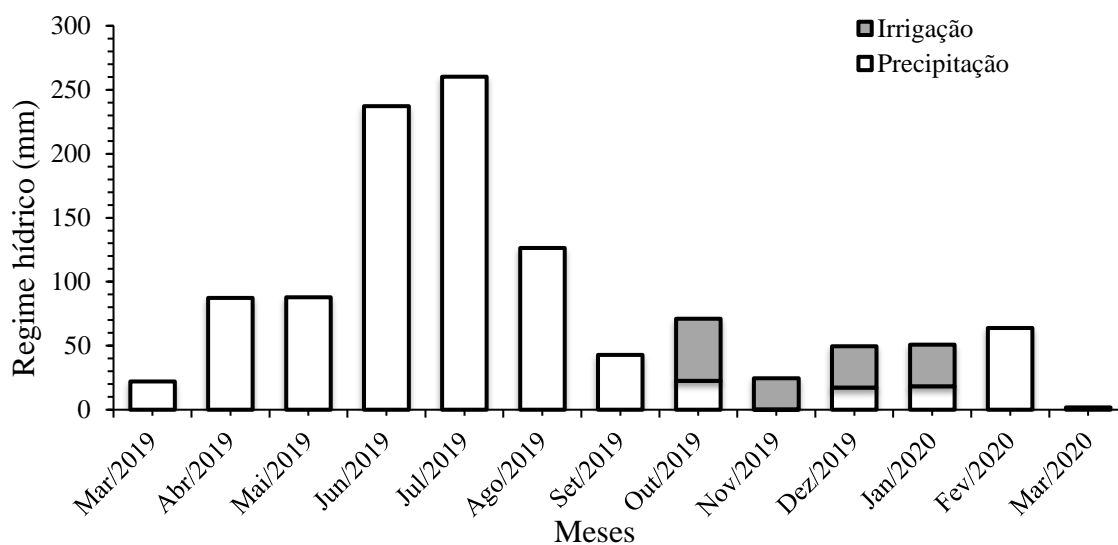
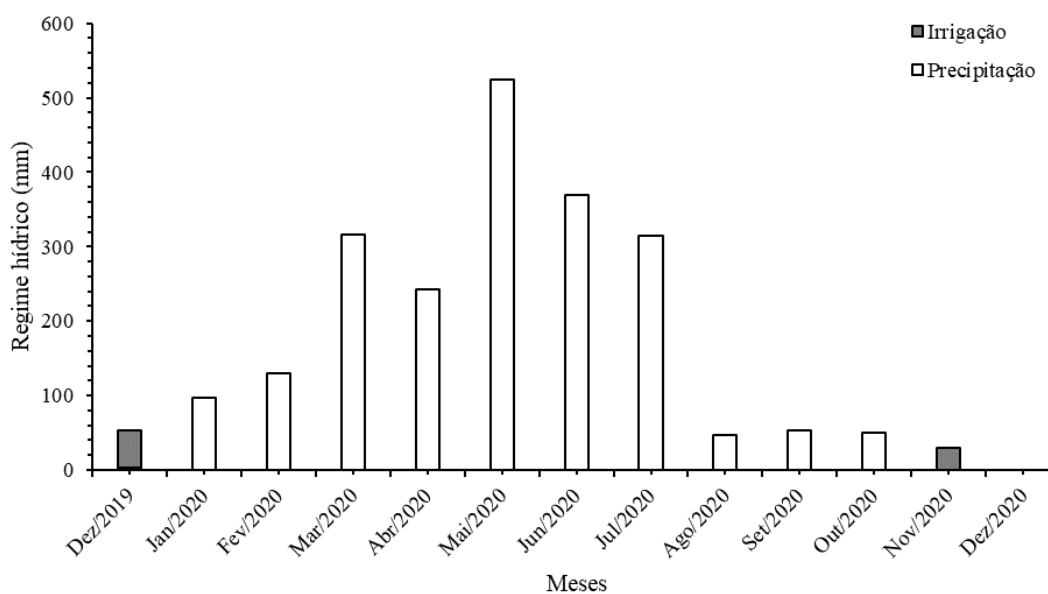


Figura 2. Regime hídrico (mm) durante o experimento na Usina Miriri, em Rio Tinto, Paraíba.



4.2.2 Caracterização química e física dos solos das áreas experimentais

O solo da área experimental da EECAC é classificado como ARGISSOLO VERMELHO AMARELO distrocoeso com textura franca arenosa (SANTOS et al., 2013). A determinação de atributos químicos (Tabela 5) foi feita em amostras coletadas nas camadas de

0 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm de profundidade, seguindo a metodologia descrita em Embrapa (2017). O pH foi determinado em água (1:2,5); Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} foram extraídos com KCl 1 mol L^{-1} e determinados por titulação; K^{+} e Na^{+} foram extraídos com o extrator Mehlich 1 e determinados por fotometria de chama; P também foi extraído com o extrator Mehlich 1 sendo determinado por espectrofotometria; C orgânico foi extraído com dicromato de potássio e determinado por titulometria; a matéria orgânica do solo foi obtida a partir dos valores de C orgânico total do solo multiplicado pelo fator de correção 1,724, depois transformado em porcentagem. Para determinação dos atributos físicos, foram coletadas amostras deformadas na profundidade de 0-20 cm, em zig-zag, com o auxílio do trado e anel volumétrico, respectivamente. Nas amostras deformadas foi realizada a análise de granulometria do solo, quantificando as frações areia, silte e argila pelo método do densímetro, segundo a metodologia da Embrapa (2009).

Tabela 1. Caracterização química e física de amostras de solo da área experimental antes do preparo do solo para plantio da Estação Experimental do Carpina, Pernambuco.

Determinações	Profundidade (cm)			Determinações	Profundidade (cm)		
	0-20	20-40	40-60		0-20	20-40	40-60
pH (H ₂ O)	6,00	5,60	5,50	V (%)	47,06	40,88	24,12
M.O (%)	1,71	1,59	1,50	m (%)	0,00	0,00	0,00
P (mg/dm ³)	14,00	13,00	6,00	Fe (mg/dm ³)	100,76	98,12	125,95
K (cmol _c /dm ³)	0,04	0,02	0,01	Cu (mg/dm ³)	0,36	0,57	0,67
Na (cmol _c /dm ³)	0,02	0,02	0,01	Zn (mg/dm ³)	20,79	26,51	12,21
Al (cmol _c /dm ³)	0,00	0,00	0,00	Mn (mg/dm ³)	10,89	9,13	1,82
Ca (cmol _c /dm ³)	2,30	2,50	0,90	Areia Total (%)	75,10	72,60	73,30
Mg (cmol _c /dm ³)	1,20	0,30	0,70	Areia Grossa (%)	55,02	51,60	56,52
H+Al (cmol _c /dm ³)	4,00	4,10	5,10	Areia Fina (%)	20,04	21,04	16,80
S.B (cmol _c /dm ³)	3,56	2,84	1,62	Silte (%)	8,10	6,40	21,90
CTC (cmol _c /dm ³)	7,56	6,94	6,72	Argila (%)	16,80	21,00	24,80

O solo da área experimental da Miriri é classificado como Argissolo Amarelo distrófico com textura arenosa (EMBRAPA, 2018). A determinação de atributos químicos e físicos (Tabela 2) foi realizada em amostras coletadas nas camadas de 0 a 30 e de 30 a 60 cm de profundidade, seguindo as metodologias descritas em Embrapa (2017), conforme detalhado anteriormente.

Tabela 2. Caracterização química e física de amostras de solo da área experimental antes do preparo do solo para plantio da Usina Miriri, Rio Tinto, Paraíba

Determinações	Profundidade (cm)		Determinações	Profundidade (cm)	
	0-30	30-60		0-30	30-60
pH (H ₂ O)	6,00	5,60	V (%)	51,79	32,05
M.O (%)	0,86	0,62	m (%)	0,00	0,00
P (mg/dm ³)	5,00	2,00	Fe (mg/dm ³)	32,34	34,65
K (cmol _c /dm ³)	0,02	0,01	Cu (mg/dm ³)	0,62	0,53
Na (cmol _c /dm ³)	0,01	0,00	Zn (mg/dm ³)	5,83	1,54
Al (cmol _c /dm ³)	0,00	0,00	Mn (mg/dm ³)	0,33	0,02
Ca (cmol _c /dm ³)	1,68	1,08	Areia Total (%)	91,00	87,00
Mg (cmol _c /dm ³)	0,22	0,13	Areia Grossa (%)	61,00	51,00
H+Al (cmol _c /dm ³)	1,80	2,60	Areia Fina (%)	30,00	36,00
S.B (cmol _c /dm ³)	1,93	1,23	Silte (%)	1,00	5,00
CTC (cmol _c /dm ³)	3,73	3,83	Argila (%)	8,00	8,00

4.2.3 Desenho experimental e tratamentos aplicados

Os experimentos foram conduzidos em esquema fatorial (4 x 4 em Carpina, 4 x 3 em Miriri), utilizando delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. O primeiro fator correspondeu aos tratamentos de cultivo da cana-de-açúcar em consórcio com leguminosas produtoras de grãos (feijão-caupi, *Vigna unguiculata* (L.) Walp, variedade IPA 207; amendoim, *Arachis hypogaea* L., variedade BR1 e soja, *Glycine max* (L.) Merr., variedade Monsoy 8372, sendo que esta última espécie só foi cultivada no experimento da EECAC) e o cultivo da cana solteira. O segundo fator correspondeu a diferentes fontes de N para a cultura da cana-de-açúcar: inoculações com as estirpes de bactéria diazotrófica IPA CF62 (*Paenibacillus* sp.) ou com o mix de bactérias diazotróficas da Embrapa (*Gluconacetobacter diazotrophicus* (BR 11281), *Herbaspirillum seropedicae* (BR 11335), *Herbaspirillum rubrisubalbicans* (BR 11504), *Azospirillum amazonense* (BR 11145) e *Burkholderia tropica* (BR 11366), e dois controles sem inoculação, um com N-fertilizante (dose 65 kg ha⁻¹) na forma de ureia e outro sem N. Os tratamentos aplicados estão sumarizados na tabela 3 para o experimento conduzido na EECAC e na tabela 4 para o experimento da usina Miriri. No experimento da usina Miriri, o tratamento com consórcio com soja foi excluído devido à baixa germinação das sementes que afetou drasticamente a produção de biomassa da leguminosa. Em cada bloco experimental foram incluídas parcelas extras contendo plantas referências (girassol, mamona e algodão) para estimativa da FBN nas leguminosas.

Os inoculantes foram preparados utilizando os isolados descrito acima. Todas as bactérias foram crescidas, separadamente, em Erlenmeyer com meio líquido DYGS (RODRIGUES NETO et al., 1986), em agitador rotatório (200 rpm), por 48 horas a 31°C. Após o crescimento bacteriano, atingindo 10^9 células ml^{-1} , foram inoculadas de forma individualizada em condições assépticas em turfa estéril conforme Figueiredo et al. (2013) e distribuídas em sacos de polietileno de média densidade (0,04 - 0,09 mm). A composição final de cada dose do inoculante foi de 50 mL do crescimento bacteriano misturados a 150 g do veículo turfa. Ao final, os inoculantes foram estocados para maturação a temperatura ambiente (28- 30° C) por sete dias. A inoculação foi realizada antes do plantio, seguindo a metodologia descrita por Oliveira et al. (2002). Em seguida, os segmentos de colmo foram colocados em sacos de rafia e imersos por 60 minutos em reservatórios contendo o inoculante turfoso diluído na proporção de 200 g de inoculante para 30 L de água.

Tabela 3. Tratamentos de cana-de-açúcar consorciada com leguminosas de grãos e fontes de N, em experimento na Estação Experimental do Carpina, Pernambuco.

Tratamento		Tratamento	
T1	Soja x Cana inoculada (IPA CF62)	T9	Feijão x Cana inoculada (IPA CF62)
T2	Soja x Cana inoculada (Embrapa)	T10	Feijão x Cana inoculada (Embrapa)
T3	Soja x Canas com N (60kg)	T11	Feijão x Cana com N (60kg)
T4	Soja x Cana sem N	T12	Feijão x Cana sem N
T5	Amendoim x Cana inoculada (IPA CF62)	T13	Sem leguminosa x Cana inoculada (IPA CF62)
T6	Amendoim x Cana inoculada (Embrapa)	T14	Sem leguminosa x Cana inoculada (Embrapa)
T7	Amendoim x Cana com N (60kg)	T15	Sem leguminosa x Cana com N (60kg)
T8	Amendoim x Cana sem N	T16	Sem leguminosa x Cana sem N

Cada parcela experimental, no experimento da EECAC, foi composta por cinco sulcos de cana-de-açúcar com comprimento de 8 m e espaçadas em 1,20 m, com área de 48 m², sendo a área útil delimitada excluindo 1 m de cada extremidade da parcela. As leguminosas foram semeadas em linhas duplas entre as linhas de cana-de-açúcar (Figura 3) no espaçamento de 0,2 x 0,7, 0,08 x 0,5 e 0,2 x 0,6 m para as culturas do amendoim, soja e feijão-caupi, respectivamente. No experimento da Usina Miriri, a área experimental foi composta por parcelas contendo quatro linhas duplas espaçadas por 0,8 x 1,6 m com comprimento de 8 metros totalizando uma área de 76,8 m² (Figura 4). As leguminosas foram plantadas entre as linhas da

cana -de-açúcar, tanto na fileira dupla, quanto entre as linhas duplas que tinham um distanciamento maior.

Figura 3: Representação dos espaçamentos nos diferentes tratamentos de consórcio de leguminosas de grãos com a cana-de-açúcar na EECAC.

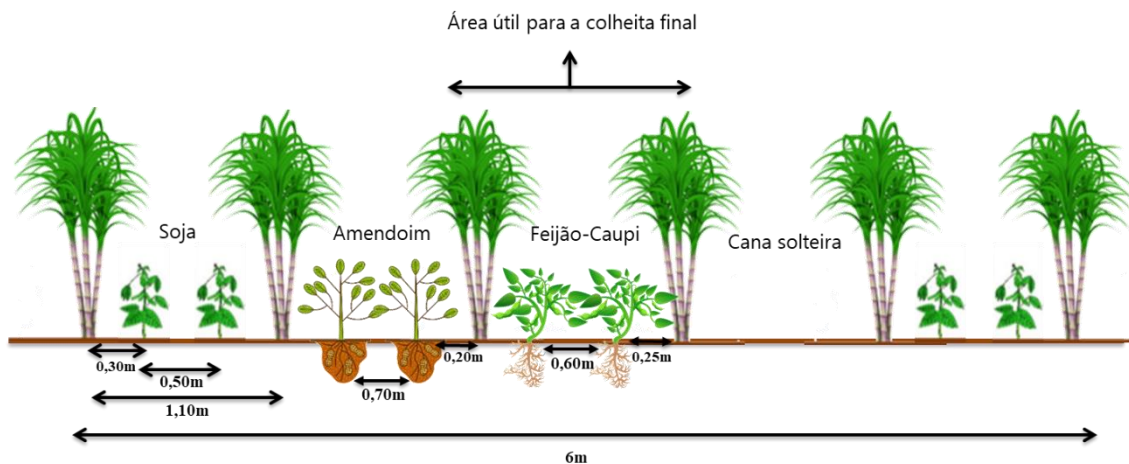
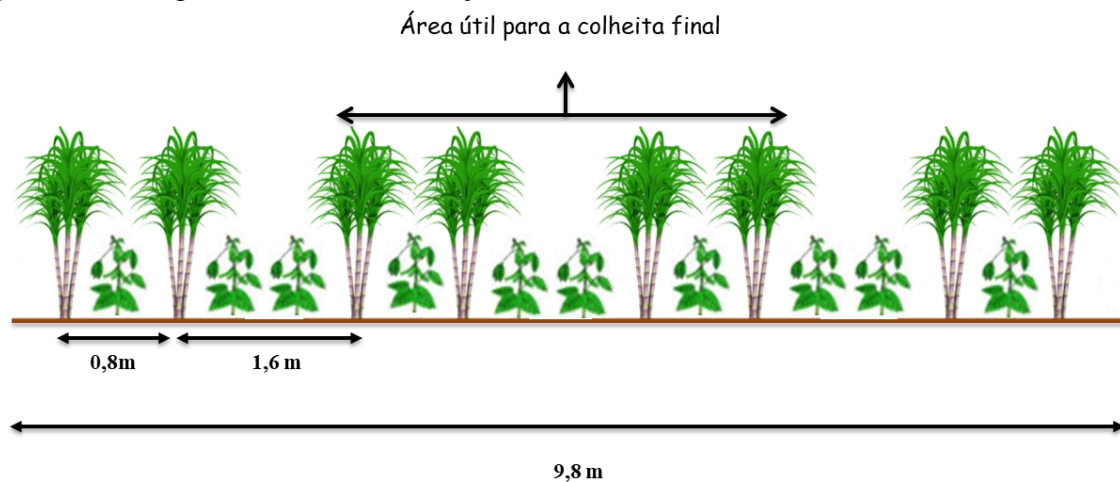


Figura 4: Representação dos espaçamentos nos diferentes tratamentos de consórcio de leguminosas de grãos com a cana-de-açúcar na Usina Miriri.



Antes da implantação do experimento, foi aplicado herbicida para dessecar a socaria remanescente e para facilitar a incorporação de $1,26 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário no experimento da EECAC (PRNT de 77%), calculados para elevar a saturação de bases para 60%. No experimento da Miriri foi adicionado 1 Mg ha^{-1} .

Em 23 de março de 2019, na EECAC, foi realizado o semeio dos colmos sementes no fundo do sulco de plantio. Foram utilizados rebolos contendo 3 gemas, totalizando 9 gemas por m de sulco. Após o semeio foi realizada a adubação de plantio no fundo do sulco da cana-de-açúcar, aplicando 80 kg ha^{-1} de K_2O , na forma de cloreto de potássio (KCl) e 30 kg ha^{-1} de P_2O_5 , na forma de superfosfato triplo (SFT). As leguminosas foram plantadas no dia seguinte

(24 de março) entre as fileiras plantadas com cana-de-açúcar. Para as leguminosas foram aplicados como adubação de fundação 40 kg ha⁻¹ de K₂O e 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para a cultura do feijão, 60 kg ha⁻¹ de K₂O e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para a cultura da soja e 25 kg ha⁻¹ de K₂O e 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para a cultura do amendoim. Todas as adubações de fundação seguiram as recomendações de adubação para o estado de Pernambuco (IPA, 2008). (Porque estas doses são diferentes? Poderiam influenciar as produtividades, limitando o feijão, por exemplo).

A instalação do experimento da usina Miriri foi iniciada no dia 5 de dezembro de 2019 com o semeio da cana, utilizando densidade de 12 gemas m⁻¹. Após o semeio foi realizada a adubação de plantio no fundo do sulco da cana-de-açúcar, aplicando 120 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de cloreto de potássio (KCl) e 125 kg ha⁻¹ de P₂O₅, na forma de superfosfato triplo (ST). As leguminosas foram plantadas no dia 19 de dezembro de 2019 entre as fileiras plantadas com cana-de-açúcar. Para as leguminosas foram aplicados como adubação de fundação 40 kg ha⁻¹ de K₂O e 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para a cultura do feijão, 60 kg ha⁻¹ de K₂O e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para a cultura da soja e 25 kg ha⁻¹ de K₂O e 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para a cultura do amendoim. Todas as adubações de fundação seguiram as recomendações de adubação para o estado de Pernambuco (IPA, 2008), exceto para a cana-de-açúcar que foi adubada seguindo a recomendação padrão da usina.

4.2.4 Estimativa da nodulação, produção de biomassa aérea e quantidade de N fixado nos restos culturais das leguminosas.

Avaliações das produções de biomassa aérea das plantas foram feitas em duas épocas distintas. A primeira avaliação foi realizada na época da avaliação da nodulação, aos 50 dias após a semeadura, em uma fileira da área útil, coletando-se, de maneira aleatória, oito plantas, seguindo a metodologia utilizada por De Luca et al. (2014). Essas amostras vegetais foram utilizadas para determinar o teor de ¹⁵N. As plantas foram cuidadosamente coletadas, com auxílio de uma pá, a fim de obter a maior quantidade possível de raízes e nódulos. Na mesma ocasião, também foram coletados três plantas de cada espécie utilizada como referência, em cada uma das quatro parcelas cultivadas com tais plantas. As raízes foram separadas e as partes aéreas foram acondicionadas em sacos de papel e levadas a estufa com circulação de ar forçada, mantida à temperatura de 65°C por 72 horas, e pesadas. As partes aéreas das plantas referências também foram secas em estufa e moídas. Os nódulos foram destacados das raízes, contados, acondicionados em sacos de papel e também foram secos em estufa com circulação de ar forçada, a 65°C por 72 horas, e pesados. Para estimar o tamanho médio dos nódulos, a

biomassa específica ($\text{mg n\u00f3dulo}^{-1}$) foi obtida dividindo-se a biomassa seca total de todos os n\u00f3dulos pelo n\u00famero de n\u00f3dulos das plantas coletadas.

Ap\u00f3s a pesagem, as partes a\u00e9reas das leguminosas foram moidas at\u00e9 obten\u00e7\u00e3o de p\u00f3 fino. O material (leguminosas e plantas refer\u00eancia) foi enviado para determina\u00e7\u00e3o dos teores de N total (%) e das abund\u00e2ncias naturais de ^{15}N (‰) em espectr\u00f4metro de massa Thermo Quest-Finnigan Delta Plus (Finnigan-MAT; CA, USA) com interface com um Analisador Elementar (Carlo Erba model 1110; Milan, Italy), no Laborat\u00f3rio de Ecologia Isot\u00f3pica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA-USP). Os valores de abund\u00e2ncia natural de ^{15}N foram expressos em unidades de “delta” ($\delta^{15}\text{N}$), que representa o desvio por mil, em rela\u00e7\u00e3o ao N_2 atmosf\u00e9rico, da raz\u00e3o entre as massas de ^{15}N e ^{14}N do nitrog\u00eanio contido na amostra:

$$\delta = (R_{\text{amostra}}/R_{\text{padr\u00e3o}} - 1) \times 1000$$

Onde: R_{amostra} e $R_{\text{padr\u00e3o}}$ s\u00e3o as raz\u00f5es $^{15}\text{N}:^{14}\text{N}$ da amostra e do padr\u00e3o (N_2 atmosf\u00e9rico).

O percentual de nitrog\u00eanio derivado do ar (%N_{dda}), em cada esp\u00e9cie de leguminosa, foi calculado quando houve diferen\u00e7a significativa entre seus sinais isot\u00f3picos e o das esp\u00e9cies refer\u00eancia (girassol, algod\u00e3o e mamona), utilizando a f\u00f3rmula descrita por Shearer e Kohl (1986):

$$\%N_{\text{dda}} = [(\delta^{15}\text{N}(\text{refer\u00eancia}) - \delta^{15}\text{N}(\text{fixadora})) / \delta^{15}\text{N}(\text{refer\u00eancia}) - B] \times 100$$

Em que: $\delta^{15}\text{N}(\text{refer\u00eancia})$ \u00e9 o valor m\u00e9dio dos $\delta^{15}\text{N}$ das plantas refer\u00eancias (girassol e algod\u00e3o) (E a mamona??), $\delta^{15}\text{N}(\text{fixadora})$ \u00e9 o valor dos $\delta^{15}\text{N}$ das leguminosas de gr\u00e3os e o B \u00e9 o valor de $\delta^{15}\text{N}$ para plantas fixadoras cultivadas na aus\u00eancia de N. Os valores de B foram -1,61‰, para o feij\u00e3o-caupi, -1,83‰, para a soja, e -1,35‰, para o amendoim (UNKOVICH et al., 2008).

As quantidades de N total na biomassa a\u00e9rea de cada leguminosa foram calculadas multiplicando-se a biomassa pelos teores de N m\u00e9dios. As quantidades de N fixadas foram obtidas multiplicando estas quantidades de N pelos resultados de % N_{dda}.

A segunda avalia\u00e7\u00e3o de biomassa a\u00e9rea das leguminosas foi realizada no corte definitivo, ao fim do ciclo de cada esp\u00e9cie, sendo a palhada da \u00e1rea \u00fatil da parcela pesada e deixada sobre o solo e os gr\u00e3os juntamente com as vagens foram retirados para a avalia\u00e7\u00e3o da produtividade. Subamostras foram coletadas para estimativa do teor de umidade e determina\u00e7\u00e3o da biomassa seca. N\u00e3o foi poss\u00edvel determinar o teor de ^{15}N nestas amostras, o que poderia permitir a investiga\u00e7\u00e3o da contribui\u00e7\u00e3o da FBN no final do ciclo.

4.2.5 Avaliação da produtividade de grãos

A colheita dos grãos foi realizada em diferentes épocas. No caso do feijão-caupi, a colheita dos grãos foi realizada aos 50 e 60 dias após o plantio, pelo fato de terem sido colhidos grãos verdes. Para as culturas da soja e do amendoim, a avaliação da produção de grãos foi realizada no final dos ciclos, aos 120 e 90 dias após a semeadura, respectivamente.

Para a avaliação da produtividade de grãos, todas as vagens da área útil da parcela foram coletadas, pesadas e debulhadas. Os grãos foram coletados, pesados e uma subamostra foi utilizada para determinação do teor de N. A quantidade de N acumulado nos grãos foi considerada a quantidade de N exportada dos sistemas, sendo calculada pelo produto dos teores de N e as produtividades de grãos.

4.2.6 Balanço de N no sistema

Para determinar o balanço de N dos cultivos das leguminosas de grãos foi necessário estimar a quantidade de biomassa seca dos grãos e, através da literatura, seus teores de N. Com a produção de biomassa aérea e o teor de N, foi possível determinar o N extraído pela planta. A diferença entre o N extraído pela planta e o exportado pelos grãos indica o N excedente que poderá ser retornado ao solo com as palhadas.

4.2.7 Estimativa da renda obtida pela comercialização dos grãos nos cultivos consorciados

Para a avaliação econômica dos cultivos das leguminosas foi levada em consideração a porcentagem de vagens úteis, as que apresentavam grãos viáveis para a comercialização e livres de injúrias por pragas e doenças. A avaliação foi feita em relação ao sistema consorciado com cana-de-açúcar, com base na produtividade dos grãos e do seu valor econômico no mercado, utilizando as Margens de Contribuição Agrícola (MCA), que correspondem à contribuição das diferentes espécies de leguminosas em relação a diferentes fontes de N. Com a MCA é possível observar os ganhos em R\$ ha⁻¹ para cada espécie em estudo.

Para a estimativa da rentabilidade foram levados em consideração os valores médios nacionais das vendas dos grãos em diferentes comércios. O valor estimado para a soja foi de R\$ 60,00 a saca com 60 kg, segundo levantamento feito pelo Cepea-Esalq no primeiro trimestre de 2020. Para o amendoim, a estimativa de preço variou entre R\$ 7,00 e 8,00 o kg, com casca e só os grãos, respectivamente, segundo informações fornecidas pela Ceasa do estado de

Pernambuco. Para o feijão-caupi colhido verde foram adotados os valores de R\$ 4,00 e 10,00 kg⁻¹ para venda em vagens ou grãos debulhados, respectivamente.

4.2.7 Análise estatística

As variáveis estudadas foram submetidas à ANOVA, considerando um delineamento em blocos casualizado com arranjo fatorial. Os efeitos significativos observados foram comparados pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. (Precisa detalhar mais. Os dados de 15N devem ter sido analisados de forma diferente)

Os dados foram submetidos à análise de componentes principais (ACP) para identificar relações entre os parâmetros avaliados. Foi feita análise de correlação de Pearson com o intuito de identificar inter-relações entre as variáveis. As análises multivariadas foram processadas utilizando o programa estatístico Statistica versão 7.0 (STATSOFT, 2004).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Avaliação da nodulação e da produção de biomassa da parte aérea das leguminosas de grãos

Na EECAC, as leguminosas cultivadas nas entrelinhas da cana apresentaram números e tamanhos de nódulos diferentes de acordo com a espécie, mas não foram influenciadas pelas fontes de N (Tabela 4). Esses efeitos estão diretamente ligados ao comportamento genético de cada espécie e demonstram a existência de populações de microssimbiontes nativos do solo, uma vez que as sementes não foram inoculadas.

O amendoim e o feijão-caupi tiveram as maiores quantidades de nódulos por planta, chegando a atingir 46 e 27 nódulos, respectivamente (Tabela 4). Já a soja, por ser uma espécie de alta seletividade e restrição na associação com estirpes de bactérias fixadoras de N, nodulando preferencialmente com estirpes do gênero *Bradyrhizobium* (PERIN et al., 2018), apresentou um número de nódulos menor. É importante ressaltar que mesmo que a nodulação da soja tenha sido menor que a das outras espécies, a presença de microssimbiontes nativos no solo é uma informação de grande interesse, já que muitas vezes se considera que solos tropicais não cultivados previamente com soja não abrigam microssimbiontes dessa leguminosa (HUNGRIA; CAMPO; MENDES, 2001).

Os nódulos do amendoim apresentaram massa específica 5,8 vezes menor que os do feijão-caupi, que foram os maiores, com um valor médio de 16 mg nódulo⁻¹, (Tabela 4). Como o feijão -caupi também teve o maior número de nódulos, teve a maior biomassa total de nódulos (Tabela 4).

Tabela 4. Número de nódulos por planta e biomassa específica dos nódulos (mg nódulos⁻¹) de espécies de leguminosas de grãos cultivadas consorciadas com a cana-de-açúcar e com diferentes fontes de N. (Colocar com o da Tabela 5 e especificar o local).

Nódulos planta⁻¹					
Leguminosa consorciada	Fonte de N aplicada à cana-de-açúcar				Média
	IPACF62	Mix Embrapa	Sem N	Com N	
Amendoim	40	63	28	53	46 a
Feijão-caupi	38	21	28	22	27 a
Soja	12	9	4	7	8 b
Média	30	31	20	27	
F					
Consórcio					32,16***
Fonte de N					2,51*
Cons. x Fonte					1,36 ^{ns}
CV					12,52
Biomassa específica (mg nódulo⁻¹)					
Amendoim	2,72	2,19	3,49	2,66	2,77 c
Feijão-caupi	16,97	17,96	17,2	12,03	16,04 a
Soja	8,39	14,85	8,97	8,64	10,21 b
Média	9,36	11,67	9,89	7,78	
F					
Consórcio					67,77***
Fonte de N					0,93 ^{ns}
Cons. x Fonte					1,03 ^{ns}
CV					8,41
Biomassa total dos nódulos (mg planta⁻¹)					
Amendoim	90	120	60	110	90 b
Feijão-caupi	510	280	440	240	360 a
Soja	110	100	70	70	80 b
Média	0,24	0,17	0,19	0,14	
F					
Consórcio					34,81***
Fonte de N					1,71 ^{ns}
Cons. x Fonte					1,18 ^{ns}
CV					11,65

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade. Os dados do número de nódulo e MSE dos nódulos foram transformados utilizando exponencial a 0,2 para obter normalidade e homocedasticidade dos dados.

Tabela 5. Número de nódulos por planta, biomassa específica dos nódulos (mg nódulo⁻¹) e biomassa total dos nódulos (mg) de espécies de leguminosas de grãos cultivadas consorciadas com a cana-de-açúcar com diferentes fontes de N, cultivadas na Usina Miriri.

Nódulos planta⁻¹					
Consórcios	Fonte de N				Média
	IPACF62	Mix Embrapa	Sem N	Com N	
Amendoim	72	73	71	89	76 a
Feijão-caupi	22	23	19	15	19 b
Média	47	48	45	52	
F					
Leguminosa					70,67***
Fonte de N					0,18 ^{ns}
Cons. x Fonte					0,70 ^{ns}
CV					39,64
Biomassa específica dos nódulos (mg nódulo⁻¹)					
Amendoim	2,89	3,01	2,72	3,04	2,92 b
Feijão-caupi	7,99	7,35	6,81	9,5	7,91 a
Média	5,44	5,18	4,76	6,27	
F					
Leguminosa					66,75***
Fonte de N					0,60 ^{ns}
Cons. x Fonte					0,16 ^{ns}
CV					7,11
Biomassa total dos nódulos (mg planta⁻¹)					
Amendoim	220	210	140	230	200
Feijão-caupi	190	160	120	130	150
Média	210	190	130	180	
F					
Leguminosa					3,15*
Fonte de N					1,23 ^{ns}
Cons. x Fonte					0,47 ^{ns}
CV					46,13

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade. Os dados da biomassa específicas dos nódulos foram transformados utilizando exponencial a 0,2 para obter normalidade e homocedasticidade dos dados.

A produção de biomassa do feijão-caupi destacou-se em ambos os experimentos, com produtividade média de 4,6 Mg ha⁻¹ no experimento da EECAC (Tabela 6) e 5,7 Mg ha⁻¹ no experimento conduzido na Usina Miriri (Tabela 7).

Este resultado é importante porque, no sistema de produção proposto nesta pesquisa, a biomassa das leguminosas é deixada sobre o solo após a colheita dos grãos, favorecendo a cobertura do solo e a ciclagem de nutrientes. Não foi observado efeito direto das fontes de N

utilizadas na cultura da cana-de-açúcar (Tabelas 6 e 7). Este efeito poderia ter ocorrido caso a adubação nitrogenada aplicada em fundo do sulco da cana tivesse servidopara as duas culturas.

Tabela 6. Biomassa aérea (Mg ha^{-1}) aos 50 dias de cultivo das espécies de leguminosas de grãos cultivadas consorciadas com a cana-de-açúcar com diferentes fontes de N, na EECAC.

