



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS – CCA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO - PPGCS

GISLAINE DOS SANTOS NASCIMENTO

ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E QUALIDADE DE UM NEOSSOLO
REGOLÍTICO SOB CULTIVO DE ADUBOS VERDES

AREIA
2021

GISLAINE DOS SANTOS NASCIMENTO

**ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E QUALIDADE DE UM NEOSSOLO
REGOLÍTICO SOB CULTIVO DE ADUBOS VERDES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo. Área de concentração: Solos em Ecossistemas Agrícolas e Naturais.

**Prof. Dr. DJAIL SANTOS
ORIENTADOR**

**Prof. Dr. TANCREDO AUGUSTO FEITOSA DE SOUZA
COORIENTADOR**

**AREIA
2021**

**Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação**

N244a Nascimento, Gislaine dos Santos.

Atributos físicos, químicos e qualidade de um
Neossolo Regolítico sob cultivo de adubos verdes /
Gislaine dos Santos Nascimento. - Areia:UFPB/CCA, 2021.
72 f.

Orientação: Djail Santos.

Coorientação: Tancredo Augusto Feitosa de Souza.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CCA.

1. Ciência do Solo. 2. Gramíneas. 3. Leguminosas. 4.
Práticas vegetativas. 5. Saúde do solo. I. Santos,
Djail. II. de Souza, Tancredo Augusto Feitosa. III.
Título.

UFPB/CCA-AREIA

CDU 631.4(043.3)

GISLAINE DOS SANTOS NASCIMENTO

**ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E QUALIDADE DE UM NEOSSOLO
REGOLÍTICO SOB CULTIVO DE ADUBOS VERDES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Aprovado em: 30 de abril de 2021.

BANCA EXAMINADORA



**Prof. Dr. Djail Santos - Orientador
DSER/CCA/UFPB**

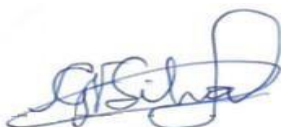


Documento assinado digitalmente
Tancredo Augusto Feitosa de Souza
Data: 07/03/2022 10:30:26-0300
CPF: 061.287.284-05
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

**Prof. Dr. Tancredo Augusto Feitosa de Souza -
Coorientador DABF/UFSC**



**Prof. Dr. Alexandre Paiva da Silva -
Examinador DSER/CCA/UFPB**



**Prof. Dr. Gerônimo Ferreira da Silva -
Examinador DEAGRI/UFRPE**

Dedico

A todos os meus familiares, em especial, ao meu pai “*in memoriam*”, Jessé Ferreira do
Nascimento.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela dádiva da vida, saúde e pelo maior presente proporcionado – a oportunidade de crescer em nível profissional. Sem tua graça e benevolência, nada disso seria possível.

À Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e ao Departamento de Solos e Engenharia Rural (DSER), por todo acolhimento e suporte durante o meu período de pós-graduação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) pelo apoio institucional e oportunidade de formação acadêmica.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo patrocínio e financiamento da minha bolsa de Mestrado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Djail Santos, por toda bondade, humanismo, paciência e valiosas contribuições acadêmicas repassadas. Sem dúvida, foram de suma importância para o meu crescimento profissional. Muito obrigada por tudo!

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Tancredo Augusto Feitosa de Souza, pela confiança, ensinamentos e por todas as palavras de incentivo. Gratidão pela amizade, lealdade e por me proporcionar a oportunidade de fazer parte do seu grupo de orientação. A você todo o meu respeito, apreço e admiração por tudo que fez por mim.

A todo o corpo Docente do PPGCS, pelas colaborações em nível profissional, em especial, àqueles os quais tive forte apreço e admiração, durante minha passagem pelo Departamento, Prof. Bruno de Oliveira Dias, Profa. Vânia da Silva Fraga, Prof. Alexandre Paiva da Silva e Prof. Flávio Pereira de Oliveira. A vocês e aos demais, a minha eterna gratidão!

A Banca Examinadora, em especial ao Prof. Dr. Alexandre Paiva da Silva e ao Prof. Dr. Gerônimo Ferreira da Silva (UFRPE), pelas discussões e importantes contribuições ao trabalho.

Ao meu amor e esposo, José Edmario Silva dos Santos, pela pessoa grandiosa e maravilhosa que é, por todo apoio, amor, paciência e dedicação. É por você e, por nós, que hoje tenho a graça de estar concluindo mais essa etapa na minha vida.

Aos meus sogros, Gracinete Silva dos Santos e José Felismino dos Santos, também considerados como pais, pelo carinho, apoio e oportunidade de convivência. Vocês são minha maior inspiração e exemplo!

À minha mãe, Maria de Fátima Araújo dos Santos e minha avó Alzira Pereira de Araújo Santos, pelo amor e carinho que sempre tiveram comigo. A Deus, a graça de ter me presenteado com essas duas mães maravilhosas.

Às minhas irmãs, Gislene Santos do Nascimento, Girleide Santos do Nascimento e Giliane dos Santos Nascimento pelas parcerias e por sempre estarem comigo, até mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos companheiros de Laboratório de Física do Solo, na pessoa de Vaval, Pedro Luan, Chico e Prof. Flávio, por toda oportunidade concedida e pelos momentos que tivemos durante esses dois anos de curso. A vocês, o meu singelo reconhecimento, respeito e carinho por tudo que puderam fazer por mim.

Ao Professor Alexandre Paiva, pela confiança em ceder espaço no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo-DSER para que eu pudesse realizar às análises químicas da minha dissertação e a Priscila e Raimundo por todo auxílio na realização das mesmas.

Aos anjos que Deus colocou em minha vida, Thaís (Mestranda em Biodiversidade), Rui (Técnico do Laboratório de Sementes) e aos colegas da Chã de Jardim, Vavá, Jó, Fã e Xuriu, pelas colaborações para implantação, condução e coleta de dados do experimento. Sem a ajuda de cada um de vocês, este sonho não teria se concretizado.

Aos amigos Samuel, Joseane, Diego, Jean, Karla, Edjane, Ednaldo e Tamillys, por toda ajuda em termos de implantação de experimento, coleta e elaboração de dados. A todos vocês, a minha gratidão por todo reconhecimento, carinho e aprendizado!

Aos colegas de classe, em especial, Regiane Farias, Diogo, Júlia Eudóxia e William Novais, por todo carisma, humanismo e paciência que sempre tiveram comigo. Gratidão a vocês por todos os momentos sublimes que tivemos juntos.

À minha grande amiga e colega de convivência diária, Talita Kelly, por ter me aturado durante estes dois anos. A você, a minha eterna gratidão e apreço pelas grandes lições de vida repassadas.

A todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que este momento acontecesse.

Gratidão!

RESUMO GERAL

Práticas inadequadas de manejo podem afetar negativamente a qualidade química e física do solo. Neste sentido, alternativas sustentáveis devem ser adotadas com o intuito de melhorar a qualidade dos sistemas produtivos sem comprometer a qualidade do solo. A adubação verde, torna-se uma alternativa viável, pois contribui para tornar o solo produtivo sem ocasionar impactos negativos ao meio ambiente. Portanto, objetivou-se com este estudo avaliar os atributos físicos, químicos e o índice de qualidade de Neossolo Regolítico sob cultivo de adubos verdes no Agreste Paraibano. O experimento foi realizado durante o período de julho a dezembro de 2019, na área experimental Chã-de-Jardim. Os tratamentos avaliados foram: *Brachiaria decumbens*, *Crotalaria juncea*, *Crotalaria ochroleuca*, *Crotalaria spectabilis*, feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), *Dolichos lablab*, milho (*Pennisetum glaucum*), mucuna cinza (*Stizolobium aterrimum*), mucuna preta (*Mucuna pruriens*) e soja perene (*Neonotonia wightii*), em delineamento em blocos casualizados, com três repetições. As amostras de solo com estruturas indeformadas e deformadas foram coletadas em duas profundidades (0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m) para determinação das seguintes variáveis: 1) físicas: densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, capacidade de aeração do solo e capacidade de água disponível do solo; 2) químicas e de fertilidade: pH do solo, fósforo disponível, bases trocáveis (Ca, Mg e K), carbono orgânico, estoque de carbono, soma de bases, H+Al, capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação de bases. Foram avaliados, também, a produção de biomassa seca da parte aérea, densidade de raízes e o índice de qualidade do solo (IQS). Para avaliação dos dados, realizou-se uma análise de variância dos tipos *one-way* e *two-way*, teste de Bonferroni ($p < 0,05$, 0,01 e 0,001), correlação de Pearson, análise de redundância e análise de componentes principais. O IQS foi calculado com base no somatório dos atributos indicadores (biomassa da parte aérea e da raiz, fósforo disponível, K, Ca e estoque de carbono) e do fator de correção. Os maiores valores de pH do solo, bases trocáveis, CTC e capacidade de água disponível foram encontrados nas parcelas onde plantas de Poaceae (i.e., *B. decumbens* e *P. glaucum*) foram cultivadas, enquanto que H+Al, fósforo disponível, CTC, água disponível e capacidade de água disponível foram encontrados nas parcelas onde as plantas de Fabaceae (i.e., *C. ensiformis*, *C. juncea*, *C. ochroleuca*, *C. spectabilis*, *D. lablab*, *M. pruriens*, *N. wightii* e *S. aterrimum*) foram cultivadas. Na profundidade de 0,0-0,1 m foram encontrados os maiores valores de Ca, Mg e K, soma de bases, saturação de bases, carbono orgânico do solo, microporosidade, porosidade total e capacidade de aeração do solo, enquanto que na profundidade de 0,1-0,2 m verificou-se maiores valores de pH do solo, H+Al, densidade do solo e ponto de murcha permanente. Os maiores valores de produção de biomassa seca da parte aérea e de densidade de raízes foram observados nas parcelas cultivadas com *C. ensiformis* e *N. wightii*, respectivamente. Todas as espécies utilizadas como adubo verde proporcionaram uma melhoria significativa na qualidade do solo ($p < 0,01$); porém, o maior valor de IQS foi verificado nas parcelas cultivadas com *N. wightii*. Ao todo, foram desenvolvidos cerca de 33 modelos preditivos para estimar os atributos físicos e químicos do solo e a produção de biomassa da planta para as condições deste estudo.

Palavras-chave: gramíneas; leguminosas; práticas vegetativas; saúde do solo; solos leves.

GENERAL ABSTRACT

Inadequate management practices can negatively affect the soil chemical and, physical quality. In this context, sustainable alternatives can be adopted with the aim to improve the production systems quality without compromising the soil quality. Green manure becomes a viable alternative, since it contributes to increasing soil productivity without negative impacts to environment. Therefore, we aim was to evaluate the soil physical and, chemical attributes and, quality index of Regosol under cultivation of green manures in Agreste Paraibano. The experiment was carried out from July to December 2019, at the “Chã-de-Jardim” Experimental Station. The treatments were: *Brachiaria decumbens*, *Crotalaria juncea*, *Crotalaria ochroleuca*, *Crotalaria spectabilis*, jack bean (*Canavalia ensiformis*), *Dolichos lablab*, paeal millet (*Pennisetum glaucum*), velvet-bean (*Stizolobium aterrimum*), velvet-bean (*Mucuna pruriens*), and perennial soy (*Neonotonia wightii*) in a randomized block design, with three replicates. Undisturbed, and deformed soil samples were collected at two depths (0.0-0.1 and 0.1-0.2 m) to determine the following variables: 1) soil physical: soil bulk density, total porosity, soil macroporosity, soil microporosity, soil field capacity, available water content, permanent wilting point, soil aeration capacity, and soil available water capacity; 2) soil chemical and, fertility: soil pH, available phosphorus, exchangeable Ca, Mg and K, soil organic carbon, soil carbon stock, sum of bases, H+Al, cation exchange capacity (CEC), and base saturation. The shoot dry biomass production, root density, and soil quality index (SQI) were also evaluated. For data evaluation, one-way and two-way analysis of variance, Bonferroni test ($p < 0.05$, 0.01, and 0.001), Pearson correlation analysis, redundancy analysis, and principal components analysis were performed. The SQI was calculated based on the sum of the indicator attributes (shoot and root biomass, available phosphorus, exchangeable Ca and K, and soil carbon stock), and the correction factor. The highest values of soil pH, exchangeable bases, CEC, and soil available water capacity were found in plots under Poaceae plants (e.g., *B. decumbens* and *P. glaucum*) cultivation, while the highest values of H+Al, CEC, soil available water, and soil available water capacity were found in plots where Fabaceae plants (e.g., *C. ensiformis*, *C. juncea*, *C. ochroleuca*, *C. spectabilis*, *D. lablab*, *M. pruriens*, *N. wightii*, and *S. aterrimum*) were cultivated. At the depth of 0.0-0.1 m, the highest values exchangeable Ca, Mg and K, sum of bases, base saturation, soil organic carbon, microporosity, soil porosity, and soil aeration capacity were found, while at the depth of 0.1-0.2 m there were higher values of soil pH, H+Al, bulk density, and permanent wilting point. The highest values for shoot dry biomass and root density, were found in the plots cultivated with *C. ensiformis* and *N. wightii*, respectively. All species used as green manure provided a significant ($p < 0.01$) improvement in soil quality; however, the highest SQI value was found in plots cultivated with *N. wightii*. About 33 predictive models were developed to estimate the soil physical and chemical attributes, and plant biomass production for the conditions of this study.

Keywords: grasses; leguminous; light soils; soil health; vegetative practices.