Consórcios	Fonte de N				Média
	IPACF62	Mix Embrapa	Sem N	Com N	
Amendoim	2,09	2,51	2,58	2,60	2,45 b
Feijão-Caupi	5,09	4,72	4,43	4,38	4,66 a
Soja	2,77	2,95	3,08	3,53	3,08 b
Média	3,32	3,39	3,36	3,50	
F					
Consórcios					32,43***
Fonte de N					0,11ns
Cons. x Fonte					0,79ns
CV					23,56

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ns não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

Tabela 7. Biomassa aérea (Mg ha^{-1}) aos 50 dias de cultivo de espécies de leguminosas de grãos cultivadas consorciadas com a cana-de-açúcar com diferentes fontes de N, na Usina Miriri.

Consórcios	Fonte de N				Média
	IPACF62	Mix Embrapa	Sem N	Com N	
Amendoim	3,86	4,17	4,08	4,21	4,08 b
Feijão-Caupi	4,92	6,22	6,17	5,50	5,70 a
Média	4,39	5,19	5,12	4,85	
F					
Consórcios					2,84*
Fonte de N					ns
Cons. x Fonte					0,18ns
CV					35,84

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ns não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

As biomassas da parte aérea das leguminosas na colheita final, cultivadas na EECAC, não diferiram significativamente (Tabela 8). Elas foram consistentes com as colhidas aos 50 dias, exceto para o feijão-caupi que apresentou uma diminuição de 1,51 Mg ha⁻¹, o pode estar relacionado com senescência e queda de folhas.

Tabela 8. Biomassa aérea (Mg ha⁻¹) no final do ciclo de espécies de leguminosas de grãos cultivadas consorciadas com a cana-de-açúcar com diferentes fontes de N, na EECAC.

Consórcios	Fonte de N				Média
	IPACF62	Mix Embrapa	Sem N	Com N	
Amendoim	2,45	3,06	2,24	2,42	2,54
Feijão-Caupi	3,36	3,05	3,11	3,10	3,15
Soja	2,83	3,34	2,74	2,77	2,92
Média	2,88	3,15	2,70	2,76	
			F		
Consórcios			22,41***		
Fonte de N			0,89 ^{ns}		
Cons. x Fonte			0,39 ^{ns}		
CV			25,53		

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

A biomassa aérea na colheita final, na Usina Miriri, foi maior no feijão-caupi que no amendoim (Tabela 9). Este resultado está relacionado com a característica botânica das espécies e das condições ambientais. As biomassas de ambas as espécies diminuíram em relação à colheita aos 50 dias.

O uso de adubos verdes trazem grandes benefícios para o ambiente de cultivo, melhorando a qualidade do solo pelo aumento da fertilidade, relacionada com o incremento de nutrientes e matéria orgânica (HE et al., 2018; LALOY E BIELDERS, 2010), redução na perda do solo por aumentar a capacidade de infiltração e diminuir o escoamento superficial da água (SALAH et al., 2016; LATATI et al., 2016; LI et al., 2013), além de melhorar o manejo de pragas, doenças e ervas daninhas (NAVNEFT; MAKHAN; GURJEET, 2016; SIKIROU ;WYDRA, 2008).

Tabela 9. Biomassa aérea (Mg ha^{-1}) no final do ciclo de espécies de leguminosas de grãos cultivadas consorciadas com a cana-de-açúcar com diferentes fontes de N, na Usina Miriri.

Consórcios	Fonte de N				Média
	IPACF62	Mix Embrapa	Sem N	Com N	
Amendoim	2,17	2,77	1,88	2,14	2,24 b
Feijão-Caupi	3,52	3,07	3,78	3,35	3,31 a
Média	2,85	2,92	2,58	2,75	
			F		
Consórcios			22,41***		
Fonte de N			0,44 ^{ns}		
Cons. x Fonte			1,29 ^{ns}		
CV			22,91		

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

4.3.2 Estimativa do N fixado nas leguminosas

Os valores isotópicos das espécies referência não diferiram entre si, foram significativamente mais altos que os de algumas das leguminosas, e as diferenças foram maiores que 3‰ na EECAC e maiores que 2‰, em Miriri (Tabela 12 e 13. Mas precisa renumerar as tabelas, já que estas viriam antes da 10). Assim, foi considerado que a metodologia da abundância natural pode ser utilizada com boa precisão para fazer as estimativas do %N_{dda}.

(Outra opção é passar esta parte inicial para mais no final, quando começa a tratar de %N_{dda} e fixação).

Os teores de N da parte aérea leguminosas também não diferiram, com médias de 2,82 e 2,87% para as leguminosas cultivadas na EECAC e na Usina Miriri, respectivamente (Tabela 10 e 11).

Por ter tido maior produção de biomassa aérea, a quantidade de N total acumulada pelo feijão-caupi ($133,8 \text{ Kg ha}^{-1}$) foi maior que a da soja ($80,83 \text{ Kg ha}^{-1}$) e do amendoim ($37,50 \text{ Kg ha}^{-1}$) na EECAC (Tabela 10) e também na Usina Miriri, onde as acumulações de N foram ainda maiores: ($165,2 \text{ kg ha}^{-1}$ no feijão e $112,9 \text{ kg ha}^{-1}$ no amendoim (Tabela 11). As maiores produções de biomassa na Usina Miriri podem estar relacionadas com a maior precipitação pluviométrica nesta área que na EECAC. Esses maiores conteúdos podem representar maior disponibilização de N e maior produtividade da cana pela decomposição da palhada da leguminosa, depois da colheita dos grãos. Cana consorciada com soja produziu $122,8 \text{ t ha}^{-1}$, contrastando com cana solteira que só produziu $74,3 \text{ t ha}^{-1}$ (GEETHA et al., 2018).

Dantas et al. (2019), utilizando consórcios de crotalaria juncea, feijão de porco e feijão guandú com a cultura do maracujazeiro, observaram maior disponibilização de N, oriundo da FBN, pelo feijão de porco com estimativa equivalente a 73% que resultou em 65 kg ha⁻¹ de N. Em cultivos de cana-de-açúcar em consórcio com leguminosas é possível observar efeitos diretos sobre a produtividade, podendo chegar a 122,82 t ha⁻¹ quando o consórcio é com soja, enquanto a cana solteira obteve produtividade de 74,30 t ha⁻¹ (GEETHA et al., 2018). Um maior acúmulo de N pelas leguminosas tornará a leguminosa um potencial alternativo para o fornecimento de N para uma cultura comercial em destaque econômico.

Tabela 10. Teor e conteúdo total de N, teor de C e relação C/N das leguminosas de grãos cultivadas em consórcio com cana-de-açúcar, na EECAC.

Espécies	Teor de N %	N Total Kg ha ⁻¹	Teor de C %	C/N
Soja	2,55	80,83 b	40,94 a	16,05
Amendoim	3,18	37,50 c	38,90 b	12,23
Feijão-caupi	2,88	133,81 a	40,42 a	14,03
	F	F	F	F
Tratamento	3,88*	32,68***	20,83***	2,57 ^{ns}
CV	11,21	20,08	2	30,05

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns}não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

Tabela 11. Teor e conteúdo total de N, teor de C e relação C/N das leguminosas de grãos cultivadas em consórcio com cana-de-açúcar, na Usina Miriri.

Espécies	Teor de N %	Conteúdo de N Kg ha ⁻¹	Teor de C %	C/N
Amendoim	2,77	112,86	38,01 b	13,74
Feijão-caupi	2,88	165,23	40,28 a	14,05
	F	F	F	F
Tratamento	0,91 ^{ns}	3,86 ^{ns}	66,4***	0,28 ^{ns}
CV	11,21	27,09	1,01	6,04

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns}não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

O teor de C da palhada do amendoim foi significativamente menor, embora com pequena diferença, que os das outras leguminosas, em ambos os experimentos (Tabelas 10 e 11). Também a relação C/N foi menor, mas as de todas as palhadas foram baixas (<15), o que

pode se refletir em rápida decomposição e ciclagem dos nutrientes (HEAL et al., 1997; ROMAN & VELLOSO, 1993; NARDOTO et al., 2008).

A contribuição do manejo consorciado com leguminosas depende da capacidade da leguminosa de ter uma boa eficiência na FBN, aumentando a disponibilidade do nutriente para a cultura intercalada (COUËDEL et al., 2018; SORATTO et al., 2012; ZOTARELLI et al., 2012)

A contribuição da FBN para o N nas plantas diferiu significativamente entre as leguminosas (Tabela 12 e 13). Na EECAC, a contribuição no feijão-caupi (66%) foi maior que nas demais leguminosas, que não diferiram entre si (43% para o amendoim e 38 % para a soja) , . Em Miriri, a contribuição para o feijão foi de 46%, equivalente a 75 kg ha⁻¹ de N fixados. Não foi possível confirmar fixação no amendoim, porque seu sinal isotópico não diferiu significativamente do sinal das referências e também ão foi possível identificas as causas da ausência de FBN no amendoim, podendo ter sido fatores nutricionais, uma vez que houve nodulação, demonstrando que existem populações de microssimbiontes no solo.Essas contribuições corroboram vários trabalhos realizados com as culturas de feijão-caupi (ALCANTARA et al., 2014; SIMUJI et al., 2019) e amendoim (CANDISCH et al., 2000) e também de soja, nos casos em que a soja não foi previamente inoculada, já que com inoculação as contribuições são bem mais altas (HUNGRIA et al., 2015).

Como apresentou a maior quantidade de N acumulado e o maior %Ndda, o feijão-caupi destacou-se quanto à quantidade de N fixada simbioticamente na EECAC, que atingiu 91 kg ha⁻¹ contra 43 e 38 kg ha⁻¹ da soja e do amendoim, respectivamente (Tabela 12). As fixações no feijão foram superiores às doses de fertilizantes nitrogenados aplicadas na cana.

Tabela 12: $\delta^{15}\text{N}$, nitrogênio derivado da atmosfera-Ndda e N fixado pelas leguminosas cultivadas em consórcio com cana-de-açúcar na EECAC.

Espécies	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	Ndda %	N fixado Kg ha ⁻¹
Plantas referências	7,02 a		
Soja	3,19 bc	43,27 b	35,57 b
Amendoim	3,84 b	37,96 b	13,77 b
Feijão-caupi	1,12 c	68,36 a	91,34 a
	F	F	F
Tratamento	8,30**	8,20**	50,77***
CV	26,01	22,73	23,94

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ns não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

Tabela 13: $\delta^{15}\text{N}$ (‰), nitrogênio derivado da atmosfera- Ndda (%) e N fixado (kg ha^{-1}) pelas leguminosas cultivadas em consórcio com cana-de-açúcar cultivada na Usina Miriri.

Espécies	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	Ndda %	N fixado Kg ha^{-1}
Plantas referências	3,16 a		
Amendoim	2,58 a		
Feijão-caupi	0,98 b	45,65	75,42
	F		
Tratamento	55,59***		
CV	13,49		

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ns não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

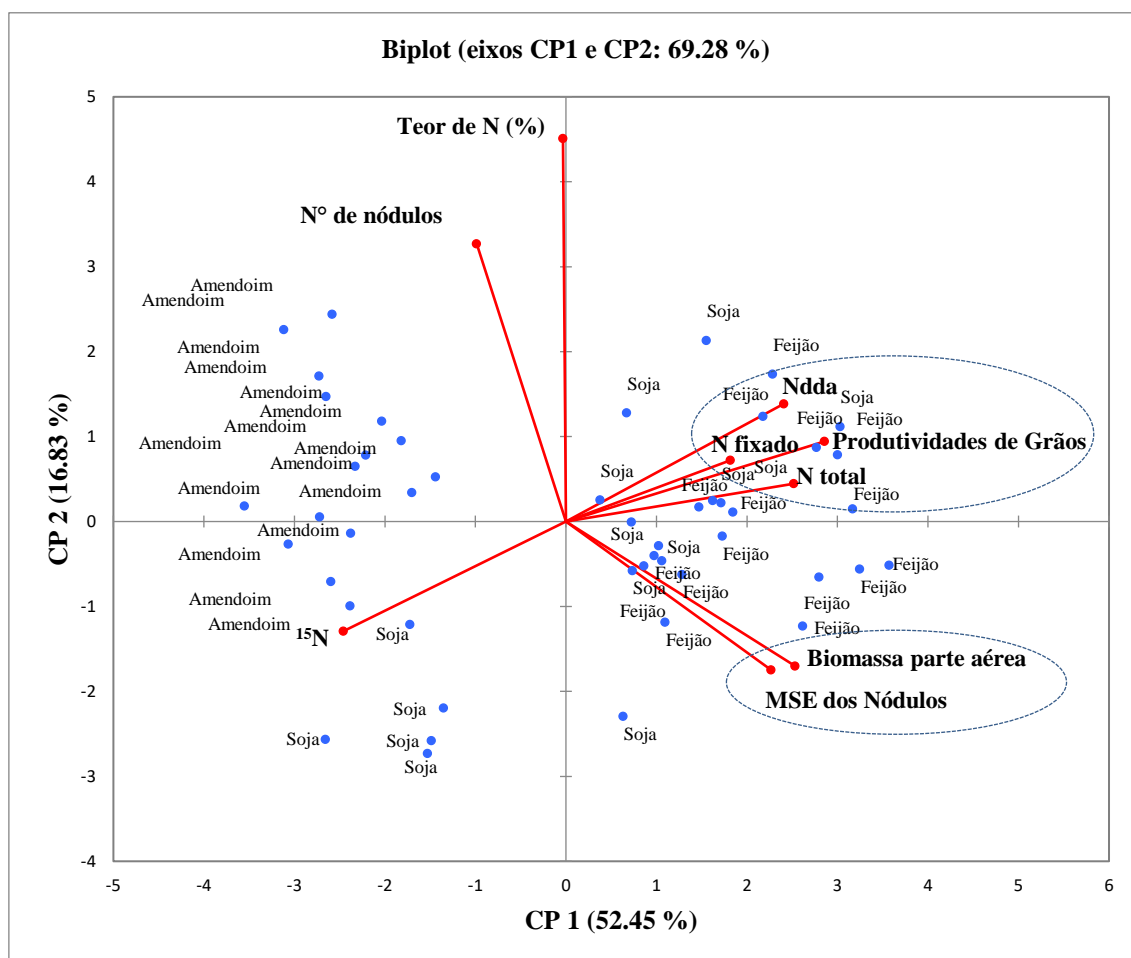
Para identificar a relação existente entre os atributos ligados à FBN (número de nódulos, MS dos nódulos, teor de N na planta e Ndda) e produtividade da biomassa aérea e de grãos, foi feita uma análise de componente principal (ACP). Os dois componentes principais explicaram 69% da variação total dos atributos referentes à FBN e à produtividade das leguminosas, o primeiro 52%, e o segundo 17% (Tabela 14). De modo geral, soja e o feijão-caupi foram mais assemelhados em alguns parâmetros (Figura 2). A semelhança da relação entre a massa específica dos nódulos e a produção de biomassa da parte aérea indica a importância dos nódulos para obtenção de altas produtividades, assim como a relação entre produtividade de grãos Ndda, N fixado e N total das plantas mostra a importância da FBN. No amendoim, o número de nódulos, o teor de N e os sinais de ^{15}N foram mais correlacionados.

Tabela 14. Matriz da análise de componentes principal da produção de biomassa aérea e produtividade de grãos com outros parâmetros relacionados a FBN das leguminosas.

Variáveis	CP1	CP2
Nº de nódulos	0,109	0,384
MSE dos Nódulos (mg)	0,574	0,110
Teor de N (%)	0,000	0,731
¹⁵ N	0,677	0,060
Ndda	0,648	0,069
N total	0,710	0,007
N fixado (kg/ha)	0,914	0,032
Biomassa Parte aérea (kg/ha)	0,718	0,104
Produtividades de Grãos (kg/ha)	0,369	0,019
Autovalor	4,721	1,515
Variabilidade	52,452	16,832

CP1 = componente principal 1; CP 2 = componente principal, MSE= massa seca específica, Ndda= nitrogênio derivado do ar. Os valores em negrito são diferentes de 0 com um nível de significância alfa=0.05

Figura 2. Análise de componente principal (ACP) entre a produção de biomassa aérea e produtividade de grãos com parâmetros relacionados à FBN das leguminosas de grãos na EECAC.



Utilizando a matriz de correlação de Pearson, é possível identificar que a MSE dos nódulos é mais relacionada positivamente com a biomassa da parte aérea e negativamente correlacionada com o sinal de ^{15}N (Tabela 6). Estes sinais também se correlacionam negativamente com N total, biomassa da parte aérea e produtividade de grãos e ainda, como é esperado, positivamente com parâmetros que são calculados em função dos valores do sinal (%Ndda e N fixado).

A produção de biomassa da parte aérea, além da correlação com a MSE dos nódulos, também teve alta correlação com o conteúdo de N (Tabela 15), já que entra no seu cálculo. Já a produtividade de grãos teve maior correlação com N fixado, confirmando a importância da eficiência da FBN na produção de grãos das leguminosas.

Tabela 15. Matriz de correlação de Pearson de atributos da produção da biomassa da parte aérea e variáveis relacionadas à absorção de N FBN das leguminosas de grãos.

Variáveis	Nº de nódulos	MSE dos Nódulos (mg)	Teor de N (%)	¹⁵ N	Ndda	N total (kg)	N fixado (kg/ha)	Biomassa Parte aérea (kg/ha)	Produtividades de grãos (kg/ha)
Nº de nódulos		-0,291	0,293	0,112	0,080	-0,250	-0,206	-0,345	-0,239
MSE dos Nódulos (mg)	-0,291		-0,270	-0,533	0,519	0,569	0,650	0,704	0,275
Teor de N (%)	0,293	-0,270		-0,028	0,032	0,235	0,181	-0,268	0,113
¹⁵ N	0,112	-0,533	-0,028		0,999	-0,471	-0,778	-0,478	-0,446
Ndda	-0,080	0,519	0,032	-0,999		0,451	0,765	0,457	0,422
N total (kg)	-0,250	0,569	0,235	-0,471	0,451		0,897	0,851	0,487
N fixado (kg/ha)	-0,206	0,650	0,181	-0,778	0,765	0,897		0,797	0,513
Biomassa parte aérea (kg/ha)	-0,345	0,704	-0,268	-0,478	0,457	0,851	0,797		0,434
Produtividades de grãos (kg/ha)	-0,239	0,275	0,113	-0,446	0,422	0,487	0,513	0,434	

Os valores em negrito são diferentes de 0 com um nível de significância alfa=0.05

4.3.3 Produtividade de grãos das leguminosas

A produção dos grãos do feijão-caupi e do amendoim não foram influenciadas pelas diferentes fontes de N aplicadas na cultura da cana-de-açúcar no cultivo realizado na EECAC (Tabela 16), O feijão-caupi produziu em média 4481 e 1999 kg ha⁻¹ com casca e sem a casca, respectivamente, e o 1720 e 1216 kg ha⁻¹. A produtividade do feijão-caupi na zona da Mata Norte e Agreste pernambucanos varia de 1.362 à 3.359 kg ha⁻¹ (COSTA et al., 2013) (Parecem valores muito altos. Não devem ser médias regionais. Esclarecer o que são). Em média, a produção de grãos em duas variedades de grande destaque produtivo (IPA207 e IPA206) são de 1.187 e 1.018 kg ha⁻¹ (SANTOS et al., 2009). As produtividades do amendoim (com e sem casca) foram superiores às médias nacionais da variedade BR1 que equivalem a 1200 e 800 kg ha⁻¹ (EMBRAPA, 2009).

A menor produção de grãos da soja ocorreu no tratamento controle sem adubação nitrogenada (Tabela 16). . Observou-se que as raízes da soja estavam presentes na rizosfera da cana-de-açúcar, podendo beneficiar-se da adubação nitrogenada aplicada no fundo do sulco da cana-de-açúcar. Produtividades mais altas que o controle também ocorreu nos tratamentos em que a cana-de-açúcar foi inoculada com bactérias promotoras de crescimento. As bactérias que realizam simbiose com a soja são do gênero do *Bradirizobhium*; no entanto, pesquisas realizadas com *Azospirillum* como co-inoculação indicaram contribuição no crescimento da cultura e melhoria na eficiência da FBN (MORETTI et al., 2020; SILVA et al., 2019; HUNGRIA et al., 2015).

Tabela 16. Produtividade de grãos de leguminosas consorciadas com cana-de-açúcar, cultivadas na EECAC, PE.

Soja			
Tratamento	Produtividade		
	Grãos + Vagens (Kg/ha)	Grãos (kg/ha)	Peso 100 sementes (g)
Soja+ Cana Inoc 1	3011 ab	2067 ab	16,79 ab
Soja+ Cana Inoc 2	3354 ab	2296 ab	19,51 a
Soja+ Cana Sem N	1577 b	967 b	14,38 b
Soja+ Cana Com N	4264 a	2948 a	17,04 ab
Média	3051	2069	16,93
	F	F	F
Fonte N	5,39**	4,95**	5,33**
CV	31,51	35,81	10,74
Amendoim			
Amendoim+ Cana Inoc 1	1681	1186	39,50 a
Amendoim + Cana Inoc 2	2005	1407	37,18 b
Amendoim + Cana Sem N	1494	1052	39,37 a
Amendoim+ Cana Com N	1700	1216	39,32 a
Média	1720	1215	38,84
	F	F	F
Fonte N	1,23 ^{ns}	1,04 ^{ns}	7,96***
CV	22,20	23,63	2,02
Feijão-caupi			
Feijão+ Cana Inoc 1	4579	2127	34,50
Feijão + Cana Inoc 2	4080	1892	35,00
Feijão + Cana Sem N	4532	1958	34,50
Feijão+ Cana Com N	4733	2015	34,63
Média	4481	1998	34,66
	F	F	F
Fonte N	1,03 ^{ns}	0,66 ^{ns}	0,07 ^{ns}
CV	12,36	12,32	5,10

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade. Obs.: Inoc 1 e Inoc 2 correspondem a inoculação dos estipes IPACF62 e mix da Embrapa, respectivamente.

Na Usina Miriri não houve efeito da fonte de N na produtividade dos grãos. O peso de 100 sementes do amendoim superou 39 g, exceto no tratamento com a inoculação com o Mix da Embrapa (Tabela 17).

Tabela 17. Produtividade de grãos de leguminosas consorciadas com cana-de-açúcar, cultivadas na Usina Miriri, PB.

Amendoim			
Tratamento	Produtividade		
	Grãos + Vagens (Kg/ha)	Grãos (kg/ha)	Peso 100 sementes (g)
Amendoim + Cana Inoc 1	843	592	39,50 a
Amendoim + Cana Inoc 2	1133	787	37,18 b
Amendoim + Cana Sem N	870	611	39,37 a
Amendoim + Cana Com N	931	661	39,32 a
Média	944	663	38,84
	F	F	F
Fonte N	0,64 ^{ns}	0,61 ^{ns}	7,95 ^{***}
CV	34,47	33,73	2,03
Feijão-caupi			
Feijão+ Cana Inoc 1	5103	3012	34,00
Feijão + Cana Inoc 2	4127	2676	31,50
Feijão + Cana Sem N	3760	2942	33,50
Feijão+ Cana Com N	5303	3529	34,25
Média	4573	3040	33,31
	F	F	F
Fonte N	3,34*	0,70 ^{ns}	0,57 ^{ns}
CV	17,85	28,01	9,88

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade. Obs.: Inoc 1 e Inoc 2 correspondem a inoculação das estirpes IPACF62 e mix da Embrapa, respectivamente.

A produtividade do amendoim na Usina Miriri foi inferior à da EECAC, chegando a ter uma redução de 83%. A baixa produtividade pode estar relacionada com a época de plantio no verão, quando as precipitações iniciais foram baixas, com a fertilidade do solo, que é arenoso na camada superficial, com a baixa qualidade da semente que resultou em um estande falho e, também, com a ausência de FBN. Já a produtividade do feijão-caupi foi 92 kg ha⁻¹ maior quando se leva em consideração a produção total (com casca) (Tabela 16 e 17). Quando se observa a produção só dos grãos essa diferença sobe para 1.042 kg ha⁻¹ (Tabela 16 e 17). Essa diferença pode estar relacionada com o ambiente de produção que pode ter influenciado na quantidade de grãos por vagem, além da sanidade dos grãos. e do ambiente de p A produtividade de 4.574 e 3.040 kg ha⁻¹ de grãos + vagens e só grãos, respectivamente, do feijão-caupi na Usina Miriri são superiores às mencionadas por Costa et al. (2013) e Santos et al. (2009) em diferentes regiões no Nordeste.

4.3.4 Levantamento econômico dos cultivos no sistema consorciado

Os custos de produção da soja e amendoim foram de 1663, e 1662 R\$ /ha⁻¹, respectivamente (Tabela 18). As despesas relacionam-se com a adubação e compra de sementes, que contribuíram com 25% do custo total das lavouras, e com o plantio, a limpa e a colheita dos grãos. O feijão-caupi teve o menor custo na produção: 1156,75 R\$ ha⁻¹.

Tabela 18. Custo de produção de leguminosas de grãos cultivadas em consórcio com cana-de-açúcar na EECAC e na Usina Miriri.

Soja					
Descrição	Unidade	Quantidade	Diárias	Valor Unitário	Valor Total
				-----R\$-----	
Despesa de custeio da lavoura					
Aduto Fosfatado	kg ha ⁻¹	60		1,25	62,75
Aduto Potássico	kg ha ⁻¹	60		0,95	47,50
Sementes	kg ha ⁻¹	50		6,00	300,00
Custo Total					410,25
Outros custos variáveis					
Plantio	H ha ⁻¹	6	2	33,86	406,32
Limpa	H ha ⁻¹	5	3	33,86	507,9
Colheita	H ha ⁻¹	5	2	33,86	338,6
Custos variáveis totais					1252,82
Total dos custos					1663,07
Amendoim					
Despesa de custeio da lavoura					
Aduto Fosfatado	Kg h ⁻¹	50		1,25	62,5
Aduto Potássico	Kg ha ⁻¹	25		0,95	23,75
Sementes	Kg ha ⁻¹	70		8,00	560,00
Custo Total					646,25
Outros custos variáveis					
Plantio	H ha ⁻¹	5	1	33,86	169,3
Limpa	H ha ⁻¹	5	3	33,86	507,9
Colheita	H ha ⁻¹	5	2	33,86	338,6
Custos variáveis totais					1015,80
Total dos custos					1662,05
Feijão-caupi					
Despesa de custeio da lavoura					
Aduto Fosfatado	kg/ha	40		1,25	62,75
Aduto Potássico	kg/ha	30		0,95	47,50
Sementes	kg/ha	25		8,00	200,00
Custo Total					310,25
Outras custo variáveis					
Plantio	H ha ⁻¹	5	1	33,86	169,3
Limpa	H ha ⁻¹	5	2	33,86	338,6
Colheita	H ha ⁻¹	5	2	33,86	338,6
Custo variáveis total					846,50
Total dos custos					1156,75

Obs.: H/ha corresponde a quantidade de homens por hectare.

Com custos de produção estabelecidos para cada cultura foi possível determinar os rendimentos econômicos para cada tratamento (Tabelas 19 e 20). Para a cultura da soja, cultivada na EECAC, houve diferença significativa da produtividade em relação aos tratamentos aplicados, o controle sem N tendo rendimento negativo (Tabela 19) e o controle nitrogenado o maior rendimento, equivalente a 3.173 R\$ ha⁻¹. O segundo maior rendimento da soja foi observado no tratamento de cana-de-açúcar inoculada com o Mix da Embrapa, sendo a diferença econômica entre eles equivalente a 51%.

O amendoim cultivado na EECAC teve rendimentos econômicos superiores aos da soja, com médias de 8.660 e 8064 R\$ ha⁻¹ para a venda dos grãos com e sem casca, respectivamente (Tabela 19). O tratamento que teve o maior rendimento correspondeu ao Mix da Embrapa, com médias de 10.372 e 8.068 R\$ ha⁻¹ para a venda dos grãos com e sem a casca, respectivamente e com diferenças de 3068 e 2840 R\$ ha⁻¹ em relação ao controle absoluto, o tratamento com o menor retorno econômico. O tratamento de cana-de-açúcar inoculada com a estirpe IPA CF62 teve o segundo maior retorno (8540 e 8068 R\$ ha⁻¹), sendo ainda 18% menor que o do Mix da Embrapa.

O feijão-caupi, cultivado na EECAC, foi a melhor alternativa econômica de cultivo consorciado com a cana-de-açúcar (Tabela 15.) Em média, o retorno foi de 16.769 e 14.832 R\$ ha⁻¹ para a venda dos grãos com e sem vagens, respectivamente. Os tratamentos com os maiores rendimentos foram o adubado com N e o inoculado com IPA CF62, ambos superiores a 17 mil R\$ ha⁻¹. Já o feijão debulhado teve maior quando inoculado com IPA CF62, com valor de 15.867 R\$ ha⁻¹. Esse maior deveu-se à eficiência na produção de grãos e à maior produtividade agrícola. O menor rendimento foi o do tratamento que recebeu o Mix da Embrapa, 12% menos que o tratamento inoculado com IPA CF62.

Os rendimentos do amendoim na Usina Miriri foram inferiores aos da EECAC (Tabelas 19 e 20), sendo de 4.951 e 3.645 R\$ ha⁻¹ com a venda dos grãos com e sem a casca, respectivamente. O tratamento com melhor retorno econômico foi a inoculação com o Mix da Embrapa, diretamente relacionado com sua maior produtividade (Tabela 20).

Já o retorno econômico do feijão-caupi foi superior ao observado na EECAC, com médias de 17.147 e 23.166 R\$ ha⁻¹ em relação à venda dos grãos com e sem a casca,

respectivamente. Os tratamentos que apresentaram os maiores rendimentos corresponderam à utilização da adubação nitrogenada, seguido pela inoculação da estirpe IPA CF62 (Tabela 20).

Os retornos econômicos com as vendas das leguminosas são uma potencial fonte de renda por ocasião da renovação dos canaviais; podendo até ser uma nova fonte de renda para os agricultores em cultivos consorciados com a cana soca.

Tabela 19. Rendimento econômico de leguminosas de grãos cultivadas em consórcio com cana-de-açúcar, em um Argissolo Amarelo distrófico da Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina - EECAC.

Tratamento	Produção (kg ha ⁻¹)		Venda (R\$ ha ⁻¹)		Custo Total (R\$ ha ⁻¹)	Rentabilidade (R\$ ha ⁻¹)	
	Com casca	Grãos	Com casca	Grãos		Com casca	Grãos
Soja+ Cana Inoc 1	3.011	2.067		3.390	1.663		1.727
Soja+ Cana Inoc 2	3.354	2.296		3.766	1.663		2.103
Soja+ Cana Sem N	1.577	967		1.586	1.663		-76
Soja+ Cana Com N	4.264	2.948		4.835	1.663		3.172
Média	3.051	2.069		3.394	1.663		1.731
Amendoim+ Cana Inoc 1	1.681	1.186	10.088	9.489	1.662	8.426	7.827
Amendoim + Cana Inoc 2	2.005	1.407	12.034	11.262	1.662	10.371	9.600
Amendoim + Cana Sem N	1.494	1.052	8.965	8.421	1.662	7.303	6.759
Amendoim+ Cana Com N	1.700	1.216	10.201	9.729	1.662	8.539	8.067
Média	1.720	1.215	10.322	9.725	1.662	8.660	8.063
Feijão+ Cana Inoc 1	4.579	2.127	18.318	17.023	1.156	17.161	15.867
Feijão + Cana Inoc 2	4.080	1.892	16.322	15.142	1.156	15.165	13.985
Feijão + Cana Sem N	4.532	1.958	18.128	15.666	1.156	16.972	14.510
Feijão+ Cana Com N	4.733	2.015	18.932	16.122	1.156	17.775	14.965
Média	4.481	1.998	17.925	15.988	1.156	16.768	14.832

Inoc 1: Bactéria IPA CF62, Inoc 2: Mix de bactérias da Embrapa. A casca se refere as vagens para culturas do amendoim e feijão-caupi que podem ser vendidos desta forma.

Tabela 20. Rendimento econômico das diferentes leguminosas de grãos cultivadas em consórcio com cana-de-açúcar em um Argissolo Amarelo cultivado na Usina Miriri-PB.

Tratamento	Produção (kg ha ⁻¹)		Venda (R\$ ha ⁻¹)		Custo Total (R\$ ha ⁻¹)	Rentabilidade (R\$/ha)	
	Com casca	Grãos	Com casca	Grãos		Com casca	Grãos
Amendoim+ Cana Inoc 1	843	592	5.904	4.738	1.662	4.242	3.076
Amendoim + Cana Inoc 2	1.133	787	7.935	6.302	1.662	6.273	4.640
Amendoim + Cana Sem N	870	611	6.093	4.892	1.662	4.431	3.230
Amendoim+ Cana Com N	931	661	6.520	5.292	1.662	4.857	3.630
Média	944	663	6.613	5.306	1.662	4.951	3.644
Feijão+ Cana Inoc 1	5.103	3.012	20.412	24.100	1.156	19.256	22.943
Feijão + Cana Inoc 2	4.127	2.676	16.511	21.411	1.156	15.354	20.254
Feijão + Cana Sem N	3.769	2.942	15.078	23.542	1.156	13.921	22.385
Feijão+ Cana Com N	5.303	3.529	21.212	28.234	1.156	20.055	27.078
Média	4.575	3040	1.8303	24.322	1.156	17.146	23.165

Inoc 1: Bactéria IPA CF62, Inoc 2: Mix de bactérias da Embrapa. A casca se refere as vagens para culturas do amendoim e feijão-caupi que podem ser vendidos desta forma.

4.3.5 Balanço de N

Com base na literatura, os teores de N na biomassa dos grãos variam de 3,7 a 8% (Tabela 21). A maior variação, de 4 a 8%, foi observada por Balboa et al., (2018), na soja. Os menores teores de N, entre as leguminosas estudadas foram observados no feijão-caupi, com variação de 3,7 a 4% (Tabela 21).

Uma boa eficiência do processo da FBN é necessária para que o acúmulo de N nas plantas que seja capaz de exceder as quantidades exportadas pelos grãos e assim torná-lo disponível no solo.

Tabela 21. Teores de N nos grãos de diferentes espécies de leguminosas com base na literatura.