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO I

- Figura 1** Dados mensais de precipitação (barras cinzas) e temperatura do ar (linha preta) da área experimental em Areia, Paraíba, Brasil (julho a dezembro de 2019). Fonte: <http://www.inmet.gov.br>.33
- Figura 2** Gráfico de pontuação da ACP dos atributos físicos e químicos do solo e da biomassa seca da parte aérea para todas as espécies de plantas estudadas como adubo verde. As figuras geométricas representam amostras de cada parcela para cada espécie de planta. Os dois eixos explicam 88,61% (PC1 = 71,32% e PC2 = 17,29%) da variabilidade total.41

CAPITULO II

- Figura 1** Dados mensais de precipitação (barras cinzas) e temperatura do ar (linha preta) da área experimental em Areia, Paraíba, Brasil (julho a dezembro de 2019). Fonte: <http://www.inmet.gov.br>.49
- Figura 2** Correlação entre os atributos do solo de espécies de plantas utilizadas como adubo verde em ecossistema tropical, Areia, Paraíba, Brasil. Os efeitos não significativos são representados por ×. CTC = capacidade de troca catiônica; CO = Carbono orgânico; CC = capacidade de campo; PMP = ponto de murcha permanente; AD = água disponível; CAD = capacidade de água disponível no solo e CAS = capacidade de aeração do solo.57
- Figura 3** Análise de Redundância para a relação entre a produção primária (biomassa seca da parte aérea e da raiz) e os atributos químicos (a) e físicos (b) do solo.58
- Figura 4** Índice de qualidade do solo (IQS) em um sistema de cultivo com diferentes espécies de adubos verdes.....61

LISTA DE TABELAS

CAPITULO I

Tabela 1 Espécies de plantas estudadas (oito espécies de Fabaceae e duas espécies de Poaceae) utilizadas como plantas de cobertura e suas características durante o experimento de campo.	34
Tabela 2 Atributos físicos e químicos do solo (média $\pm$ DP) em parcelas cultivadas com espécies de adubos verdes.	38
Tabela 3 Atributos físicos e químicos do solo em profundidades de 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m. .	39
Tabela 4 Estimativa de biomassa seca da parte aérea (kg ha^{-1}) e densidade de raízes (g cm^{-3}) de cada espécie de adubo verde estudada (média $\pm$ DP).	40

CAPITULO I

Tabela 1 Espécies de plantas estudadas (oito espécies de Fabaceae e duas espécies de Poaceae) utilizadas como plantas de cobertura e suas características durante o experimento de campo.	51
Tabela 2 Modelos preditivos entre os atributos físicos e químicos do solo e a produção de biomassa da planta.	59

SUMÁRIO

1. Introdução geral	12
2. Revisão bibliográfica	14
2.1 Adubação verde.....	14
2.2 Espécies de adubos verdes.....	15
2.2.1 <i>Brachiaria decumbens</i>	15
2.2.2 <i>Crotalárias (C. juncea, C. spectabilis e C. ochroleuca)</i>	15
2.2.3 <i>Dolichos lablab</i>	16
2.2.4 Feijão de porco (<i>Canavalia ensiformis</i>).....	16
2.2.5 Milheto (<i>Pennisetum glaucum</i>)	17
2.2.6 <i>Mucunas (Mucuna pruriens e Stizolobium aterrimum)</i>	17
2.2.7 Soja perene (<i>Neonotonia wightii</i>).....	18
2.3 Qualidade do solo.....	18
2.4 Indicadores de qualidade do solo sob influência de adubos verdes	19
2.4.1 Químicos	19
2.4.2 Físicos.....	20
2.4.3 Biológicos.....	21
2.5 Índices de qualidade do solo	22
CAPÍTULO I: ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO, PRODUÇÃO DE BIOMASSA E DENSIDADE DE RAÍZES EM SISTEMA DE CULTIVO DE ADUBAÇÃO VERDE DE ECOSSISTEMA TROPICAL DO NORDESTE DO BRASIL	30
1. Introdução	31
2. Material e métodos	32
2.1 <i>Local do estudo, condições climáticas e tipo de solo</i>	32
2.2 <i>Histórico da área</i>	33
2.3 <i>Delineamento experimental</i>	34
2.4 <i>Amostragem de solo</i>	34
2.6 <i>Atributos físicos do solo</i>	35
2.7 <i>Produção de biomassa seca da parte aérea e densidade de raízes</i>	36
2.8 <i>Análises estatísticas</i>	36
3. Resultados.....	37
3.1 <i>Efeito das espécies de plantas utilizadas como adubo verde e profundidades nos atributos físicos e químicos do solo</i>	37
3.2 <i>Produção de biomassa da planta e densidade de raízes</i>	40
3.3 <i>Análise multivariada</i>	40
4. Discussão	41

REFERÊNCIAS	44
CAPÍTULO II: MODELOS PREDITIVOS PARA ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMA DE CULTIVO DE ADUBAÇÃO VERDE EM CONDIÇÕES TROPICAIS DO NORDESTE DO BRASIL	47
1. Introdução	48
2. Material e métodos	49
2.1 <i>Local do estudo, condições climáticas e tipo de solo</i>	<i>49</i>
2.2 <i>Histórico da área</i>	<i>50</i>
2.3 <i>Delineamento experimental</i>	<i>50</i>
2.4 <i>Amostragem de solo</i>	<i>51</i>
2.5 <i>Atributos químicos do solo</i>	<i>51</i>
2.6 <i>Atributos físicos do Solo</i>	<i>52</i>
2.7 <i>Produção de biomassa seca da parte aérea e densidade de raízes</i>	<i>53</i>
2.8 <i>Análises estatísticas</i>	<i>53</i>
2.9 <i>Índice de qualidade do solo (IQS)</i>	<i>54</i>
3. Resultados	54
3.1 <i>Análise de redundância</i>	<i>57</i>
3.2 <i>Modelos preditivos multivariados para IQS.....</i>	<i>58</i>
3.3 <i>Índice de qualidade do solo (IQS)</i>	<i>60</i>
3. Discussão	61
4. Considerações finais	63
REFERÊNCIAS	64
ANEXOS	68

1. Introdução geral

A produção de alimentos de forma sustentável é um dos maiores desafios da atualidade e a busca por tecnologias cada vez mais modernas para estimular a produção, em quantidade e qualidade, sem comprometer o meio ambiente, têm se tornado cada vez mais frequente (ANGHINONI et al., 2021)

No Agreste Paraibano, um dos principais desafios enfrentados pela produção agrícola se deve a aquisição de materiais orgânicos (i.e., esterco bovino) para utilização em sistemas de cultivos, que em grande parte é ocasionado pelos preços elevados dos materiais, produção agropecuária limitada e logística de transporte (NASCIMENTO et al., 2021). Esses fatores não só comprometem a sustentabilidade dos agroecossistemas, mas também reduzem a capacidade do solo em manter suas funções essenciais para o desenvolvimento de sua produção (WESENBEECK et al., 2021).

Nesse contexto, torna-se necessário a adoção de práticas de manejo que promovam a substituição desses materiais por outras fontes orgânicas. Dentre as possíveis práticas a serem adotadas, a adubação verde é considerada como a mais relevante, pois além dos inúmeros benefícios proporcionados ao solo, eleva a produtividade das culturas e não causa impactos negativos sobre o meio ambiente (MA et al., 2021).

A adubação verde foi definida como uma prática de manejo conservacionista que melhora os atributos do solo, através do cultivo isolado ou consorciado de espécies de leguminosas e gramíneas (XAVIER; OLIVEIRA; SILVA, 2017). Dentre as espécies cultivadas com essa finalidade destacam-se *Cajanus cajan*, *Canavalia ensiformis*, *Crotalaria spectabilis*, *Stizolobium aterrimum* e *Pennisetum glaucum* como sendo as comumente utilizadas pelos agricultores familiares (REDIN et al., 2016).

Como principais benefícios desta prática é possível destacar o incremento nos teores de bases trocáveis (ARANTES; CREMON; LUZ, 2012), estoques de carbono (FRASIER; QUIROGA; NOELLEMAYER, 2016), e melhoria dos atributos físicos (TEIXEIRA et al., 2016; ÇERÇİOĞLU et al., 2019), químicos e biológicos do solo (THAPA et al., 2021).

Além dessas alterações, o cultivo com adubos verdes promove uma melhoria na qualidade do solo, tornando o sistema ainda mais produtivo. Portanto, a avaliação deste parâmetro, sob esta condição, torna-se fundamental para auxiliar na sustentabilidade de agroecossistemas (KELLY et al., 2021).

A avaliação da qualidade do solo exige o uso de métodos sistemáticos capazes de mensurar e interpretar as contribuições das práticas de manejo sobre os atributos do solo

(MELO FILHO et al., 2007). Para isso, torna-se necessário a seleção de um conjunto mínimo de indicadores (CHAVES et al., 2012; NEHRANI et al., 2020), levando-se em consideração a facilidade de mensuração, baixo custo e sensibilidade a variações causadas pelo manejo do solo (RAHMANIPOUR et al., 2014). Com base nessa seleção é possível calcular um índice de qualidade do solo (IQS), por meio do somatório dos atributos indicadores e seus respectivos pesos ou contribuições. O IQS é, portanto, um parâmetro avaliativo de suma importância e que expressa a capacidade do solo de funcionar dentro do limite adequado de um ecossistema natural ou bem manejado (GRIFFITHS et al., 2010).

Diante do exposto, este estudo teve por objetivo avaliar os atributos físicos, químicos e o índice de qualidade de Neossolo Regolítico submetido a cultivos de longo prazo de adubos verdes no Agreste Paraibano.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Adubação verde

A adubação verde é uma prática de manejo conservacionista que usa espécies de plantas com aptidão para recuperação ou melhoria dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo (XAVIER; OLIVEIRA; SILVA, 2017).

Em sistemas de cultivos, essas plantas são capazes de proteger o solo contra o impacto das gotas de chuva, aumentar a capacidade de retenção de água e a ciclagem de nutrientes no solo, além de reduzir a infestação por pragas e doenças (COSTA-MELLO et al., 2018). Seus benefícios, quando associados aos manejos rotacionado com coquetel diversificado, contribuem para uma maior produção de matéria seca, sendo esta, influenciada pela época de semeadura, condições climáticas e taxa de decomposição (VAISMAN et al., 2011).

Na agricultura orgânica, a adubação verde pode ser utilizada como alternativa ao uso de fertilizantes nitrogenados, bem como para o incremento da diversidade vegetal e controle de plantas espontâneas (GUARDIA et al., 2019). No sistema de plantio direto, sua finalidade principal é de formar uma camada de palhada, promovendo uma maior cobertura do solo. Neste caso, é comum a utilização de espécies de gramíneas e leguminosas, pelo fato dessas plantas apresentarem características agronômicas distintas, como baixa e alta taxa de decomposição, respectivamente, favorecendo a formação de palhada e a mineralização de elementos no solo (RODRIGUES et al., 2012).

A decomposição dos resíduos vegetais no solo pode ser influenciada pela composição química das espécies cultivadas. Assim, resíduos mais lignificados, ricos em carbono e com baixas concentrações de nitrogênio em seus tecidos tornam-se mais resistentes à decomposição microbiana e tendem a permanecer por mais tempo no solo, em comparação àqueles mais lábeis (ABBASI et al., 2015). Portanto, é possível destacar que a escolha da espécie de adubo verde a ser utilizada depende, dentre outros fatores, dos objetivos do sistema de produção, sendo o uso de consórcio entre diferentes espécies de plantas uma estratégia interessante e eficaz na melhoria dos atributos indicadores físicos, químicos e biológicos do solo (RODRIGUEZ et al., 2020).

Outra importante contribuição da adubação verde é na melhoria da qualidade do solo, pelo aumento na atividade microbiana, estoque de carbono, ciclagem de nutrientes e redução da temperatura no solo (FRASIER; QUIROGA; NOELLEMAYER, 2016).

2.2 Espécies de adubos verdes

2.2.1 *Brachiaria decumbens*

A espécie *Brachiaria decumbens* Stapf. cv. Basilisk é originária da África e que possui utilidades específicas, principalmente para pastagens no Brasil (DIAS et al., 2019). A espécie pertence à família Poaceae, é perene, de baixo crescimento, resistente à seca e adaptada a solos de baixa fertilidade (LIMA FILHO et al., 2014). A *B. decumbens* é ideal para ser utilizada como adubo verde em áreas de baixo potencial agrícola, uma vez que possui sistema radicular fasciculado - que auxilia na formação de agregados estáveis -, e uma alta capacidade de produção de biomassa (25 T ha⁻¹), contribuindo para o aumento da matéria orgânica do solo (MUNIANDY et al., 2020).

2.2.2 Crotalárias (*C. juncea*, *C. spectabilis* e *C. ochroleuca*)

As crotalárias são espécies de adubos verdes pertencentes à família Fabaceae, dentre as quais destacam-se *Crotalaria juncea* L, *Crotalaria spectabilis* Roth e *Crotalaria ochroleuca* G. Don, como sendo as mais utilizadas pelos agricultores com a finalidade de recuperação dos solos. Se caracterizam por serem espécies de ciclo anual, porte ereto, arbustivas e crescimento determinado (LIMA FILHO et al., 2014).

A *C. juncea* é originária de países tropicais, de crescimento rápido, metabolismo C3 e tolerante à seca. A espécie é amplamente utilizada como adubo verde, não apresentando exigência quanto a textura do solo e níveis de fertilidade (PARENTI et al., 2021). Além de produzir uma alta quantidade de biomassa, é resistente ao ataque de pragas e doenças, podendo ser utilizada para o controle de nematoides do solo (WANG et al., 2006). A *C. juncea* pode produzir até 15 T ha⁻¹ de matéria seca e fixar, dependendo das condições cultivo e manejo, até 150 kg ha⁻¹ de N no solo (LIMA FILHO et al., 2014). Outra característica importante desta espécie é a baixa relação C/N e a capacidade de liberação rápida de nutrientes no solo, as quais influenciam diretamente no crescimento e desenvolvimento das culturas em sucessão (PARENTI et al., 2021).

A *C. spectabilis* é originária das Américas do Sul e Norte, de ciclo anual, crescimento ereto e lento, podendo atingir até 1,5 metro de altura (LINK, 2020). Possui um sistema radicular do tipo pivotante que atua diretamente na ciclagem de nutrientes no solo (ARRUDA et al.,

2021). A espécie pode produzir até 6 T ha⁻¹ de matéria seca e fixar cerca de 150 kg de N ha⁻¹ no solo (WUTKE; CALEGARI; WILDNER, 2014).

A *C. ochroleuca* é uma espécie arbustiva de caule ereto e semi-lenhoso, possuindo boa adaptação aos diferentes tipos de solo e condições climáticas (ALMEIDA, 2019). É uma leguminosa rústica, pouco exigente quanto à fertilidade e conteúdo de matéria orgânica do solo, apresentando alta capacidade de produção de biomassa e de fixação de N no solo (FORSTALL-SOSA et al., 2020).

2.2.3 *Dolichos lablab*

De origem africana, o *Dolichos lablab* L. Sweet é considerado uma espécie de adubo verde de alto potencial para ser utilizado na recuperação dos solos. A espécie caracteriza-se por ser anual ou bianual, perene, rasteira e de crescimento indeterminado (LINK, 2020). Possui características como alta capacidade de produção de biomassa e fixação biológica de N no solo. É uma planta que se adapta bem a solos de baixa fertilidade, com crescimento inicial lento (NAEEM et al., 2020).

A espécie *D. lablab* pode ser cultivada com outras espécies em sistemas de cultivos intercalados, consorciados ou isoladamente. Sua principal função como adubo verde é a de melhorar os atributos do solo, após incorporação de sua biomassa (NASCIMENTO et al., 2021).

2.2.4 Feijão de porco (*Canavalia ensiformis*)

A *Canavalia ensiformis* L. DC é uma leguminosa originária da América Central e amplamente utilizada como adubo verde devido as suas características agronômicas como alta capacidade de produção de biomassa, sistema radicular profundo e potencial de controle de invasoras (CHRISTINA et al., 2021). É uma planta anual, ereta, mas de crescimento inicial lento, sendo resistente à seca e adaptada aos diferentes tipos de solos (LIMA FILHO et al., 2014). A espécie tem potencial de melhorar os atributos do solo, podendo minimizar a degradação e aumentar a disponibilidade de nutrientes, devido à sua capacidade de aumentar a ciclagem de nutrientes e promover uma melhoria da fertilidade do solo (BORTOLUZZI et al., 2019).

O ciclo de cultivo da espécie pode variar em função das condições edáficas e climáticas de cada região, mas geralmente se situa entre 130 e 140 dias após o plantio, com ciclo de 80 a

90 dias para o florescimento. A espécie pode produzir até 8 T ha⁻¹ de matéria seca e fixar de 57 a 190 kg ha⁻¹ de N (LIMA FILHO et al., 2014).

2.2.5 Milheto (*Pennisetum glaucum*)

O *Pennisetum glaucum* L.R. Brown é espécie pertencente à família Poaceae, de ciclo anual, crescimento ereto e bastante tolerante à seca (VADEZ et al., 2012). Apresenta pouca exigência quanto a textura do solo, podendo ser cultivada em solos arenosos ou argilosos, de baixa e média fertilidade (DIAS-MARTINS et al., 2018). Esta espécie de forrageira pode ser cultivada no verão, juntamente com espécies de cereais ou em rotações de culturas com milho e soja (SOUZA, 2018). Outra alternativa é a introdução em sistemas de plantio direto, o qual é cultivado com a finalidade de produzir palhada para cobertura de solo (PACHECO et al., 2011).

O *P. glaucum* é uma planta de ciclo curto e geralmente apresenta floração precoce (em média aos 50 dias). Além dessas características, a espécie destaca-se por possuir um sistema radicular fasciculado, permitindo maior exploração do ambiente edáfico (LIMA FILHO et al., 2014).

2.2.6 Mucunas (*Mucuna pruriens* e *Stizolobium aterrimum*)

As mucunas são espécies de plantas originárias da África e pertencente à família Fabaceae, sendo mucuna cinza (*Stizolobium aterrimum* Piper & Tracy) e mucuna preta (*Mucuna pruriens* L. DC) as principais espécies representativas deste gênero (LIMA FILHO et al., 2014).

As mucunas estão incluídas dentre as espécies de adubos verdes com potencial para melhoria dos atributos do solo, devido às suas características agronômicas como alta produção de biomassa, fixação de N, controle de pragas e ervas invasoras, alta taxa de cobertura e estímulo à ciclagem de nutrientes no solo (COMIN et al., 2018).

O *S. aterrimum* é caracterizado como uma planta anual, rústica, trepadora, de crescimento inicial rápido, resistente à seca e adaptada aos diferentes tipos de solo, podendo produzir até 8 T ha⁻¹ de matéria seca e fixar 120 kg ha⁻¹ de N no solo (LIMA FILHO et al., 2014). A espécie possui capacidade para recuperar a fertilidade do solo, aumentar os teores de carbono orgânico, ciclagem de nutrientes e reduzir os níveis de erosão do solo (FORSTALL-SOSA et al., 2020).

A *M. pruriens* é uma planta anual, rasteira e herbácea que apresenta crescimento prostrado e alta adaptação às diferentes condições climáticas e edáficas (CHINAPOLIAH et al., 2019). A espécie se destaca por apresentar crescimento rápido, alta produção de biomassa e capacidade de fixação de N no solo, podendo ser recomendada para recuperação de áreas degradadas, controle de ervas invasoras e cobertura de solo (GUIMARÃES, 2015).

2.2.7 Soja perene (*Neonotonia wightii*)

A *Neonotonia wightii* (Wight & Arn.) J.A. Lackey é uma leguminosa perene, herbácea, de crescimento indeterminado e que apresenta ciclo vegetativo longo. A espécie se destaca pela sua alta capacidade de rebrota, produção de biomassa, fixação biológica de N e resistência à seca (MELO FILHO et al., 2014). Devido essas características agrônômicas pode ser utilizada como adubo verde na recuperação de solos ou como cultura permanente em pomares de frutíferas. A espécie ainda possui um sistema radicular robusto, o que contribui para o aumento da ciclagem de nutrientes e melhoria dos atributos físicos do solo, além de possibilitar o incremento nos teores de matéria orgânica e N no solo (SANTOS et al., 2015).

2.3 Qualidade do solo

A preocupação com a qualidade do solo tomou maior impulso no início da década de 1990, quando começaram a surgir os estudos enfatizando a importância do cuidado do solo para geração de alimentos e a publicação de trabalhos acadêmicos que discorriam sobre a degradação deste recurso natural (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009).

A qualidade do solo foi definida por Griffiths et al. (2010) como sendo a capacidade do solo de manter suas funções ativas ao longo do tempo, sendo considerado um dos parâmetros mais utilizados no monitoramento dos agroecossistemas. Este termo recebeu esta denominação em virtude da capacidade complexa e dinâmica do solo de sustentar a vida, agindo como meio de abrigo para a fauna e flora e por ser ele a base para a produção de alimentos no mundo (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009; NUNES et al., 2020).

Por tratar-se de um parâmetro avaliativo, a qualidade do solo pode ser determinada por meio do estudo dos atributos físicos, químicos e biológicos, também denominados de indicadores de qualidade do solo, sendo a escolha desses indicadores dependentes de fatores como facilidade de mensuração, baixo custo e sensibilidade às mudanças no uso e manejo do solo (RAHMANIPOUR et al., 2014).

Dentre os atributos utilizados em sua avaliação, podem ser destacados os teores de N e P, estoques de carbono, condutividade elétrica, respiração microbiana e diâmetro médio ponderado de agregados (NEHRANI et al., 2020). Neste ponto, foi desenvolvido ao longo das últimas décadas, por meio do uso desses e dentre outros indicadores, a geração de um índice de qualidade do solo (IQS), avaliado com o objetivo de monitorar diferentes sistemas de manejo adotados no mundo.

Este índice representa, de forma geral, o desempenho do solo em relação a sua capacidade de promover o completo crescimento das plantas e com isso, atingir uma produção agrícola sustentável (GURA; MNKENI, 2019). Contudo, fatores inerentes ao uso e manejo do solo podem interferir positivamente ou negativamente nos valores de sua qualidade (SHABANPOUR et al., 2019).

Dentre as possíveis ferramentas utilizadas para geração do IQS, destaca-se a análise de componentes principais (ACP) ou análise multivariada como sendo um dos métodos mais utilizados pelos pesquisadores. O seu princípio básico inclui a seleção de um banco de dados, o qual é reduzido a um conjunto de componentes ou banco mínimo representativo, podendo ser avaliado na forma de vetores lineares a partir de correlações entre as suas variáveis dependentes e possíveis similaridades (NEHRANI et al., 2020).

No entanto, um dos maiores desafios da avaliação da qualidade do solo está relacionado com a sua interpretação (CHAER, 2001), pois há uma diversidade de informações acerca dos indicadores de qualidade do solo na literatura, o que torna a definição de um valor padrão um desafio.

2.4 Indicadores de qualidade do solo sob influência de adubos verdes

2.4.1 Químicos

Os adubos verdes, segundo diversos estudos científicos e evidências práticas, desempenham ações em diferentes aspectos sobre a fertilidade do solo, entre os quais, o aumento no teor de matéria orgânica, no valor de pH do solo e na fixação biológica de N (FERREIRA; SOUSA; CHAVES, 2012). Verifica-se, também, um incremento adicional de nutrientes do perfil solo que pode variar em função do tipo de cultivo e qualidade do material incorporado (SCHMATZ et al., 2016).

Dentre as espécies utilizadas como adubo verde, *C. juncea*, *P. glaucum*, *S. aterrimum* e *Sorghum vulgare* são algumas das que influenciam positivamente nos teores de cátions

trocáveis no solo, a exemplo de K e Mg (ARANTES; CREMON; CORREA LUZ, 2012), além de reduzirem as perdas de P no solo (TIECHER et al., 2017). Contudo, os adubos verdes podem responder de forma diferenciada a essa condição de disponibilidade, podendo haver incremento ou redução de um elemento no solo (ALMEIDA et al., 2019). No Sul do Brasil, o cultivo com leguminosas em Latossolo Amarelo promoveu um maior balanço de N e estoque de C orgânico no solo em comparação ao cultivo com espécies de gramíneas (BALOTA et al., 2014).

A adubação verde também aumenta o conteúdo e o estoque de C no solo. Em um estudo de simulação de 48 anos, realizado em área sob cultivo de adubo verde sob plantio direto, verificou-se um incremento de $0,22 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e uma redução significativa nas perdas desse elemento no solo quando comparado com um ambiente de cultivo convencional (HUNG et al., 2020).

De uma forma geral, a adubação verde promove efeitos positivos sobre os atributos químicos do solo, por melhorar o pH, conteúdo de N, P, K e de matéria orgânica do solo (MA et al., 2021), contribuindo para a qualidade e produtividade de ecossistemas agrícolas e naturais.

2.4.2 Físicos

A qualidade física do solo é indispensável para a melhoria da produção agrícola, estando ligada diretamente com crescimento radicular e o suprimento hídrico e nutricional das culturas (JARDINI, 2018), sendo fatores como manejo e características mineralógicas do solo os responsáveis por promover ou não essa melhor qualidade.

Em sistemas conservacionistas, esse efeito está associado com os maiores teores de matéria orgânica do solo, advindos do uso de resíduos orgânicos (i.e., restos culturais, serragem e plantas de cobertura) que proporcionam ao solo melhor estruturação e maior acúmulo de carbono e retenção de umidade no solo (VALADÃO JÚNIOR; VALADÃO; SILVA, 2017).

Dos resíduos utilizados na agricultura, os adubos verdes têm sido relatados como imprescindíveis para a redução da densidade, aumento da porosidade e do índice de estabilidade de agregados, além dos efeitos condicionantes sobre as características hídricas do solo (TEIXEIRA et al., 2016; ÇERÇIOĞLU et al., 2019)

Dentre as espécies de adubos verdes, o *P. glaucum* apresenta alta capacidade de reduzir a densidade do solo, devido à alta produção de biomassa e expansão de seu sistema radicular que promove incrementos significativos sobre o conteúdo de carbono orgânico, reduzindo a densidade do solo (SILVA et al., 2017).

O efeito do cultivo de adubos verdes sobre os atributos físicos do solo também pode ser evidenciado em curto prazo. Em estudos realizados por Nascente e Stone (2018) e Çerçioğlu et al. (2019), houve alteração significativa de microporosidade, macroporosidade, retenção de água e porosidade total do solo, após dois e cinco anos de manejo com adubos verdes na área, respectivamente. Outro efeito positivo é referente à redução da compactação e melhoria da estruturação do solo pelo cultivo com essas espécies, favorecendo a maior circulação de ar e o crescimento radicular de culturas principais (CALONEGO et al., 2017)

Quanto à disponibilidade de água, Meyer et al. (2020) destacam que uso de cobertura morta, após o cultivo com adubos verdes, pode reduzir a perda de água no solo, devido ao maior acúmulo de matéria orgânica nas camadas mais superficiais, aumentando a capacidade de retenção de água nesta camada de solo.

2.4.3 Biológicos

A biologia do solo é considerada a fase mais ativa e sensível do solo, sendo influenciada positivamente por práticas de manejo como adubação orgânica, plantio direto e cultivo de adubos verdes (SCHMIDT; MITCHELL; SCOW, 2019).

Em agroecossistemas, o papel dos organismos do solo é fundamental para manter a qualidade do solo, pois estes atuam diretamente na decomposição de resíduos, humificação, mineralização, absorção e transporte de nutrientes no solo (ASHWORTH et al., 2017), além de auxiliarem na estruturação de agregados, aeração do solo, retenção e eficiência no uso de água e controle de agentes poluentes (WU et al., 2021; REN et al., 2021)

Além das avaliações envolvendo os microrganismos, a quantificação de carbono orgânico, respiração do solo e biomassa microbiana é imprescindível para a determinação da qualidade biológica do solo, uma vez que estas variáveis estão vinculadas às várias funções e processos ecossistêmicos (NUNES et al., 2020).