Leguminosa	Concentração de N (g 100g ⁻¹)	Autor
Soja	4 a 8	Balboa et al., 2018
Amendoim	6- 6,3	Bolonhezi et al., 2005
Feijão-caupi	3,7 a 4	Sreerama et al., 2012

Com base nestes teores, foi feito o balanço de N das leguminosas, considerando a extração pelos grãos, com base na produção de biomassa. As quantidades de N excedente diferiram entre as espécies (Tabelas 22 e 23). Na EECAC, a exportação de N pelos grãos da soja foi superiora às quantidades extraídas pela parte aérea da planta (quer dizer, só da palhada??), não havendo excedente de N para ser disponibilizado no solo (Tabela 22) (Não faz sentido, sempre fica palhada e ela sempre tem algum N). Excedentes foram estimados para o feijão-caupi e o amendoim com valores médios de 39 e 36 kg ha⁻¹ de N disponível para solo, respectivamente (Tabela 22).

Na Usina Miriri, as quantidades de N excedentes foram todas positivas, equivalendo a 41 e 40 kg ha⁻¹ de N disponibilizados para solo com as culturas do amendoim e do feijão-caupi, respectivamente (Tabela 23).

O uso de leguminosas como fonte de matéria orgânica e ciclagem de nutrientes é de grande importância para a manutenção da agricultura considerada de baixo carbono, podendo ser utilizado em rotação de cultura ou até mesmo em consórcios com culturas comerciais (THOMAZINI et al., 2015; SÁ et al., 2017). As quantidades excedentes de N

poderão contribuir para culturas intercaladas, como a cana-de-açúcar, estabelecendo assim um manejo mais sustentável no setor sucroenergético.

Tabela 22. Balanço de N de leguminosas de grãos cultivadas em consórcio com a cultura da cana-de-açúcar na EECAC.

Tratamento	Biomassa dos grãos kg ha ⁻¹	Teor de N g kg ⁻¹	Exportação de N -----kg ha ⁻¹ -----	Biomassa final	Teor de N %	N extraído -----kg ha ⁻¹ -----	N excedente
Soja+ Cana Inoc 1	2701		162,	2834	2,55	72	-89
Soja+ Cana Inoc 2	3008		180	3341	2,55	85	-95
Soja+ Cana Sem N	1410	60,00	84	2744	2,55	69	-14
Soja+ Cana Com N	3810		228	2771	2,55	70,	-157
Amendoim + Cana Inoc 1	620		39	2449	3,18	77	38
Amendoim + Cana Inoc 2	892		56	3063	3,18	97	41
Amendoim + Cana Sem N	697	63,00	43	2239	3,18	71	27
Amendoim + Cana Com N	617		38	2419	3,18	76	38
Feijão+ cana Inoc 1	1491		56	3360	2,88	96	40
Feijão + cana Inoc 2	1254		47	3053	2,88	87	40
Feijão + cana Sem N	1314	38,00	49	3106	2,88	89	39
Feijão+ cana Com N	1422		54	3103	2,88	89	35

Tabela 23. Balanço de N das leguminosas de grãos cultivadas em consórcio com a cultura da cana-de-açúcar na Usina Miriri.

Tratamento	Biomassa dos grãos kg ha ⁻¹	Teor de N g kg ⁻¹	Exportação de N -----kg ha ⁻¹ -----	Biomassa final	Teor de N %	N extraído -----kg ha ⁻¹ -----	N excedente
Amendoim + Cana Inoc 1	277		17	2177	2,77	60	42
Amendoim + Cana Inoc 2	415		26	2770	2,77	76	50
Amendoim + Cana Sem N	338	63	21	1876	2,77	51	30
Amendoim + Cana Com N	314		19	2142	2,77	59	39
Feijão+ cana Inoc 1	1644		62	3517	2,88	101	38
Feijão + cana Inoc 2	1276		48	3075	2,88	88	4
Feijão + cana sem N	1285	38	48	3275	2,88	94	45
Feijão+ cana com N	1611		61	3353	2,88	96	35

4.4 CONCLUSÃO

A produtividade de biomassa vegetal aérea das leguminosas teve uma correlação alta com a biomassa seca específica dos nódulos, o que pode levar a criar equações que contribuam para o melhor entendimento da eficiência da nodulação das leguminosas de grãos. A produtividade das culturas, de modo geral, está relacionada com a maior eficiência da FBN nas leguminosas. O feijão-caupi foi a cultura com maior potencial econômico em consorciação com a cana-de-açúcar em diferentes ambientes.

4.5 REFERÊNCIAS

- ALCANTARA, R.M.C.M.; XAVIER, G.R.; RUMJANEK, N.G.; ROCHA, M.M.; CARVALHO, J.S. Eficiência simbiótica de progenitores de cultivares brasileiras de feijão-caupi. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 1, p. 1-9, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000100001>
- AZEREDO, D.F.; BOLSANELLO, J.; WEBWE, H. & VIEIRA, J.R. Nitrogênio em cana-planta - doses e fracionamento. **STAB**, Piracicaba, v. 4, p. 25-29, 1986.
- BALBINOT JUNIOR, A.A.; DEBIASI, H, FRANCHINI, J.C.; PRIETO, J.P.C.; MORAES, M.T.; WERNER, F.; FERREIRA, A.S. Crescimento e distribuição de raízes de soja em diferentes densidades de plantas. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 1, p. 12-22, 2018. <https://doi.org/10.5965/223811711712018012>
- BALBOA, G.R.; SADRAS, V.O.; CIAMPITTI, I.A. Shifts in soybean yield, nutriente uptake, and nutrient stoichiometry: A historical synthesis-analysis. **Crop Science Society of America**, v. 58, p. 43-54, 2018. <https://doi.org/10.2135/cropsci2017.06.0349>
- BARCELOS, J.E.T. “Meiosi - Cana e Alimentos” Método inter-rotacional ocorrendo simultaneamente. **SACCHARUM (Revista Tecnológica da indústria açucareira alcooleira)**, São Paulo, v.7, n.31, 1984.
- BELTÃO, B. A. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea - Estado de Pernambuco: Diagnóstico do município de Carpina**. [s.l.] CPRM - Serviço Geológico do Brasil, p. 11, 2005.
- BOLONHEZI, D. **Colheita e Pós-colheita do Amendoim**. In: Roseane Cavalcanti Santos. (Org.). **O Agronegócio do Amendoim no Brasil**. 1ed. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2005, v. 1, p. 244-262.
- CADISCH, G.; HAIRIAH, K.; GILLER, K.E. Applicability of the natural ¹⁵N abundance technique to measure N₂ fixation in *Arachis hypogaea* grown on an Ultisol. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, v. 48, p. 31-45, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1573-5214\(00\)80003-2](https://doi.org/10.1016/S1573-5214(00)80003-2)

CARLSON, K.M.; GERBER, J.S.; MUELLER, N.D.; HERRERO, M.; MCDONALD, G.K.; BRAUMAN, K.A.; HAVLIK, P.; O'CONNELL, C.S.; JOHNSON, J.A.; SAATCHI, S.; WEST, P.C. Greenhouse gas emissions intensity of global croplands. **Nature Climate Change**, p. 1-9, 2016. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE3158>

CASTRO, J.L.; SOUZA, M.G.; RUFINI, M.; GUIMARÃES, A.A.; RODRIGUES, T.L.; MOREIRA, F.M.S. Diversity and efficiency of rhizobia communities from iron mining areas using cowpea as a trap plant. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. 1-20, 2017. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20160525>

CONAB- Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2021**, v.1, n.1, p. 85. 2021.

CONAB — Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2019/20**, v. 6, p. 58, 2019.

COPERAGUAS. **O feijão na alimentação dos brasileiros**. Disponível em: <<http://coperaguas.com.br/noticia/o-feijao-na-alimentacao-do-brasileiro>>,2015. Acesso em 29 de janeiro de 2021.

COSTA, A.F.; SOUZA, M.C.M.; CANUTO, V.T.B.; COITINHO, R.L.B.C.; TAVARES, J.A.; FONSECA, M.A.C. Miranda IPA 207, nova cultivar de feijão-caupi para o Nordeste brasileiro. **Pesquisa Agropecuária de Pernambuco**, v.18, n. 1, p. 39-43, 2013. <http://dx.doi.org/10.12661/pap.2013.008>

COUËDEL, A.; ALLETTO, L.; TRIBOUILLOIS, H.; JUSTES, E. Cover crop crucifer-legume mixtures provide effective nitrate catch crop and nitrogen green manure ecosystem services. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 254, p. 50-59, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.017>

CPRM- Serviço geográfico do Brasil. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea do estado de Pernambuco: Diagnóstico do município de Igarassu**. p. 22, 2005.

DANTAS, E.F.; FREITAS, A.D.S.; LYRA, M.C.C.P.; SANTOS, C.E.R.E.S.; CARVALHO NETA, S. J.; SANTANA, A.C.A.; BESERRA, R.V.; SAMPAIO, E.V.S. B. Biological fixation, transfer and balance of nitrogen in passion fruit (*Passiflora edulis* Sims) orchard intercropped with different green manure crops. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, p. 465-471, 2019. <https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.03.p1559>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-Embrapa. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. ed. téc. Humberto Gonçalves dos Santos. 5ª ed. revista e ampliada - Embrapa Informação Tecnológica. 532 p. Brasília, DF: 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-Embrapa. **Manual de métodos de análise de solo**. ed. téc. Paulo Cesar Teixeira. 3ª ed. revista e ampliada - Embrapa Informação Tecnológica. 573 p. Brasília, DF: 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solo, plantas e fertilizantes**. ed. téc. Fábio Cesar da Silva. 2ª ed. revista e ampliada - Embrapa Informação Tecnológica. 627 p. Brasília, DF: 2009.

FORTES, C.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OTTO, R.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E. Stalk and sucrose yield in response to nitrogen fertilization of sugarcane under reduced tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, p. 88-96, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X13000100012>

GEETHA, P.; TAYADE, A.S.; CHANDRASEKAR, C.A.; SELVAN, T.; RAJESH, K. Agronomic response, weed smothering efficiency and economic feasibility of sugarcane and legume intercropping system in tropical India. **Sugar Tech**, v. 21, p. 838-842, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0689-9>

HE, T.; SU, L.; LI, Y.; SU, T.; QIN, F.; LI, Q. Nutrient decomposition rate and sugarcane yield as influenced by mung bean intercropping and crop residue recycling. **Sugar Tech**, v. 20, n. 2, p. 154-162, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12355-017-0548-0>

HEAL, O.W.; ANDERSON, J.M.; SWIFT, M.J., **Plant litter quality and decomposition: An historical Overview**. In: GADISCH, G.; GILLER, K., Ed. *Nature: plant litter quality and decomposition*, Wallingford, UK: CAB International, p. 332, 1997.

HEIL, J.; VERECKEN, H.; BRÜGGEMANN, N. A review of chemical reactions of nitrification intermediates and their role in nitrogen cycling and nitrogen trace gas formation in soil. **European Journal of Soil Science**, v. 67, n. 1, p. 23-39, 2016. <https://doi.org/10.1111/ejss.12306>

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M.A.; ARAUJO, R.S. Alternative methods of soybean inoculation to overcome adverse conditions at sowing. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 3, p. 2329-2338, 2015. <https://doi.org/10.5897/AJAR2014.8687>

HUNGRIA, M.; CAMPO, R.J.; MENDES, I.C. Fixação biológica de nitrogênio na soja. **Londrina: Embrapa Soja**, 2001. p.48. (Circular técnico/ Embrapa soja, ISSN 1516-7860; n.35).

IBRAIM, M. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in biological nitrogen fixation and nitrogen transfer from legume to companion species. **Journal of stress physiology & biomchemistry**, Irkutsk, v. 17, n.2, p. 121-134, 2021.

IPA– Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco**. 2ª ed. Recife, 2008. 198p.

LALOY, E.; BIELDERS, C.L. Effect of intercropping period management on runoff and erosion in a maize cropping system. **Journal of Environmental Quality**, v. 39, p.1001-1008, 2010. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0239>

- LATATI, M.; BARGAZ, A.; BERLARBI, B.; LAZALI, M.; BENLAHRECH, S.; TELLAH, S.; KACI, G.; DREVON, J.J.; OUNANE, S.M. The intercropping common bean with maize improves the rhizobial efficiency, resource use and grain yield under low phosphorus availability. **European Journal of Agronomy**, v.72, p. 80-90, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.015> 1161-0301
- LI, X.; MU, Y.; CHENG, Y.; LIU, X.; NIAN, H. Effects of intercropping sugarcane and soybean on growth, rhizosphere soil microbes, nitrogen and phosphorus availability. **Acta Physiol Plant**, v. 35, p.1113-1119, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-1148-y>
- LUCA, M.J.; NOGUEIRA, M.A.; HUNGRIA, M. Feasibility of lowering soybean planting density without compromising nitrogen fixation and yield. **Agronomy, Soil & Environmental Quality**, v. 106, n.6, p.2118-2124, 2014. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0234>
- MARINHO, R.C.N.; FERREIRA, L.V.M.; SILVA, A.F.; MARTINS, L.M.V.; NÓBREGA, R.S.A.; FERNANDES JUNIOR, P.I.; Symbiotic and agronomic efficiency of new cowpea rhizobia from Brazilian Semi-Arid. **Bragantia**, v. 76, n. 2, p. 273-281, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.003>
- MORETTI, L.G.; CRUSCIOL, C.A.C.; KURAMAE, E.E.; BOSSOLANI, J.W.; MOREIRA, A.; COSTA, N.R.; ALVES, C.J.; PASCOALOTO, I.M.; RONDINA, A.B.L.; HUNGRIA, M. Effects of growth-promoting bacteria on soybean root activity, plant development, and yield. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 1, p.418-428, 2019. <https://doi.org/10.1002/agj2.20010>
- NARDOTO, G.B.; OMETTO, J.P.H.B.; EHLERINGER, J.R.; BUSTAMANTE, M.M.C.; MARTINELLI, L.A. Understanding the influences of spatial patterns on N availability within the Brazilian Amazon Forest. **Ecosystems**, v.11, n.8, p.1234–1246, 2008. <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9189-1>
- NAVNEET, K.; MAKHAN, S.B.; GURJEET, G. Weed management in sugarcane-canola intercropping systems in northern India. **Field Crops Research**, v. 188, p. 1–9, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.01.009>
- PERIN, J.G.; BERTÉLI, M.B.D.; VALLE, J.S.; LINDE, G.A.; PACCOLA-MEIRELLES, L.D.; COLAUTO, N.B.; BARELLOS, F.G. Characterization of *aapP* and *nopP* genes related to the biological nitrogen fixation efficiency with soybean in contrasting strains of *Bradyrhizobium japonicum*. **Genetics and Molecular Research**, v. 17, n. 1, p. 1-7, 2018. <http://dx.doi.org/10.4238/gmr16039867>
- ROBINSON, N.; BRACKIN, R.; VINALL, K.; SOPER, F.; HOLST, J.; GAMAGE, H.; PAUNGFUO-LONHIENNE, C.; RENNENBERG, H.; LAKSHMANAN, P.; SCHMIDT, S. Nitrate paradigm does not hold up for sugarcane. **Plos One**, v. 6, n. 4, p.1-9, 2011. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019045>
- ROMAN, E.S.; VELLOSO, J.A.R.O. **Controle cultural, coberturas mortas e alelopatia em sistemas conservacionistas**. Plantio direto no Brasil. Passo Fundo, Aldeia Norte, p.77-84, 1993.

SÁ, J.C.M.; LAL, R.; CERRI, C.C.; LORENZ, K.; HUNGRIA, M.; CARVALHO, P.C.F. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, v.98, p.102-112, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.020>

SALAH, A.M.A.; PRASSE, R.; MARSCHNER, B. Intercropping with native perennial plants protects soil of arable fields in semi-arid lands. **Journal of Arid Environments**, v. 130, p. 1-13, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.02.015>

SANTOS, E.L.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C.; VIEIRA, M.J.; BALBINOT JUNIOR, A.A. Chiseling and gypsum application affecting soil physical attributes, root growth and soybean yield. **Revista Ciência Agronômica**, v. 50, n. 4, p. 536-542, 2019. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20190063>

SANTOS, H. G. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3ª Edição, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA Solos, Rio de Janeiro, 2013.

SANTOS, J.F.; GRANGEIRO, J.I.T.; BRITO, L.M.P.; OLIVEIRA, M.M.; OLIVEIRA, M.E.C. Novas variedades de caupi para a microrregião do brejo da Paraíba. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, Frederico Westphalen, v. 3, n. 3, p. 7-12, 2009.

SHEARER, G.; KOHL, D.H. N₂-fixation in field settings: estimations based on natural ¹⁵N abundance. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 13, p. 699-756, 1986. <https://doi.org/10.1071/PP9860699>

SIKIROU, R.; WYDRA, K. Effect of intercropping cowpea with maize or cassava on cowpea bacterial blight and yield. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v. 115, n. 4 p. 145–151, 2008. <https://doi.org/10.1007/BF03356262>

SIMUJI, S.; MUNYINDA, K.L.; LUNGU, O.I.; MWEETWA, A.M.; PHIRI, E. Evaluation of cowpea (*Vigna unguiculata L. walp*) genotypes for biological nitrogen fixation in maize-cowpea crop rotation. **Sustainable Agriculture Research**, v. 8, n. 1, p. 82-93, 2019. <https://doi.org/10.5539/sar.v8n1p82>

SOLANKI, M.K.; WANG, Z.; WANG, F.; LI, C.; LAN, T.; SINGH, R.K.; SINGH, P.; YANG, L.; LI, Y. Intercropping in sugarcane cultivation influenced the soil properties and enhanced the diversity of vital diazotrophic bacteria. **Sugar Tech**, v. 19, p. 136-147, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12355-016-0445-y>

SORATO, R.P.; CRUSCIOL, C.A.C.; COSTA, C.H.M.; FERRARI NETO, J.; CASTRO, G.S.A. Produção, decomposição e ciclagem de nutrientes em resíduos de crotalária e milho, cultivados solteiros e consorciados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 10, p. 1462-1470, 2012.

SREERAMA, Y.N.; SASHIKALA, V.B.; PRATAPE, V.M.; SINGH, V. Nutrients and antinutrients in cowpea and horse gram flours in comparison to chickpea flour: Evaluation of their flour functionality. **Food Chemistry**, v. 131, p. 462-468, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.09.008>

STATSOFT Inc. **Statistica: Data Analysis Software System, Version 7**. StatSoft, Inc., Tulsa, 2004.

THOMAZINI, A.; MENDONÇA, E.S.; SOUZA, J.L.; CARDOSO, I.M.; GARBIN, M.L. Impact of organic no-till vegetables systems on soil organic matter in the Atlantic Forest biome. **Scientia Horticulturae**, v. 182, p. 145-155, 2015.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2014.12.002>

UNKOVICH, M.; HERRIDGE, D.; PEOPLES, M.; CADISCH, G.; BODDEY, R.; GILLER, K.; ALVES, B.; CHALK, P. **Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems**. Canberra: ACIAR, 258p, 2008.

ZAMBROSI, F.C.B. et al. Sugarcane performance under phosphorus deficiency: physiological responses and genotypic variation. **Plant and Soil**, v. 386, n. 1–2, p. 273–283, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2252-0>

ZHANG, Y.; LI, F.; ZHANG, Q.; LI, J.; LIU, Q. Tracing nitrate pollution sources and transformation in surface- and ground-waters using environmental isotopes. **Science of the Total Environment**, v. 490, p. 213-222, 2014.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.004>

ZOTARELLI, L.; ZATORRE, N.P.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; JANTALIA, C.P.; FRANCHINI, J.C.; ALVES, B.J.R. 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**, v. 132, p. 185-195, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.12.013>

**5 Capítulo 3: CONTRIBUIÇÃO DA INOCULAÇÃO DE BACTÉRIAS
PROMOTORAS DE CRESCIMENTO E DO CONSÓRCIO COM
LEGUMINOSAS DE GRÃOS PARA A CANA-DE-AÇÚCAR**

5 Contribuição da inoculação com bactérias promotoras de crescimento e do consórcio com leguminosas para o desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar

RESUMO

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande destaque no setor do agronegócio brasileiro por desempenhar um papel importante na economia e na cultura do país. Para atingir desempenhos produtivos na cana-de-açúcar o uso de adubos nitrogenados é indispensável. No entanto, a busca por tecnologias sustentáveis converge para a manutenção da produtividade com menor impacto ambiental. O uso de adubos verdes em consórcios e utilização de bactérias promotoras de crescimento em plantas (BPCP) possibilitam ganhos produtivos com menor uso de insumos. Sendo assim, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o uso de diferentes leguminosas de grãos em consórcio e o uso de inoculantes com BPCP para minimizar o uso de adubos nitrogenados na cana-de-açúcar. Para isto, foi montado dois experimentos em campo com delineamento em blocos casualizados em um arranjo fatorial. Os tratamentos corresponderam ao consórcio da cana-de-açúcar com diferentes espécies de leguminosas produtoras de grãos (feijão-caupi e amendoim em ambos os experimentos, e também soja, apenas em um dos experimentos) e diferentes fontes de N para a cultura da cana-de-açúcar (inoculação com a estirpe de bactéria diazotrófica IPA CF62, inoculação com o mix de bactérias diazotróficas da Embrapa e fertilizante mineral). Foram incluídos tratamentos controle sem leguminosas consorciadas (cultivo solteiro) e controle sem aplicação de fonte de N no sulco da cana-de-açúcar. Foram avaliados atributos biométricos no decorrer do tempo, contribuições da FBN das BPCP como também da transferência de N pelas leguminosas, produção de biomassa, produtividade agrícola e industrial, além do retorno econômico. Em ambos os experimentos as leguminosas impactaram no desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar por competição por luz e nutrientes. Contribuições da FBN que variaram entre 26,31 a 40,18% foram observados em cultivos com consórcio com feijão-caupi na EECAC. Na usina Miriri não foi possível observar contribuição da FBN. Os inoculantes como também os consórcios contribuíram para obter produções superiores a 60 Mg ha⁻¹ de biomassa aérea total em ambos os experimentos. Na EECAC a produção de biomassa atingiu 73,19 Mg ha⁻¹. As maiores produtividades agrícola foram observados em cultivos solteiros com N, com média de 101,13 Mg ha⁻¹ seguida pelo tratamento inoculado com a estirpe IPACF62 com 85,14 Mg ha⁻¹ no experimento da EECAC. Já Usina Miriri ambos os tratamentos apresentaram a mesma produtividade com média de 84,64 Mg ha⁻¹. Os maiores retornos econômicos foram observados com os cultivos consorciados com amendoim e feijão-caupi. O uso de leguminosas de grãos consorciadas com cana-de-açúcar e o uso da estirpe IPACF62 como inoculante proporcionam ganhos produtivos e econômicos que possibilita ter cultivos mais sustentáveis no setor sucroenergético.

Palavras-chaves: *Saccharum officinarum*, *Arachis hypogaea*, *Vigna unguiculata*, *Glycine max*, abundancia natural do ¹⁵N, retorno econômico.

5 Contribution of inoculation of growth-promoting bacteria and intercropping of grain legumes to sugarcane

ABSTRACT

Sugarcane plays an important role in the the Brazilian economy and culture. , The use of nitrogen fertilizers is essential to achieve high cane productions, but it has an environmental impact and more sustainable technologies are being searched. Green fertilizers and plant growth promoting bacteria (BPCP) may allow high productivity with less impact. Therefore, the objective of this research was to evaluate the use of intercropped grain legumes and inoculants with BPCP to minimize the use of nitrogen fertilizers in sugarcane. Two field experiments were set up with a randomized block design in a factorial arrangement, one at EECAC, Pernambuco and the other at Miriri plantation, Paraíba, treatments corresponding to the intercropping of cowpea and peanuts in both experiments, and also soybeans, in only one of the experiments and four N ftreatments:inoculation with the diazotrophic bacteria strain IPA CF62, inoculation with the mix of diazotrophic bacteria from Embrapa, mineral fertilizer and a control, without fertilizer. Biometric attributes were evaluated over time, contributions of FBN from BPCP as well as N transfer by legumes, biomass production, agricultural and industrial productivity, in addition to economic return. In both experiments, the legumes negatively impacted the initial development of sugarcane, competing for light and nutrients. Biological N fixation contributed with 26 to 40% of the legume N at EECAC, but no BNF was detected at Miriri. The inoculants and the consortia contributed to productivities above 60 Mg ha⁻¹ of total aboveground biomass in both experiments. The single N fertilized cane achieved the highest productivity (101 Mg ha⁻¹) followed by the treatment inoculated with the IPACF62 strain (85 Mg ha⁻¹), ate EECAC. At Usina Miriri, both treatments produced 84 Mg ha⁻¹. The greatest economic returns were obtained intercropping with peanuts and cowpea. The use of grain legumes intercropped with sugarcane and the use of the IPACF62 strain as an inoculant provide more sustainable crop productions in the sugar-energy sector.

Keywords: *Saccharum officinarum*, *Arachis hypogaea*, *Vigna unguiculata*, *Glycine max*, natural ¹⁵N abundance, economic return.

5.1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma cultura de grande destaque no setor agrícola do Brasil e é considerada a principal alternativa para o setor de biocombustível no país, devido ao grande potencial de produção de etanol e derivados (CONAB, 2019). A cana cultivada no Brasil ainda possui grande dependência do uso de fertilizantes, sendo responsável pelo consumo de 14% dos fertilizantes usados na agricultura brasileira, incluindo os fertilizantes nitrogenados (PEREIRA, 2011). Em 2018, aproximadamente 25 milhões de toneladas de fertilizantes foram importadas, sendo 35% correspondentes a adubos nitrogenados (ANDA, 2019; GLOBALFERT, 2019), e, em 2020, as importações tiveram alta de 8,6% em relação ao ano anterior. Com isto, o Brasil é considerado o quarto país com maior consumo de fertilizantes no mundo, atrás somente da China, Índia e EUA (ANDA, 2020).

A exigência da cana-de-açúcar é de aproximadamente 2,1 a 2,4 kg de N por tonelada de colmos (CANTARELLA; ROSSETO, 2010). Essa exigência faz com que o suprimento do N via fertilizante seja um dos itens mais significativos dentro do custo total de produção. Atualmente, no Brasil, são aplicados, em média, 45 kg ha⁻¹ de N na cana planta e 80 kg ha⁻¹ nas socas. Contudo, a fertilização nitrogenada tem baixa eficiência na cultura (em média 44%), com baixo aproveitamento principalmente no ciclo de cana-planta. Nas socas, mesmo sendo mais frequentes as respostas à adubação nitrogenada, as diferenças entre as doses aplicadas e a quantidade de N acumulado pela cultura ainda são expressivas (VITTI et al., 2008; VITTI et al., 2011; SCHULTZ et al., 2012, MARIN, 2014).

Com base nisto, a busca por tecnologias que visem aprimorar a nutrição nitrogenada das culturas vem ganhando mais espaço no âmbito científico. A utilização de inoculantes tem sido uma prática cada vez mais utilizada, na busca de soluções ecologicamente viáveis e sustentáveis, que possuam baixa utilização de insumos e que não comprometam a produção agrícola. Os inoculantes contêm bactérias diazotróficas, com o objetivo de aumentar a quantidade de N na planta que é derivado da atmosfera, e/ou microrganismos que apresentem outros mecanismos de promoção de crescimento em plantas, trazendo benefícios econômicos e ambientais (SÁ et al., 2017). O uso de inoculantes com bactérias promotoras de crescimento em plantas (BPCP) pode garantir uma redução significativa na utilização de insumos agrícolas, mantendo e até mesmo aumentando a produção vegetal (RODRIGUES et al., 2016; MOHAMMADI, 2012).

Consórcios com leguminosas com capacidade de formar simbiose com rizóbios, além de potencializar a ciclagem e liberação de nutrientes como P e K, podem contribuir para a nutrição da cultura principal por meio do aporte de N simbioticamente fixado (WANG et al., 2020; WANG et al., 2014). Benefícios do consórcio com leguminosas na melhoria na disponibilidade de nutrientes do solo e produtividade da cana-de-açúcar têm sido comprovados por diversos autores (He et al. 2018; Geetha et al. 2018), porém as respostas dependem das espécies envolvidas. Por exemplo, na Índia, Geetha et al. (2018) observaram respostas variáveis de espécies consorciadas, mas o consórcio com soja foi capaz de elevar a produtividade de colmos em mais de 60 % em relação à cana em cultivo solteiro. Além da contribuição na produção agrícola e na redução dos impactos ambientais, o uso de tecnologias que potencializem a disponibilidade de nutrientes, reduzindo a dependência de fertilizantes químicos, possui grande potencial de retornos econômicos. Em sistemas de consorciação de diferentes culturas com a cana-de-açúcar na Índia, Kaur et al. (2016) estimaram um ganho econômico que pode chegar a US\$ 1.674,00 ha⁻¹, comparado com o cultivo da cana solteira.

Considerando as razões apontadas, o objetivo deste trabalho foi avaliar o uso de diferentes leguminosas de grãos em consórcio e o uso de inoculantes com BPCP para minimizar o uso de adubos nitrogenados na cana-de-açúcar. Para isto, foram montados dois experimentos em campo, um em Pernambuco e outro na Paraíba.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Descrição e caracterização da área

Foram conduzidos dois experimentos em campo, sendo um na Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC), no município de Carpina, PE, e o outro na Usina Miriri Alimentos e Bioenergia, no município de Rio Tinto, PB. O município de Carpina está localizado na região da Mata Norte de Pernambuco, com altitude de 180 m e com coordenadas geográficas em torno de 7° 51' 04'' S e 35° 14' 27'' W. O clima de Carpina, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo "As", tropical chuvoso com estação seca de verão, precipitação média anual de 1.400 mm (CPRM, 2005) e temperatura média de 24,2 °C (BELTRÃO et al., 2005) e . O município de Rio Tinto está localizado na região do Litoral Norte da Paraíba. O clima, de acordo com a

classificação de Köppen, também é do tipo “As”, mas a temperatura média é de 26 °C e a precipitação média anual é de 1500 mm (Alvares et al., 2013).

A precipitação total ocorrida durante a condução do experimento em Carpina foi de 1125,6 mm, sendo incluídas 4 lâminas de irrigação nos meses mais secos do ano (Figura 1). Em Miriri, a precipitação total ocorrida durante a condução do experimento foi de 2.149 mm e não foi aplicada irrigação (Figura 2).

Figura 1. Regime hídrico (mm) durante a pesquisa de campo na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina- EECAC.

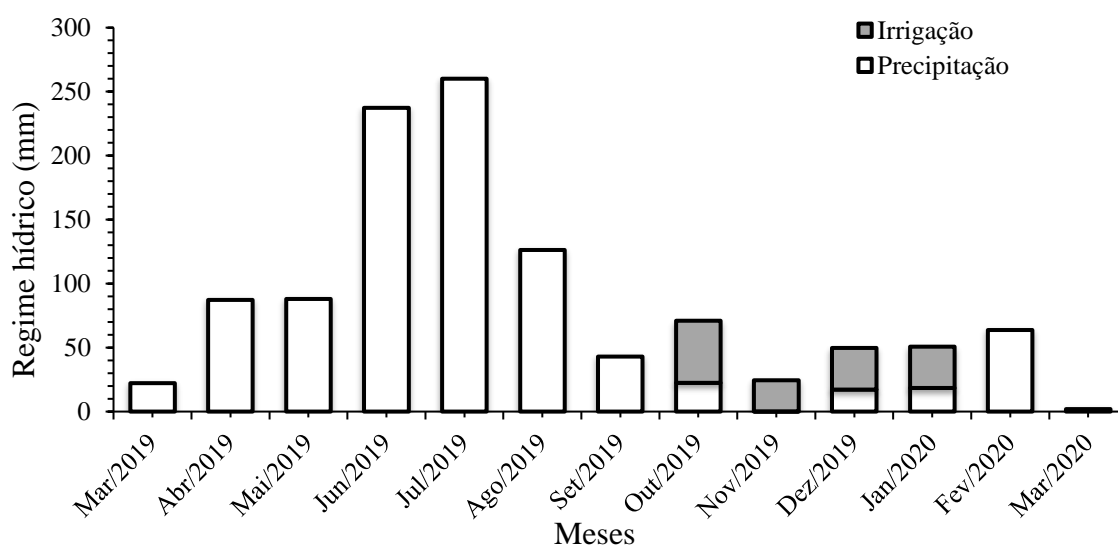
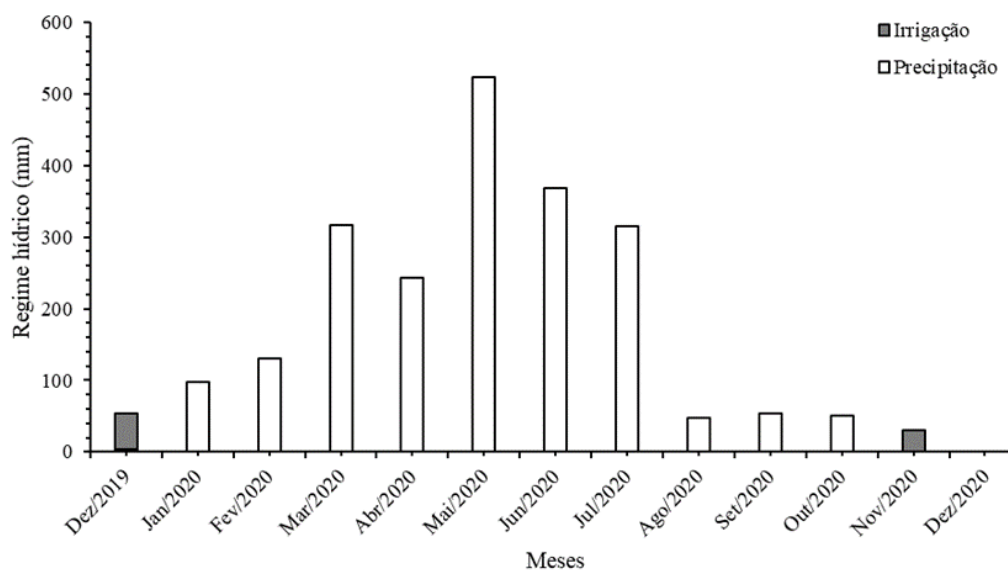


Figura 2. Precipitação pluvial mensal (mm) durante o experimento na Usina Miriri.