A adubação verde pode influenciar de diversas maneiras a microbiota do solo, melhorando a atividade microbiana e incrementando os teores de carbono orgânico do solo (MARTÍNEZ-GARCÍA et al., 2018). Verifica-se também, um aumento na atividade enzimática, principalmente no que diz respeito às enzimas fosfatase e urease, imprescindíveis para a ciclagem de fósforo e nitrogênio no solo, respectivamente (ADETUNJI et al., 2021).

Dentre as espécies de adubos verdes, *Urochloa brizantha*, *Sorghum Bicolor* e *P. glaucum* apresentam alta capacidade de alterar o ambiente biológico do solo, proporcionando maior diversidade de Coleoptera, Hemiptera, Diptera e Isoptera (SANTOS et al., 2020). Além

desses organismos, é possível destacar uma maior ocorrência de fungos micorrízicos arbusculares e de bactérias fixadoras de nitrogênio que atuam auxiliando as plantas na absorção de nutrientes do solo (THAPA et al., 2021).

Na Região Nordeste do Brasil, o cultivo com espécies de leguminosas como *M. pruriens* em Neossolo Regolítico proporcionou uma maior diversidade de macroartrópodes do solo (MELO; SOUZA; SANTOS, 2019). Sob esta mesma condição, Forstall-Sosa et al. (2020) encontraram maiores valores de riqueza, diversidade e dominância na comunidade de macroartrópodes, porém, além de *M. pruriens*, a espécie *C. spectabilis* também contribuiu para a obtenção desses resultados. Para os autores, um dos fatores que contribuiu para a maior presença da macrofauna do solo, foi a significativa quantidade de biomassa (aproximadamente 4,1 e 3,5 T ha⁻¹, respectivamente) produzida por essas espécies de plantas.

2.5 Índices de qualidade do solo

Na literatura existem diversas informações sobre a elaboração de índices de qualidade do solo (IQS), desenvolvidos com o objetivo de avaliar tanto a qualidade do solo geral como o efeito em separado de seus atributos, a exemplo dos índices de qualidade física (IQF), química (IQQ) e biológica do solo (IQB) (XU et al., 2017; MORA-HERRERA et al., 2020; FORSTALL-SOSA et al., 2020).

Dentre os procedimentos adotados para a determinação desses índices destaca-se o da avaliação dos componentes principais (VASU et al., 2016; NABIOLLAHI et al., 2018). Esse procedimento consiste na redução do volume de dados, facilitando a seleção dos indicadores ao agrupar categoricamente os atributos do solo em um conjunto de componentes principais. Ao final, estes indicadores - escolhidos com base no tamanho e seus respectivos pesos - são utilizados para calcular o IQS (VASU et al., 2016).

Este procedimento foi utilizado por Askari e Holden (2014) para avaliar a qualidade do solo em pastagens sob diferentes intensidades de manejo, com relatos de resultados positivos. Nabiollahi et al. (2017); Nabiollahi et al. (2018) e Zhou et al. (2020) também trabalharam com a seleção de indicadores para compor um banco de dados mínimo e, assim, determinar o IQS.

No Leste da China, Liu et al. (2014) avaliaram a qualidade de um solo de baixa produtividade agrícola, por meio da seleção de 18 variáveis edáficas (i.e., físicas, químicas e biológicas). Após análise sucinta de suas colinearidades e significâncias, apenas cinco das 18 variáveis foram escolhidas para compor a equação, sendo elas, matéria orgânica do solo, N total, pH do solo, desidrogenase e fungos micorrízicos arbusculares. A qualidade do solo foi

calculada utilizando a seguinte fórmula: $IQS = \sum W_i \times S_i$, em que, W_i é o peso atribuído a cada indicador e S_i é o indicador de qualidade.

Em relação à qualidade química do solo, Mora-Herrera et al. (2020) desenvolveram um IQQ destinado à avaliação de cacauzeiros na Colômbia. O índice foi calculado utilizando modelagem linguística (procedimento de inferência *fuzzy* ou lógica difusa), com base nas variáveis pH do solo, matéria orgânica, macronutrientes (P, Ca, Mg e K), saturação por bases e teores de cádmio no solo (elemento considerado prejudicial ao desenvolvimento de cacaueiros em países da América Latina). Os autores destacaram a importância do procedimento na predição da qualidade do solo nessas áreas e a obtenção de resultados positivos com a geração do mesmo.

Em relação aos atributos físicos do solo, o uso de um índice de qualidade física (índice “S”), derivado da curva de retenção de água no solo apresentou forte correlação com IQS, conforme detalhado por Xu et al. (2017). Esses autores utilizaram o procedimento da ACP para calcular o IQS com base em oito atributos (carbono orgânico, densidade do solo, N, P e K totais e disponíveis) e depois avaliaram a relação existente entre o índice “S” e o IQS. Os resultados demonstraram que o coeficiente de correlação linear entre ambos foi de 0,88 e que o índice S se correlacionou positivamente com os conteúdos de N total (R^2 : 0,90) e disponível (R^2 : 0,94) no solo, variáveis essas que foram indispensáveis para a geração do IQS.

Em estudo realizado por Huang et al. (2021) no sudoeste da China, foi calculado um IQS (procedimento da ACP) em duas áreas distintas (floresta nativa e cultivo de milho), utilizando 16 variáveis edáficas (densidade do solo, fósforo total, pH do solo, teores de ferro total, ativo e disponível, N total, K, Al, Ca, Mg, Na, enxofre (S), estoque de carbono, carbono orgânico e teor de água no solo). A equação de IQS utilizada foi $IQS = \sum W_i \times N_i$, em que, W_i é o peso atribuído a cada variável e N_i é a pontuação da variável estudada. Os resultados desse estudo mostraram que o carbono orgânico, N total, K e F disponível no solo foram os principais responsáveis pela qualidade do solo nessas áreas e que o cultivo do milho reduziu a qualidade do solo.

Neste ponto, é notória a relevância dos estudos que enfatizam a criação e o aperfeiçoamento dos IQSs, uma vez que estes são utilizados para avaliar a saúde e a capacidade de produção deste recurso natural. No entanto, é desejável que estes sejam desenvolvidos com o máximo de simplicidade e eficácia possível, de modo a refletir a qualidade do solo com precisão (XU et al., 2017).

REFERÊNCIAS

- ABBASI, M. K. et al. Impact of the addition of different plant residues on nitrogen mineralization-immobilization turnover and carbon content of a soil incubated under laboratory conditions. **Solid Earth**, v. 6, n. 1, p. 197-205, 2015.
- ADETUNJI, A. T. et al. Soil pH, nitrogen, phosphatase and urease activities in response to cover crop species, termination stage and termination method. **Heliyon**, v. 7, n. 1, p.1-10, 2021.
- ALMEIDA, D. S. et al. Phosphorus availability and dynamics in soil affected by long-term ruzigrass cover crop. **Geoderma**, v. 337, p. 434-443, 2019.
- ANGHINONI, G. et al. Conservation agriculture strengthen sustainability of Brazilian grain production and food security. **Land Use Policy**, v. 108, n. 105591, 2021.
- ARANTES, E. M.; CREMON, C.; LUZ, M. A. C. Alterações dos atributos químicos do solo cultivado no sistema orgânico com plantio direto sob diferentes coberturas vegetais. **Revista Agrarian**, v. 5, n. 15, p. 47-54, 2012.
- ARRUDA, B. et al. Cover crop species and mycorrhizal colonization on soil phosphorus dynamics. **Rhizosphere**, v. 19, n. 100396, 2021.
- ASHWORTH, A.J. Et al. The structure of the microbial community is affected by cultivation sequences and poultry litter under long-term no-tillage. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 114, p. 210-219, 2017.
- ASKARI, M. S.; HOLDEN, N. M. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. **Geoderma**, v. 230-231, p. 131-142, 2014.
- BALOTA, E. L. et al. Benefits of winter cover crops and no-tillage for microbial parameters in a Brazilian Oxisol: a long-term study. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 197, p. 31-40, 2014.
- BORTOLUZZI, M. P. et al. Crescimento, acúmulo de fitomassa e produtividade do “feijão-deporco” em diferentes datas de semeadura. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 62, p. 1-7, 2019.
- CALONEGO, J. C. et al. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, v. 85, p. 31-37, 2017.
- ÇERÇIOĞLU, M. et al. Effect of cover crop management on soil hydraulic properties. **Geoderma**, v. 343, p. 247-253, 2019.
- CHAER, G. M. **Modelo para determinação de índice de qualidade do solo baseado em indicadores físicos, químicos e microbiológicos**. 2001. 100f. Tese (Doutorado em Microbiologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, MG, 2001.
- CHAVES, A. A. A. et al. Indicadores de qualidade de Latossolo Vermelho sob diferentes usos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 4, p. 446-454, 2012.

CHINAPOLAIHAH, A. et al. Variability in L-Dopa and other biochemical composition of *Mucuna pruriens* (L.) an underutilized tropical legume. **Industrial Crops and Products**, v. 138, n. 111447, p. 1-7, 2019.

CHRISTINA, M. et al. A trait-based analysis to assess the ability of cover crops to control weeds in a tropical island. **European Journal of Agronomy**, v. 128, n. 126316, p. 1-10, 2021.

COMIN, J. J. et al. Carbon and nitrogen contents and aggregation index of soil cultivated with onion for seven years using crop successions and rotations. **Soil and Tillage Research**, v. 184, p. 195-202, 2018.

COSTA-MELLO, S. et al. Abonos verdes en el rendimiento del perejil y la fertilidad del suelo en Piracicaba, Brasil. **Revista Colombiana de Ciências Hortícolas**, v. 12, n. 1, p. 183-191, 2018.

DIAS-MARTINS, A. M. et al. Potential use of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) in Brazil: food security, processing, health benefits and nutritional products. **Food Research International**, v. 109, p. 175-186, 2018.

DIAS, R. R. et al. Morphological variation of phytoliths according to leaf senescence and position in the organs of *Brachiaria decumbens*. **Flora**, v. 260, n. 151478, p. 1-6, 2019.

FERREIRA, L. E.; SOUZA, E. P.; CHAVES, A. F. Adubação verde e seu efeito sobre os atributos do solo. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 7, n. 1, p. 33-38, 2012.

FORSTALL-SOSA K. S. et al. Soil macroarthropod community and soil biological quality index in a green manure farming system of the Brazilian semi-arid. **Biologia**, v. 76, n. 3, p. 1-13, 2020.

FRASIER, I.; QUIROGA, A.; NOELLEMAYER, E. Effect of different cover crops on C and N cycling in sorghum NT systems. **Science of The Total Environment**, v. 562, n. 27107651, p. 628-639, 2016.

GUARDIA, G. et al. Effective climate change mitigation through cover cropping and integrated fertilization: A global warming potential assessment from a 10-year field experiment. **Journal of Cleaner Production**, v. 241, n. 118307, p. 1-12, 2019.

GUIMARÃES, R. R. P. **Avaliação da qualidade nutritiva da biomassa foliar de leguminosas nativas selecionadas para emprego como adubo verde nos agrossistemas da Amazônia**. Manaus: INPA, 2015. 105 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Agricultura no Trópico Úmido, Manaus, AM, 2015.

GRIFFITHS, B. S. et al. Integrating soil quality changes to arable agricultural systems follow inorganic matter addition, or adoption of a ley-arable rotation. **Applied Soil Ecology**, v. 46, n. 1, p. 43-53, 2010.

GURA, I.; MNKENI, P. N. S. Crop rotation and residue management effects under no-till on the soil quality of a Haplic Cambisol in Alice, Eastern Cape, South Africa. **Geoderma**, v. 337, p. 927-934, 2019.

HUANG, W. et al. Determining the impacts of deforestation and corn cultivation on soil quality in tropical acidic red soils using a soil quality index. **Ecological Indicators**, v. 125, n. 107580, p.1-10, 2021.

HUANG, Y. et al. Assessing synergistic effects of no-tillage and cover crops on soil carbon dynamics in a long-term maize cropping system under climate change. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 291, n. 108090, p. 1-13, 2020.

JARDINI, D. C. **Qualidade física e desempenho agrônômico de culturas anuais em um Latossolo (LVad) submetido a aplicação de resíduos agroindustriais**. 2018. 71f. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical), Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, MT, 2018.

KELLY, C. et al. Dryland cover crop soil health benefits are maintained with grazing in the U.S. High and Central Plains. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 313, n. 107358, p. 1-11, 2021.

LIMA FILHO, O. F. et al. **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e práticas**. 2. ed. Brasília: Embrapa Agropecuária, 2014. 478 p.

LINK, L. **Plantas de cobertura de verão: crescimento e acúmulo de nutrientes, épocas de dessecação e produtividade do trigo**. Paraná: UTFPR, 2020. 62 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2020.

LIU, Z. Soil quality assessment of Albic soils with different productivities for eastern China. **Soil and Tillage Research**, v. 140, p. 74-81, 2014.

MA, D. et al. Meta-analysis of green manure effects on soil properties and crop yield in northern China. **Field Crops Research**, v. 266, n. 108146, p. 1-11, 2021.

MARTÍNEZ-GARCÍA, L. B. et al. Organic management and cover crop species steer soil microbial community structure and functionality along with soil organic matter properties. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 263, p. 7-17, 2018.

MELO FILHO, J. F. de. Determinação do índice de qualidade subsuperficial em um Latossolo Amarelo Coeso dos Tabuleiros Costeiros, sob floresta natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1599-1608, 2007.

MELO, L. N.; SOUZA, T. A. F.; SANTOS, D. Cover crop farming system affect macroarthropods community diversity of Caatinga, Brazil. **Biologia**, v. 74, n. 12, p. 1653–1660, 2019.

MEYER, N. et al. Cover crops reduce drainage but not always soil water content due to interactions between rainfall distribution and management. **Agricultural Water Management**, v. 231, n. 105998, p. 01-14, 2020.

MORA-HERRERA, D. Y. A fuzzy logic based soil chemical quality index for cacao. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 177, n. 105624, p. 1-9, 2020.

MUNIANDY, K. V. Filling the gap of *Brachiaria decumbens* (signal grass) research on clinico-pathology and haemato-biochemistry in small ruminants: a review. **Toxicon**, v. 174, p. 26-31, 2020.

NABIOLLAHI, K. et al. Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan. **Ecological Indicators**, v. 83, p. 482-494, 2017.

NABIOLLAHI, K. et al. Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate. **Geoderma**, v. 318, p. 16-28, 2018.

NAEEM, M. et al. Hyacinth bean (*Lablab purpureus* L.) - An underutilised crop with future potential. **Scientia Horticulturae**, v. 272, n. 109551, p. 1-12, 2020.

NASCENTE, A. S.; STONE, L. F. Cover crops as affecting soil chemical and physical properties and development of upland rice and soybean cultivated in rotation. **Rice Science**, v. 25, n. 6, p. 340-349, 2018.

NASCIMENTO, G. S. et al. Soil physico-chemical properties, biomass production, and root density in a green manure farming system from tropical ecosystem, North-eastern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 21, n. 6, p. 2203–2211, 2021.

NEHRANI, H. S. et al. Quantification of soil quality under semi-arid agriculture in the Northwest of Iran. **Ecological Indicators**, v. 108, n.105770, p. 1-12, 2020.

NUNES, M. R. et al. Biological soil health indicators respond to tillage intensity: A US meta-analysis. **Geoderma**, v. 369, n. 15, p. 1-12, 2020.

ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ, R. et al. Legumes used as cover crops to reduce fertilisation problems improving soil nitrate in an organic orchard. **European Journal of Agronomy**, v. 95, p. 1-13, 2018.

PACHECO, L.P. et al. Produção de fitomassa e acúmulo e liberação de nutrientes por plantas de cobertura na safrinha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 1, p. 17-25, 2011.

PARENTI, A. et al. SunnGro: A new crop model for the simulation of sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.) grown under alternative management practices. **Biomass and Bioenergy**, v. 146, n. 105975, p. 1-16, 2021.

RAHMANIPOUR, F. et al. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. **Ecological Indicators**, v. 40, p. 19-26, 2014.

REDIN, M. et al. Plantas de cobertura de solo e agricultura sustentável: espécies, matéria seca e ciclagem de carbono e nitrogênio. In: TIECHER, T. (Org.). **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil**: práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água. Porto Alegre: UFRGS, 2016. p. 7-22.

REN, C. et al. Impacts of earthworm introduction and cadmium on microbial communities composition and function in soil. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 83, n. 103606, p. 1-9, 2021.

RODRIGUES, G. B. et al. Matéria e nutrientes da parte aérea de adubos verdes em cultivos exclusivo e consorciado. **Ceres**, v. 59, n. 3, p. 380-385, 2012.

RODRIGUEZ, C. et al. Grain legume-cereal intercropping enhances the use of soil-derived and biologically fixed nitrogen in temperate agroecosystems. A meta-analysis. **European Journal of Agronomy**, v. 118, n. 126077, p. 1-11, 2020.

SANTOS, D. P. et al. Soil macrofauna associated with cover crops in an Oxisol from the Southwest of Piauí State, Brazil. **Arquivos do Instituto Biológico**, v. 87, n. 822018, p. 1-9, 2020.

SANTOS, L. D. T. et al. Phenotypic plasticity of *Neonotonia wightii* and *Pueraria phaseoloides* grown under different light intensities. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 87, n. 1, p. 519-528, 2015.

SCHMATZ, R. et al. Crop residue quality and soil type influence the priming effect but not the fate of crop residue. **Plant and Soil**, v. 441, n. 1-2, p. 229-245, 2016.

SCHMIDT, R.; MITCHELL, J.; SCOW, K. Cover cropping and no-till increase diversity and symbiotroph: saprotroph ratios of soil fungal communities. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 129, p. 99-109, 2018.

SHABANPOUR, M. et al. Influence of crops on soil properties in agricultural lands of Northern Iran. **Science of The Total Environment**, v. 711, n. 134694, p. 1-42, 2019.

SILVA, M. P. et al. Plantas de cobertura e qualidade química e física de Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto. **Revista Agrária**, v. 12, n. 1, p. 60-67, 2017.

SOUZA, M. C. **Consortiação de braquiária, milheto e crotalária em safrinha na produção de fitomassa e cobertura do solo**. Rondonópolis: UFMG, 2018. 35 f. TCC (Graduação) – Curso superior em Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal do Mato Grosso, Rondonópolis, MT, 2018.

TEIXEIRA, R. B. et al. Tillage systems and cover crops on soil physical properties after soybean cultivation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 20, n. 12, p. 1057-1061, 2016.

THAPA, V. R. et al. Cover crop biomass and species composition affect soil microbial community structure and enzyme activities in semiarid cropping systems. **Applied Soil Ecology**, v. 157, n. 103735, p. 1-10, 2021.

TIECHER, T. et al. Soil fertility and nutrient budget after 23-years of different soil tillage systems and winter cover crops in a subtropical Oxisol. **Geoderma**, v. 308, p. 78-85, 2017.

VADEZ, V. et al. II.1.5 Phenotyping pearl millet for adaptation to drought. **Frontiers in Physiology - Plant Physiology**, v. 3, n. 386, p. 1-12, 2012.

VAISMAN, I. et al. Blade roller-green manure interactions on nitrogen dynamics, weeds, and organic wheat. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 3, p. 879-889, 2011.

VALADÃO JÚNIOR, D. D.; VALADÃO, F. C. DE A.; SILVA, G. J. Atributos físicos e matéria orgânica de um Latossolo sob diferentes manejos. **Cultura Agronômica**, v. 26, n. 3, p. 237-250, 2017.

VASU, D. et al. Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India. **Geoderma**, v. 282, p. 70-79, 2016.

VEZZANI, F. M.; J. MIELNICZUK. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 33, n. 4, p. 743-755, 2009.

WANG, K. H. et al. Influence of organic *Crotalaria juncea* hay and ammonium nitrate fertilizers on soil nematode communities. **Applied Soil Ecology**, v. 31, n. 3, p. 186-198, 2006.

WESENBEECK, C.F.A.V. et al. Can China's overuse of fertilizer be reduced without threatening food security and farm incomes. **Agricultural Systems**, v. 190, n. 103093, p. 1-15, 2021.

WUTKE, E. B.; CALEGARI, A.; WILDNER, L. P. Espécies de adubos verdes e plantas de cobertura e recomendações para seu uso. In: LIMA FILHO, O. F. et al. **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática**. Brasília: Embrapa Agropecuária, p. 59-167, 2014.

WU, X. et al. Deciphering microbial mechanisms underlying soil organic carbon storage in a wheat-maize rotation system. **Science of The Total Environment**, v. 788, n. 147798, p.1-11, 2021.

XAVIER, F. A. S.; OLIVEIRA, J. I. A.; SILVA, M. R. Decomposition and nutrient release dynamics of shoot phytomass of cover crops in the Recôncavo Baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, n. 160103, p. 1-14, 2017.

XU, C. et al. Developing pedotransfer functions to estimate the S-index for indicating soil quality. **Ecological Indicators**, v. 83, n. 147798, p. 338-345, 2017.

ZHOU, Y. et al. Assessment of soil quality indexes for different land use types in typical steppe in the loess hilly area, China. **Ecological Indicators**, v. 118, n. 106743, p. 1-10, 2020.

CAPÍTULO I: ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO, PRODUÇÃO DE BIOMASSA E DENSIDADE DE RAÍZES EM SISTEMA DE CULTIVO DE ADUBAÇÃO VERDE DE ECOSSISTEMA TROPICAL DO NORDESTE DO BRASIL

RESUMO

Em um agroecossistema, os atributos físicos e químicos do solo, a produção de biomassa e a densidade de raízes são considerados fatores-chave para se determinar a saúde do solo, podendo ser, inclusive, influenciados por práticas de manejo. Portanto, objetivou-se com este estudo avaliar o crescimento da planta (i.e., produção de biomassa da parte aérea e densidade de raízes) e as alterações nos atributos de um solo arenoso, após seis anos de cultivo com espécies de adubos verdes. O experimento foi realizado em delineamento em blocos casualizados com dez tratamentos, referente a dez espécies de adubos verdes distribuídas em três blocos: *Brachiaria decumbens* Stapf. cv. Basilisk, *Canavalia ensiformis* (L.) DC, *Crotalaria juncea* L., *Crotalaria ochroleuca* G. Don, *Crotalaria spectabilis* Roth, *Dolichos lablab* (L.) Sweet, *Mucuna pruriens* (L.) DC, *Neonotonia wightii* (Wight & Arn.) JA Lackey, *Pennisetum glaucum* L. e *Stizolobium aterrimum* Piper e Tracy. Os dados foram analisados por meio de anova (*one-way* e *two-way*) e comparados pelo teste de Bonferroni ($p < 0,05$, $0,01$ e $0,001$). Os maiores valores de pH do solo, cátions trocáveis, CTC e capacidade de água disponível do solo foram encontrados em parcelas cultivadas com plantas de Poaceae, enquanto que fósforo, H+Al, CTC, água disponível e capacidade de água disponível foram encontrados em parcelas onde as plantas de Fabaceae foram cultivadas. Os maiores valores de produção de biomassa seca da parte aérea e densidade de raízes foram obtidas em parcelas cultivadas com *C. ensiformis* e *N. wightii*, respectivamente. Esta pesquisa destacou a importância de considerar as espécies de plantas da família Poaceae e Fabaceae, usadas como adubo verde, como principais condicionadoras do solo, promovendo a fertilidade, a ciclagem de nutrientes e os atributos hidráulicos na zona radicular da planta. Os resultados deste estudo evidenciaram que uma prática consecutiva de adubação verde, sem qualquer adição de fertilizante, afetou positivamente os atributos físicos e químicos do solo e melhorou o crescimento da planta (i.e., produção de biomassa seca e densidade radicular) em condições de ecossistema tropical e que, ao alterar a fertilidade do solo estas espécies de plantas podem criar um ciclo sustentável no perfil do solo, promovendo, assim, a sua qualidade.

Palavras-chave: Semiárido brasileiro; adubação verde; solo arenoso; fertilidade do solo; espécies de plantas leguminosas; ecossistema tropical.

1. Introdução

O uso de espécies de plantas como adubo verde é amplamente reconhecido como uma estratégia valiosa para promover a saúde do solo, reduzir a erosão, melhorar os atributos hidráulicos, aumentar os teores de carbono orgânico e fornecer nitrogênio adicional ao perfil do solo (DARYANTO et al., 2018).

De uma forma geral, as espécies de plantas usadas como adubo verde podem promover melhorias significativas sobre os atributos do solo e ajudar a mitigar e se adaptar às condições tropicais, principalmente a partir da redução do uso de fertilizantes, aumento do conteúdo de carbono orgânico, cátions trocáveis e redução da densidade do solo (SOUZA et al., 2018).

No Nordeste do Brasil, o sistema de agricultura familiar baseado em princípios orgânicos é amplamente difundido. No entanto, o uso de fertilizantes orgânicos está se tornando problemático por dois motivos principais. O primeiro está relacionado a uma parcela significativa de produtores que precisam comprar fertilizantes orgânicos a preços elevados (incluindo transporte, distribuição e fonte orgânica). O segundo é que, em períodos de seca, a disponibilidade desses materiais diminui significativamente (SOUZA et al., 2016).

Nesse contexto, o sistema de adubação verde torna-se uma alternativa eficaz para auxiliar os agricultores familiares. Essa prática é responsável por reduzir em até 69% os custos totais com fertilizantes orgânicos. Além disso, as espécies de plantas usadas como adubo verde podem criar uma condição para sustentar uma teia alimentar diversificada no solo, melhorar a fertilidade, proteger a superfície do solo durante o período seco e, após a incorporação, melhorar a produção das espécies de plantas anuais durante o período chuvoso (MELO; SOUZA; SANTOS, 2019a; FORSTALL-SOSA et al., 2020).

Utilizando plantas de Fabaceae e não Fabaceae (i.e., *Brachiaria decumbens* e *Pennisetum glaucum*) como adubo verde, pode-se maximizar a prestação de serviços ecossistêmicos, aumentando a disponibilidade de nutrientes para a safra seguinte e criando um ambiente positivo para produção de biomassa e crescimento de raízes (IMPASTATO; CARRINGTON, 2020). Além disso, como o reservatório de carbono orgânico do solo está ligado à entrada de fontes de matéria orgânica (SOUZA; RODRIGUES; MARQUES, 2016), a prática da adubação verde tem o potencial de aumentar o acúmulo de carbono orgânico no solo ao longo do tempo (FORSTALL-SOSA et al., 2020). Entretanto, os efeitos de longo prazo de seis anos consecutivos dessa prática em um solo arenoso de ecossistema tropical no Nordeste do Brasil ainda são bastante incertos (SOUZA; FREITAS, 2018).

De acordo com Souza e Santos (2018), o aporte de longo prazo de fontes orgânicas no perfil do solo pode promover o crescimento das plantas e melhorar a fertilidade do solo em condições de ecossistemas tropicais brasileiros. Espécies de leguminosas, como *Crotalaria spectabilis* e *Mucuna pruriens*, podem melhorar a fertilidade do solo fornecendo, em média, 200% mais nitrogênio total e 140% mais carbono orgânico do solo do que as espécies não leguminosas (SOUZA et al., 2018; MELO; SOUZA; SANTOS, 2019a, b; FORSTALL-SOSA et al., 2020).

Portanto, entender o efeito da adição do resíduo dessas plantas, que podem melhorar os atributos físicos e químicos do solo, após seis anos de seu cultivo, é essencial para explicar como a prática da adubação verde pode promover a qualidade do solo e a saúde de um ecossistema tropical (MANWARING; WALLACE; WEAVER, 2018; ROY et al., 2018; NUNES et al., 2019).