5.2.2 Caracterização química e física dos solos das áreas de estudo

O solo da área experimental da EECAC é classificado como ARGISSOLO VERMELHO AMARELO distrocoeso (SANTOS et al., 2013). Foi feita caracterização química e física do solo nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm de profundidade (Tabela 1). A análise química correspondeu ao pH determinado em água (1:2,5); Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} extraídos com KCl 1 mol L^{-1} e determinados por titulação; K^+ e Na^+ extraídos com o extrator Mehlich 1 e determinados por fotometria de chama; P extraído também com o extrator Mehlich1 e determinado por espectrofotometria; carbono orgânico do solo extraído com dicromato de potássio e determinado por titulometria (SILVA et al., 2009). Para determinar as características físicas do solo foram coletadas amostras deformadas na profundidade de 0-20 cm, em zig-zag, com o auxílio do trado. Nas amostras foram realizadas análises de granulometria do solo, quantificando as frações areia, silte e argila pelo método do densímetro, segundo a metodologia da Embrapa (1997).

Tabela 1. Caracterização química e física de amostras de solo da área experimental antes do preparo do solo para plantio

Determinações	Profundidade (cm)			Determinações	Profundidade (cm)		
	0-20	20-40	40-60		0-20	20-40	40-60
pH (H ₂ O)	6,00	5,60	5,50	V (%)	47,06	40,88	24,12
M.O (%)	1,71	1,59	1,50	m (%)	0,00	0,00	0,00
P (mg/dm ³)	14,00	13,00	6,00	Fe (mg/dm ³)	100,76	98,12	125,95
K (cmol _c /dm ³)	0,04	0,02	0,01	Cu (mg/dm ³)	0,36	0,57	0,67
Na (cmol _c /dm ³)	0,02	0,02	0,01	Zn (mg/dm ³)	20,79	26,51	12,21
Al (cmol _c /dm ³)	0,00	0,00	0,00	Mn (mg/dm ³)	10,89	9,13	1,82
Ca (cmol _c /dm ³)	2,30	2,50	0,90	Areia Total (%)	75,10	72,60	73,30
Mg (cmol _c /dm ³)	1,20	0,30	0,70	Areia Grossa (%)	55,02	51,60	56,52
H+Al (cmol _c /dm ³)	4,00	4,10	5,10	Areia Fina (%)	20,04	21,04	16,80
S.B (cmol _c /dm ³)	3,56	2,84	1,62	Silte (%)	8,10	6,40	21,90
CTC (cmol _c /dm ³)	7,56	6,94	6,72	Argila (%)	16,80	21,00	24,80

O solo da área experimental da Usina Mirir é classificado como Argissolo AMARELO distrófico com textura arenosa (Embrapa, 2018). A caracterização química e física do solo (Tabela 2) foi feita nas camadas de 0-30 e 30-60 cm de profundidade, seguindo os mesmos protocolos de amostragem e determinações descritos para a área da EECAC.

Tabela 2. Caracterização química e física de amostras de solo da área experimental antes do preparo do solo para plantio da Usina Miriri

Determinações	Profundidade (cm)		Determinações	Profundidade (cm)	
	0-30	30-60		0-30	30-60
pH (H ₂ O)	6,00	5,60	V (%)	51,79	32,05
M.O (%)	0,86	0,62	m (%)	0,00	0,00
P (mg/dm ³)	5,00	2,00	Fe (mg/dm ³)	32,34	34,65
K (cmol _c /dm ³)	0,02	0,01	Cu (mg/dm ³)	0,62	0,53
Na (cmol _c /dm ³)	0,01	0,00	Zn (mg/dm ³)	5,83	1,54
Al (cmol _c /dm ³)	0,00	0,00	Mn (mg/dm ³)	0,33	0,02
Ca (cmol _c /dm ³)	1,68	1,08	Areia Total (%)	91,00	87,00
Mg (cmol _c /dm ³)	0,22	0,13	Areia Grossa (%)	61,00	51,00
H+Al (cmol _c /dm ³)	1,80	2,60	Areia Fina (%)	30,00	36,00
S.B (cmol _c /dm ³)	1,93	1,23	Silte (%)	1,00	5,00
CTC (cmol _c /dm ³)	3,73	3,83	Argila (%)	8,00	8,00

5.2.3 Desenho experimental e tratamentos aplicados

O experimento conduzido na EECAC seguiu um esquema fatorial 4 x 4 (4 tratamentos relacionados ao consórcio e 4 tratamentos de inoculação da cana com bactérias diazotróficas), com delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. Os sistemas de consórcio consistiram no cultivo da cana-de-açúcar simultaneamente a três espécies de leguminosas produtoras de grãos (feijão-caupi, *Vigna unguiculata* (L.) Walp., variedade IPA 207; amendoim, *Arachis hypogaea* L., variedade BR1; e soja, *Glycine max* (L.) Merr., variedade Monsoy 8372) e mais um controle sem cultivo de leguminosa. O segundo fator correspondeu a diferentes fontes de N para a cultura da cana-de-açúcar: inoculações com as estirpes de bactéria diazotrófica IPA CF62 (*Paenibacillus* sp.) ou com o mix de bactérias diazotróficas da Embrapa (*Gluconacetobacter diazotrophicus* (BR 11281), *Herbaspirillum seropedicae* (BR 11335), *Herbaspirillum rubrisubalbicans* (BR 11504), *Azospirillum amazonense* (BR 11145) e *Burkholderia tropica* (BR 11366), e dois tratamentos sem inoculação, sendo um com adição de N mineral e outro um controle absoluto sem N mineral. Em cada bloco experimental, foram incluídas parcelas extras contendo plantas referências (girassol, mamona e algodão) para estimativa da FBN, tanto nas leguminosas quanto na cana-de-açúcar. O experimento conduzido na Usina Miriri, adotou um desenho experimental

idêntico, porém foi necessário considerar um esquema fatorial 3 x 3, pois a soja não germinou o suficiente para prosseguir com o estudo sobre o efeito da consorciação com a cana.

Em ambos os experimentos, cada parcela experimental foi composta por cinco linhas de cana-de-açúcar plantadas em sulcos, com comprimento de 8 metros e espaçadas em 1,2 m. Dessa forma, a área da parcela foi de 48 m², sendo a área útil delimitada excluindo 1 m de cada extremidade da parcela. As leguminosas foram plantadas em linhas duplas entre as linhas de cana-de-açúcar (Figura 3) no espaçamento de 0,2 x 0,7, 0,08 x 0,5 e 0,2 x 0,6 m para as culturas do amendoim, soja e feijão, respectivamente.

Figura 3: Representação da parcela experimental de diferentes consórcios da cana-de-açúcar.

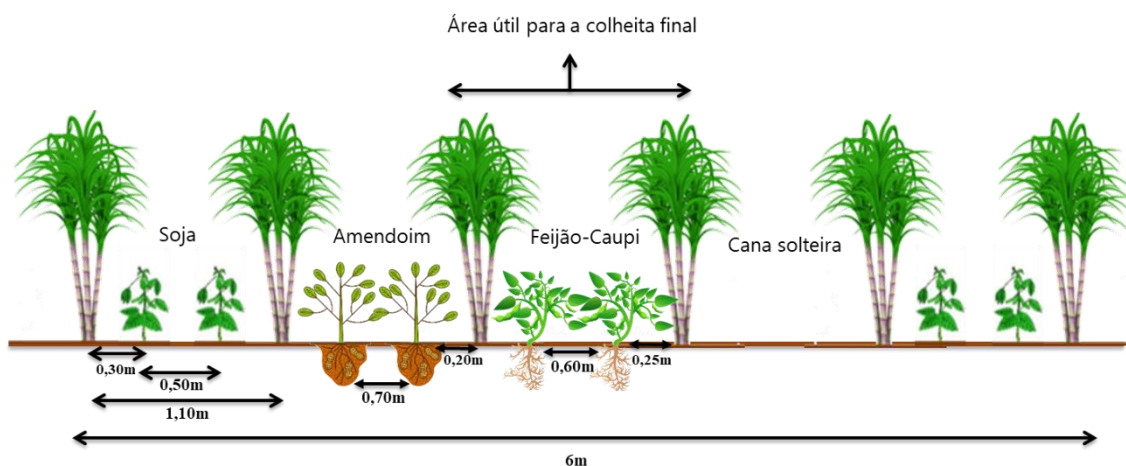
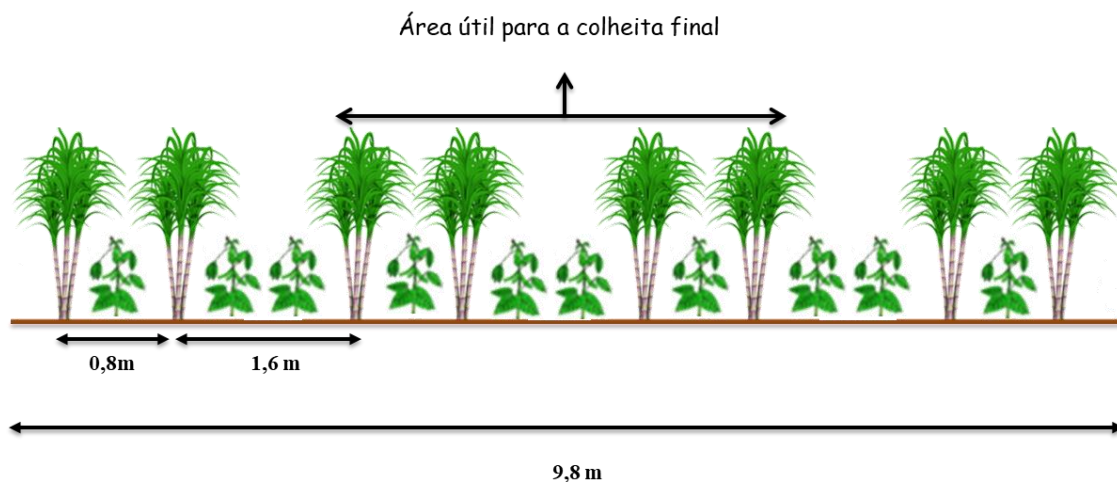


Figura 4: Representação dos espaçamentos nos diferentes tratamentos de consórcio de leguminosas de grãos com a cana-de-açúcar na Usina Miriri.



Antes da implantação do experimento, foi aplicado herbicida para dessecar a socaria remanescente e para facilitar a incorporação de $1,26 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário (PRNT de 77%), quantidade calculada para elevar a saturação de bases para 60%.

Em 23 de março de 2019 foi feito o semeio dos colmos sementes no fundo do sulco de plantio, na EECAC. Foram utilizados rebolos contendo três gemas, totalizados 9 gemas por m de sulco. Após o semeio, foi feita a adubação de plantio no fundo do sulco da cana-de-açúcar, aplicando 80 kg ha^{-1} de K_2O , na forma de cloreto de potássio (KCl) e 30 kg ha^{-1} de P_2O_5 , na forma de superfosfato triplo (SFT). As leguminosas foram plantadas no dia seguinte entre as fileiras plantadas com cana-de-açúcar. Para as leguminosas foram aplicados como adubação de fundação: 40 kg ha^{-1} de K_2O e 30 kg ha^{-1} de P_2O_5 para a cultura do feijão; 60 kg ha^{-1} de K_2O e 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 para a cultura da soja; e 25 kg ha^{-1} de K_2O e 50 kg ha^{-1} de P_2O_5 para a cultura do amendoim. Todas as adubações de fundação seguiram as recomendações de adubação para o estado de Pernambuco (IPA, 2008).

A instalação do experimento da usina Miriri foi iniciada no dia 5 de dezembro de 2019 com o semeio da cana na densidade de 12 gemas por m de sulco. Após o semeio foi feita a adubação de plantio no fundo do sulco da cana-de-açúcar, aplicando 120 kg ha^{-1} de K_2O , na forma de cloreto de potássio (KCl) e 125 kg ha^{-1} de P_2O_5 , na forma de superfosfato triplo (ST). As leguminosas foram plantadas no dia 19 de dezembro de 2019, entre as fileiras plantadas com cana-de-açúcar. Para as leguminosas foram aplicados como adubação de fundação: 40 kg ha^{-1} de K_2O e 30 kg ha^{-1} de P_2O_5 para a cultura do feijão; 60 kg ha^{-1} de K_2O e 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 para a cultura da soja; e 25 kg ha^{-1} de K_2O e 50 kg ha^{-1} de P_2O_5 para a cultura do amendoim. As adubações de fundação seguiram as recomendações de adubação para Pernambuco (IPA, 2008) exceto para a cana-de-açúcar para a qual foi utilizada a recomendação padrão da Usina.

Os inoculantes foram preparados utilizando os isolados descritos acima. Todas as bactérias foram crescidas, separadamente, em Erlenmeyer com meio líquido DYGS (RODRIGUES NETO et al., 1986), em agitador rotatório (200 rpm), por 48 horas a 31°C . Após o crescimento bacteriano, atingindo 10^9 células ml^{-1} , foram inoculadas de forma individualizada em condições assépticas em turfa estéril, conforme Figueiredo et al., (2013), e distribuídas em sacos de polietileno de média densidade (0,04- 0,09 mm). A composição final de cada dose do inoculante foi de 50 mL do crescimento bacteriano misturado a 150 g do veículo turfa totalizando um produto final com 200 g. Ao final, os

inoculantes foram estocados para maturação a temperatura ambiente (28- 30° C) por sete dias. A inoculação foi feita antes do plantio, seguindo a metodologia descrita por Oliveira et al. (2002). Os segmentos de colmo foram colocados em sacos de ráfia e imersos por 60 minutos em reservatórios contendo o inoculante turfoso diluído na proporção de 200 g de inoculante para 30 L de água.

5.2.4 Avaliações biométricas da cana-de-açúcar

Ao longo do cultivo da cana-de-açúcar, foram feitas determinações da altura da planta até a inserção da folha +1 e do diâmetro na base do caule. Para isto, foram selecionadas 10 plantas por parcelas, sendo cinco plantas na primeira linha útil e mais cinco plantas na segunda linha útil. Todas essas plantas foram marcadas para que as determinações fossem repetidas nas mesmas plantas, aos 50, 100, 120, 180, 260 dias após o plantio.

Para a estimativa do incremento da altura e do diâmetro do colmo durante o crescimento da cana-de-açúcar, foi utilizado o modelo de regressão sigmoide $y = a / [1 + \exp(-(x-x_0) / b)]$, no qual “ x_0 ” corresponde ao ponto de inflexão, ou seja, o dia m que ocorre o maior incremento; “ a ” é o maior valor de “ y ” alcançado pelo modelo, ou seja, o valor do maior incremento. Nesse modelo, as fases de incremento foram estimadas pelos seus parâmetros, sendo a primeira fase iniciada no plantio até “ $x_0 - 2b$ ”; a terceira fase iniciada em “ $x_0 + 2b$ ”; e a segunda fase correspondendo ao período entre a primeira e a terceira fase.

5.2.5 Estimativa da FBN na cana-de-açúcar

Aos 120 dias após o plantio foi feita uma amostragem de 10 folhas referências (folha +1) (BODDEY et al. 2001) para avaliação do percentual de nitrogênio derivado da atmosfera (%N_{da}), utilizando o método da abundância natural (SHEARER; KOHL, 1986). As folhas foram colhidas na área útil do experimento (4 linhas centrais) e foram secas em estufa de circulação forçada a 65 °C, moídas em moinho de facas e maceradas até pó fino, e então encaminhadas ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) em Piracicaba, SP Também foram coletadas amostras de espécies não fixadoras para serem utilizadas como plantas referência. As plantas referências utilizadas foram mamona, girassol, algodão e maxixe. O material vegetal coletado (tecido foliar de cana-de-açúcar e plantas referência) foi enviado para determinação dos teores de N total (%) e

das abundâncias naturais de ^{15}N (‰) em espectrômetro de massa Thermo Quest-Finnigan Delta Plus (Finnigan-MAT; CA, USA) com interface com um Analisador Elementar (Carlo Erba model 1110; Milan, Italy), no Laboratório de Ecologia Isotópica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA-USP). Os valores de abundância natural de ^{15}N foram expressos em unidades de “delta” ($\delta^{15}\text{N}$), que representa o desvio por mil, em relação ao N_2 atmosférico, da razão entre as massas de ^{15}N e ^{14}N do nitrogênio contido na amostra:

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

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

O percentual de nitrogênio derivado do ar (%N_{dda}) na cana-de-açúcar foi calculado quando houve diferença significativa entre seus sinais isotópicos e o das espécies referência (girassol, algodão e mamona), utilizando a fórmula descrita por Shearer e Kohl (1986):

$$\%N_{\text{dda}} = [(\delta^{15}\text{N} (\text{referência}) - \delta^{15}\text{N} (\text{fixadora})) / \delta^{15}\text{N} (\text{referência}) - B] \times 100$$

Em que: $\delta^{15}\text{N}$ (referência) é o valor médio dos $\delta^{15}\text{N}$ das plantas referências (girassol, mamona, algodão e maxixe), $\delta^{15}\text{N}$ (fixadora) é o valor dos $\delta^{15}\text{N}$ das leguminosas de grãos e o B é o valor de $\delta^{15}\text{N}$ para plantas fixadoras cultivadas na ausência de N. Foi considerado $B = 0\text{‰}$ (Morais et al. 2012).

5.2.6 Avaliação da transferência do N das leguminosas para a cana-de-açúcar

As transferências de N das leguminosas para a cana-de-açúcar foram avaliadas utilizando a metodologia proposta por Shearer & Kohl (1983) e utilizada por Dias et al. (2007), determinando o percentual de N transferido utilizando a equação:

$$\% \text{ N transferido} = 100 - ((\text{Valor } \delta^{15}\text{N} \text{ da cana em consórcio} \times 100) / \delta^{15}\text{N} \text{ da cana sem o consórcio})$$

As canas-de-açúcar utilizadas como testemunha na equação da transferência de N foram colhidas no tratamento nitrogenado sem consorciação.

5.2.7 Avaliação da produção de biomassa aérea

A produção de biomassa aérea foi avaliada aos 330 dias após o plantio da cana-de-açúcar. Para a avaliação foi coletado todo o material vegetal em um metro linear da segunda linha das parcelas experimentais. O material vegetal foi compartimentado em ponteira, folhas verdes, colmos e folhas secas, conforme descrito por Oliveira et al. (2011). Subamostras foram secas em estufa com ventilação a 65 °C até atingirem massa constante e novamente pesadas para determinação da umidade do material.

A partir do número de perfilhos contabilizados na área útil (2 linhas com 8 metros de comprimento), da biomassa produzida nos compartimentos da planta e da umidade determinada em laboratório, foi calculada a produção de matéria seca (Mg ha^{-1}) de colmo, das demais partes aéreas da planta (folha verde, seca e palmito) e a biomassa total da planta pela soma dos dois compartimentos (que compartimentos?).

5.2.8 Avaliação da produtividade e dos atributos tecnológicos

Para determinação da produtividade foram coletados aos 330 DAP os colmos das plantas contidos na área útil de cada parcela experimental. Após o corte, os colmos foram pesados ainda no campo, com auxílio de dinamômetro digital (precisão de 0,05kg). Com a biomassa fresca de colmos foi possível estimar a produtividade de colmos por hectare (Mg ha^{-1}). Após a pesagem, foram colhidos aleatoriamente dez colmos, que foram encaminhados ao Laboratório e passados empicadora. Deste material foram coletadas subamostras para determinação dos atributos tecnológicos de qualidade da cana-de-açúcar, sendo determinados os sólidos solúveis (°Brix) com auxílio do refratômetro digital, Fibra (FIB %), pureza do caldo (PC) e o açúcar total recuperável (ATR), de acordo com as equações descritas em Fernandes (2003) e Carvalho et al. (2008). A porcentagem de sacarose do caldo (Pol) foi obtida com sacarímetro digital. Pelo produto do PC com a produtividade de colmos, foi calculada a produtividade de açúcar por hectare (TAH).

5.2.9 Análises estatísticas

As variáveis altura da planta, diâmetro do caule, BSPA, produtividade e os atributos tecnológicos foram submetidas a teste de distribuição normal e

homoscedasticidade e quando necessário foram realizadas transformações dos dados para que atendessem às premissas da análise de variância (ANOVA).

A altura da planta e o diâmetro do caule por serem avaliados ao decorrer do tempo foram analisadas a partir do teste de medida repetida no tempo, utilizando o pacote estatístico SAS Learning 2.0, seguindo o procedimento para modelos misto e selecionado o teste de covariância [AR (1), Ante (1), ARH (1), ARMA (1), CS, CSH, HF, TOEP, Lin (1), UN] que apresentou o menor valor do critério de Akaike.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Biometria da cana-de-açúcar no decorrer do tempo

Na EECAC, houve efeitos significativos da interação entre consórcio, fonte de N e tempo (Tabela 3) sobre a estatura média dos colmos (EMC) e o perfilhamento. Já para o diâmetro médio dos colmos (DMC) foram observados efeitos isolados da fonte de N e da interação do consórcio com o tempo (Tabela 3). Os modelos de Akaike para medida repetida no tempo ajustada para cada variável corresponderam a Heterogeneous Autoregressive (ARH 1), Unstructured Corrs (UNR) e (ANTE 1) para as variáveis EMC, DMC e perfilhamento, respectivamente (Tabela 3).

Tabela 3. Análise de variância (ANOVA) de altura e diâmetro de cana-de-açúcar no decorrer do tempo na EECAC.

ANOVA	
Altura média dos colmos (EMC)	
Consórcio	19,81***
Fonte	18,61***
Tempo	1544,69***
Consórcio x Tempo	12,79***
Consórcio x Fonte	1,17ns
Fonte x Tempo	6,23***
Consórcio x Fonte x Tempo	1,57**
AIC	1749,70
Modelo	ARH (1)
Diâmetro médio dos colmos (DMC)	
Consórcio	5,87***
Fonte	8,69***
Tempo	3491,16***
Consorcio x Tempo	18,38***
Consorcio x Fonte	0,72 ^{ns}
Fonte x Tempo	1,87*
Consórcio x Fonte x Tempo	0,92 ^{ns}
AIC	-759,90
Modelo	UNR
Perfilamento	
Consórcio	6,59***
Fonte	2,07 ^{ns}
Tempo	491,21***
Consórcio x Tempo	13,99***
Consórcio x Fonte	1,13 ^{ns}
Fonte x Tempo	1,47ns
Consórcio x Fonte x Tempo	1,67***
AIC	987,00
Modelo	ANTE (1)

Os dados utilizados foram transformados pela potência de 0,1; ^{ns} não significativo, *, ** e ***, significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade. AIC: Critério de Informação de Akaike- ARH (1): Heterogeneous Autoregressive.; UNR: Unstructured Corrs; ANTE (1):

Para altura média dos colmos houve efeito da interação entre os consórcios, as fontes de N e o tempo. O comportamento do crescimento do colmo ajustou-se ao modelo sigmoide de crescimento vegetal (Figura 4), com suas três fases de desenvolvimento vegetativo (Tabela 4).

Figura 4. Altura dos Colmos-EMC de cana-de-açúcar em consórcios com (soja (A), amendoim (B), feijão-caupi (C) e sem consórcio (cana solteira, D) e com diferentes fontes de N (IPACF62 (E), Mix Embrapa (F), sem N (G) e com N (H) na EECAC. (Não dá para ler as equações e os eixos).

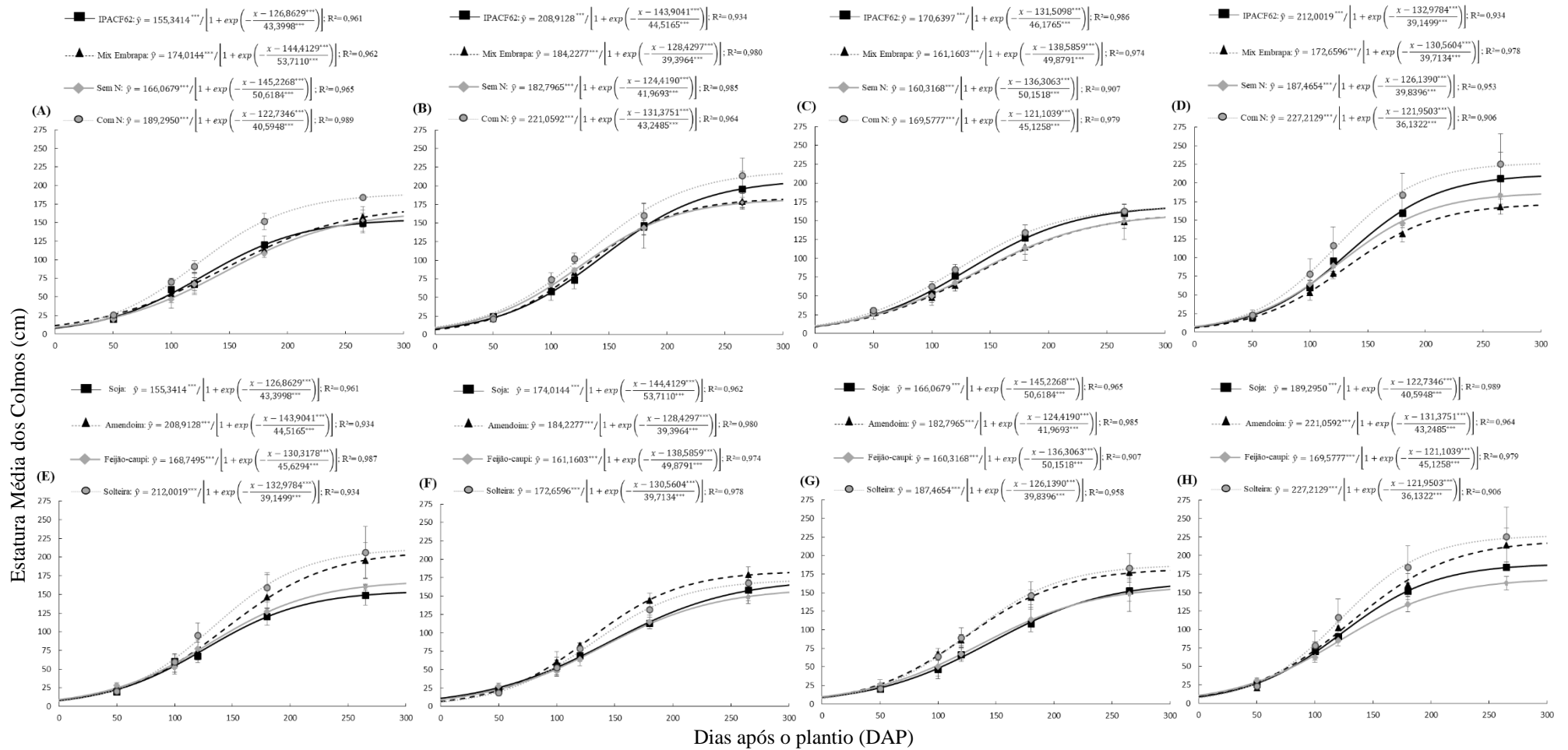


Tabela 4. Distribuição das fases de desenvolvimento e incremento na altura da cana-de-açúcar, em consórcios com leguminosas de grãos e com aplicação de diferentes fontes de N (dois inoculantes, N mineral e sem N).

Tratamento	<i>Altura média dos colmos</i>										
	1ª Fase			2ª fase			Maior incremento		3ª fase		
	Dias	cm	%	Dias	Cm	%	Dias	cm dia ⁻¹	Dias	cm	%
Soja e IPACF62	40	18,49	12,40	174	118,08	79,17	127	0,89	51	12,58	8,43
Soja e Mix Embrapa	37	20,74	13,18	215	132,24	84,05	144	0,80	13	4,36	2,77
Soja e Sem N	44	19,80	13,04	202	126,65	83,42	145	0,82	19	5,37	3,54
Soja e Com N	42	22,79	12,40	162	103,67	56,41	123	1,16	61	57,31	31,19
Amendoim e IPACF62	55	24,96	12,73	178	158,58	80,91	144	1,17	32	12,46	6,36
Amendoim e Mix Embrapa	50	22,13	12,39	158	140,03	78,39	128	1,16	58	16,48	9,23
Amendoim e Sem N	40	21,57	12,21	168	139,27	78,87	124	1,08	57	15,75	8,92
Amendoim e Com N	45	26,41	12,49	173	168,36	79,63	132	1,27	47	16,66	7,88
Feijão e IPACF62	39	20,28	12,55	185	130,06	80,46	132	0,92	41	11,31	7,00
Feijão e Mix Embrapa	39	19,27	12,91	200	122,56	82,08	139	0,80	27	7,48	5,01
Feijão e Sem N	36	19,11	12,84	201	121,89	81,88	136	0,79	28	7,87	5,29
Feijão e Com N	31	20,27	12,45	181	128,95	79,18	121	0,93	54	13,64	8,38
Solteira e IPACF62	55	25,45	12,42	157	161,12	78,61	133	1,35	54	18,39	8,97
Solteira e Mix Embrapa	51	20,52	12,29	159	131,10	78,50	131	1,08	55	15,38	9,21
Solteira e Sem N	46	22,12	12,16	159	142,59	78,39	126	1,17	59	17,18	9,45
Solteira e Com N	50	27,29	12,24	145	172,69	77,46	122	1,57	71	22,97	10,30

A primeira fase de desenvolvimento vegetal com relação a altura correspondeu a um período de baixo crescimento, quando ocorre a fase de perfilhamento. O alongamento correspondeu a menos de 13% da altura final e durou de 36 a 50 dias (Figura 4 e Tabela 4).

A cana-de-açúcar consorciada com o feijão-caupi teve a primeira fase de desenvolvimento com período mais curto devido ao alongamento pela competição por luz entre as duas culturas intercaladas (Tabela 4). Com isto, observou-se maior alongamento da planta, em busca por luz, até os 50 dias (50 dias é a mais curta??), período este que correspondeu a permanência da cultura do feijão-caupi intercalada com a cana-de-açúcar. Competição por luz também parece ter ocorrido no consórcio com soja e, em ambos os consórcios levou às menores alturas no final do ciclo (Figura 4 A e C).

A segunda fase de desenvolvimento caracterizou-se pelo maior crescimento, correspondendo, em média, a 79% da altura final e durando de 155 a 191 (Tabela 4). Destacaram-se os tratamentos do consórcio da cana com o amendoim e da cana solteira adubada com N, que cresceram 173 e 168 cm, respectivamente, com incrementos de 67 e 34% da cana solteira com N em relação aos consórcios com soja e feijão-caupi com N, respectivamente (Tabela 4 e figura 4 D e H) e de 60 e 31%.

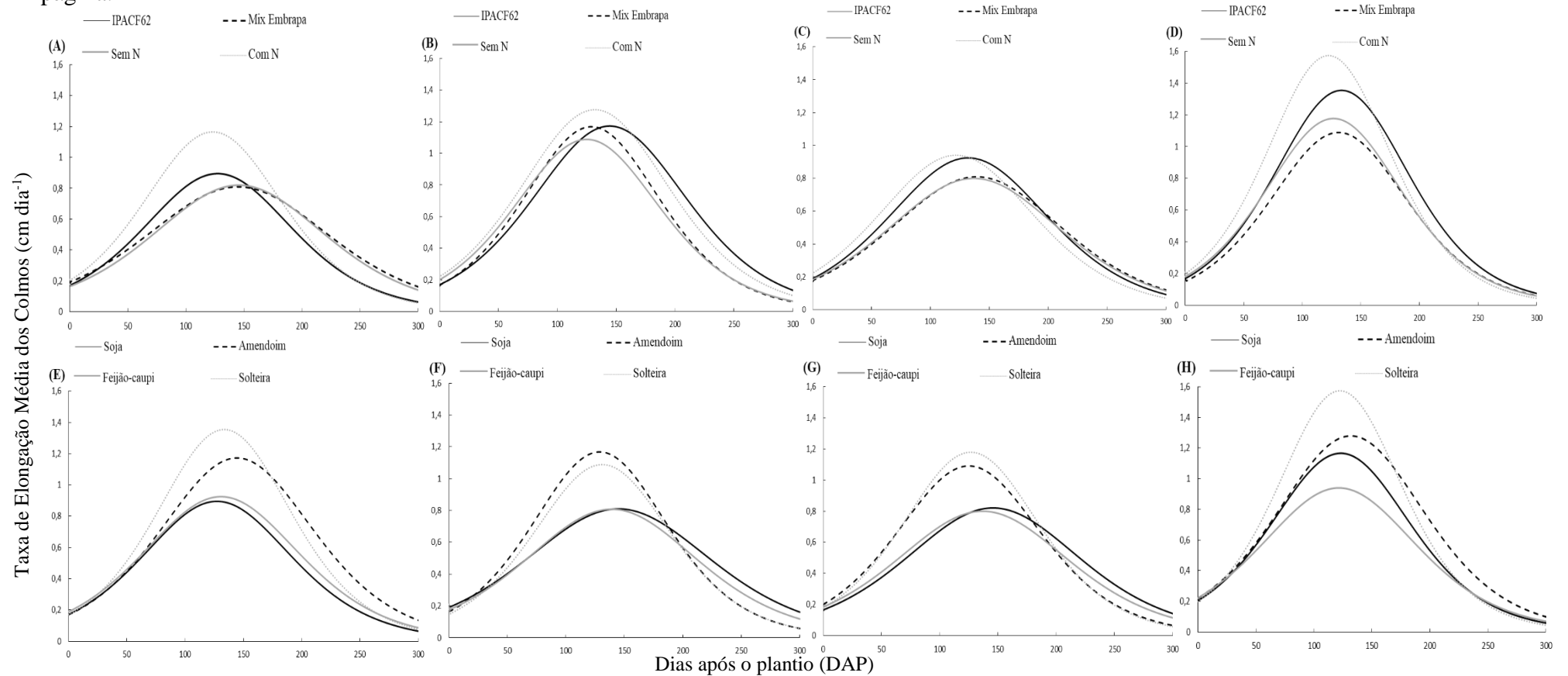
A competição por luz fez com que os tratamentos com soja e feijão retomassem o perfilhamento no período em que era para estarem em pleno desenvolvimento (GRAZECORCORAN et al., 2020). A espécie com o crescimento mais rápido, como a soja e o feijão-caupi, impacta a cultura intercalada, sombreando a cana-de-açúcar. Efeitos negativos da consorciação na produção de grãos de milho foram vistos por Khonde et al. (2018); no entanto, sistemas de consórcio podem ser mais lucrativos do que os cultivos solteiros por existirem novas fontes de renda para o produtor.

A terceira fase de desenvolvimento vegetal é caracterizada pelo período de maturação da cultura, que, no caso da cana-de-açúcar, consiste em acúmulo de açúcares no colmo. Nesta fase, o incremento em altura volta a diminuir, sendo as médias equivalentes a 16 cm e a duração média de 45 dias (Tabela 4). Os tratamentos nitrogenados e a inoculação da cana solteira com a estirpe IPACF62 destacaram-se por apresentarem no final do ciclo maiores ganhos em altura (Tabela 4, Figura 4 A, B, C e D).

A curva de altura identifica as maiores taxas de incremento para a cana solteira e o consórcio com amendoim, correspondendo a uma média de 1,29 e 1,17 cm dia⁻¹ aos 128 e 132 dias, respectivamente (Tabela 4, Figura 5 B, D, E, F, G e H). Em ambos os

tratamentos, a inoculação com a estirpe IPACF62 e a adubação nitrogenada levaram às maiores taxas de acúmulo (Tabela 4, Figura 5 A, B, C, D). Já os consórcios com soja e feijão não ultrapassaram acúmulos de 1 cm dia^{-1} (Tabela 4, Figura 5 A, C, E, F, G e H).

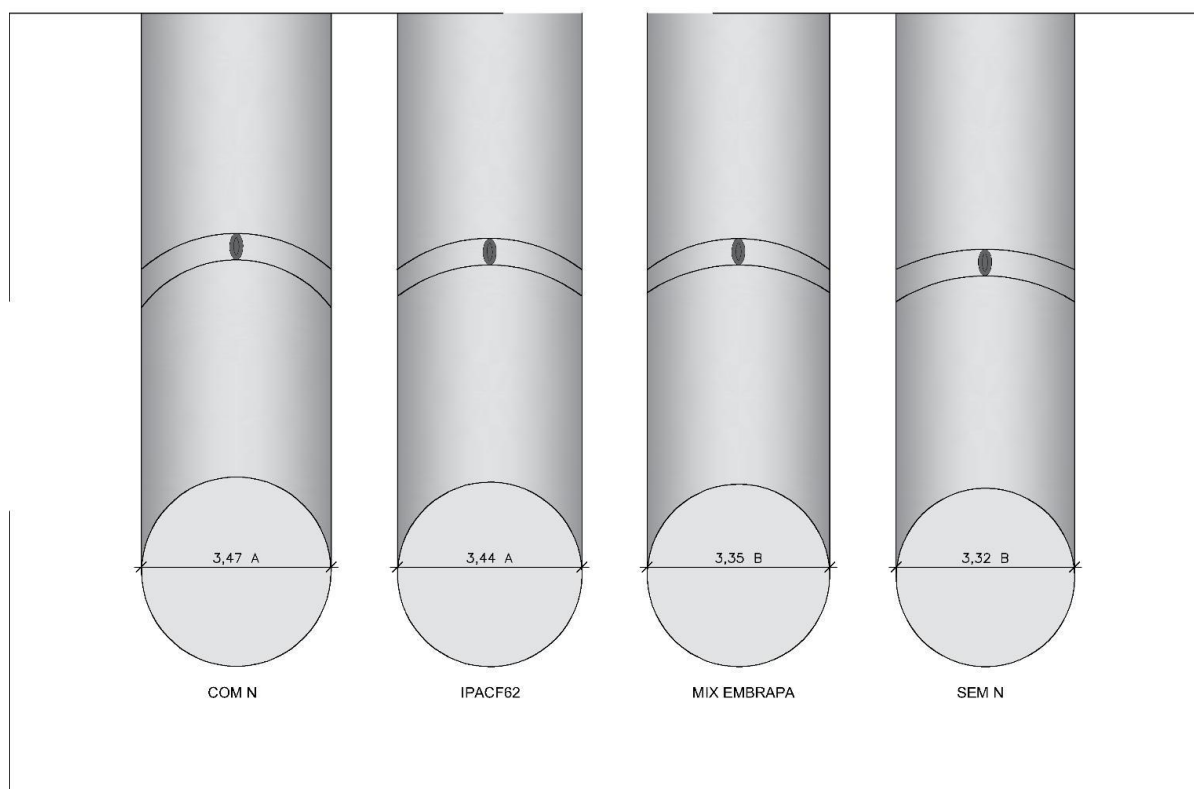
Figura 5. Taxa de alongação média dos colmos (TEMC, cm dia^{-1}) da cana-de-açúcar em consórcios comsoja (A), amendoim (B) e feijão-caupi (C) e da cana solteira (D), com diferentes fontes de N (IPACF62 (E), Mix Embrapa (F), sem N (G) e com N (H) Adaptar a figura ao tamanho da página.



5.3.1.2 Diâmetro médio dos colmos

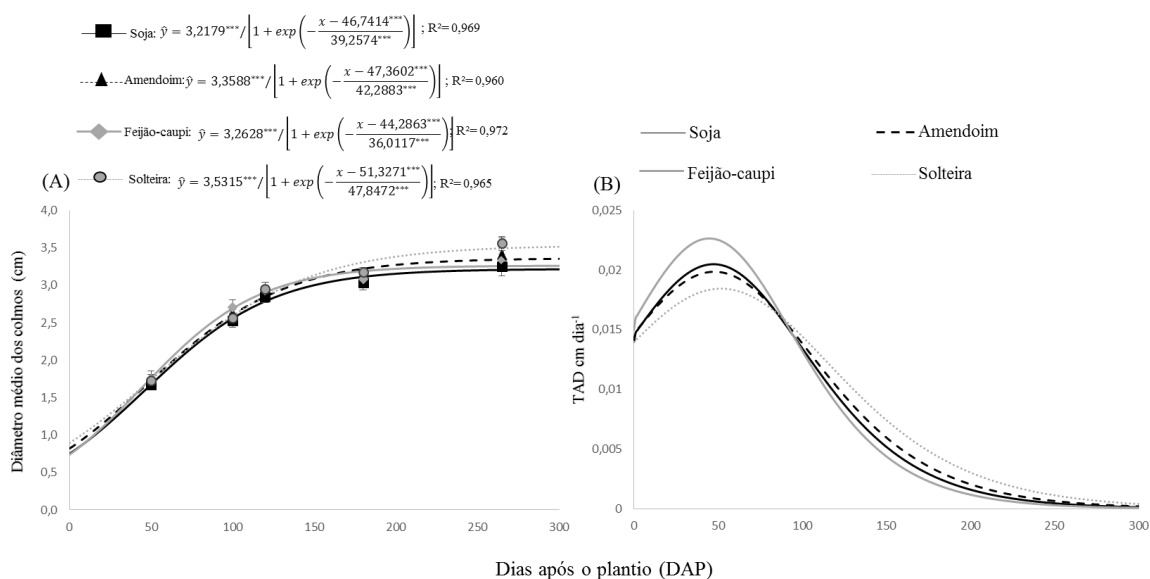
Houve efeito isolado da fonte de N e da interação entre consórcio e tempo para o diâmetro médio dos colmos (Tabela 3). O maior diâmetro (3,47 cm) ocorreu no tratamento com N, seguido pelo tratamento com inoculação da estirpe IPACF62, ambos superiores aos tratamentos com inoculação do mix da Embrapa e sem N, mostrando assim a importância de uma estirpe adaptada à região (Figura 6).

Figura 6. Diâmetro (cm) da cana-de-açúcar sob efeito de diferentes fontes de N cultivada na EECAC. Médias seguidas da mesma letra, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



O modelo que mais se ajustou ao comportamento no incremento no diâmetro foi o sigmoidal (Figura 7 A). Os tratamentos com a cana solteira seguido pelo cultivo consorciado com amendoim tiveram os maiores diâmetros, entre 3,0 e 3,5 cm (Figura 7 A). No entanto, a maior taxa de aumento do diâmetro (TAD) foi observada no consorciado com o feijão-caupi, com valor superior a $0,023 \text{ cm dia}^{-1}$ aos 48 dias (Figura 7 B).

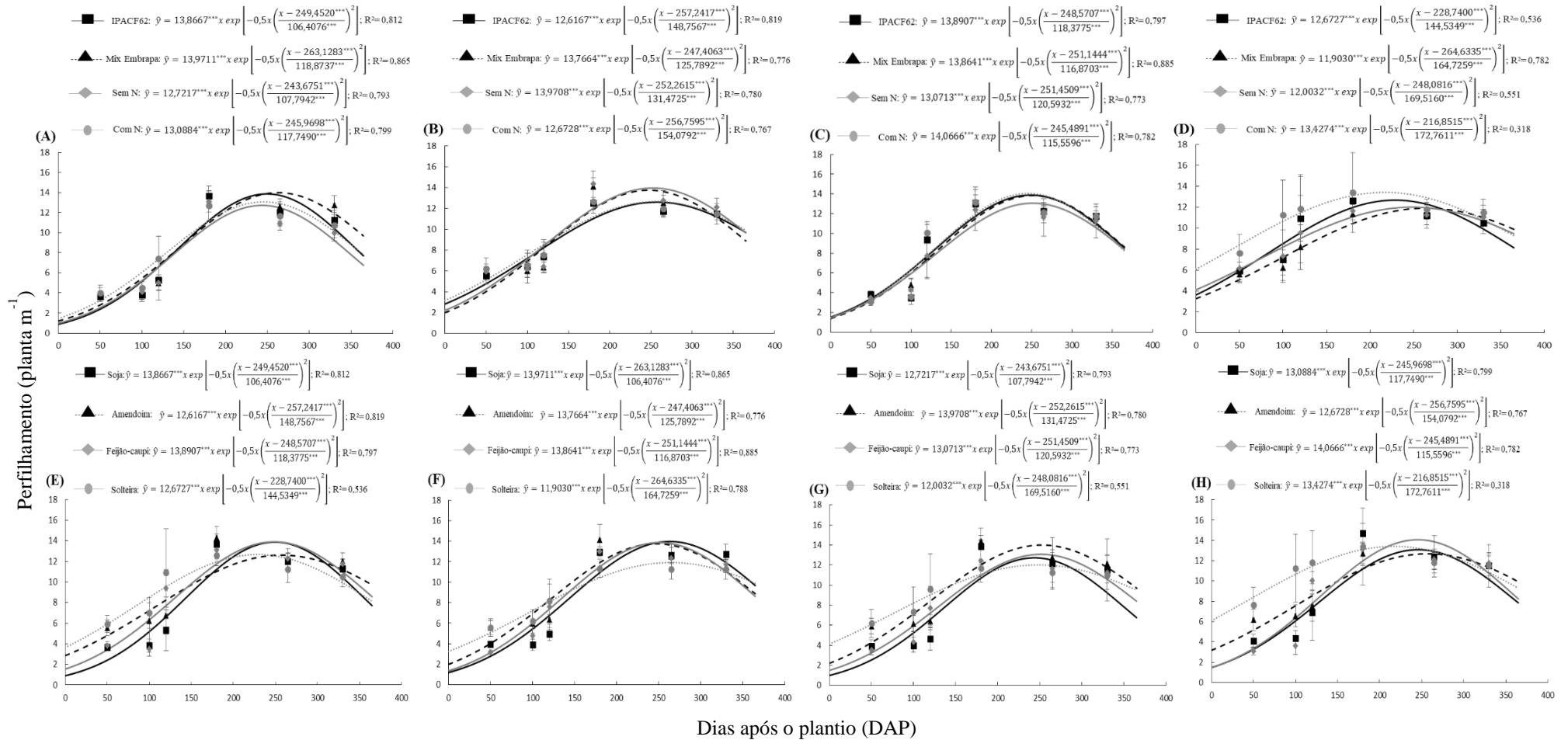
Figura 7. Curva de aumento do diâmetro (A) e taxa do aumento do diâmetro (B) do colmo na cana-de-açúcar sob efeito dos diferentes consórcios, na EECAC.



5.3.1.3 Perfilhamento da cana-de-açúcar

Para o perfilhamento, houve efeito da interação tripla entre os consórcios, fonte de N e o tempo (Tabela 2). O modelo que se ajustou aos parâmetros também foi o sigmoidal (Figura 8). Os tratamentos com a cana solteira e consórcio com amendoim tiveram os maiores números de perfilhos nas fases iniciais e finais do desenvolvimento da cultura (Figura 8 E, F, G e H). Com a adubação nitrogenada, o consórcio com feijão-caupi iniciou com o menor perfilhamento, devido a competição por luz, mas, ao final do ciclo, as plantas tiveram os maiores números de perfilhos, cerca de 14 perfilhos por m de sulco (Figura 8 H). Quando a cana foi cultivada sem consórcio, os tratamentos que obtiveram mais perfilhos foram a adubação nitrogenada, com média de 13,4 plantas m^{-1} , e a inoculação com IPACF62, com 12,6 plantas m^{-1} aos 180 dias (Figura 8 D). No final do ciclo, aos 330 dias, os tratamentos assemelharam-se em perfilhos por metro, destacando-se o tratamento nitrogenado, com 11,5 plantas m^{-1} , seguido pela mix da Embrapa com 11,25 plantas m^{-1} (Figura 8 D).

Figura 8. Perfilamento da cana-de-açúcar em relação consorciada com soja (A), amendoim (B), feijão-caupi (C) e cana solteira (D), com diferentes fontes de N (IPACF62 (E), Mix Embrapa (F), sem N (G) e com N (H)).



5.3.2 Estimativa da contribuição do N atmosférico para a cana-de-açúcar

Nos sistemas de cultivo consorciados, a cana-de-açúcar pode absorver N do solo; do fertilizante (nos tratamentos com adubação nitrogenada); da atmosfera, por meio da associação com bactérias diazotróficas endofíticas ou epifíticas; ou por meio de transferência de N entre as espécies, que pode ocorrer por meio da decomposição dos restos culturais das leguminosas, pela decomposição de nódulos e raízes, pela exsudação de compostos pelas raízes e por meio da rede de micorrizas (CHALK et al., 2014; PEOPLES, et. al., 2015; IBRAIM, 2021). Embora diversas estimativas da FBN em cana-de-açúcar e de transferência de N entre espécies estejam disponíveis na literatura, os casos de espécies com potencial de FBN precisam ser analisados com cuidado, de modo a separar o N possivelmente fixado e o N possivelmente transferido.

Na EECAC, a composição isotópica de N da cana-de-açúcar só diferiu da média das espécies referências quando em consórcio com feijão-caupi (Tabela 5), tanto para a cana inoculada (estirpes IPACF62 e mix da Embrapa) como para o tratamento sem adubação nitrogenada. Assim, a contribuição da FBN para a cana, seja por fixação própria ou por transferência de N fixado no feijão-caupi variou entre 25 e 40 % do N total nas canas (Tabela 6), sendo o tratamento que recebeu inoculação com mix da Embrapa o que teve a maior contribuição (Tabela 6).

Tabela 5. Valores isotópicos $\delta^{15}\text{N}$ (‰), teor de N (%), ^{13}C (‰), teor de carbono (%) e relação C/N de folhas +3 de cana-de-açúcar cultivadas em diferentes consórcios com leguminosas de grãos e fonte de N, na EECAC.

Tratamento	^{15}N	%N	^{13}C	%C	C/N
Soja + IPACF62	4,78 abcd	1,60 ab	-12,32 abc	45,35	28,74 abc
Soja + mix Embrapa	4,79 abcd	1,59 ab	-12,71 abc	44,33	28,04 abc
Soja + sem N	4,89 abcd	1,43 b	-12,90 abc	44,65	31,56 a
Soja + com N	4,57 abcd	1,52 ab	-12,67 abc	45,06	30,51 ab
Amendoim + IPACF62	4,77 abcd	1,77 ab	-13,11 bc	44,91	26,29 abc
Amendoim + mix Embrapa	4,74 abcd	1,52 ab	-13,31 c	45,17	29,92 abc
Amendoim + sem N	5,06 abc	1,52 ab	-12,75 abc	45,03	29,80 abc
Amendoim + com N	5,90 a	1,82 ab	-11,83 abc	43,81	24,09 bc
Feijão-caupi + IPACF62	4,00 cd	1,91 a	-12,66 abc	44,32	23,17 c
Feijão-caupi + mix Embrapa	3,32 d	1,86 ab	-12,17 abc	44,27	23,79 bc
Feijão-caupi + sem N	3,71 cd	1,82 ab	-12,36 abc	44,12	24,43 abc
Feijão-caupi + com N	5,28 abc	1,84 ab	-12,01 abc	44,23	23,99 bc
Solteira + IPACF62	4,80 abcd	1,61 ab	-11,31 a	44,48	27,57 abc
Solteira + mix Embrapa	4,73 abcd	1,56 ab	-11,44 ab	44,18	28,47 abc
Solteira + sem N	4,65 abcd	1,62 ab	-12,04 abc	44,23	27,32 abc
Solteira + com N	5,62 ab	1,75 ab	-12,03 abc	44,13	25,13 abc
Referências	5,55 ab	-	-	-	-
F	3,62***	3,03***	2,85***	1,84*	3,68***
CV	14,51	10,28	5,43	1,49	10,39

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

Tabela 6. Nitrogênio derivado da atmosfera-N_{dda} (%) na cana-de-açúcar cultivada em consórcio com feijão-caupi e inoculada com diferentes estirpes de bactérias promotoras de crescimento ou sem inoculação, na EECAC.

Tratamento	N _{dda} (%)
Feijão-caupi+ IPACF62	26,3
Feijão-caupi +mix Embrapa	40,2
Feijão-caupi + sem N	33,2

Tabela 7. $\delta^{15}\text{N}$ (‰) em folhas de cana-de-açúcar cultivadas em consórcios com leguminosas de grãos e transferência de N (%) da fixação biológica de N das leguminosas para a cultura da cana-de-açúcar, na EECAC.

Tratamento	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	N transferido (%)
Cana com N	5,62 a	
Cana Sem N	4,64 ab	
Cana + soja	4,89 ab	
Cana + amendoim	5,06 ab	
Cana + feijão-Caupi	3,71 b	33,88
F		
Tratamento	4,26**	
CV	14,13	

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

A transferência de N das leguminosas para a cultura da cana-de-açúcar só parece ter ocorrido no tratamento consorciado com feijão-caupi com contribuição de 34% (Tabela 7). O feijão-caupi por ter tido uma grande produção de biomassa e grande proporção de N derivado da FBN (Tabela 4 do capítulo 2), possibilitou a transferência do N para a cana-de-açúcar.

A ciclagem de nutrientes, principalmente o N que é oriundo da FBN, possibilita a manutenção da agricultura considerada de baixo carbono (THOMAZINI et al., 2015; SÁ et al., 2017). Consórcio ou rotação de culturas com leguminosas possibilitam ganhos expressivos em culturas como a cana-de-açúcar (HE et al., 2018; GEETHA et al., 2018).

Não houve diferença significativa na composição isotópica do N das folhas das espécies referências a das folhas da cana-de-açúcar cultivada na usina Miriri (Tabela 8), não sendo possível fazer estimativas da FBN ou de transferência de N. Alguns fatores podem estar relacionados com a dificuldade de observar a FBN em ambientes tropicais, sendo um deles o baixo valor isotópico no solo, que está relacionado com o clima chuvoso e com suas características físicas e químicas. Além disso, em vários locais a cana-de-açúcar não mostra evidência de FBN (BIGGS et al., 2002; KURDALY, 2009).

Tabela 8. Valores isotópicos $\delta^{15}\text{N}$ (‰) de folhas +3 de cana-de-açúcar cultivadas com diferentes consórcios com leguminosas de grãos e fonte de N, na Usina Miriri.

Tratamento	^{15}N
Amendoim + IPACF62	5,25 ab
Amendoim + mix Embrapa	5,88 ab
Amendoim + sem N	4,44 bc
Amendoim + com N	5,45 ab
Feijão-caupi + IPACF62	5,10 abc
Feijão-caupi + mix Embrapa	5,11 abc
Feijão-caupi + sem N	5,03 abc
Feijão-caupi + com N	6,55 a
Solteira + IPACF62	5,77 ab
Solteira + mix Embrapa	5,03 abc
Solteira + sem N	6,49 a
Solteira + com N	6,36 ab
Referências	3,20 c
F	5,45***
CV	14,58

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

5.3.3 Biomassa aérea da cana-de-açúcar aos 335 DAP

A cana solteira com N, que pode ser considerado o sistema padrão utilizado para a cultura, teve a maior produtividade de colmos (56 Mg ha^{-1}). Essa produtividade foi mais que o dobro da cana com fertilizante consorciada com a soja ou com o feijão-caupi, mas não diferiu da cana com fertilizante e consorciada com o amendoim (Tabela 9). Para o cultivo da cana sem fertilizante químico, as maiores produtividades de colmo foram obtidas nas plantas em consórcio com amendoim e inoculadas com a estirpe IPACF62 ($45,2 \text{ Mg ha}^{-1}$), em consórcio com o feijão-caupi e inoculadas com o mix de bactérias da Embrapa ($42,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) e pela cana solteira inoculada com a estirpe IPACF62 ($44,6 \text{ Mg ha}^{-1}$), cujas produtividades equivaleram a 80, 76 e 79% da produção do tratamento padrão, respectivamente. A menor produtividade de colmos foi observada para a cana em consórcio com a soja e sem fertilizante químico (11 Mg ha^{-1}). Essa menor produtividade pode estar relacionada com a competição por nutrientes e luz entre as plantas intercaladas (GRAZE-CORCORAN et al., 2020), uma vez que a aplicação de fertilizante químico ou as inoculações não aumentaram a produtividade da cana consorciada com a soja.

Tabela 9. Matéria seca dos compartimentos da parte aérea da cana-de-açúcar consorciada com diferentes leguminosas e com diferentes fontes de N, aos 335 DAP, na EECAC.

Biomassa do colmo (Mg ha⁻¹)					
Consórcios	Fonte de N				Média
	IPACF62	Mix Embrapa	Sem N	Com N	
Soja	22,34 Ab	25,19 Aa	11,19 Ab	28,32 Ab	21,76
Amendoim	45,35 Aa	34,4 Aa	31,4 Aab	35,64 Aab	36,70
Feijão-caupi	28,62 Aa	42,51 Aa	26,72 Aab	26,59 Ab	31,11
Solteira	44,65 ABa	36,53 ABa	35,58 Ba	56,23 Aa	43,25
Média	35,24	34,66	26,22	36,70	
F					
Consórcios					18,36***
Fonte de N					4,96***
Cons. x Fonte					2,82**
CV					25,58
Biomassa de folhas secas (Mg ha⁻¹)					
Soja	6,99 Aa	9,67 Aa	5,84 Ab	8,78 Aab	7,82
Amendoim	8,86 Aa	9,01 Aa	6,93 Aab	9,29 Aab	8,52
Feijão-caupi	8,71 Aa	11,81 Aa	11,28 Aa	7,81 Ab	9,90
Solteira	9,26 Aa	10,18 Aa	9,60 Aab	12,57 Aa	10,40
Média	8,46	10,17	8,41	9,61	
F					
Consórcios					6,69***
Fonte de N					3,53**
Cons. x Fonte					2,76**
CV					20,21
Biomassa de folhas verdes + palmito (Mg ha⁻¹)					
Soja	3,85 Aab	4,44 Aa	4,05 Aab	3,55 Aa	3,97
Amendoim	4,01 ABab	5,15 Aa	5,58 Aa	2,82 Ba	4,39
Feijão-caupi	2,82 Bb	6,00 Aa	3,25 Bb	4,46 ABa	4,13
Solteira	4,93 Aa	4,76 Aa	2,54 Bb	4,40 ABa	4,16
Média	3,90	5,09	3,86	3,81	
F					
Consórcios					0,78 ^{ns}
Fonte de N					10,22***
Cons. x Fonte					7,56***
CV					18,56

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

A massa de folhas secas (Tabela 9) também foi maior nas canas com o tratamento padrão ($12,57 \text{ Mg ha}^{-1}$) e menor nas plantas em consórcio com soja e sem fertilizante mineral ($5,84 \text{ Mg ha}^{-1}$). Nas canas inoculadas com o mix da Embrapa também foram observadas massas elevadas de folhas secas, quando as plantas foram cultivadas solteiras ou consorciadas com feijão-caupi (Tabela 9). No consórcio com feijão-caupi + mix da Embrapa também houve a maior produção de folhas verdes ($6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$), seguido pelos consórcios com amendoim sem adubação nitrogenada e cana solteira inoculada com a estirpe IPAF62, com médias de $5,58$ e $4,93 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente. A maior produção de biomassa de folhas verde e do palmito pode ter relação com a capacidade da planta continuar com o processo de crescimento vegetal, ou seja, são indicativos de continuidade do desenvolvimento vegetativo.

As produções totais de biomassa da parte aérea refletem as biomassas parciais (Tabela 10), já que são mais influenciadas pela biomassa dos colmos e as proporções dos componentes não variaram muito. As maiores produtividades foram as das plantas solteiras com fertilizante mineral, quase o dobro das plantas com fertilizante e consorciadas com o feijão-caupi. Entre as plantas do controle sem fertilizante, as cultivadas sem consórcio produziram mais que o dobro das consorciadas com a soja, mas sem diferença com o consórcio com feijão-caupi ou amendoim. Quando em consórcio com o feijão-caupi, a cana inoculada com as bactérias do mix da Embrapa produziu mais biomassa total que as plantas com fertilizante nitrogenado.

Tabela 10. Matéria seca total da parte aérea da cana-de-açúcar (Mg ha^{-1}) consorciada com diferentes leguminosas e com diferentes fontes de N, aos 335 DAP, na EECAC..

Consórcios	Fonte de N				Média
	IPACF62	Mix Embrapa	Sem N	Com N	
Soja	33,18 Aa	39,3 Aa	21,08 Ab	40,65 Ab	33,55
Amendoim	58,22 Aa	48,56 Aa	43,91 Aab	47,74 Aab	49,61
Feijão-caupi	40,16Aa	60,32 Aa	41,25 Aab	38,86 Ab	45,15
Solteira	58,84 Aa	51,46 Aa	47,72 Aa	73,19 Aa	57,80
Média	47,60	49,91	38,49	50,11	
F					
Consórcios					16,14***
Fonte de N					4,74***
Cons. x Fonte					2,98***
CV					21,64

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

Na Usina Miriri, não houve diferença significativas entre os fatores estudados, para os compartimentos da biomassa aérea (Tabela 11). Em valor absoluto (Tabela 12), o tratamento com a cana solteira teve a maior biomassa aérea ($54,96 \text{ Mg ha}^{-1}$), o que equivale a mais 11 Mg ha^{-1} de palhada que a produtividade da cana em consórcio com o feijão-caupi e com o amendoim.

Tabela 11. Matéria seca dos compartimentos da parte aérea da cana-de-açúcar consorciada com diferentes leguminosas e com diferentes fontes de N, aos 335 DAP, na Usina Miriri.

Biomassa do colmo (Mg ha⁻¹)					
Consórcios	Fonte de N				Média
	IPACF62	Mix Embrapa	Sem N	Com N	
Amendoim	21,94	38,85	27,12	34,85	30,69
Feijão-caupi	29,73	27,94	27,61	37,99	30,82
Solteira	47,45	44,03	28,70	37,19	39,34
Média	33,04	36,94	27,81	36,67	
F					
Consórcios					2,71*
Fonte de N					1,50 ^{ns}
Cons. x Fonte					1,31 ^{ns}
CV					35,8
Biomassa de folhas secas (Mg ha⁻¹)					
Amendoim	5,41	7,46	6,13	6,72	6,43
Feijão-caupi	6,83	7,55	7,38	6,27	7,00
Solteira	7,53	9,13	6,71	6,95	7,58
Média	6,59	8,04	6,74	6,64	
F					
Consórcios					1,06 ^{ns}
Fonte de N					1,16 ^{ns}
Cons. x Fonte					0,32 ^{ns}
CV					31,96
Biomassa de folhas verdes + ponteira (Mg ha⁻¹)					
Amendoim	5,21	8,35	4,88	5,88	6,08
Feijão-caupi	6,86	5,89	6,88	6,32	6,48
Solteira	8,47	8,14	9,51	6,00	8,03
Média	6,84	7,46	7,09	6,06	
F					
Consórcios					1,62 ^{ns}
Fonte de N					0,36 ^{ns}
Cons. x Fonte					0,75 ^{ns}
CV					47,46

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

Tabela 12. Matéria seca total da parte aérea da cana-de-açúcar (Mg ha⁻¹) consorciada com diferentes leguminosas e com diferentes fontes de N, aos 335 DAP, na Usina Miriri.

Consórcios	Fonte de N				Média
	IPACF62	Mix Embrapa	Sem N	Com N	
Amendoim	32,56	54,65	38,14	47,45	43,20 b
Feijão-caupi	43,41	41,19	41,88	50,58	44,27 b
Solteira	63,46	61,30	44,92	50,14	54,96 a
Média	46,48	52,38	41,65	49,39	
F					
Consórcios					3,30**
Fonte de N					1,22 ^{ns}
Cons. x Fonte					1,27 ^{ns}
CV					30,13

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

5.3.5 Produtividade agrícola e industrial

Os efeitos nos atributos biométricos e na produção de biomassa dos diferentes tratamentos acarretaram em diferenças significativas quanto à produção agrícola (TCH) e industrial da cana-de-açúcar, na EECAC (Tabela 13 e 14).

Tabela 13. Produtividade de colmos (TCH) da cana-de-açúcar consorciada com diferentes leguminosas e com diferentes fontes de N, aos 335 DAP, na EECAC.

Consórcios	Fonte de N				Média
	IPACF62	Mix Embrapa	Sem N	Com N	
Soja	41,3 Ac	45,3 Aa	40,4 Aa	53,9 Ab	45,2
Amendoim	63,7 ABab	61,8 ABA	48,4 Ba	73,1 Aab	61,7
Feijão-caupi	58,5 Abc	48,0 Aa	50,5 Aa	58,1 Ab	53,8
Solteira	85,1 Aa	53,6 Ba	59,8 Ba	101,1 Aa	74,9
Média	62,2	52,2	49,8	71,6	
F					
Consórcios					32,57***
Fonte de N					21,32***
Cons. x Fonte					3,81***
CV					2,78

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade. Os dados foram submetidos a uma transformação (potência de 0,2) para se enquadrar nas premissas (normalidade e homocedase) da ANOVA.

Tabela 14. Análise de variância (ANOVA) dos atributos tecnológicos da cana-de-açúcar consorciada com diferentes leguminosas e com diferentes fontes de N, aos 335 DAP, na EECAC.

°Brix	
	F
Consórcios	5,40***
Fonte de N	0,37 ^{ns}
Cons. x Fonte	0,53 ^{ns}
CV	7,42
POL	
Consórcios	5,58***
Fonte de N	0,20 ^{ns}
Cons. x Fonte	0,38 ^{ns}
CV	9,49
Fibra	
Consórcios	0,32 ^{ns}
Fonte de N	0,81 ^{ns}
Cons. x Fonte	0,57
CV	8,24
PC	
Consórcios	5,16***
Fonte de N	0,21 ^{ns}
Cons. x Fonte	0,38 ^{ns}
CV	12,2
ATR	
Consórcios	6,74***
Fonte de N	0,82 ^{ns}
Cons. x Fonte	0,49 ^{ns}
CV	9,81

POL- % aparente de sacarose em uma solução; PC- Corresponde a % da pureza do caldo; ATR- Açúcar total recuperado. ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

Não houve efeito significativo a 5% de probabilidade entre a interação dos fatores quanto à produção de TCH (Tabela 13). Destacou-se o tratamento padrão com média acima de 100 T ha⁻¹, seguido pelos tratamentos com cana solteira e inoculada com IPACF62 com produção média de 84,1 T/ha e pelo tratamento consorciado com amendoim com adubação nitrogenada com uma média de 73,2 T/ha (Tabela 13). Quando comparados com o controle absoluto (sem consórcio e sem N), os incrementos destes tratamentos chegaram a atingir 69% (Tabela 13).

Todos os tratamentos com consórcio com soja tiveram produtividades de colmos inferiores às do controle absoluto, possivelmente um efeito direto da competição por luz

e nutrientes. A menor produtividade ocorreu no consórcio com a soja e sem adubação com N, sendo 48% inferior à do controle absoluto, tanto no consórcio com amendoim, como na cana solteira houve efeito positivo da inoculação com as estirpes IPACF62 e com o mix da Embrapa (Tabela 13).

Os consórcios tiveram efeito isolado para Brix, PC, POL e ATR, mas não para o teor de fibra (Tabela 14). No tratamento com a cana solteira, o °Brix, o POL e a pureza do caldo das canas foram superiores aos dos demais tratamentos (Figuras 5, 6 e 7), já o feijão-caupi não diferiu dos demais. São atributos importantes para o acompanhamento da curva de maturação do canavial e diretamente relacionados com a produtividade de açúcar ou álcool. A qualidade da matéria prima da cana-de-açúcar está relacionada com diferentes fatores, tanto ambientais, como temperatura, frequência de chuvas e umidade relativa do ar, quanto de manejo, como época de colheita, sujeira e contaminação nas canas (AQUINO et al., 2018; VOLTARELLI et al., 2018).