Neste trabalho, com base na hipótese denominada “ilha de fertilidade” proposta por Souza et al. (2018), Melo; Souza e Santos (2019a), espera-se encontrar maior teor de cátions trocáveis e de carbono orgânico e melhoria nos atributos físicos do solo (i.e., porosidade do solo e água disponível) em parcelas cultivadas com plantas de Fabaceae, devido a sua alta capacidade de produção de biomassa que, após ser incorporada no perfil do solo, pode atuar como fonte de matéria orgânica, aumentando a fertilidade e a disponibilidade de nutrientes no ambiente edáfico (DUVAL et al., 2020; SONG et al., 2020; WARD et al., 2020). Com isso, objetivou-se com este estudo avaliar as alterações nos atributos físicos e químicos de um Neossolo Regolítico sob cultivo em longo prazo com espécies de adubos verdes em ecossistema tropical do Nordeste do Brasil.

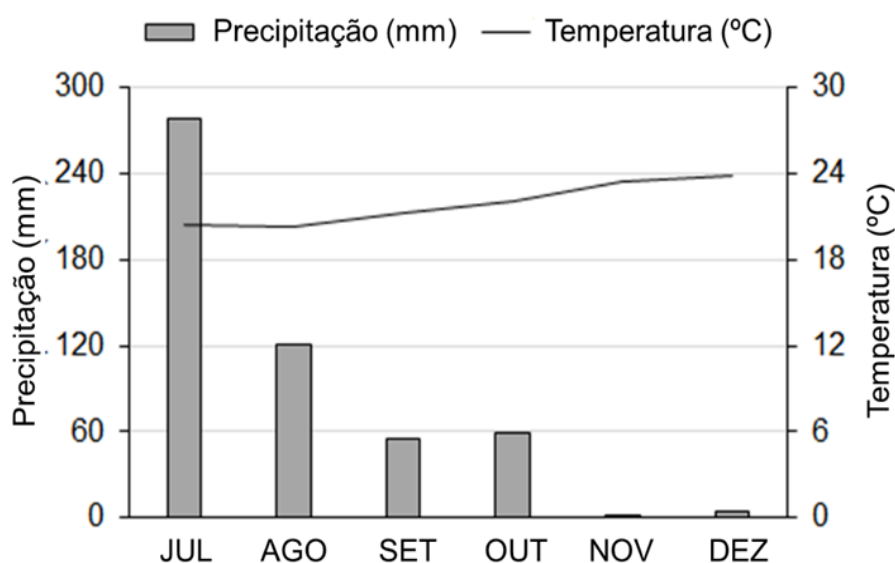
2. Material e Métodos

2.1 Local do estudo, Condições climáticas e tipo de solo

A amostragem foi realizada em um experimento de campo de seis anos, no período de julho a dezembro de 2019, na Estação Experimental “Chã-de-Jardim”, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba (CCA-UFPB), localizado em Areia, Paraíba, Brasil (06°58’12” S, 35°42’15” W, altitude 619 m acima do nível do mar). O clima na área experimental é do tipo As, de acordo com a classificação de Köppen (i.e., tropical com características de verão seco), com precipitação média anual e temperatura do ar de 1.330 mm e +22,5 °C, respectivamente (SILVA et al., 2019).

Os dados climáticos de precipitação mensal e temperatura média do ar para Areia, Paraíba, Brasil (julho a dezembro de 2019) (Figura 1) foram obtidos no site: <http://www.inmet.gov.br>. O solo da área experimental foi classificado como Neossolo Regolítico textura franco-arenosa (WRB, 2015).

Figura 1 Dados mensais de precipitação (barras cinzas) e temperatura do ar (linha preta) da área experimental em Areia, Paraíba, Brasil (julho a dezembro de 2019). Fonte: <http://www.inmet.gov.br>.



2.2 Histórico da área

O sistema de cultivo de adubação verde foi iniciado em 2014, utilizando os mesmos tratamentos em cada ano estudado, sendo que esta pesquisa faz parte da coleta de dados do sexto ano de avaliação.

As espécies de plantas utilizadas como adubos verdes pertencem às famílias Fabaceae e Poaceae e incluem *Canavalia ensiformis* (L.) DC, *Crotalaria juncea* L., *Crotalaria ochroleuca* G. Don, *Crotalaria spectabilis* Roth, *Dolichos Lablab* (L.) Sweet, *Mucuna pruriens* (L.) DC, *Neonotonia wightii* (Wight & Arn.) JA Lackey, *Stizolobium aterrimum* Piper e Tracy, *Brachiaria decumbens* Stapf. cv. Basilisk e *Pennisetum glaucum* L.

Antes da instalação do experimento, a área foi utilizada para o cultivo de inhame. Nesse período eram feitas aplicações anuais com esterco bovino (10 t ha^{-1}) e fertilizante nitrogenado (20 kg ha^{-1} de ureia, 46% N), não sendo realizada correção de solo e nem aplicação de herbicidas. Os tratos culturais como controle de plantas espontâneas e preparo de solo foram realizados de forma manual. Durante o período de cultivo de adubos verdes, a área experimental

não recebeu aplicação de adubos orgânicos, químicos ou corretivos agrícolas (SOUZA et al., 2018).

2.3 Delineamento experimental

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados, com três blocos e dez tratamentos que consistiram de diferentes espécies de plantas, seguindo um sistema de monocultura por parcela. (Tabela 1). Cada parcela (6×4 m) continha oito linhas espaçadas de 0,5 m entre si. Todas as espécies de plantas foram semeadas a uma taxa de semeadura de 400 sementes m^{-2} , a 2 cm de profundidade.

Tabela 1 Espécies de plantas estudadas (oito espécies de Fabaceae e duas espécies de Poaceae) utilizadas como plantas de cobertura e suas características durante o experimento de campo.

Espécies de plantas	Família	Florescimento (dias)	Densidade de plantas (plantas parcela ⁻¹)
<i>Brachiaria decumbens</i>	Poaceae	180	480
<i>Canavalia ensiformis</i>	Fabaceae	70	480
<i>Crotalaria juncea</i>	Fabaceae	55	240
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	Fabaceae	55	240
<i>Crotalaria spectabilis</i>	Fabaceae	76	240
<i>Dolichos lablab</i>	Fabaceae	90	480
<i>Mucuna pruriens</i>	Fabaceae	124	240
<i>Neonotonia wightii</i>	Fabaceae	75	480
<i>Pennisetum glaucum</i>	Poaceae	66	480
<i>Stizolobium aterrimum</i>	Fabaceae	124	480

2.4 Amostragem de solo

As amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m, em cada parcela estudada, aos 90 dias após as espécies de adubos verdes serem incorporadas no solo. Para caracterização dos atributos químicos do solo foram coletadas cinco amostras em linhas, por parcela, com auxílio de um trado holandês. Já para os atributos físicos, foram coletadas amostras indeformadas utilizando-se cinco cilindros metálicos (100 cm³) por parcela. As amostras de solos com estrutura deformada foram armazenadas em sacos plásticos rotulados,

secas ao ar e, em seguida, passadas em peneira de malha de 2 mm para posterior análises (TEIXEIRA et al., 2017).

2.5 Atributos químicos do solo

Para caracterizar quimicamente o solo de cada parcela e profundidade, foram analisados: pH do solo, P disponível, H⁺Al, cátions trocáveis (Ca, Mg, K e Na), soma de bases, capacidade de troca catiônica (CTC), carbono orgânico do solo e saturação de bases.

O pH do solo foi mensurado em uma suspensão de solo e água destilada (1: 2,5 v: v, suspensão solo: água). O P disponível foi extraído por Mehlich-1 e determinado por colorimetria. Os métodos de extração com acetato de cálcio e cloreto de potássio foram usados para determinar H⁺Al, Ca e Mg trocáveis (TEIXEIRA et al., 2017; PAGE; MILLER; KEENEY, 1982) e o Mehlich-1 para determinar K e Na. A soma de bases foi calculada através do somatório dos cátions trocáveis: $SB\ (cmol_c\ kg^{-1}) = K + Na + Ca + Mg$, enquanto a CTC foi mensurada usando a seguinte equação: $CTC\ (cmol_c\ kg^{-1}) = [SB + (H^+ Al)]$. O carbono orgânico total foi estimado de acordo com a metodologia descrita por Okaleb; Gathia; Woomer (1993) com oxidação por via úmida com dicromato de potássio e, finalmente, a saturação por bases foi calculada pela equação: $V\ (\%) = [(SB/CTC) \times 100]$, conforme Teixeira et al. (2017).

2.6 Atributos físicos do solo

Para caracterizar fisicamente o solo de cada parcela e profundidade, foram determinados densidade do solo, microporosidade, porosidade total, macroporosidade, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, teor de água disponível, capacidade de aeração e capacidade de água disponível no solo.

A densidade do solo foi calculada por meio da relação entre a massa do solo seco e o volume do cilindro, conforme descrito por Grossman e Reinsch (2002). A microporosidade do solo foi determinada conforme a metodologia descrita por Teixeira et al. (2017), em que amostras de solo foram saturadas por um período de 48 h por adição gradual de água a uma bandeja de plástico até atingir um nível de $\frac{2}{3}$ da altura dos cilindros, sendo posteriormente pesadas e submetidas à uma tensão de 6 kPa. Após isso, as amostras foram submetidas a secagem em estufa a 105 °C por 48 h para obtenção dos valores da massa do solo seco. A porosidade total foi estimada por meio da equação $PT = (Massa\ do\ solo\ saturado - Massa\ do\ solo\ seco)/volume$. A macroporosidade do solo foi determinada pela diferença entre a

porosidade total e a microporosidade do solo. A capacidade de campo e o ponto de murcha permanente foram determinadas de acordo com Richards (1947), aplicando potenciais matriciais às amostras de solo em uma câmara de Richards com placa porosa. Os potenciais matriciais usados foram 10 kPa (capacidade de campo) e 1.500 kPa (ponto de murcha permanente). O conteúdo de água disponível foi calculado como a diferença entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. A capacidade de aeração do solo e a capacidade de água disponível no solo foram calculadas de acordo com as equações propostas por Reynolds et al. (2002) e Assis et al. (2015), respectivamente.

2.7 Produção de biomassa seca da parte aérea e densidade de raízes

Todas as medições biométricas das plantas foram realizadas durante o período de floração das espécies em cada parcela estudada. Para avaliação da produção de biomassa seca da parte aérea foram selecionadas dez plantas com características homogêneas de altura e diâmetro caular. Em seguida, estas plantas foram cortadas a 5 cm acima da superfície do solo, armazenadas em sacos de papel e secas em estufa a 65 °C. Esses dados foram utilizados para estimar a produção de biomassa das plantas em kg ha⁻¹, seguindo o mesmo procedimento descrito em Forstall-Sosa et al. (2020), estimando o número de plantas por hectare e a biomassa seca da planta em kg ha⁻¹.

Para a coleta das raízes, foi utilizada a metodologia proposta por Souza e Santos (2018), com coleta de dez monólitos de solo de dimensões 20 × 20 × 20 cm em cada parcela. Em seguida, esses monólitos foram envolvidos com papel filme e transportados até o laboratório com o menor distúrbio possível. Durante a análise, foram coletadas as raízes dos monólitos do solo e, logo em seguida, lavadas com auxílio de água destilada em uma peneira de malha de 0,5 mm. A biomassa seca da raiz (g) foi determinada após secagem das amostras por 48 h a 65 °C para estimativa da densidade radicular.

2.8 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk para avaliação quanto à sua normalidade. Como o teste indicou uma normalidade entre os dados, foi utilizado para as variáveis biomassa seca da parte aérea e densidade de raízes um teste F e uma ANOVA do tipo *one-way*, enquanto que para comparar os atributos físicos e químicos entre as espécies de plantas e as profundidades do solo utilizou-se um teste F em uma ANOVA do tipo *two-way*. As

médias foram comparadas, quando significativas, pelo teste de Bonferroni ($p < 0,01$, $0,05$ e $0,001$). Para verificar a relação entre a produção de biomassa seca da planta, densidade de raízes e atributos do solo foi realizada uma análise de componentes principais (ACP). As análises estatísticas foram realizadas usando os pacotes *Hmisc*, *psych*, *car*, *ade4* e *vegan* do software R (R CORE TEAM, 2018).

3. Resultados

3.1 Efeito das espécies de plantas utilizadas como adubo verde e profundidades nos atributos físicos e químicos do solo

Os resultados da ANOVA *two-way* demonstraram diferenças significativas entre as espécies de plantas utilizadas como adubo verde no pH do solo ($F_{9,77} = 4,76$, $p < 0,001$), Ca e K trocáveis, P disponível, H+Al ($F_{9,77} = 3,91$, $p < 0,001$; $F_{9,77} = 3,24$, $p < 0,01$; $F_{9,77} = 36,83$, $p < 0,001$ e $F_{9,77} = 3,03$, $p < 0,01$, respectivamente), CTC ($F_{9,77} = 2,48$, $p < 0,05$), conteúdo de água disponível ($F_{9,77} = 2,25$, $p < 0,05$) e capacidade de água disponível do solo ($F_{9,77} = 2,25$, $p < 0,05$) (Tabela 2), não apresentando diferenças significativas para Mg trocável ($F_{9,77} = 1,41$, $p = 0,37$), carbono orgânico ($F_{9,77} = 1,78$, $p = 0,07$), soma de bases ($F_{9,77} = 0,66$, $p = 0,12$), V ($F_{9,77} = 1,28$, $p = 0,06$), densidade do solo ($F_{9,77} = 0,32$, $p = 0,81$), microporosidade ($F_{9,77} = 1,19$, $p = 0,95$), macroporosidade ($F_{9,77} = 0,67$, $p = 0,57$), porosidade do solo ($F_{9,77} = 0,22$, $p = 0,89$), capacidade de campo ($F_{9,77} = 2,0$, $p = 0,06$), ponto de murcha permanente ($F_{9,77} = 1,86$, $p = 0,08$) e capacidade de aeração do solo ($F_{9,77} = 0,52$, $p = 0,85$).