Figura 5. ° Brix da cana-de-açúcar cultivada com diferentes consórcios de leguminosas de grãos, na EECAC.

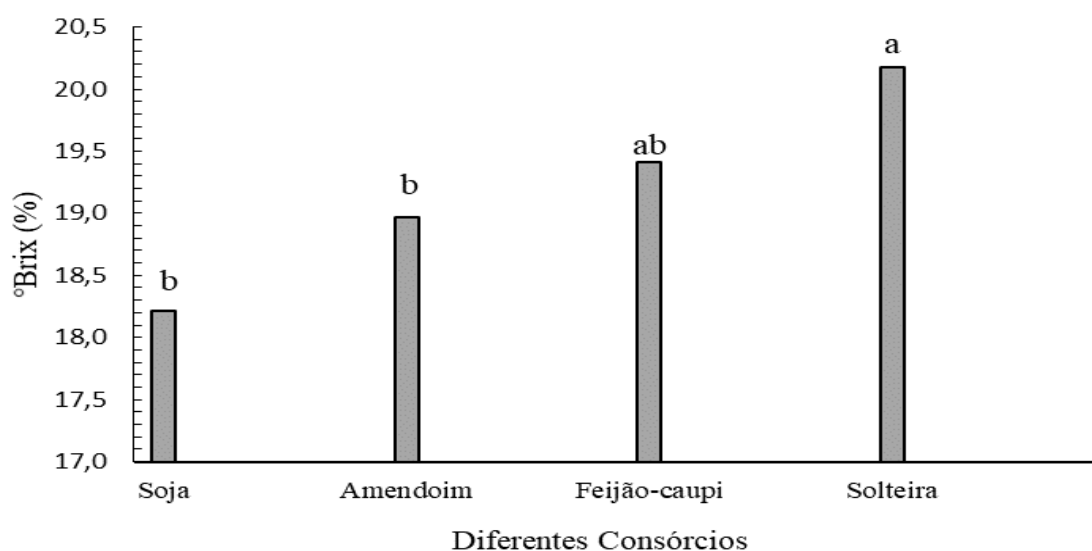


Figura 6. Porcentagem aparente de sacarose do caldo (POL) da cana-de-açúcar cultivada com diferentes consórcios de leguminosas de grãos na EECAC.

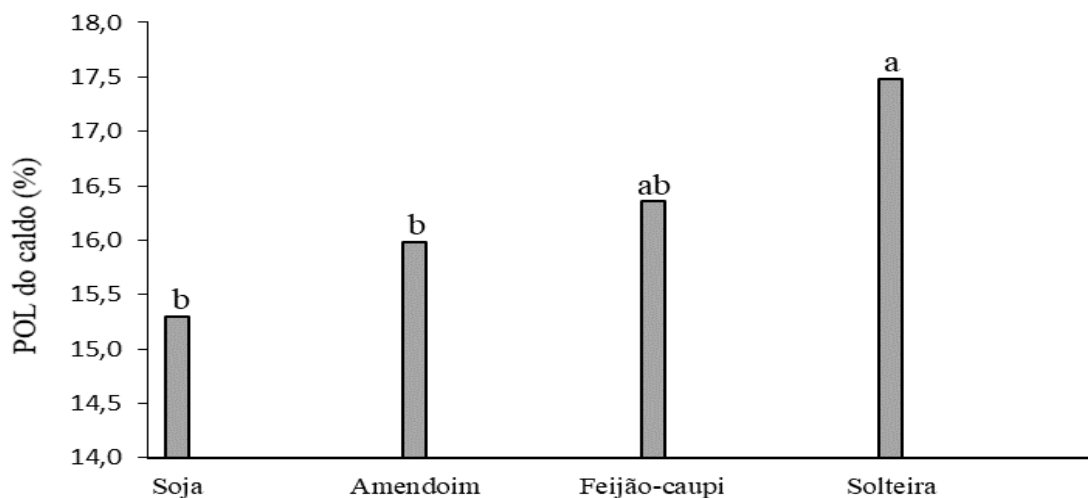
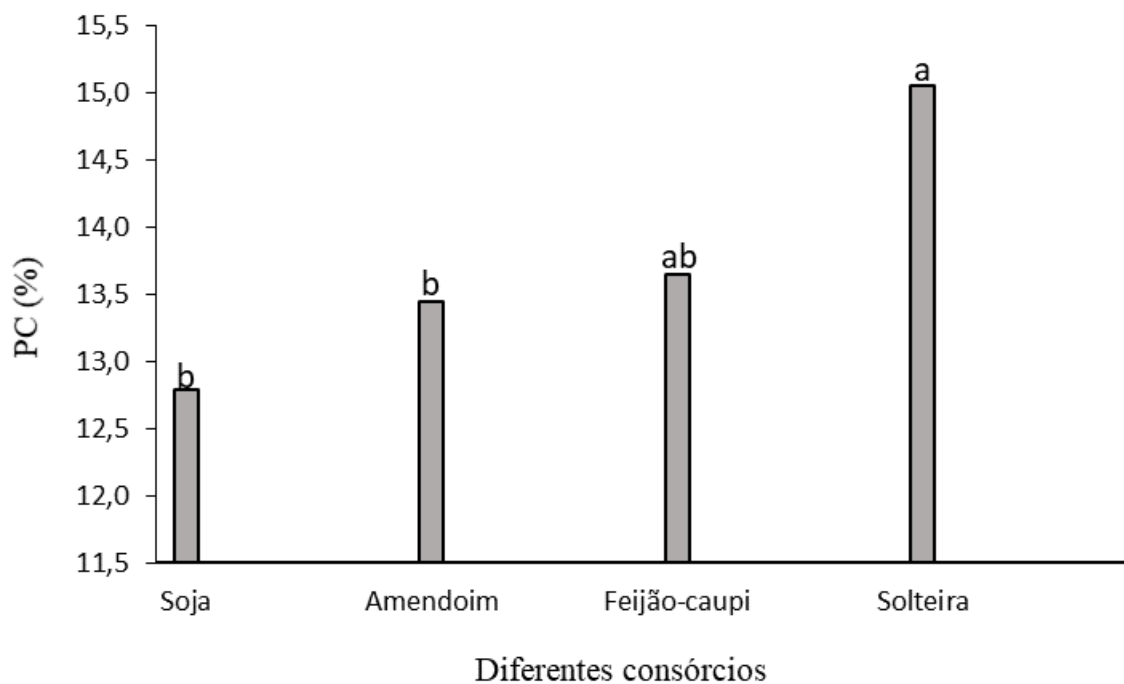


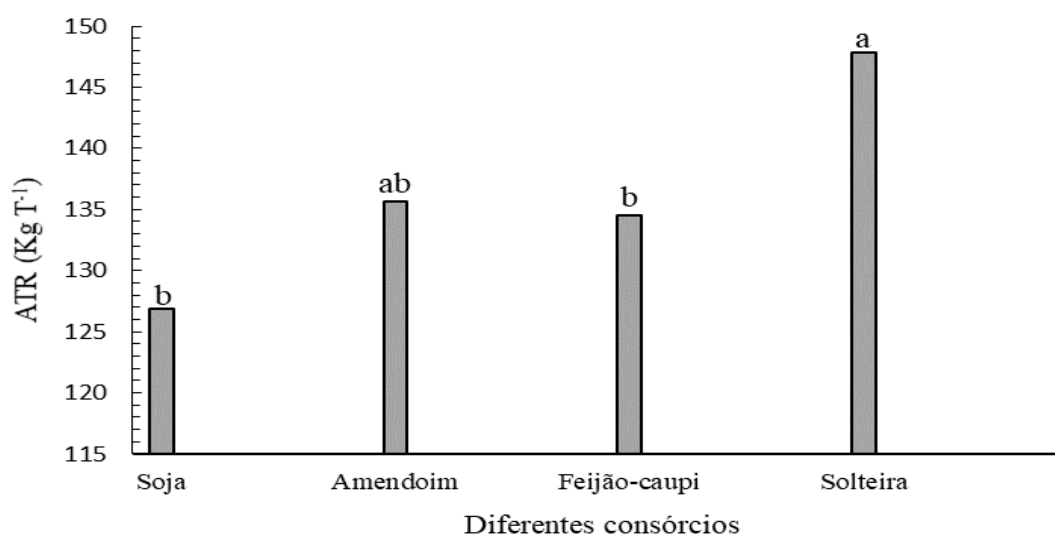
Figura 7. Pureza do Caldo (PC (%)) da cana-de-açúcar cultivada com diferentes consórcios de leguminosas de grãos na EECAC



A cana solteira também teve os maiores rendimentos em açúcares totais recuperados (ATR), com média de 147,8 kg t⁻¹, embora não tenha diferido significativamente do consórcio com amendoim que teve uma média de 135,6 kg t⁻¹ (Figura 8). O consórcio com a soja teve os menores ATR. Os ganhos de ATR estão de acordo com os comportamentos biométricos, tanto a superioridade da cana solteira quanto

a inferioridade do consórcio com a soja. O ATR é um atributo agroindustrial de grande importância para o setor canavieiro, visto que existe recompensa financeira com maior pagamento para canas com valores de ATR acima do padrão (119 kg t^{-1}).

Figura 8. Açúcar total recuperado (ATR) da cana-de-açúcar cultivada com diferentes consórcios de leguminosas de grãos, na EECAC.



Combinando os valores de PC e TCH é possível determinar a produção de açúcares por área (TAH). Neste experimento, houve efeito da interação dos fatores consórcio e fonte de N (Tabela 15) e a cana solteira produziu as maiores TAH, com média de $15,08 \text{ T ha}^{-1}$, seguida pelos tratamentos com a cana solteira inoculada com IPACF62 e consorciada com amendoim e adubada com N ($12,7$ e $9,9 \text{ T ha}^{-1}$, respectivamente). O consórcio com a soja resultou nos menores ATH, cerca de um terço do valor médio obtido no tratamento padrão.

Os tratamentos com feijão-caupi não diferiram estatisticamente da cana solteira, exceto com adubação nitrogenada, no qual o TAH foi aproximadamente 88% do tratamento padrão (Tabela 15).

Tabela 15. Produtividade de açúcar em toneladas por hectare (TAH) da cana-de-açúcar consorciada com diferentes leguminosas e com diferentes fontes de N, aos 335 DAP, na EECAC.

Consórcios	Fonte de N				Média
	IPACF62	Mix Embrapa	Sem N	Com N	
Soja	4,92 Ab	5,95 Aa	5,20 Ab	7,15 Ab	5,81
Amendoim	8,57 Aa	8,73 Aa	6,12 Aab	9,93 Aab	8,34
Feijão-caupi	8,00 Aab	6,28 Aa	7,18 Aab	7,98 Ab	7,36
Solteira	12,72 ABa	8,04 Ba	9,34 Ba	15,08 Aa	11,30
Média	8,55	7,25	6,96	10,04	
F					
Consórcios					30,52***
Fonte de N					11,16***
Cons. x Fonte					3,63**
CV					3,87

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

Na usina Miriri a não foi possível observar efeito da interação entre os fatores quanto à produtividade agrícola (TCH), sendo só observado efeito isolado da fonte de N (Tabela 16). O consórcio com a soja foi descartado, porque a germinação foi muito baixa e resultou em um estande inadequado. Os demais consórcios não diferiram em relação ao cultivo da cana solteira, com produções variando entre 75,7 a 65,9 Mg ha⁻¹ (Tabela 16).

A ausência de diferença do cultivo solteiro, ao contrário do observado no experimento na EECAC, pode estar relacionada com a época de plantio e o regime hídrico. Na EECAC, o plantio ocorreu no início da época chuvosa (final de março), caracterizando um plantio de inverno, e o pico de desenvolvimento vegetativo ocorreu após quatro meses (Figura 4 e 5 e tabela 4), foi afetado pelas poucas chuvas nesse período (Figura 1). Já na Usina Miriri, o plantio foi feito no verão (dezembro de 2019) e o maior desenvolvimento vegetativo ocorreu no período chuvoso, quando choveu 91% mais que na EECAC (Figura 1 e 2).

A maior produtividade foi observada no tratamento padrão (cana solteira com N), com valores médios de 79,1 Mg ha⁻¹, seguido pelo tratamento com inoculação com a estirpe IPACF62, com valor médio de 71,6 Mg ha⁻¹ (Tabela 16). A menor produtividade ocorreu no tratamento com inoculação com mix da Embrapa.

Vale salientar que as bactérias que são diazotróficas em gramíneas precisam de uma complementação com adubação nitrogenada para que se obtenha o maior potencial da promoção de crescimento de plantas (BAPTISTA et al., 2014) e esta adubação não ocorreu neste experimento. Estirpes do mix da Embrapa, por não serem oriundas da própria região, ao contrário do IPACF62, associada a falta da complementação da adubação

nitrogenada acarretaram em menores produtividades agrícolas. Com isto, fica evidente a importância da prospecção de novos inoculantes adaptados à região em estudo.

Tabela 16. Produtividade de colmos (TCH) da cana-de-açúcar consorciada com diferentes leguminosas e com diferentes fontes de N, aos 335 DAP, na Usina Miriri.

Consórcios	Fonte de N				Média
	IPACF62	Mix Embrapa	Sem N	Com N	
Amendoim	61,85	62,50	64,45	74,74	65,89
Feijão-caupi	68,36	60,55	69,01	77,94	68,97
Solteira	84,64	65,76	67,71	84,64	75,69
Média	71,62 ab	62,94 b	67,06 ab	79,11 a	
			F		
Consórcios			2,52*		
Fonte de N			4,14**		
Cons. x Fonte			0,64 ^{ns}		
CV			3,31		

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade. Os dados foram submetidos a uma transformação (potência de 0,2) para se enquadrarem nas premissas de normalidade e homocedase da ANOVA.

Na Usina Miriri, os atributos agroindustriais não diferiram entre os tratamentos, exceto o °Brix que apresentou efeito isolado da fonte de N (Tabela 17).

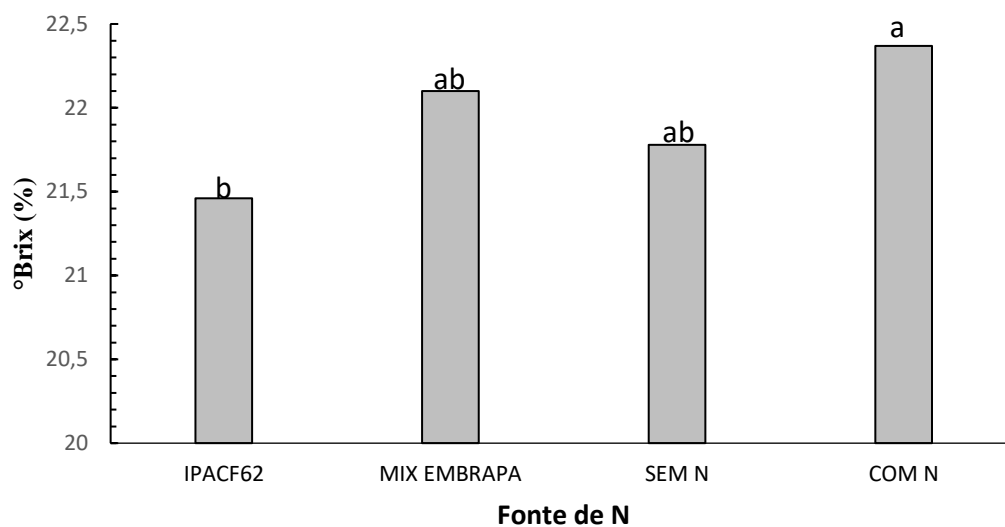
Tabela 17. Análise de variância (ANOVA) dos atributos tecnológicos da cana-de-açúcar consorciada com diferentes leguminosas e com diferentes fontes de N, aos 335 DAP, na Usina Miriri.

°Brix	
	F
Consórcios	1,13 ^{ns}
Fonte de N	3,37**
Cons. x Fonte	0,63 ^{ns}
CV	3,4
POL	
Consórcios	0,35 ^{ns}
Fonte de N	2,36*
Cons. x Fonte	0,36 ^{ns}
CV	4,36
Fibra	
Consórcios	0,04 ^{ns}
Fonte de N	0,62 ^{ns}
Cons. x Fonte	0,65 ^{ns}
CV	10,39
PC	
Consórcios	0,25 ^{ns}
Fonte de N	1,40 ^{ns}
Cons. x Fonte	0,52 ^{ns}
CV	5,14
ATR	
Consórcios	0,33 ^{ns}
Fonte de N	1,79 ^{ns}
Cons. x Fonte	1,09 ^{ns}
CV	4,46

POL- % aparente de sacarose em uma solução; PC- Corresponde a % da pureza do caldo; ATR- Açúcar total recuperado. ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

A porcentagem de °Brix foi maior no tratamento padrão (com N) que no tratamento que recebeu inoculação com a estirpe IPACF62: 22,4 e 21,4%, respectivamente (Figura 8). No tratamento com a estirpe IPACF62, é possível que a influência dos mecanismos de promoção de crescimento tenha levado a uma maior permanência no estágio vegetativo.

Figura 8. °Brix da cana-de-açúcar cultivada com diferentes consórcios de leguminosas de grãos na Usina Miriri.



O ATR não diferiu entre tratamentos e variou de 150,7 e 161,7 kg T⁻¹, mas a TAH apresentou efeito isolado da fonte de N (Tabela 18). O tratamento padrão teve a maior TAH, com média de 13,2 Mg ha⁻¹ de açúcar (Tabela 18), não diferindo da inoculação com IPACF62, mesmo sem complementação com N, com produção média de 11,5 Mg ha⁻¹ de açúcar. A menor produção do açúcar ocorreu no tratamento com mix da Embrapa (10,45 Mg ha⁻¹), 20% a menos que o tratamento padrão (Tabela 13).

Tabela 18. Produtividade de açúcar em toneladas por hectare (TAH) da cana-de-açúcar consorciada com diferentes leguminosas e com diferentes fontes de N, aos 335 DAP, na Usina Miriri.

Consórcios	Fonte de N				Média
	IPACF62	Mix Embrapa	Sem N	Com N	
Amendoim	9,96	10,37	10,63	12,67	10,91
Feijão-caupi	11,01	9,92	11,45	12,54	11,23
Solteira	13,58	11,05	10,90	14,33	12,46
Média	11,52 ab	10,45 b	10,99 ab	13,18 a	
		F			
Consórcios		2,20 ^{ns}			
Fonte de N		3,39**			
Cons. x Fonte		0,61 ^{ns}			
CV		19,25			

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo, *, ** e *** significativo, respectivamente, 10, 5 e 1% de probabilidade.

5.4 CONCLUSÃO

O sistema de consórcio afeta o desenvolvimento da cana-de-açúcar, direta ou indiretamente, mas o efeito depende da cultura utilizada. O cultivo de amendoim nas entrelinhas não afetou o desenvolvimento da cana, já a soja e o feijão-caupi impactaram negativamente. Em ambientes favoráveis, com melhor disponibilidade de água, a cana-de-açúcar consorciada com feijão-caupi tende a recuperar o desenvolvimento e atingir valores maiores na produtividade agrícola e industrial.

As maiores proporções de N da cana-de-açúcar derivado da atmosfera foram obtidas com o consórcio com o feijão-caupi e inoculação com as estirpes IPACF62 e mix da Embrapa, chegando a atingir contribuições de 26,3 e 40,2% quando cultivada na EECAC. Entretanto, não foi possível separar o N fixado nos próprios tecidos da cana e o N na cana transferido pelo feijão-caupi. As maiores produções agrícolas e industriais ocorreram nos cultivos da cana-de-açúcar solteira com adubação nitrogenada, inoculada com a estirpe IPACF62 e em consórcios com amendoim e feijão-caupi associadas com adubação nitrogenada.

5.5 REFERÊNCIAS

AQUINO, G.S.; MEDINA, C.C.; SHAHAB, M.; SANTIAGO, A.D.; CUNHA, A.C.B.; KUSSABA, D.A.O.; CARVALHO, J.B.; MOREIRA, A. Does straw mulch partial-removal from soil interfere in yield and industrial quality sugarcane? A long term study. **Industrial Crops & Products**, v. 111, p. 573-578, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.026>

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. KÖPPEN'S climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 721-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário Estatístico 2019 [da] ANDA**. São Paulo, 2019, Anual.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário Estatístico 2020 [da] ANDA**. São Paulo, 2020, Anual.

BALBINOT JUNIOR, A.A.; DEBIASI, H, FRANCHINI, J.C.; PRIETO, J.P.C.; MORAES, M.T.; WERNER, F.; FERREIRA, A.S. Crescimento e distribuição de raízes de soja em diferentes densidades de plantas. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 1, p.12-22, 2018. <https://doi.org/10.5965/223811711712018012>

BAPTISTA, R.B.; MORAIS, R.F.; LEITE, J.M.; SCHULTZ, N.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. Variations in the ¹⁵N natural abundance of plant-available N with soil depth: Their influence on estimates of contributions of biological N₂ fixation to sugar cane. **Applied Soil Ecology**, v. 73, p. 124-129, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.08.008>

BARROS, B.G.F.; FREITAS, A.D.S.; TABOSA, J.N.; LYRA, M.C.C.P.; MERGULHÃO, A.C.E.S.; SILVA, A.F.; OLIVEIRA, W.S.; FERNANDES-JÚNIOR, P.I.; SAMPAIO, E.V.S.B. Biological nitrogen fixation in field-grown sorghum under different edaphoclimatic conditions is confirmed by N isotopic signatures. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 117, p. 93-101, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10051-3>

BELTÃO, B. A. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea - Estado de Pernambuco: Diagnóstico do município de Carpina**. [s.l.] CPRM - Serviço Geológico do Brasil, p. 11, 2005.

BIGGS, I.M.; STEWART, G.R.; WILSON, J.R.; CRITCHLEY, C. ¹⁵N natural abundance studies in Australian commercial sugarcane. **Plant and Soil**, v. 238, p. 21-30, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1014280420779>

BODDEY, R. M.; POLIDORO, J. C.; RESENDE, A.S.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. Use of the ¹⁵N natural abundance technique for the quantification of the contribution of N₂ fixation to grasses and cereals. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 28, n. 1, p. 889-895, 2001. <https://doi.org/10.1071/PP01058>

CHALK, P.M.; PEOPLES, M.B.; MCNEILL, A.M.; BODDEY, R.M.; UNKOVICH, M.J.; GARDENER, M.J.; SILVA, C.F.; CHEN, D. Methodologies for estimating nitrogen transfer between legumes and companion species in agro-ecosystems: A review of ¹⁵N-enriched techniques. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 73, p. 10-21, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.02.005>

CONAB — Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2019/20**. v. 6, p. 58, 2019.

CPRM- Serviço geográfico do Brasil. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea do estado de Pernambuco: Diagnóstico do município de Igarassu**. p. 22, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro de Pesquisas de Solos, 212p, 1997.

FIGUEIREDO, I.C.; MACIEL, B.F.; MARQUES, M.O. **A qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de álcool**. Nucleus, edição especil. p. 82-92, 2008. <https://doi.org/10.3738/1982.2278.93>

FIGUEIREDO, M. V. B.; ANTUNES, J.E.L.; RODRIGUES, A. C. ; GOUVEIA, C. K. ; MORAES, R. L. C. DE ; OLIVEIRA, JOSÉ DE PAULA ; et al. **Fixação biológica de nitrogênio (FBN): bactérias diazotróficas para uma agricultura sustentável**. In: FIGUEIREDO, M. V. B.; GOMES, E.W.F.; ROSA, R. C. T. et al. (Org.). **Manual de práticas laboratoriais: um guia para pesquisa**. 1ª ed. Recife: CCS Gráfica e Editora, v. 1, p. 33-88, 2013.

FRANCO, H.C.J.; TRIVELIN, P.C.O.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; OTTO, R. Stalk yield and technological attributes of planted cane as related to nitrogen fertilization. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 5, p. 579-590, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000500012>

GEETHA, P.; TAYADE, A.S.; CHANDRASEKAR, C.A.; SELVAN, T.; RAJESH, K. Agronomic response, weed smothering efficiency and economic feasibility of sugarcane and legume intercropping system in tropical India. **Sugar Tech**, v. 21, p. 838-842, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0689-9>

GLOBALFERT. **Vendas de adubos estão aquecidos no Brasil**. Disponível em: <<https://www.globalfert.com.br/>> Acesso em: 20 de agosto de 2020.

GRAZE-CORCORAN, S.; HASHEMI, M.; SADEGHPOUR, A.; JAHANZAD, E.; AFSHAR, R.K.; LIU, X.; HERBERT, S.J.; Understanding intercropping to improve agricultural resiliency and environmental sustainability. **Advances in Agronomy**, v. 162, p. 199-257, 2020. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.02.004>

HE, T.; SU, L.; LI, Y.; SU, T.; QIN, F.; LI, Q. Nutrient decomposition rate and sugarcane yield as influenced by mung bean intercropping and crop residue recycling. **Sugar Tech**, v. 20, n. 2, p. 154-162, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12355-017-0548-0>

IBRAIM, M. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in biological nitrogen fixation and nitrogen transfer from legume to companion species. **Journal of stress physiology & biomchemistry**, Irkutsk, v. 17, n.2, p. 121-134, 2021.

IPA– Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco**. 2ª ed. Recife, 2008. 198p.

KAUR, N.; BHULLAR, M.S.; GILL, G. Weed management in sugarcane-canola intercropping systems in northern India. **Field Crop Research**, v. 188, p. 1-9, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2016.01.009>

KHONDE, P.; TSHIABUKOLE, K.; KANKOLONGO, M.; HAUSER, S.; DJAMBA, M.; VUMILIA, K.; NKONGOLO, K. Evaluation of yield and competition indices for intercropped eight maize varieties, soybean and cowpea in the zone of Savanna of South-West RD Congo. **Open Access Library Journal**, v. 5, p. 1-17, 2018. <https://doi.or/10.4236/oalib.1103746>

KURDALY, K. Growth and nitrogen fixation in Dhaincha/ Sorghum and Dhaincha/sunflower intercropping systems using ¹⁵Nitrogen and ¹³Carbon natural abundances techniques. **Communications Soil Science Plant Analysis**, v. 40, p. 2995–3014, 2009. <https://doi.org/10.1080/00103620903261577>

MAPA- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **A cachaça no Brasil: dados de registro de cachaças e aguardentes**. 32 p. 2020.

MOHAMMADI, K. Phosphorus Solubilizing Bacteria: Occurrence, Mechanisms and Their Role in Crop Production. **Resources and Environment**, v. 2, n. 1, p.80-85, 2012. <https://doi.org/10.5923/j.re.20120201.10>

MUÑOZ, F.; VILLEGAS, F.; MORENO, C.; POSADA, C. Use of cowpea (*Vigna unguiculata*) as a green manure and its effect on nitrogen (N) requirement and productivity of sugarcane. **Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists**, v. 29, p. 1-6, 2016.

OLIVEIRA, A.L.M.; URQUIAGA, S.; DÖBEREINER, J.; BALDANI, J.I. The effect of inoculating endophytic N₂-fixing bacteria on micropropagated sugarcane plants. **Plant Soil**, v. 242, p. 205-215, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1016249704336>

OLIVEIRA, E.C.A.; OLIVEIRA, R.I.; ANDRADE, B.M.T.; FREIRE, F.J.; LIRA JUNIOR, M.A.; MACHADO, P.R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivada sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 9, p. 951-960, 2010.

PEOPLES, M.B.; CHALK, P.M.; UNKOVICH, M.J.; BODDEY, R.M. Can differences in ^{15}N natural abundance be used to quantify the transfer of nitrogen from legumes to neighbouring non-legume plant species? **Soil Biology & Biochemistry**, v. 87, p. 97-109, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.04.010>

PEREIRA, W. **Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar inoculada com bactérias diazotróficas**. 70 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2011.

RODRIGES, A.A.; FORRZANI, M.V.; SOARES, R.S.; SIBOV, S.T.; VIEIRA, J.D.G. Isolation and selection of plant growth-promoting bacteria associated with sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 46, n. 2, p. 149-158, 2016. <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4639526>

SÁ, J.C.M.; LAL, R.; CERRI, C.C.; LORENZ, K.; HUNGRIA, M.; CARVALHO, P.C.F. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, v. 98, p. 102-112, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.020>

SHEARER, G.; KOHL, D.H. N_2 -fixation in field settings: estimations based on natural ^{15}N abundance. **Australian Journal Plant Physiology**, v. 13 p. 699-756, 1986. <https://doi.org/10.1071/PP9860699>

SHULTZ, N.; SILVA, J.A.; SOUSA, J.S.; MONTEIRO, R.C.; OLIVEIRA, R.P.; CHAVES, V.A.; PEREIRA, W.; SILVA, M.F.S.; BALDANI, J.I.; BODDEY, R.M., URQUIAGA, S.; XAVIER, R.P.; MORAIS, R.F.; BATISTA, R.B.; SHULTZ, N.; 33 LEITE, J.M.; SÁ, J.M.; BARBOSA, K.P.; RESENDE, A.S.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M. Evidence from field nitrogen balance and ^{15}N natural abundance data for the contribution of biological N_2 fixation to Brazilian sugarcane varieties. **Plant Soil**, v. 356, p. 5-21, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1016-3>

SILVA, F. C.; EIRA, P. A.; RAIJ, B. van.; SILVA, C. A. ABREU, C. A.; GIANELLO, C.; PÉREZ, D. V.; QUAGGIO, J. A.; TEDESCO, M. J.; ABREU, M. F.; BARRETO, W. O. **Análises químicas para avaliação da fertilidade do solo**. In: SILVA, F. C. (Org). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa, 2009. p.75-169. (Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia).

THOMAZINI, A.; MENDONÇA, E.S.; SOUZA, J.L.; CARDOSO, I.M.; GARBIN, M.L. Impact of organic no-till vegetables systems on soil organic matter in the Atlantic Forest biome. **Scientia Horticulturae**, v. 182, p. 145-155, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2014.12.002>

VOLTARELLI, M.A.; PIXÃO, C.S.S.; ZERBATO, C.; SILVA, R.P.; GAZZOLA, J. Failure mode and effect analysis (FMEA) in mechanized harvest of sugarcane billets. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 1, p. 88-96, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n1p88-96/2018>

VITTI, A. C.; FRANCO, H. C. J. ; FERREIRA, D. A. ; OTTO, R. ; FORTES, C. ; FARONI, C.E. Nitrogênio proveniente da adubação nitrogenada e de resíduos culturais na nutrição da cana-planta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 287-293, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000300009>

VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J.C.; PENATTI, C.P.; BOLOGNA, I.R.; FARONI, C.E.; FRANCO, H.C.J. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual e do sistema radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 249-256, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000200014>

WANG, X.; FENG, Y.; YU, L.; SHU, Y.; TAN, F.; GOU, Y.; LUO, S.; YANG, W.; LI, Z.; WANG, J. Sugarcane/soybean intercropping with reduced nitrogen input improves crop productivity and reduces carbon footprint in China. **Science of the Total Environment**, v. 719, p. 1-11, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137517>

WANG, Z.; JIN, X.; BAO, X.; LI, X.; ZHAO, J.; SUN, J.; CHRISTIE, P.; LI, L. Intercropping Enhances Productivity and Maintains the Most Soil Fertility Properties Relative to Sole Cropping. **Plos One**, v. 9, n. 12, p. 1-24, 2014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0020592>

WEBBER III, C.L.; WHITE JR., P.M.; DALLEY, C.; PETRIE, E.C.; VIATOR, R.P.; SHREFLER, J.W. Kenaf (*Hibiscus cannabinus*) and Cowpea (*Vigna unguiculata*) as Sugarcane Cover Crops. **Journal of Agriculture Science**, Canadá, v. 8, n. 8, p. 13-20, 2016.

WHITE JR., P.M.; WILLIAMS, G.; VIATOR, H.P.; VIATOR, R.P.; WEBBER III, C.L. Legume Cover Crop Effects on Temperate Sugarcane Yields and Their Decomposition in Soil. **Agronomy**, v. 10, n. 703, p.1-12, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050703>

**6 Levantamento econômico da cana-de-açúcar consorciada com leguminosas de
grãos e diferentes fontes de N**

6 Levantamento econômico da cana-de-açúcar consorciada com leguminosas de grãos e diferentes fontes de N

RESUMO

A busca por uma agricultura sustentável, que garanta a manutenção da produtividade agrícola juntamente com a diminuição no uso de insumos, tornou-se uma necessidade global para a preservação da qualidade de vida da população e dos ecossistemas. O uso de adubos verdes consorciados e a utilização de inoculantes podem ser alternativas sustentáveis na cultura da cana-de-açúcar que garantam retornos econômicos e ambientais. O objetivo desta pesquisa foi avaliar a viabilidade econômica da utilização de consórcios com leguminosas de grãos e de fontes de N na cana-de-açúcar. Dois experimentos de campo foram montados com delineamento em blocos casualizados em um arranjo fatorial. Os tratamentos corresponderam ao consórcio da cana-de-açúcar com feijão-caupi e amendoim, em ambos os experimentos, e também soja, apenas em um dos experimentos e três fontes de N (inoculação com a estirpe de bactéria diazotrófica IPA CF62, inoculação com o mix de bactérias diazotróficas da Embrapa e fertilizante mineral), além de um controle sem leguminosas (cultivo solteiro) e fertilizado e um controle sem fertilização. Foram avaliadas as produtividades agrícola e industrial e a margem de contribuição agrícola dos diferentes tratamentos. Os tratamentos padrões com consórcios com feijão-caupi e amendoim tiveram as maiores margens de contribuição agrícola. Os maiores ganhos econômicos considerando a produção do açúcar, álcool, cachaça e venda da cana bruta ocorreram nos tratamentos com feijão-caupi com inoculação da estirpe IPACF62, na EECAC, variando de 5.298 a 12.981 R\$ ha⁻¹. Na Usina Miriri, os ganhos foram superiores aos na EECAC, destacando-se o consórcio com feijão-caupi e adubação nitrogenada com 21.458 a 35.566 R\$ ha⁻¹. O uso de adubos verdes como o feijão-caupi e da estirpe IPACF62 trazem retornos econômicos no cultivo da cana-de-açúcar no Nordeste.

Palavras-chaves: *Saccharum officinarum*, *Arachis hypogaea*, *Vigna unguiculata*, *Glycine max*, inoculante, Bactérias promotoras de crescimento em plantas, rendimento agrícola.

6 Economic survey of sugarcane under different intercropping with grain legumes and different sources of N

ABSTRACT

The search for sustainable agriculture, which guarantees the maintenance of agricultural productivity together with the reduction in the use of inputs, has become a global need for the preservation of the quality of life of the population and ecosystems. The use of intercropped green manures and the use of inoculants can be sustainable alternatives in the cultivation of sugarcane that guarantees economic and environmental returns. Therefore, the objective of this research was to economically evaluate the feasibility of using different consortia with grain legumes and N sources in sugarcane, in order to provide guidance on the sustainable management of the crop. For this, two field experiments were set up in a randomized block design in a factorial arrangement. The treatments corresponded to the intercropping of sugarcane with different grain-producing leguminous species (cowpea and peanut in both experiments, and also soybean, only in one of the experiments) and different N sources for sugarcane cultivation. Sugarcane (inoculation with the diazotrophic bacteria strain IPA CF62, inoculation with the mix of diazotrophic bacteria from Embrapa and mineral fertilizer). Control treatments without intercropped legumes (single cultivation) and control without application of N source in the sugarcane furrow were included. Agricultural and industrial productivity were evaluated as well as the agricultural contribution margin of the different treatments. The MCA of both experiments showed higher values than the standard treatment when intercropped with cowpea and peanut. The economic gains when considering the production of sugar, alcohol, cachaça and sale of raw cane were observed in treatments with cowpea with inoculation of the strain IPACF62, at EECAC, which ranged from 5,298 R\$ ha⁻¹ to 12,981 R\$ ha⁻¹. At Usina Miriri, gains were higher than at EECAC, highlighting the treatment with cowpea consortium with nitrogen fertilization, obtaining values ranging from 21,458 R\$ ha⁻¹ to 35,566 R\$ ha⁻¹. The use of green manures such as cowpea and the IPACF62 strain were able to bring economic and sustainable returns to the cultivation of sugarcane in the Northeast.

Keywords: *Saccharum officinarum*, *Arachis hypogaea*, *Vigna unguiculata*, *Glycine max*, inoculant, Plant growth-promoting bacteria, economic income.

6.1 INTRODUÇÃO

O Brasil é maior produtor de cana-de-açúcar e o maior exportador de seus derivados, tornando a cana uma das mais importantes fontes de renda e de trabalho no país (CONAB, 2019). Com os avanços tecnológicos implementados na cultura da cana-de-açúcar, ganhos produtivos e sustentáveis estão sendo observados (SÁ et al., 2017).

O aumento das emissões de gases tóxicos na atmosfera está relacionado em parte à atividade agrícola e industrial. Na agricultura, o uso de fertilizantes nitrogenados promove aumento da liberação de gases nocivos ao meio ambiente, sendo um deles o N_2O , um gás mais danoso que o CO_2 (HEIL et al., 2015) e que pode gerar em torno de 0,033 Mg CO_2 e M $Kcal^{-1}$ de emissões (esses números como estão não informam nada) pela ação do uso de fertilizantes nitrogenados na agricultura (CARLSON et al., 2016).

Nos dias atuais, a busca por uma agricultura sustentável e de baixo carbono, que garanta a manutenção da produtividade agrícola juntamente com a diminuição no uso de insumos, tornou-se uma necessidade global para a preservação da qualidade de vida da população e dos ecossistemas (GARIBALDI et al., 2017). Para se obter um cultivo mais sustentável, práticas como plantio direto, adubação verde, potencialização da FBN e utilização de bactérias promotoras de crescimento em plantas (BPCP) têm sido adotadas. Essas práticas podem minimizar os impactos ambientais decorrentes da contaminação do ambiente terrestre, como também as emissões de CO_2 e outros gases nocivos. Estimativas apontam para a possibilidade de uma mitigação de 8,24 Pg de C, de 2016 a 2050, pela adoção de uma agricultura de baixo carbono (SÁ et al., 2017). O uso da adubação verde em rotação com cultivos comerciais promove, além da diminuição das quantidades de fertilizantes utilizados, outros benefícios, como o aporte de carbono ao solo (THOMAZINI et al., 2015). A liberação de nitrogênio pela adubação verde está relacionada com o uso de leguminosas que são capazes de realizar simbiose com bactérias diazotróficas, o que garante um aporte de N mineralizado para os cultivos subsequentes (COUËDEL et al., 2018; SORATTO et al., 2012; ZOTARELLI et al., 2012).

Retornos econômicos em sistemas de consorciação de diferentes culturas com a cana-de-açúcar têm sido relatados na Índia (Kaur et al., 2016), com ganho econômico de US\$ 1.674,00 ha^{-1} comparado com o cultivo da cana solteira.

Outra técnica que possibilita ganhos significativos na produção de gramíneas é a utilização de bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP). Por exemplo,

Rodrigues et al. (2016) observaram promoção de crescimento do milho com a inoculação com uma mistura de BPCPs que estavam em associação com a cultura da cana-de-açúcar. A utilização das BPCPs pode garantir uma redução significativa na utilização de insumos agrícolas, mantendo e até mesmo aumentando a produção vegetal (RODRIGUES et al., 2016; MOHAMMADI, 2012; KAUR; REDDY, 2015; SOUZA et al., 2015). A diminuição de insumos pode levar a ganhos econômicos e maior sustentabilidade ambiental.

Com base no exposto, a pesquisa teve como objetivo avaliar a viabilidade econômica da utilização de diferentes consórcios com leguminosas de grãos e de fontes de N na cana-de-açúcar, a fim de trazer orientações no manejo sustentável da cultura.

6.2 MATERIAL E MÉTODOS

6.2.1 Descrição e caracterização da área

Foram conduzidos dois experimentos em campo, sendo um na Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC), no município de Carpina-PE, e o na Usina Miriri Alimentos e Bioenergia, localizada no município de Rio Tinto-PB. O município de Carpina está localizado na região da Mata Norte de Pernambuco, com altitude de 180 m e com coordenadas geográficas de 7° 51' 04'' S e 35° 14' 27'' W. O clima de Carpina, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo "As", tropical chuvoso com estação seca de verão, temperatura média de 24,2 °C (BELTRÃO et al., 2005) e precipitação média anual de 1.400 mm (CPRM, 2005). O município de Rio Tinto está localizado na região do Litoral Norte da Paraíba. O clima, de acordo com a classificação de Köppen, também é do tipo "As", mas a temperatura média é de 26 °C e a precipitação média anual é de 1500 mm (ALVARES et al., 2013).

A precipitação total ocorrida durante a condução do experimento em Carpina foi de 1125,6 mm, sendo incluídas 4 lâminas de irrigação de nos meses mais secos do ano (Figura 1). Em Miriri, a precipitação total ocorrida durante a condução do experimento foi de 2.149 mm e não foi aplicada irrigação (Figura 2).

Figura 1. Regime hídrico (mm) durante a pesquisa de campo na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina- EECAC.

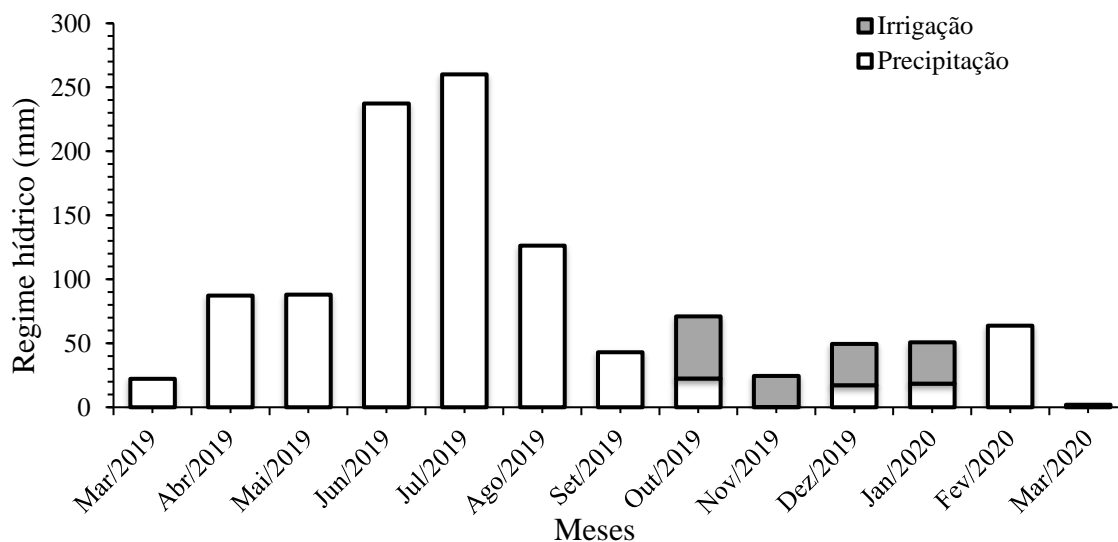
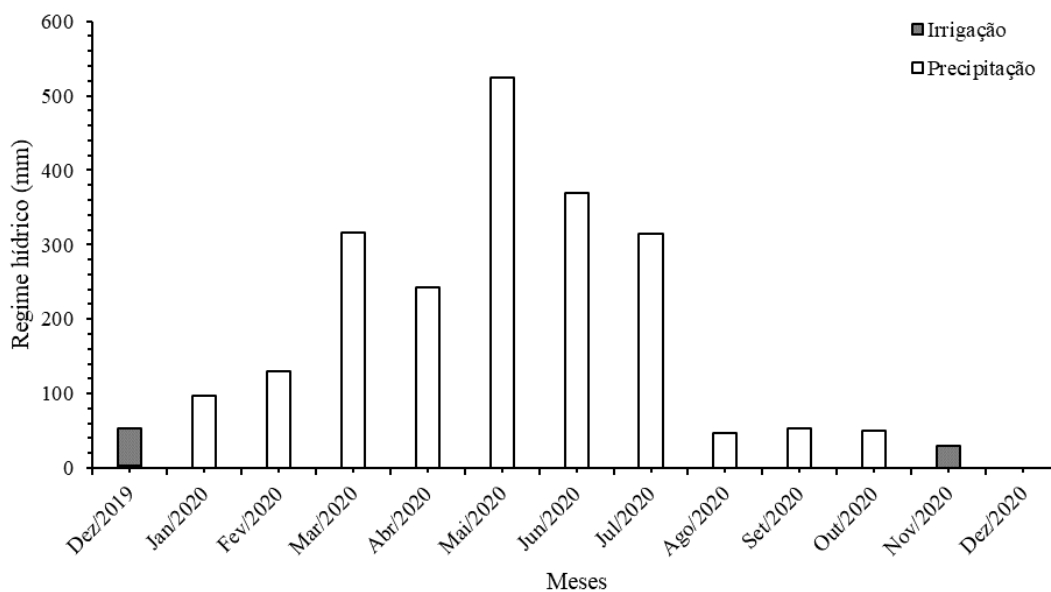


Figura 2. Regime hídrico (mm) durante o experimento na Usina Miriri.



6.2.2 Caracterização química e física do solo em estudo

O solo da área experimental foi classificado como ARGISSOLO VERMELHO AMARELO distrocioso (SANTOS et al., 2013). A caracterização química e física do solo

(Tabela 5) foi realizada na camada de 0-20, 20-40 e 40-60 cm de profundidade. A análise química correspondeu ao pH determinado em água (1:2,5); o Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} extraídos com KCl 1 mol L^{-1} e determinados por titulação; o K^{+} e o Na^{+} extraídos com o extrator Mehlich1 e determinados por fotometria de chama; o P foi extraído também com o extrator Mehlich1 sendo determinado por espectrofotometria; carbono orgânico do solo extraído por dicromato de potássio e determinado por titulometria; a matéria orgânica do solo é baseada nos valores de carbono orgânico total do solo multiplicado pelo fator de correção 1,724, depois transformado em porcentagem (SILVA et al., 2009).

Para as características físicas do solo foram coletadas amostras deformadas na profundidade de 0-20 cm, em zig-zag, com o auxílio do trado e anel volumétrico, respectivamente. Nas amostras deformadas foi realizada a análise de granulometria do solo, quantificando as frações areia, silte e argila pelo método do densímetro, segundo a metodologia da Embrapa (1997).

Tabela 1. Caracterização química e física de amostras de solo da área experimental antes do preparo do solo para plantio

Determinações	Profundidade (cm)			Determinações	Profundidade (cm)		
	0-20	20-40	40-60		0-20	20-40	40-60
pH (H ₂ O)	6,00	5,60	5,50	V (%)	47,06	40,88	24,12
M.O (%)	1,71	1,59	1,50	m (%)	0,00	0,00	0,00
P (mg/dm ³)	14,00	13,00	6,00	Fe (mg/dm ³)	100,76	98,12	125,95
K (cmolc/dm ³)	0,04	0,02	0,01	Cu (mg/dm ³)	0,36	0,57	0,67
Na (cmolc/dm ³)	0,02	0,02	0,01	Zn (mg/dm ³)	20,79	26,51	12,21
Al (cmolc/dm ³)	0,00	0,00	0,00	Mn (mg/dm ³)	10,89	9,13	1,82
Ca (cmolc/dm ³)	2,30	2,50	0,90	Areia Total (%)	75,10	72,60	73,30
Mg (cmolc/dm ³)	1,20	0,30	0,70	Areia Grossa (%)	55,02	51,60	56,52
H+Al (cmolc/dm ³)	4,00	4,10	5,10	Areia Fina (%)	20,04	21,04	16,80
S.B (cmolc/dm ³)	3,56	2,84	1,62	Silte (%)	8,10	6,40	21,90
CTC (cmolc/dm ³)	7,56	6,94	6,72	Argila (%)	16,80	21,00	24,80

Tabela 2. Caracterização química e física de amostras de solo da área experimental antes do preparo do solo para plantio da Usina Miriri

Determinações	Profundidade (cm)		Determinações	Profundidade (cm)	
	0-30	30-60		0-30	30-60
pH (H ₂ O)	6,00	5,60	V (%)	51,79	32,05
M.O (%)	0,86	0,62	m (%)	0,00	0,00
P (mg/dm ³)	5,00	2,00	Fe (mg/dm ³)	32,34	34,65
K (cmol _c /dm ³)	0,02	0,01	Cu (mg/dm ³)	0,62	0,53
Na (cmol _c /dm ³)	0,01	0,00	Zn (mg/dm ³)	5,83	1,54
Al (cmol _c /dm ³)	0,00	0,00	Mn (mg/dm ³)	0,33	0,02
Ca (cmol _c /dm ³)	1,68	1,08	Areia Total (%)	91,00	87,00
Mg (cmol _c /dm ³)	0,22	0,13	Areia Grossa (%)	61,00	51,00
H+Al (cmol _c /dm ³)	1,80	2,60	Areia Fina (%)	30,00	36,00
S.B (cmol _c /dm ³)	1,93	1,23	Silte (%)	1,00	5,00
CTC (cmol _c /dm ³)	3,73	3,83	Argila (%)	8,00	8,00

6.2.3 Desenho experimental e tratamentos aplicados

O experimento conduzido na EECAC adotou um esquema fatorial 4 x 4 (4 tratamentos relacionados ao consórcio e 4 tratamentos de inoculação da cana com bactérias diazotróficas), com delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. Os sistemas de consórcio consistiram no cultivo da cana-de-açúcar simultaneamente a 3 espécies de leguminosas produtoras de grãos (feijão-caupi, *Vigna unguiculata* (L.) Walp., variedade IPA 207; amendoim, *Arachis hypogaea* L., variedade BR1 e soja, *Glycine max* (L.) Merr., variedade Monsoy 8372 e mais um controle sem cultivo de leguminosa). O segundo fator correspondeu a diferentes fontes de N para a cultura da cana-de-açúcar, sendo elas: inoculação com a bactéria diazotrófica IPA CF62, inoculação com um mix de bactérias diazotróficas fornecidas pela Embrapa e dois tratamentos sem inoculação, sendo um com adição de N mineral e outro um controle absoluto sem N. Em cada bloco experimental, foram incluídas parcelas extras contendo plantas referências (girassol, mamona e algodão) para estimativa da FBN, tanto nas leguminosas quanto na cana-de-açúcar. O experimento conduzido na Usina Miriri, adotou um desenho experimental idêntico, porém foi necessário considerar um esquema fatorial

3 x 3, pois a soja não germinou o suficiente para prosseguir com o estudo sobre o efeito da consorciação com a cana.

Em ambos os experimentos, cada parcela experimental foi composta por cinco linhas de cana-de-açúcar plantadas em sulcos, com comprimento de 8 metros e espaçadas em 1,20m. Dessa forma, a área da parcela foi de 48 m², sendo a área útil delimitada excluindo 1 m de cada extremidade da parcela. As leguminosas foram plantadas em linhas duplas entre as linhas de cana-de-açúcar (Figura 3) no espaçamento de 0,2 x 0,7, 0,08 x 0,5 e 0,2 x 0,6 m para as culturas do amendoim, soja e feijão, respectivamente. Já o experimento da Usina a área experimental foi composto por parcelas contendo 4 linhas duplas espaçadas por 0,8 x 1,6 m com comprimento de 8 metros totalizando uma área de 76,8 m² (Figura 4). As leguminosas foram plantadas entre as linhas da cana -de-açúcar, tanto na fileira dupla, quanto entre as linhas duplas que continha um distanciamento maior.

Figura 3: Representação da parcela experimental de diferentes consórcios da cana-de-açúcar.

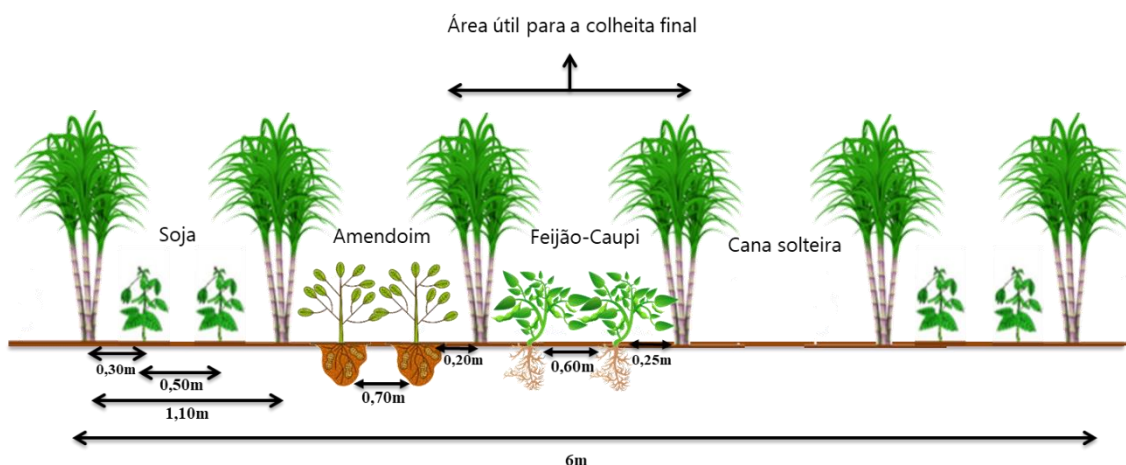
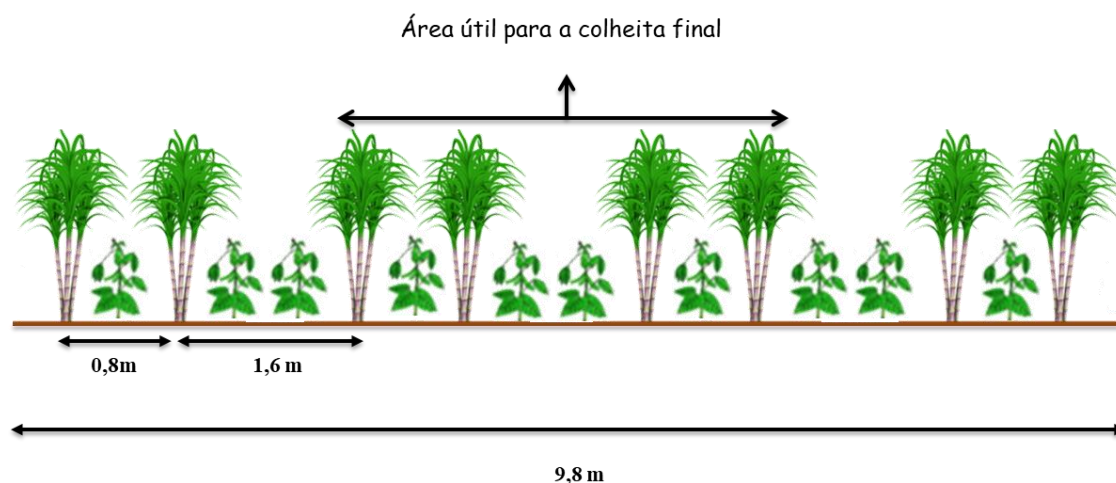


Figura 4: Representação dos espaçamentos nos diferentes tratamentos de consórcio de leguminosas de grãos com a cana-de-açúcar na Usina Miriri.



Antes da implantação do experimento, foi aplicado herbicida para dessecar a socaria remanescente e para facilitar a incorporação de $1,26 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário (PRNT de 77%), quantidade calculada para elevar a saturação de bases para 60%.

Em 23 de março de 2019 foi realizado o semeio dos colmos sementes no fundo do sulco de plantio, na EECAC. Foram utilizados rebolos contendo 3 gemas, totalizados 9 gemas/m. Após o semeio foi realizada a adubação de plantio no fundo do sulco da cana-de-açúcar, aplicando 80 kg ha^{-1} de K_2O , na forma de cloreto de potássio (KCl) e 30 kg ha^{-1} de P_2O_5 , na forma de superfosfato triplo (SFT). As leguminosas foram plantadas no dia seguinte (24 de março) entre as fileiras plantadas com cana-de-açúcar. Para as leguminosas foram aplicados como adubação de fundação 40 kg ha^{-1} de K_2O e 30 kg ha^{-1} de P_2O_5 para a cultura do feijão, 60 kg ha^{-1} de K_2O e 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 para a cultura da soja e 25 kg ha^{-1} de K_2O e 50 kg ha^{-1} de P_2O_5 para a cultura do amendoim. Todas as adubações de fundação seguiram as recomendações de adubação para o estado de Pernambuco (IPA, 2008).

A instalação do experimento da usina Miriri foi iniciada no dia 05 de dezembro de 2019 com o semeio da cana que foi utilizado densidade de gema de 12 gemas/m. Após o semeio foi realizada a adubação de plantio no fundo do sulco da cana-de-açúcar, aplicando 120 kg ha^{-1} de K_2O , na forma de cloreto de potássio (KCl) e 125 kg ha^{-1} de P_2O_5 , na forma de superfosfato triplo (ST). As leguminosas foram plantadas no dia 19 de dezembro de 2019 entre as fileiras plantadas com cana-de-açúcar. Para as leguminosas foram aplicados como adubação de fundação 40 kg ha^{-1} de K_2O e 30 kg ha^{-1} de P_2O_5 para a cultura do feijão, 60 kg ha^{-1} de K_2O e 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 para a cultura da soja e 25 kg ha^{-1} de K_2O e 50 kg ha^{-1} de P_2O_5 para a cultura do amendoim. Todas as adubações de

fundação seguiram as recomendações de adubação para o estado de Pernambuco (IPA, 2008) exceto para a cana-de-açúcar que foi utilizado a recomendação padrão da Usina.

6.2.4 Avaliação da produtividade e dos atributos tecnológicos

Para determinação da produtividade foram coletados aos 330 DAP os colmos das plantas contidos na área útil de cada parcela experimental. Após o corte, os colmos foram pesados ainda no campo, com auxílio de dinamômetro digital (precisão de 0,05kg). Com a biomassa fresca de colmos foi possível estimar a produtividade de colmos por hectare ($Mg\ ha^{-1}$). Após a pesagem, foi realizada amostragem aleatória de dez colmos, no qual os mesmo foram encaminhados ao Laboratório, passados em picadora e coletadas subamostras para determinação dos atributos tecnológicos de qualidade da cana-de-açúcar, sendo determinados os sólidos solúveis ($^{\circ}Brix$) com auxílio do refratômetro digital, Fibra (FIB %), pureza do caldo (PC) e o açúcar total recuperável (ATR) de acordo com as equações descritas em Fernandes (2003) e Carvalho et al. (2008), a percentagem de sacarose do caldo (Pol) foi obtido pelo sacarímetro digital. Pelo produto do PC com a produtividade de colmos, foi calculada a produtividade de açúcar por hectare (TAH).

6.2.5 Avaliação da margem de contribuição agrícola

Para a avaliação econômica foi utilizada a Margem de Contribuição Agrícola (MCA) que corresponde a contribuição dos diferentes consórcios e da fonte de N em relação a produção de colmos e açúcares em relação ao custo do adubo (uréia) mais o custo do corte, carregamento e transporte (CCT).

Os valores da venda da matéria prima e os derivados foram estabelecidos na safra 2019/2020, ano da colheita do canavial. Foi tomado o tratamento padrão como base de comparação.

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.3.1 Margem de contribuição agrícola em relação a produção de açúcar na EECAC

Na EECAC, a MCA do tratamento padrão (cana solteira + adubação nitrogenada) para produção de açúcar foi de $10.016\ R\$ ha^{-1}$, superior à da cana solteira e do consórcio

com a soja, mas inferior às dos (consórcios com amendoim e feijão-caupi (Tabela 1). As vendas dos grãos da soja, amendoim e feijão-caupi tiveram valores médios de 1.732, 8.064 e 14.825 R\$ ha⁻¹, respectivamente, indicando que os consórcios com o amendoim e o feijão-caupi são atraentes. As produtividades agrícolas destes tratamentos foram inferiores à do tratamento padrão, mas a venda dos grãos cobriu a perda na produção da cana-de-açúcar e levou a uma rentabilidade maior.

Os maiores ganhos econômicos em relação ao tratamento padrão foram observados no consórcio com feijão-caupi e inoculação com IPACF62 (11.119 R\$ ha⁻¹), seguido pelo consórcio com feijão-caupi e adubação com N (10.004 R\$ ha⁻¹). A cultura o feijão-caupi é considerada de subsistência na região nordeste do país, no entanto tem grande potencial econômico para cultivos sustentáveis em consórcio e em rotação de cultura (WHITE JR. et al., 2020; WEBBER III et al., 2016; MUÑOZ et al., 2016).

6.3.2 Margem de contribuição agrícola para a produção de álcool na EECAC

O rendimento econômico de álcool hidratado seria menor que o do açúcar (Tabela 2). Os melhores resultados de MCA foram observados nos tratamentos com os consórcios com feijão-caupi (todos acima de 20.000,00 R\$), consorcio com amendoim com adubação com N, mix da Embrapa e IPACF6, além do tratamento padrão que obteve valor equivalente a 16.102,70 R\$ ha⁻¹ (Tabela 2).

Em relação aos ganhos econômicos os consórcios com amendoim e feijão-caupi apresentaram ganhos em relação ao cultivo padrão, exceto o tratamento com amendoim sem nitrogênio que apresentou impacto negativo equivalente a 4.076,00 R\$ ha⁻¹ quando se optou por cultivar a cana-de-açúcar com esse tratamento em vez do cultivo padrão (Tabela 2). Mostrando assim a importância do entendimento da linha de produção de cada produtor para posteriormente definir melhores manejos sustentáveis.

O maior retorno econômico foi observado no tratamento com consórcio com feijão-caupi e inoculada com a estirpe IPACF62 com ganhos equivalentes a 8.015,95 R\$ ha⁻¹ em relação ao tratamento padrão. Esse valor adquirido pela escolha do manejo sustentável adotado para a cultura da cana-de-açúcar pode ser considerado satisfatório por apresentar uma contribuição que se paga os custos iniciais do plantio das culturas,

amenizando assim o custo para o produtor e aumentando a margem de lucro para ser utilizado em novas tecnologias.

Trabalhos realizados em outros países, produtores de cana-de-açúcar também observaram ganhos expressivos quando se utilizam leguminosas de grãos, como foi o caso de um sistema de consorciação de diferentes culturas com a cana-de-açúcar foi observado na Índia por Kaur et al. (2016) ganho econômico de US\$ 1.674,00 ha⁻¹ comparado com o cultivo da cana solteira.

6.3.3 Margem de contribuição agrícola para a produção da cachaça na EECAC

Se tratando de produção artesanal ou até mesmo industrial da cachaça, que consiste em um destilado brasileiro com grande destaque econômico, estado como a Paraíba encontra-se na posição de 6^a colocada em maiores quantidades de registros de produtores, segundo o MAPA (2020). O mesmo levantamento destaca o estado de Minas Gerais como o maior produtor e com maiores quantidades de registros. Pernambuco encontra-se na posição de 12^a lugar (MAPA, 2020).

Com base nisto, fica evidente a necessidade de se obter informações econômicas de diferentes manejos agrícolas para a produção da cachaça. Para este experimento, a MCA apresentou ser maior do que os demais derivados da cana-de-açúcar mencionado anteriormente, valores superiores a 20.000,00 R\$ ha⁻¹ foram observados em 50% de todos os tratamentos (Tabela 3).

As maiores MCA foram observados nos tratamentos com consórcio com feijão-caupi, seguido pelos tratamentos em consórcios com amendoim adubada com N e inoculada com mix da Embrapa, além do tratamento padrão que obteve uma MCA de 21.740,94 R\$ ha⁻¹ (Tabela 3).

A menor MCA foi observado no tratamento com consórcio com a soja e sem receber adubação nitrogenada, obtendo valor médio de 7.105,11 R\$ ha⁻¹ que representa uma queda de 67% em relação ao tratamento padrão (Tabela 3).

Os impactos decorrentes da competição entre plantas intercaladas podem refletir significativamente em perdas econômicas, para isto é necessária uma melhor compreensão do manejo adotado.

Os ganhos econômicos em relação ao tratamento padrão só foi possível ser observados em todos os tratamentos em consórcio com feijão-caupi chegando atingir

valor máximo de 5.298,04 R\$ ha⁻¹ quando se utilizou inoculação com a estirpe IPACF62 e consorciada com o feijão-caupi. Tratamentos em consórcios com amendoim com foi o caso quando se utilizou adubação nitrogenada e inoculação com mix da Embrapa, também apresentou ganhos em relação ao tratamento padrão (Tabela 3). Os demais tratamentos não mencionados não apresentaram ganhos quando se compara o tratamento padrão.

6.3.4 Margem de contribuição agrícola em relação a venda da cana bruta na EECAC

A MCA em relação a venda da cana bruta, caso especial pra os fornecedores de cana-de-açúcar, foi possível identificar maiores contribuições quando se utilizou consórcio com feijão-caupi e inoculada com IPACF62 que obteve valor médio de 20.118,20 R\$ ha⁻¹ (Tabela 2). A menor MCA foi observado no tratamento em consórcio com a soja e sem aplicação de N obtendo valor médio de 2.863,35 R\$ ha⁻¹ (Tabela 4).

Em relação aos ganhos, mas uma vez os consórcios com feijão-caupi seguidos pelos consórcios com amendoim mostraram valores positivos em relação ao tratamento padrão. Com isto, fica evidente a importância da escolha da espécie utilizada para um manejo com consórcios com leguminosas de grãos e a cultura da cana-de-açúcar.

Fornecedores de cana-de-açúcar podem optar por consorciar ou até mesmo rotacionar seus cultivos com culturas com amendoim e feijão-caupi garantindo assim retornos econômicos e sustentáveis.

Tabela 1. Margem de contribuição agrícola (MCA) da produção de açúcar de cana consorciada com leguminosas de grãos e diferentes fontes de N, na EECAC.

Tratamento	TCH	ATR	Açúcar	Receita Bruta	Receita Líquida (Grãos)	Custo CCT	Custo Uréia	Custo Total	MCA	Ganhos
	Mg ha ⁻¹	Kg t ⁻¹	Kg ha ⁻¹	-----R\$ ha ⁻¹ -----						
Cana solteira com N	101,13	150,09	15.080	13.460	-	3.236	208,30	3.444	10.015	-
Cana solteira sem N	59,80	147,81	9.340	8.336	-	1.913	-	1.913	6.423	-3.592
Cana solteira + IPACF62 (deve ter algum custo)	85,14	147,80	12.720	11.353	-	2.724	-	2.724	8.629	-1.386
Cana solteira + MIX Embrapa (idem)	53,69	145,63	8.040	7.176	-	1.718	-	1.718	5.458	-4.557
Cana com N + Soja	53,95	131,31	7.150	6.382	3.172	1.726	208,30	1.934	7.620	-2.395
Cana sem N + Soja	40,48	126,21	5.200	4.641	-76	1.295	-	1.295	3.269	-6.746
Cana com IPACF62 + Soja	41,36	119,72	4.920	4.391	1.727	1.323	-	1.323	4.795	-5.220
Cana com Mix Embrapa + Soja	45,31	130,09	5.950	5.310	2.103	1.449	-	1.449	5.964	-4.051
Cana com N + Amendoim	73,18	144,74	9.930	8.863	8.067	2.341	208,30	2.550	14.381	4.365
Cana sem N + Amendoim	40,40	126,08	6.120	5.462	6.759	1.292	-	1.292	10.929	913
Cana com IPACF62 + Amendoim	63,75	132,83	8.570	7.649	7.827	2.040	-	2.040	13.436	3.421
Cana com Mix Embrapa + Amendoim	61,80	138,94	8.730	7.792	9.600	1.977	-	1.977	15.414	5.399
Cana com N + Feijão-caupi	58,14	135,56	7.980	7.122	14.965	1.860	208,30	2.068	20.019	10.004
Cana sem N + Feijão-caupi	50,51	137,53	7.180	6.408	14.510	1.616	-	1.616	19.302	9.286
Cana com IPACF62 + Feijão-caupi	58,53	134,32	8.000	7.140	15.867	1.872	-	1.872	21.135	11.119
Cana com Mix Embrapa + Feijão-caupi	48,01	130,77	6.280	5.605	13.985	1.536	-	1.536	18.054	8.038

TCH: tonelada de colmo por hectare; ATR: açúcar total recuperável; Açúcar: TCH x ATR; Receita Bruta: Açúcar x 0.8926 (ATR do fechamento da safra 2019/2020); CCT: custo de corte, carregamento e transporte; CCT= R\$ 32,00 (preço médio da região); custo uréia em 03/2020: 1562,64 (R\$/T) ou R\$ 3,47/ kg de N; Custo total= CCT + Uréia. Ganhos: ganhos em R\$ em relação controle nitrogenado que corresponde ao manejo padrão das usinas.