Os maiores valores significativos de pH do solo e K trocável foram encontrados nas parcelas cultivadas com plantas de Poaceae (*B. decumbens* e *P. glaucum*). Para o Ca trocável, os maiores valores foram encontrados nas parcelas em que *B. decumbens* foi cultivada, enquanto os maiores valores significativos de H+Al foram encontrados em parcelas em que *C. spectabilis*, *M. pruriens*, *N. wightii* e *S. aterrimum* foram cultivadas.

Os maiores valores de fósforo disponível foram verificados em parcelas cultivadas com *C. ensiformis* e *C. spectabilis*, enquanto que os maiores valores de CTC foram encontrados em parcelas sob cultivo de *B. decumbens*, *C. spectabilis*, *N. wightii* e *S. aterrimum*. Para o conteúdo de água disponível no solo, os maiores valores foram obtidos em parcelas cultivadas com *D. lablab* e, para a capacidade de água disponível do solo, os maiores valores foram verificados em parcelas cultivadas com espécies de Poaceae (*B. decumbens* e *P. glaucum*) e de Fabaceae (*C. spectabilis*, *D. lablab* e *N. wightii*) (Tabela 2).

Tabela 2 Atributos físicos e químicos do solo (média $\pm$ DP) em parcelas cultivadas com espécies de adubos verdes.

Espécies de plantas	pH do solo	Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	K ⁺ (mg kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	H ⁺ +Al ³⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	CTC (cmol _c kg ⁻¹)	Água disponível (m ³ m ⁻³)	Capacidade de água disponível no solo (mm $\times 10^3$)
<i>B. decumbens</i>	5,6 $\pm$ 0,2 a	2,00 $\pm$ 0,7 a	37,00 $\pm$ 0,2 a	7,43 $\pm$ 0,1 c	2,30 $\pm$ 0,5 c	5,40 $\pm$ 0,7 a	0,041 $\pm$ 0,0 b	4,00 $\pm$ 0,1 a
<i>C. ensiformis</i>	5,3 $\pm$ 0,2 c	1,80 $\pm$ 0,5 b	36,00 $\pm$ 1,2 b	13,02 $\pm$ 0,1 a	2,30 $\pm$ 0,5 c	5,20 $\pm$ 0,8 b	0,034 $\pm$ 0,0 d	3,00 $\pm$ 0,2 b
<i>C. juncea</i>	5,4 $\pm$ 0,1 c	1,70 $\pm$ 0,6 b	28,00 $\pm$ 1,7 d	5,70 $\pm$ 0,2 c	2,30 $\pm$ 0,5 c	5,10 $\pm$ 0,6 b	0,039 $\pm$ 0,0 c	3,20 $\pm$ 0,1 b
<i>C. ochroleuca</i>	5,4 $\pm$ 0,2 c	1,30 $\pm$ 0,1 d	34,70 $\pm$ 0,8 b	7,19 $\pm$ 0,2 c	2,10 $\pm$ 0,6 d	4,70 $\pm$ 0,5 c	0,036 $\pm$ 0,0 d	3,40 $\pm$ 0,2 b
<i>C. spectabilis</i>	5,4 $\pm$ 0,3 c	1,50 $\pm$ 0,3 c	21,00 $\pm$ 1,0 e	11,81 $\pm$ 0,1 a	2,70 $\pm$ 0,8 a	5,50 $\pm$ 0,8 a	0,040 $\pm$ 0,0 b	4,50 $\pm$ 0,1 a
<i>D. lablab</i>	5,4 $\pm$ 0,2 c	1,60 $\pm$ 0,3 c	34,00 $\pm$ 1,7 b	7,76 $\pm$ 0,2 c	2,40 $\pm$ 0,4 b	5,10 $\pm$ 0,6 b	0,044 $\pm$ 0,0 a	4,20 $\pm$ 0,2 a
<i>M. pruriens</i>	5,1 $\pm$ 0,2 d	1,20 $\pm$ 0,1 d	32,50 $\pm$ 0,6 c	4,77 $\pm$ 0,8 d	2,60 $\pm$ 0,6 a	5,10 $\pm$ 0,7 b	0,037 $\pm$ 0,0 c	3,70 $\pm$ 0,5 b
<i>N. wightii</i>	5,2 $\pm$ 0,1 d	1,6 $\pm$ 0,3 c	27,50 $\pm$ 1,1 d	6,79 $\pm$ 0,2 c	2,60 $\pm$ 0,4 a	5,40 $\pm$ 0,6 a	0,042 $\pm$ 0,0 b	4,40 $\pm$ 0,2 a
<i>P. glaucum</i>	5,5 $\pm$ 0,2 a	1,5 $\pm$ 0,2 c	38,50 $\pm$ 0,8 a	5,88 $\pm$ 0,1 d	2,50 $\pm$ 0,4 b	5,20 $\pm$ 0,6 b	0,042 $\pm$ 0,0 b	4,20 $\pm$ 0,1 a
<i>S. aterrimum</i>	5,2 $\pm$ 0,2 d	1,4 $\pm$ 0,1 d	34,10 $\pm$ 1,0 b	9,50 $\pm$ 0,1 b	2,93 $\pm$ 0,4 a	5,83 $\pm$ 0,7 a	0,038 $\pm$ 0,0 c	3,10 $\pm$ 0,3 b

¹Letras minúsculas iguais nas mesmas colunas não diferem entre si pelo teste de Bonferroni ($p < 0,05$).

Os resultados da ANOVA *two-way* também demonstraram diferenças significativas entre as profundidades de solo para pH do solo, Mg, K, Ca, H+Al ($F_{1,34} = 9,02$, $p < 0,01$, $F_{1,34} = 71,63$, $p < 0,001$, $F_{1,34} = 11,99$, $p < 0,01$ e $F_{1,34} = 36,93$, $p < 0,001$, respectivamente), soma de bases ($F_{1,34} = 9,16$, $p < 0,01$), saturação de bases ($F_{1,34} = 33,79$, $p < 0,001$), carbono orgânico do solo ($F_{1,34} = 4,00$, $p < 0,05$), densidade do solo ($F_{1,34} = 11,04$, $p < 0,01$), microporosidade ($F_{1,34} = 8,62$, $p < 0,01$), porosidade do solo ($F_{1,3483} = 6,83$, $p < 0,05$), ponto de murcha permanente ($F_{1,34} = 7,04$, $p < 0,05$) e capacidade de aeração do solo ($F_{1,34} = 5,34$, $p < 0,05$), não apresentando diferenças significativas para CTC ($F_{1,34} = 2,62$, $p = 0,88$), água disponível ($F_{1,34} = 0,70$, $p = 0,38$), capacidade de água disponível do solo ($F_{1,34} = 0,70$, $p = 0,38$) e capacidade de campo ($F_{1,34} = 1,96$, $p = 0,17$).

A profundidade de 0,0-0,1 m foi responsável por promover maior aumento nos teores de Mg, K, Ca, soma de bases, saturação por bases, carbono orgânico do solo, microporosidade, porosidade do solo e capacidade de aeração do solo, enquanto a profundidade de 0,1-0,2 m promoveu maior valores de pH do solo, H+Al, densidade do solo e ponto de murcha permanente (Tabela 3).

Tabela 3 Atributos físicos e químicos do solo em profundidades de 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m.

Atributos do solo	0,0-0,1 m	0,1-0,2 m
pH do solo	5,3 ± 0,2 b	5,4 ± 0,3 a
Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	1,10 ± 0,2 a¹	0,90 ± 0,5 b
K ⁺ (mg kg ⁻¹)	40,20 ± 0,1 a	24,4 ± 0,7 b
Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	1,47 ± 0,1 a	1,31 ± 0,1 b
H ⁺ +Al ³⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	2,24 ± 0,48 b	2,77 ± 0,53 a
SB (cmol _c kg ⁻¹)	2,91 ± 0,62 a	2,58 ± 0,53 b
V (%)	56,57 ± 0,86 a	48,15 ± 7,03 b
CO (g kg ⁻¹)	8,20 ± 0,1 a	7,60 ± 1,4 b
Densidade do solo (g cm ⁻³)	1,42 ± 0,06 b	1,46 ± 0,08 a
Microporosidade (m ³ m ⁻³)	0,33 ± 0,02 a	0,31 ± 0,02 b
Porosidade do solo (m ³ m ⁻³)	0,40 ± 0,03 a	0,38 ± 0,04 b
Ponto de murcha permanente (m ³ m ⁻³)	0,042 ± 0,005 b	0,045 ± 0,005 a
Capacidade de aeração do solo (mm)	0,23 ± 0,02 a	0,21 ± 0,03 b

¹Letras minúsculas iguais nas mesmas linhas não diferem entre si pelo teste de Bonferroni ($p < 0,05$).

3.2 Produção de biomassa da planta e densidade de raízes

Os resultados de ANOVA *one-way* demonstraram diferenças significativas entre as espécies de plantas na biomassa seca da parte aérea ($F_{9,77} = 56,08$, $p < 0,001$) e densidade de raízes ($F_{9,77} = 73,42$, $p < 0,001$). Os maiores valores de biomassa seca da parte aérea foram encontrados nas parcelas cultivadas com *C. ensiformis* ($645,8 \pm 11,6$), enquanto os maiores valores de densidade radicular foram encontrados nas parcelas onde as plantas *N. wightii* ($1535,0 \pm 262,6$) foram cultivadas (Tabela 4).

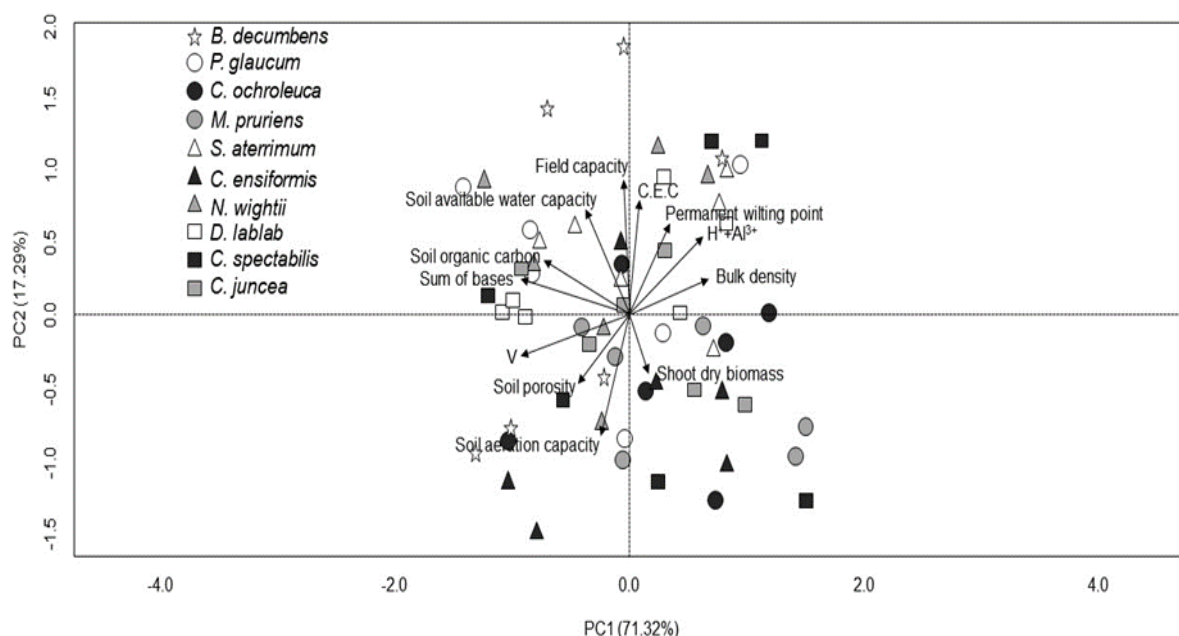
Tabela 4 Estimativa de biomassa seca da parte aérea (kg ha^{-1}) e densidade de raízes (g cm^{-3}) de cada espécie de adubo verde estudada (média $\pm$ DP).

Espécie de planta	Biomassa seca da parte aérea (kg ha^{-1})	Densidade de raízes (g cm^{-3})
<i>B. decumbens</i>	$1058,0 \pm 100,5 \text{ e}^1$	$0,64 \pm 0,07 \text{ b}$
<i>C. ensiformis</i>	$1645,8 \pm 110,6 \text{ a}$	$0,17 \pm 0,02 \text{ c}$
<i>C. juncea</i>	$1100,0 \pm 180,7 \text{ d}$	$0,02 \pm 0,01 \text{ d}$
<i>C. ochroleuca</i>	$1145,8 \pm 280,3 \text{ c}$	$0,07 \pm 0,01 \text{ c}$
<i>C. spectabilis</i>	$1291,6 \pm 550,3 \text{ b}$	$0,12 \pm 0,02 \text{ c}$
<i>D. lablab</i>	$1042,5 \pm 70,7 \text{ e}$	$0,21 \pm 0,06 \text{ c}$
<i>M. pruriens</i>	$1159,1 \pm 280,8 \text{ c}$	$0,27 \pm 0,06 \text{ c}$
<i>N. wightii</i>	$1079,1 \pm 140,3 \text{ e}$	$1,54 \pm 0,26 \text{ a}$
<i>P. glaucum</i>	$1066,7 \pm 120,3 \text{ e}$	$0,04 \pm 0,01 \text{ d}$
<i>S. aterrimum</i>	$1200,0 \pm 370,0 \text{ c}$	$0,20 \pm 0,04 \text{ c}$

3.3 Análise multivariada

De acordo com os resultados da ACP, a biomassa seca da parte aérea, densidade do solo, ponto de murcha permanente, CTC, capacidade de campo, capacidade de água disponível no solo, carbono orgânico do solo, soma de bases, saturação de bases, porosidade do solo e capacidade de aeração do solo foram os principais fatores que contribuíram para a variação das amostras (Figura 2). Os primeiros dois componentes (PC1 e PC2) foram responsáveis por 88,61% da variância dos dados, e por essa razão, foram assumidos como componentes principais. A capacidade de campo apresentou uma correlação positiva com a capacidade de água disponível no solo enquanto o teor de carbono orgânico do solo correlacionou-se positivamente com a soma de bases (Figura 2).