Tabela 2. Margem de contribuição agrícola, levando em consideração a produção de álcool, de diferentes consórcios com leguminosas de grãos e fonte de N da cultura da cana-de-açúcar cultivada na EECAC.

Tratamento	TCH Mg ha ⁻¹	ATR Kg t ⁻¹	Álcool (Hidratado) L ha ⁻¹	Receita	Receita Líquida	Custo	Custo	Custo	MCA	Ganhos
				Bruta	(Grãos)	CCT	Uréia	Total		
Cana solteira com N	101,13	150,09	9.334	19.547	-	3.236	208,30	3.444	16.102	
Cana solteira sem N	59,80	147,81	5.436	11.383	-	1.913	-	1.913	9.469	-6.633
Cana solteira + IPACF62	85,14	147,80	7.738	16.205	-	2.724	-	2.724	13.480	-2.621
Cana solteira + MIX Embrapa	53,69	145,63	4.808	10.069	-	1.718	-	1.718	8.351	-7.751
Cana com N + Soja	53,95	131,31	4.356	9.123	3.172	1.726	208,30	1.934	10.361	-5.741
Cana sem N + Soja	40,48	126,21	3.142	6.579	-76	1.295	-	1.295	5.284	-10.818
Cana com IPACF62 + Soja	41,36	119,72	3.045	6.376	1.727	1.323	-	1.323	6.780	-9.322
Cana com Mix Embrapa + Soja	45,31	130,09	3.625	7.590	2.103	1.449	-	1.449	8.244	-7.858
Cana com N + Amendoim	73,18	144,74	6.514	13.640	8.067	2.341	208,30	2.550	19.158	3.055
Cana sem N + Amendoim	40,40	126,08	3.132	6.559	6.759	1.292	-	1.292	12.026	-4.076
Cana com IPACF62 + Amendoim	63,75	132,83	5.207	10.905	7.827	2.040	-	2.040	16.692	589
Cana com Mix Embrapa + Amendoim	61,80	138,94	5.280	11.057	9.600	1.977	-	1.977	18.680	2.577
Cana com N + Feijão-caupi	58,14	135,56	4.847	10.149	14.965	1.860	208,30	2.068	23.046	6.944
Cana sem N + Feijão-caupi	50,51	137,53	4.272	8.945	14.510	1.616	-	1.616	21.839	5.736
Cana com IPACF62 + Feijão-caupi	58,53	134,32	4.834	10.124	15.867	1.872	-	1.872	24.118	8.015
Cana com Mix Embrapa + Feijão-caupi	48,01	130,77	3.861	8.085	13.985	1.536	-	1.536	20.534	4.431

TCH: tonelada de colmo por hectare; ATR: açúcar total recuperável; Álcool Hidratado: (ATR x 0,615) x TCH; Receita Bruta: álcool Hidratado x 2,094 (preço do álcool no fechamento da safra 2019/2020); CCT: custo de corte, carregamento e transporte; CCT= R\$ 32,00 (preço médio da região); custo Uréia 03/2020: 1562,64 (R\$/T) ou R\$ 3,47/kg de N; Custo total= CCT + Uréia. Ganhos: ganhos em R\$ em relação controle nitrogenado que corresponde ao manejo padrão das usinas.

Tabela 3. Margem de contribuição agrícola, levando em consideração a produção de cachaça, de diferentes consórcios com leguminosas de grãos e fonte de N da cultura da cana-de-açúcar cultivada na EECAC.

Tratamento	TCH	ATR	Cachaça	Receita Bruta	Receita Líquida (Grãos)	Custo CCT	Custo Uréia	Custo Total	MCA	Ganhos
	Mg ha ⁻¹	Kg t ⁻¹	L ha ⁻¹	-----R\$ ha ⁻¹ -----						
Cana solteira com N	101,13	150,09	1.7736	25.185	-	3.236	208,30	3.444	21.740	-
Cana solteira sem N	59,80	147,81	10.328	14.666	-	1.913	-	1.913	12.752	-8.988
Cana solteira + IPACF62	85,14	147,80	14.704	20.879	-	2.724	-	2.724	18.155	-3.585
Cana solteira + MIX Embrapa	53,69	145,63	9.136	12.973	-	1.718	-	1.718	11.255	-10.485
Cana com N + Soja	53,95	131,31	8.277	11.754	3.172	1.726	208,30	1.934	12.992	-8.748
Cana sem N + Soja	40,48	126,21	5.969	8.477	-76	1.295	-	1.295	7.105	-14.635
Cana com IPACF62 + Soja	41,36	119,72	5.785	8.216	1.727	1.323	-	1.323	8.619	-13.121
Cana com Mix Embrapa + Soja	45,31	130,09	6.887	9.780	2.103	1.449	-	1.449	10.433	-11.307
Cana com N + Amendoim	73,18	144,74	12.376	17.575	8.067	2.341	208,30	2.550	23.092	1.351
Cana sem N + Amendoim	40,40	126,08	5.951	8.451	6.759	1.292	-	1.292	13.918	-7.822
Cana com IPACF62 + Amendoim	63,75	132,83	9.894	14.050	7.827	2.040	-	2.040	19.837	-1.903
Cana com Mix Embrapa + Amendoim	61,80	138,94	10.033	14.247	9.600	1.977	-	1.977	21.869	128
Cana com N + Feijão-caupi	58,14	135,56	9.209	13.077	14.965	1.860	208,30	2.068	25.974	4.233
Cana sem N + Feijão-caupi	50,51	137,53	8.117	11.526	14.510	1.616	-	1.616	24.420	2.679
Cana com IPACF62 + Feijão-caupi	58,53	134,32	9.186	13.044	15.867	1.872	-	1.872	27.038	5.298
Cana com Mix Embrapa + Feijão-caupi	48,01	130,77	7.336	10.417	13.985	1.536	-	1.536	22.866	1.125

TCH: tonelada de colmo por hectare; ATR: açúcar total recuperável; Cachaça: (ATR x 0,615 x 1,9) x TCH; Receita Bruta: Cachaça x 1,42 (preço da cachaça no fechamento da safra 2019/2020); CCT: custo de corte, carregamento e transporte; CCT= R\$ 32,00 (preço médio da região); custo Uréia 03/2020: 1562,64 (R\$/T) ou R\$ 3,47/ kg de N; Custo total= CCT + Uréia. Ganhos: ganhos em R\$ em relação controle nitrogenado que corresponde ao manejo padrão das usinas.

Tabela 4. Margem de contribuição agrícola, levando em consideração a venda da cana bruta, de diferentes consórcios com leguminosas de grãos e fonte de N da cultura da cana-de-açúcar cultivada na EECAC.

Tratamento	TCH Mg ha ⁻¹	Receita Bruta	Receita Líquida (Grãos)	Custo CCT	Custo	Custo Total	MCA	Ganhos
					Uréia			
				-----R\$ ha ⁻¹ -----				
Cana solteira com N	101,13	10.581		3.236	208,30	3.444	7.136	
Cana solteira sem N	59,80	6.256		1.913		1.913	4.343	-2.793
Cana solteira + IPACF62	85,14	8.908		2.724		2.724	6.183	-953
Cana solteira + MIX Embrapa	53,69	5.617		1.718		1.718	3.899	-3.237
Cana com N + Soja	53,95	5.644	3.172	1.726	208,30	1.934	6.882	-253
Cana sem N + Soja	40,48	4.235	-76	1.295		1.295	2.863	-4.273
Cana com IPACF62 + Soja	41,36	4.327	1.727	1.323		1.323	4.731	-2.405
Cana com Mix Embrapa + Soja	45,31	4.740	2.103	1.449		1.449	5.394	-1.742
Cana com N + Amendoim	73,18	7.656	8.067	2.341	208,30	2.550	13.174	6.037
Cana sem N + Amendoim	40,40	4.227	6.759	1.292		1.292	9.694	2.557
Cana com IPACF62 + Amendoim	63,75	6.670	7.827	2.040		2.040	12.457	5.320
Cana com Mix Embrapa + Amendoim	61,80	6.466	9.600	1.977		1.977	14.088	6.951
Cana com N + Feijão-caupi	58,14	6.083	14.965	1.860	208,30	2.068	18.980	11.843
Cana sem N + Feijão-caupi	50,51	5.284	14.510	1.616		1.616	18.178	11.041
Cana com IPACF62 + Feijão-caupi	58,53	6.123	15.867	1.872		1.872	20.118	12.981
Cana com Mix Embrapa + Feijão-caupi	48,01	5.023	13.985	1.536		1.536	17.472	10.335

TCH: tonelada de colmo por hectare; ATR: açúcar total recuperável; Receita Bruta: Cana bruta x 104,63 (preço da cana bruta no fechamento da safra 2019/2020); CCT: custo de corte, carregamento e transporte; CCT= R\$ 32,00 (preço médio da região); custo Uréia 03/2020: 1562,64 (R\$/T) ou R\$ 3,47/ kg de N; Custo total= CCT + Uréia. Ganhos: ganhos em R\$ em relação controle nitrogenado que corresponde ao manejo padrão das usinas.

6.3.5 Margem de contribuição agrícola para a produção de açúcar na Usina Miriri

O levantamento da MCA para o cultivo experimental na Usina Miriri seguiu o mesmo procedimento adotado para o experimento da EECAC, no entanto os tratamentos com consórcio com soja não foram possíveis obter resultados devido a falta de germinação das sementes.

Os valores das MCA se aproximaram dos valores obtidos pelo experimento da EECAC. Para a produção do açúcar o valor médio do tratamento padrão apresentou ser inferior 138,98 R\$ ha⁻¹ a menos que no experimento anterior, no entanto tratamentos como cana consorciada com feijão-caupi e adubada com N apresentou a maior contribuição de todos os tratamentos com média da MCA de 35.566,24 R\$ ha⁻¹ seguida pelo tratamento com consórcio com feijão-caupi e inoculada com a estirpe IPACF62 obtendo média de MCA de 30.587,86 R\$ ha⁻¹, sendo em média superior ao experimento anterior 15.546,26 e 9.452,85 R\$ ha⁻¹, respectivamente (Tabela 5).

Os melhores resultados para os tratamentos com o consórcio com o feijão-caupi vieram em decorrência da boa produtividade agrícola e industrial, visto que a competição entre as espécies intercaladas não sutil tanto efeito negativo quando comparado ao outro ambiente. O alto regime hídrico observado na Miriri (Figura 5) deu condições para que a cana que esteve em consórcio com o feijão-caupi se recuperasse a tempo de garantir produtividade próximas aos valores obtidos em cana solteira, sendo sua diferença em média de 6,72 Mg ha⁻¹. Além do mais, a cultura do feijão-caupi apresentou uma maior produtividade neste ambiente e conseqüentemente aumentou o rendimento econômico garantindo assim uma maior MCA.

Quando se trata dos ganhos econômicos ao ser comparado com tratamento padrão mostrou-se que os tratamentos com consórcios apresentaram valores positivos devido ao incremento financeiro da venda dos grãos, destacando assim o tratamento com consórcio com feijão-caupi com adubação nitrogenada seguida pelo mesmo consórcio, mas inoculada com a estirpe IPACF62 com ganhos médios de 25.689,27 e 20.710,89 R\$ ha⁻¹, respectivamente (Tabela 5).

Os tratamentos com consórcio com amendoim apresentaram ter ganhos econômicos superiores ao tratamento padrão (Tabela 5), sendo o tratamento com mix da Embrapa associada ao consórcio que apresentou o maior ganho econômico com valor médio de 2.460,20 R\$ ha⁻¹.

6.3.6 Margem de contribuição agrícola para a produção de álcool na Usina Miriri

Se tratando da produção de álcool hidratado com estimativa da MCA para os diferentes manejos adotados, foi possível identificar que os consórcios com leguminosas de grãos apresentam as maiores contribuições na MCA, sendo em destaque a cultura do feijão-caupi que apresentou contribuição média de 34.754,88 R\$ ha⁻¹ com ganhos médios de 20.050,68 R\$ ha⁻¹ em relação ao tratamento padrão (Tabela 6).

O tratamento que apresentou a maior contribuição econômica e relação a produção do álcool hidratado foi o tratamento com consórcio com feijão-caupi associada com adubação nitrogenada obtendo uma média no ganho de 25.129,75 R\$ ha⁻¹. Em relação ao consórcio com amendoim, ganhos positivos foram observados no tratamento com adubação nitrogenada e inoculada com o mix da Embrapa (Tabela 6). Todos os tratamentos com a cana solteira não apresentaram ganhos econômicos em relação ao tratamento padrão.

6.3.7 Margem de contribuição agrícola para a produção da cachaça na Usina Miriri

Para os produtores de cachaça, as maiores MCA estão relacionadas com a consorciação com feijão-caupi seguida pelo tratamento com consórcio com amendoim e adubada com N (Tabela 7). A maior contribuição da MCA foi observada no tratamento em consórcio com feijão-caupi e adubada com N obtendo, em média, uma contribuição de 44.292,78 R\$ ha⁻¹, valor este superior ao experimento conduzido na EECAC. O ganho econômico em relação ao tratamento padrão atingiu valor médio de 24.505,93 R\$ ha⁻¹ que equivale aproximadamente a um valor seis vezes a mais que o experimento da EECAC.

Esse aumento no ganho econômico está relacionado a diferentes fatores, sendo um dos principais é o aumento na produção do grão, no TCH da cana-de-açúcar e do ATR que contribuiu com o aumento na produção da cachaça que conseqüentemente aumenta o retorno econômico, além da renda extra pela venda dos grãos.

6.3.8 Margem de contribuição agrícola em relação a venda da cana bruta na Usina Miriri

Em relação a venda da cana bruta, que corresponde a uma atividade de grande parte de agricultores de média a pequeno porte da zona da mata pernambucana e paraibana, mostrou favorável o uso de tecnologias sustentáveis como inoculantes para redução da adubação nitrogenada. Tratamento com inoculação com a estirpe IPACF62 em cana solteira, apresentou a mesma produção do tratamento padrão e consequentemente obteve uma maior MCA e com ganhos de 208,30 R\$ ha⁻¹ (Tabela 8). Este valor se paga o custo do uso do inoculante, sendo retribuído pelo ganho sustentável que pode ser convertido em CBIOS. Além deste tratamento, os demais tratamentos com consórcios com as leguminosas apresentaram maiores contribuições, sendo destaque mais uma vez para o consórcio com feijão-caupi com adubação nitrogenada (Tabela 8).

Tabela 5. Margem de contribuição agrícola, levando em consideração a produção de açúcar, de diferentes consórcios com leguminosas de grãos e fonte de N da cultura da cana-de-açúcar cultivada na Usina Miriri.

Tratamento	TCH Mg ha ⁻¹	ATR Kg t ⁻¹	Açúcar Kg ha ⁻¹	Receita	Receita Líquida	Custo CCT	Custo	Custo	MCA	Ganhos
				Bruta	(Grãos)		Uréia	Total		
-----R\$ ha ⁻¹ -----										
Cana solteira com N	84,64	161,66	14.333	12.793	-	2.708	208,30	2.916	9.876	-
Cana solteira sem N	67,71	150,75	10.895	9.725	-	2.166	-	2.166	7.558	-2.318
Cana solteira + IPACF62	84,64	153,82	13.585	12.125	-	2.708	-	2.708	9.417	-459
Cana solteira + MIX Embrapa	65,76	160,68	11.053	9.866	-	2.104	-	2.104	7.761	-2.115
Cana com N + Amendoim	74,74	162,57	12.667	11.306	3.630	2.391	208,30	2.599	16.774	2.460
Cana sem N + Amendoim	64,45	157,37	10.631	9.489	3.230	2.062	-	2.062	14.186	780
Cana com IPACF62 + Amendoim	61,85	153,20	9.955	8.886	3.076	1.979	-	1.979	14.734	106
Cana com Mix Embrapa + Amendoim	62,50	158,94	10.369	9.255	4.640	2.000	-	2.000	16.855	2.019
Cana com N + Feijão-caupi	77,94	154,01	12.537	11.190	27.078	2.494	208,30	2.702	35.566	25.689
Cana sem N + Feijão-caupi	69,01	158,92	11.447	10.217	22.385	2.208	-	2.208	30.395	20.518
Cana com IPACF62 + Feijão-caupi	68,36	154,09	11.015	9.831	22.943	2.187	-	2.187	30.587	20.710
Cana com Mix Embrapa + Feijão-caupi	60,55	157,05	9.921	8.855	20.254	1.937	-	1.937	27.172	17.295

TCH: tonelada de colmo por hectare; ATR: açúcar total recuperável; Açúcar: TCH x ATR; Receita Bruta: Açúcar x 0.8926 (ATR do fechamento da safra 2019/2020); CCT: custo de corte, carregamento e transporte; CCT= R\$ 32,00 (preço médio da região); custo Uréia 03/2020: 1562,64 (R\$/T) ou R\$ 3,47/ kg de N; Custo total= CCT + Uréia. Ganhos: ganhos em R\$ em relação controle nitrogenado que corresponde ao manejo padrão das usinas.

Tabela 6. Margem de contribuição agrícola, levando em consideração a produção de álcool, de diferentes consórcios com leguminosas de grãos e fonte de N da cultura da cana-de-açúcar cultivada na Usina Miriri.

Tratamento	TCH	ATR	Álcool (Hidratado)	Receita Bruta	Receita Líquida (Grãos)	Custo CCT	Custo Uréia	Custo Total	MCA	Ganhos
	Mg ha ⁻¹	Kg t ⁻¹	L ha ⁻¹	-----R\$ ha ⁻¹ -----						
Cana solteira com N	84,64	161,66	8.414	17.620	-	2.708	208,30	2.916	14.704	-
Cana solteira sem N	67,71	150,75	6.277	13.145	-	2.166	-	2.166	10.978	-3.725
Cana solteira + IPACF62	84,64	153,82	8.006	16.766	-	2.708	-	2.708	14.057	-646
Cana solteira + MIX Embrapa	65,76	160,68	6.498	13607	-	2.104	-	2.104	11.503	-3.201
Cana com N + Amendoim	74,74	162,57	7.472	15.647	3.630	2.391	208,30	2.599	16.678	1.973
Cana sem N + Amendoim	64,45	157,37	6.237	13.061	3.230	2.062	-	2.062	14.229	-474
Cana com IPACF62 + Amendoim	61,85	153,20	5.827	12.202	3.076	1.979	-	1.979	13.300	-1.404
Cana com Mix Embrapa + Amendoim	62,50	158,94	6.109	12.792	4.640	2.000	-	2.000	15.433	729
Cana com N + Feijão-caupi	77,94	154,01	7.382	15.458	27.078	2.494	208,30	2.702	39.833	25.129
Cana sem N + Feijão-caupi	69,01	158,92	6.744	14.123	22.385	2.208	-	2.208	34.300	19.596
Cana com IPACF62 + Feijão-caupi	68,36	154,09	6.478	13.565	22.943	2.187	-	2.187	34.321	19.617
Cana com Mix Embrapa + Feijão-caupi	60,55	157,05	5.848	12.246	20.254	1.937	-	1.937	30.563	15.859

TCH: tonelada de colmo por hectare; ATR: açúcar total recuperável; Álcool Hidratado: (ATR x 0,615) x TCH; Receita Bruta: álcool Hidratado x 2,094 (preço do álcool no fechamento da safra 2019/2020); CCT: custo de corte, carregamento e transporte; CCT= R\$ 32,00 (preço médio da região); custo Uréia 03/2020: 1562,64 (R\$/T) ou R\$ 3,47/kg de N; Custo total= CCT + Uréia. Ganhos: ganhos em R\$ em relação controle nitrogenado que corresponde ao manejo padrão das usinas.

Tabela 7. Margem de contribuição agrícola, levando em consideração a produção de cachaça, de diferentes consórcios com leguminosas de grãos e fonte de N da cultura da cana-de-açúcar cultivada na Usina Miriri.

Tratamento	TCH Mg ha ⁻¹	ATR Kg t ⁻¹	Cachaça L ha ⁻¹	Receita Bruta	Receita	Custo CCT	Custo Uréia	Custo Total	MCA	Ganhos
					Líquida (Grãos)					
-----R\$ ha ⁻¹ -----										
Cana solteira com N	84,64	161,66	15.988	22.703	-	2.708	208,30	2.916	19.786	-
Cana solteira sem N	67,71	150,75	11.927	16.936	-	2.166	-	2.166	14.769	-5.016
Cana solteira + IPACF62	84,64	153,82	15.213	21.602	-	2.708	-	2.708	18.894	-892
Cana solteira + MIX Embrapa	65,76	160,68	12.346	17.532	-	2.104	-	2.104	15.428	-4.358
Cana com N + Amendoim	74,74	162,57	14.197	20.160	3.630	2.391	208,30	2.599	21.191	1.404
Cana sem N + Amendoim	64,45	157,37	11.851	16.829	3.230	2.062	-	2.062	17.997	-1.789
Cana com IPACF62 + Amendoim	61,85	153,20	11.072	15.722	3.076	1.979	-	1.979	16.819	-2.967
Cana com Mix Embrapa + Amendoim	62,50	158,94	11.607	16.482	4.640	2.000	-	2.000	19.123	-663
Cana com N + Feijão-caupi	77,94	154,01	14.026	19.917	27.078	2.494	208,30	2.702	44.292	24.505
Cana sem N + Feijão-caupi	69,01	158,92	12.815	18.197	22.385	2.208	-	2.208	38.374	18.587
Cana com IPACF62 + Feijão-caupi	68,36	154,09	12.308	17.478	22.943	2.187	-	2.187	38.234	18.447
Cana com Mix Embrapa + Feijão-caupi	60,55	157,05	11.111	15.778	20.254	1.937	-	1.937	34.095	14.308

TCH: tonelada de colmo por hectare; ATR: açúcar total recuperável; Cachaça: (ATR x 0,615 x 1,9) x TCH; Receita Bruta: Cachaça x 1,42 (preço da cachaça no fechamento da safra 2019/2020); CCT: custo de corte, carregamento e transporte; CCT= R\$ 32,00 (preço médio da região); custo Uréia 03/2020: 1562,64 (R\$/T) ou R\$ 3,47/ kg de N; Custo total= CCT + Uréia. Ganhos: ganhos em R\$ em relação controle nitrogenado que corresponde ao manejo padrão das usinas.

Tabela 8. Margem de contribuição agrícola, levando em consideração a venda da cana bruta, de diferentes consórcios com leguminosas de grãos e fonte de N da cultura da cana-de-açúcar cultivada na Usina Miriri.

Tratamento	TCH Mg ha ⁻¹	Receita Bruta	Receita Líquida	Custo	Custo	Custo	MCA	Ganhos
			(Grãos)	CCT	Uréia	Total		
		-----R\$ ha ⁻¹ -----						
Cana solteira com N	84,64	8855	-	2.708	208,30	2.916	5.939	-
Cana solteira sem N	67,71	7084	-	2.166	-	2.166	4.917	-1021
Cana solteira + IPACF62	84,64	8855	-	2.708	-	2.708	6.147	208
Cana solteira + MIX Embrapa	65,76	6880	-	2.104	-	2.104	4.776	-1.162
Cana com N + Amendoim	74,74	7820	3.630	2.391	208,30	2.599	8.850	2.911
Cana sem N + Amendoim	64,45	6743	3.230	2.062	-	2.062	7.911	1.972
Cana com IPACF62 + Amendoim	61,85	6471	3.076	1.979	-	1.979	7.568	1.629
Cana com Mix Embrapa + Amendoim	62,50	6539	4.640	2.000	-	2.000	9.180	3.240
Cana com N + Feijão-caupi	77,94	8154	27.078	2.494	208,30	2.702	32.530	26.591
Cana sem N + Feijão-caupi	69,01	7220	22.385	2.208	-	2.208	27.397	21.458
Cana com IPACF62 + Feijão-caupi	68,36	7152	22.943	2.187	-	2.187	27.908	21.969
Cana com Mix Embrapa + Feijão-caupi	60,55	6335	20.254	1.937	--	1.937	2.4652	18.713

TCH: tonelada de colmo por hectare; ATR: açúcar total recuperável; Receita Bruta: Cana bruta x 104,63 (preço da cana bruta no fechamento da safra 2019/2020); CCT: custo de corte, carregamento e transporte; CCT= R\$ 32,00 (preço médio da região); custo Uréia 03/2020: 1562,64 (R\$/T) ou R\$ 3,47/ kg de N; Custo total= CCT + Uréia. Ganhos: ganhos em R\$ em relação controle nitrogenado que corresponde ao manejo padrão das usinas.

6.4 CONCLUSÃO

As leguminosas de grãos apresentaram maiores (que o que?) retornos econômicos pela venda de grãos, exceto a soja.

A inoculação da estirpe IPACF62 apresentou potencialidade em promoções de crescimento em planta e consequentemente maiores retornos econômicos.

A estirpe IPACF62 apresentou melhores resultados quando associada com o consórcio com feijão-caupi.

O uso de tecnologias sustentáveis em cultivos no Nordeste como consórcios com leguminosas de grãos e inoculantes de BPCP trazem benefícios agrícolas, industriais e sustentáveis.

6.5 REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. KÖPPEN'S climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, p. 721-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

BELTÃO, B. A. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea - Estado de Pernambuco: Diagnóstico do município de Carpina**. [s.l.] CPRM - Serviço Geológico do Brasil, p. 11, 2005.

CARLSON, K.M.; GERBER, J.S.; MUELLER, N.D.; HERRERO, M.; MCDONALD, G.K.; BRAUMAN, K.A.; HAVLIK, P.; O'CONNELL, C.S.; JOHNSON, J.A.; SAATCHI, S.; WEST, P.C. Greenhouse gas emissions intensity of global croplands. *Nature Climate Change*, p. 1-9, 2016. <https://doi.org/10.1038/nclimate3158>

CONAB- Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2019/20**, v. 6, 58p, 2019.

COUËDEL, A.; ALLETTO, L.; TRIBOUILLOIS, H.; JUSTES, E. Cover crop crucifer-legume mixtures provide effective nitrate catch crop and nitrogen green manure ecosystem services. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 254, p. 50-59, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.017>

CPRM- Serviço geográfico do Brasil. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea do estado de Pernambuco: Diagnóstico do município de Igarassu**. p. 22, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro de Pesquisas de Solos, p. 212, 1997.

FRANCO, H.C.J.; TRIVELIN, P.C.O.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; OTTO, R. Stalk yield and technological attributes of planted cane as related to nitrogen fertilization. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 5, p. 579-590, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000500012>

GARIBALDI, L.A.; GEMMILL-HERREN, B.; D'ANNOLFO, R.; GRAEUB, B.E.; CUNNIGHAM, S.A.; BREEZE, T.D. Farming Approaches for Greater Biodiversity, 29 Livelihoods, and Food Security. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 32, n. 1, p. 68-80, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.10.001>

HEIL, J.; VEREENCKEN, H.; BRUGGEMANN, N. A review of chemical reactions of nitrification intermediates and their role in nitrogen cycling and nitrogen trace gas formation in soil. **European journal of Soil Science**, v. 67, p. 23-39, 2015. <https://doi.org/10.1111/ejss.12306>

KAUR, N.; BHULLAR, M.S.; GILL, G. Weed management in sugarcane-canola intercropping systems in northern India. **Field Crop Research**, v. 188, p. 1-9, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2016.01.009>

KAUR, G.; REDDY, M.S. Effects of phosphate-solubilizing bacteria, rock phosphate and chemical fertilizers on maize-wheat cropping cycle and economics. **Pedosphere**, v. 25, n. 3, p. 428-437, 2015. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)30010-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)30010-2)

MAPA- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **A cachaça no Brasil: dados de registro de cachaças e aguardentes**. 32 p. 2020.

MOHAMMADI, K. Phosphorus Solubilizing Bacteria: Occurrence, Mechanisms and Their Role in Crop Production. **Resources and Environment**, v. 2, n. 1, p.80-85, 2012. <https://doi.org/10.5923/j.re.20120201.10>

MUÑOZ, F.; VILLEGAS, F.; MORENO, C.; POSADA, C.; Use of cowpea (*Vigna unguiculata*) as a green manure and its effect on nitrogen (N) requirement and productivity of sugarcane. **Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists**, v. 29, p.1-6, 2016.

RODRIGES, A.A.; FORRZANI, M.V.; SOARES, R.S.; SIBOV, S.T.; VIEIRA, J.D.G. Isolation and selection of plant growth-promoting bacteria associated with sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 46, n. 2, p. 149-158, 2016. <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4639526>

SÁ, J.C.M.; LAL, R.; CERRI, C.C.; LORENZ, K.; HUNGRIA, M.; CARVALHO, P.C.F. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, v. 98, p. 102-112, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.020>

SANTOS, H. G. **Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ª Edição**, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA Solos, Rio de Janeiro, 2013.

SORATTO, R.P.; CRUSCIOL, C.A.C.; COSTA, C.H.M.; FERRARI NETO, J.; CASTRO, G.S.A.; Produção, decomposição e ciclagem de nutrientes em resíduos de crotalária e milho, cultivados solteiros e consorciados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 10, p. 1462-1470, 2012.

SOUZA, R.; AMBROSINI, A.; PASSAGLIA, L.M.P. Plant growth-promoting bactéria as inoculants in agricultural soils. **Genetics and Molecular Biology**, v.38, n.4, p.401-419, 2015. <https://doi.org/10.1590/S1415-475738420150053>

SILVA, F. C.; EIRA, P. A.; RAIJ, B. van.; SILVA, C. A. ABREU, C. A.; GIANELLO, C.; PÉREZ, D. V.; QUAGGIO, J. A.; TEDESCO, M. J.; ABREU, M. F.; BARRETO, W. O. **Análises químicas para avaliação da fertilidade do solo**. In: SILVA, F. C. (Org). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa, 2009. p.75-169. (Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia).

THOMAZINI, A.; MENDONÇA, E.S.; SOUZA, J.L.; CARDOSO, I.M.; GARBIN, M.L. Impact of organic no-till vegetables systems on soil organic matter in the Atlantic Forest biome. **Scientia Horticulturae**, v. 182, p.145-155, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2014.12.002>

WEBBER III, C.L.; WHITE JR., P.M.; DALLEY, C.; PETRIE, E.C.; VIATOR, R.P.; SHREFLER, J.W. Kenaf (*Hibiscus cannabinus*) and Cowpea (*Vigna unguiculata*) as Sugarcane Cover Crops. **Journal of Agriculture Science**, Canadá, v. 8, n. 8, p. 13-20, 2016.

WHITE JR., P.M.; WILLIAMS, G.; VIATOR, H.P.; VIATOR, R.P.; WEBBER III, C.L. Legume Cover Crop Effects on Temperate Sugarcane Yields and Their Decomposition in Soil. **Agronomy**, v. 10, n. 703, p. 1-12, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050703>

ZOTARELLI, L.; ZATORRE, N.P.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; JANTALIA, C.P.; FRANCHINI, J.C.; ALVES, B.J.R. 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**, v. 132, p. 185-195, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.12.013>

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estudos envolvendo novas tecnologias que promovam a diminuição da necessidade de insumos agrícolas onerosos e dependentes de energia fóssil para sua fabricação são fundamentais para a promoção da sustentabilidade da atividade agrícola. Essas novas tecnologias proporcionam economia nos custos produtivos e diminuição dos impactos ambientais. A adubação nitrogenada, por exemplo, impacta o meio ambiente por meio da queima de combustíveis fósseis, necessária para a produção dos fertilizantes, pela formação e emissão de gases de efeitos estufa e pela eutrofização de mananciais, devido a lixiviação de compostos nocivos.

Os consórcios com leguminosas de grãos e inoculações com bactérias promotoras de crescimento em planta, trazem benefícios que podem ser vistos no primeiro ciclo da cultura da cana-de-açúcar. Nesta pesquisa, as informações a respeito do uso de tecnologias sustentáveis em relação aos aspectos produtivos, industriais e econômicos da cana-de-açúcar mostraram o efeito positivo do inoculante e a possível utilização de leguminosas de grãos consorciadas. Mais especificamente, os resultados permitem fazer as seguintes considerações:

1. A estirpe IPACF62 apresenta diferentes mecanismos de promoção de crescimento que promoveram ganhos produtivos na cana-de-açúcar, demonstrando potencial para utilização como inoculante comercial;
2. As leguminosas de grãos podem interferir positivamente ou negativamente na cana-de-açúcar em cultivos consorciados, sendo necessário estudos para embasar a escolha da espécie mais apropriada para as diferentes condições edafoclimáticas e de manejo dos cultivos dessa cultura energética;
3. O feijão-caupi apresenta grande potencial para produção de biomassa aérea quando em consórcio com a cana-de-açúcar, sendo uma espécie promissora para promover aportes de N atmosférico e ganhos produtivos, com potencial para diminuir a quantidade de N fertilizante necessária para que a cana expresse seu potencial produtivo;
4. A venda de grãos de leguminosas consorciadas à cana-de-açúcar representa uma fonte extra de renda para os produtores, além de proporcionar benefícios agrícolas e industriais.