Figura 2 Gráfico de pontuação da ACP dos atributos físicos e químicos do solo e da biomassa seca da parte aérea para todas as espécies de plantas estudadas como adubo verde. As figuras geométricas representam amostras de cada parcela para cada espécie de planta. Os dois eixos explicam 88,61% (PC1 = 71,32% e PC2 = 17,29%) da variabilidade total.



4. Discussão

Os resultados desta pesquisa enfatizam a influência da adubação verde nos atributos físicos e químicos do solo. O objetivo inicial do estudo foi de entender como o crescimento e a incorporação de biomassa das espécies cultivadas mudou esses atributos no perfil do solo, após seis anos de cultivo.

Os resultados demonstraram que houve diferenças significativas entre as espécies de plantas estudadas e as profundidades do solo quanto aos atributos analisados. Porém, não foi encontrado efeito significativo das espécies de plantas sobre o teor de Mg e valores de carbono orgânico, soma de bases, saturação de bases, densidade do solo, microporosidade, macroporosidade, porosidade total, capacidade de aeração do solo e interação entre os dois fatores estudados (espécie de planta $\times$ profundidade do solo).

De acordo com Souza et al. (2018); Melo, Souza e Santos (2019a), as espécies de plantas da família Fabaceae, como *C. ochroleuca*, *C. spectabilis* e *M. pruriens*, podem melhorar os atributos do solo, aumentando o sequestro de carbono orgânico e o conteúdo de Nitrato-N quando são totalmente incorporadas em um Neossolo Regolítico em condições de campo. Esses autores também destacaram mudanças positivas em atributos do solo em parcelas em que

espécies de plantas com as seguintes características foram plantadas e incorporadas: i) alta qualidade da biomassa da parte aérea; ii) fixação biológica de nitrogênio; iii) alta reação do solo em sua zona radicular por extrusão de íons de H^+ ; iv) crescimento rápido e; v) alta eficiência do uso de água em região Semiárida.

Após seis anos consecutivos, foi verificado um incremento de 104 % no teor de carbono orgânico do solo quando comparado com os resultados do primeiro ano deste experimento obtidos por Souza et al. (2018). Esses resultados estão de acordo com trabalhos anteriores (AUSTIN et al., 2017; WANG; WEIL; NAN, 2017; ROY et al., 2018) que também relataram alterações significativas nos atributos químicos do solo (i.e., teor de cátions trocáveis e valor CTC) após incorporação de resíduos de adubos verdes.

Ao alterar a fertilidade do solo, as espécies de adubos verdes criam um ciclo sustentável no perfil do solo, de modo que os nutrientes fornecidos (i.e., P, Ca, Mg e K) por meio da incorporação de biomassa promovem maior crescimento das plantas. Neste caso, tanto a biomassa da parte aérea quanto a da raiz atuam como importantes fontes de matéria orgânica para o solo. De acordo com Melo, Souza e Santos (2019b), existem dois benefícios que estão associados à incorporação de resíduos vegetais no solo: i) o aumento da ciclagem de nutrientes, que consequentemente aumenta o estado nutricional da planta e; ii) a criação de um feedback positivo do solo para a planta através do cultivo em longo prazo com essas espécies de plantas.

A hipótese inicial deste estudo, de que as espécies de leguminosas poderiam promover melhorias sobre os atributos físicos e químicos do solo foi sustentada, exceto para o valor de pH do solo e teores de Ca e K que foram maiores nas parcelas cultivadas com plantas de Poaceae. De uma forma geral, verificou-se que as espécies de Poaceae (i.e., *B. decumbens* e *P. glaucum*) foram responsáveis por promover maiores valores de pH solo, Ca, K, CTC e capacidade de água disponível do solo, enquanto as plantas de Fabaceae (i.e., *C. ensiformis*, *C. juncea*, *C. ochroleuca*, *C. spectabilis*, *D. lablab*, *M. pruriens*, *N. wightii* e *S. aterrimum*), promoveram maior H^+Al , P disponível, CTC e conteúdo de água disponível no solo.

Para a produção de biomassa seca da parte aérea e densidade de raízes, as espécies *C. ensiformis* e *N. wightii* apresentaram os maiores valores dentre as espécies estudadas, provavelmente, devido à alta capacidade de fixação de N. Isso também pode estar relacionado à modificação do solo pela adubação verde em longo prazo, que após incorporação sucessiva contribui para melhoria da fertilidade do solo e aumento da ciclagem de nutrientes (KALLENBACH et al., 2015; POEPLAU et al., 2017; SOUZA; FREITAS, 2018; FORSTALL-SOSA et al., 2020; HENNERON et al., 2020).

A produção de biomassa vegetal em ecossistema tropical é um fator importante para a qualidade do solo (LAW et al., 2019). Nesse sentido, quando a biomassa produzida é incorporada, ela pode atuar como refúgio para organismos do solo criarem galerias e transformarem a matéria orgânica em estágios intermediários de decomposição (MELO; SOUZA; SANTOS, 2019a; KOOCH; NOGHRE, 2020; MASSACCESI et al., 2020).

Apesar deste estudo não ter sido projetado para testar diretamente se a densidade de raízes afeta os atributos físicos e químicos do solo, deve-se considerar que os maiores valores de porosidade do solo, água disponível e capacidade de água disponível foram encontrados em parcelas cultivadas com plantas de alta densidade de raízes. De acordo com Zhang et al. (2020), este resultado pode estar relacionado com as propriedades hidráulicas encontradas na zona rizosférica do gênero *Neonotoniae* e da rizodeposição de elementos que contribuem para alterar a distribuição de raízes no solo.

Esses resultados estão de acordo com estudos anteriores realizados por Domínguez et al. (2020), Forstall-Sosa et al. (2020) e Rabbi et al. (2021) que relataram que a incorporação constante de resíduos de alta qualidade (i.e., biomassa seca da parte aérea e da raiz) no perfil do solo influenciam diretamente e indiretamente a fertilidade e os atributos físicos do solo, respectivamente, alterando a interface solo-raiz e a capacidade da planta de se recuperar de eventuais episódios de seca (TESFAYE et al., 2020).

5. Considerações finais

Os resultados deste estudo evidenciam que uma prática consecutiva de adubação verde, sem qualquer adição de fertilizante, afetou positivamente os atributos físicos e químicos do solo e melhorou crescimento da planta (i.e., produção de biomassa seca e densidade radicular) em condições de ecossistema tropical e que, ao alterar a fertilidade do solo estas espécies de plantas podem criar um ciclo sustentável no perfil do solo, promovendo, assim, a sua qualidade.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, P. C. R. et al. Atributos físicos do solo em Sistemas de Integração Lavoura Pecuária-Floresta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 309-316, 2015.
- AUSTIN, E. E. et al. Cover crop root contributions to soil carbon in a no-till corn bioenergy cropping system. **GCB Bioenergy**, v. 9, n. 7, p. 1252–1263, 2017.
- DARYANTO, S. et al. Quantitative synthesis on the ecosystem services of cover crops. **Earth-Science Reviews**, v. 185, p. 357-373, 2018.
- DOMÍNGUEZ, M. T. et al. Thistle crops in marginal lands after compost addition: plant biomass and effect on soil physical, chemical and biological properties. **Land Degradation & Development**, v. 3, n. 9, p. 1167-1175, 2020.
- DUVAL, B. D et al. Greenhouse gas emissions and extracellular enzyme activity variability during decomposition of native versus invasive riparian tree litter. **Plant Ecology**, v. 221, n. 3, p. 177-189, 2020.
- FORSTALL-SOSA, K. S. et al. Soil macroarthropod community and soil biological quality index in a green manure farming system of the Brazilian semi-arid. **Biologia**, v. 76, n. 3, p. 907-917, 2020.
- GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. The solid phase. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Eds.). **Methods of soil analysis: Part 4 Physical Methods**. Madison, Estados Unidos: SSSA Book Series: 2002. p. 201-414.
- HENNERON, L. et al. Rhizosphere control of soil nitrogen cycling: a key component of plant economic strategies. **New Phytologist**, v. 228, n. 4, p. 1269-1282, 2020.
- IMPASTATO, C. J.; CARRINGTON, M. E. Effects of plant species and soil history on root morphology, arbuscular mycorrhizal colonization of roots, and biomass in four tallgrass prairie species. **Plant Ecology**, v. 221, n. 2, p. 117-124, 2020.
- KALLENBACH, C. M. et al. Microbial physiology and necromass regulate agricultural soil carbon accumulation. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 91, p. 279–290, 2015.
- KOOCH, Y.; NOGHRE, N. The effect of shrubland and grassland vegetation types on soil fauna and flora activities in a mountainous semi-arid landscape of Iran. **Science of The Total Environment**, v. 703, n. 104621, p. 1-39, 2019.
- LAW, S. et al. Suspended dead wood decomposes slowly in the tropics, with microbial decay greater than termite decay. **Ecosystems**, v. 22, n. 6, p. 1176–1188, 2019.
- MANWARING, M.; WALLACE, H. M.; WEAVER, H. J. Effects of a mulch layer on the assemblage and abundance of mesostigmatan mites and other arthropods in the soil of a sugarcane agro-ecosystem in Australia. **Experimental and Applied Acarology**, v. 74, n. 3, p. 291–300, 2018.

MASSACCESI, L. et al. Soil functions are affected by transition from conventional to organic mulch-based cropping system. **Applied Soil Ecology**, v. 153, n. 103639, p. 1-10, 2020.

MELO, L. N.; SOUZA, T. A. F.; SANTOS, D. Transpiratory rate, biomass production, and leaf macronutrient content of different plant species cultivated on a Regosol in the Brazilian semiarid. **Russian Agricultural Sciences**, v. 45, n. 2, p. 147-153, 2019a.

MELO, L. N.; SOUZA, T. A. F.; SANTOS, D. Cover crop farming system affect macroarthropods community diversity of Caatinga, Brazil. **Biologia**, v. 74, n. 12, p. 1653-1660, 2019b.

NUNES, L. A. P. L. et al. Edaphic fauna in a vegetation gradient in the Sete Cidades National Park. **Brazilian Journal of Biology**, v. 79, n. 1, p.45-51, 2019.

OKALEBO, J. R.; GATHIA, K. W.; WOOMER, P. L. **Laboratory methods of plant and soil analysis: a working manual**. Nairobi: Tropical Soil Biology and Fertility Programme. 1993. 88 p.

PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. **Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties**. 2 ed. Madison: Estados Unidos: American Society of Agronomy. 1982.

POEPLAU, C. et al. Qualitative and quantitative response of soil organic carbon to 40 years of crop residue incorporation under contrasting nitrogen fertilisation regimes. **Soil Research**, v. 55, n. 1, p. 1-9, 2017.

RABBI, S. M. F. et al. High water availability in drought tolerant crops is driven by root engineering of the soil micro-habitat. **Geoderma**, v. 383, n. 114738, p. 1-10, 2021.

R CORE TEAM R. **A language and environment for statistical computing**. Vienna, Áustria: R Foundation for Statistical Computing, 2018. Disponível em: <https://www.R-project.org/>

REYNOLDS, W. D. et al Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, v. 110, n. 1–2, p. 131-146, 2002.

RICHARDS, L. A. Pressure-membrane apparatus, conduction and use. Madison: **Agricultural Engineering**, v. 28, n. 10, p. 451-454, 1947.

ROY, S. et al. Soil arthropods in maintaining soil health: thrust areas for sugarcane production systems. **Sugar Tech**, v. 20, n. 1, p. 376–391, 2018.

SILVA, S. A. I. et al. Avaliação dos componentes de produção em variedades crioulas de fava cultivadas no Agreste da Paraíba. **Revista Ciências Agrárias**, v. 42, n. 3, p. 731-742, 2019.

SONG, H. et al. Precipitation variability drives the reduction of total soil respiration and heterotrophic respiration in response to nitrogen addition in a temperate forest plantation. **Biology and Fertility of Soils**, v. 56, n. 2, p. 273-279, 2020.

SOUZA, A. V. S. S. et al. Agronomic evaluation of legume cover crops for sustainable agriculture. **Russian Agricultural Sciences**, v. 44, n. 2, p. 31–38, 2018.

SOUZA, T. A. F.; FREITAS, H. **Long-term effects of fertilization on soil organism diversity**. In: GABA, S.; SMITH, B.; LICHTFOUSE, E. (Ed.). Califórnia, Estados Unidos: Springer, 2018. p. 211-247.

SOUZA, T. A. S.; RODRIGUES, A. F.; MARQUES, L. F. Long-term effects of alternative and conventional fertilization II: Effects on *Triticum aestivum* L. development and soil properties from a Brazilian Ferralsols. **Russian Agricultural Sciences**, v. 42, n. 1, p. 1-6, 2016.

SOUZA, T. A. F.; SANTOS, D. Effects of using different host plants and long-term fertilization systems on population sizes of infective arbuscular mycorrhizal fungi. **Symbiosis**, v. 76, n. 2, p. 139-149, 2018.

TEIXEIRA, P. C. et al. (Ed.) **Manual de métodos de análise do solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

TESFAYE, M. A. et al. Aboveground biomass, growth, and yield for some selected introduced tree species, namely *Cupressus lusitanica*, *Eucalyptus saligna*, and *Pinus patula* in Central Highlands of Ethiopia. **Journal of Ecology and Environment**, v. 44, n. 3, p. 1-18, 2020.

WANG, F.; WEIL, R. R.; NAN, X. Total and permanganate-oxidizable organic carbon in the corn rooting zone of US Coastal Plain soils as affected by forage radish cover crops and N fertilizer. **Soil and Tillage Research**, v. 165, p. 247-257, 2017.

WARD, E.B. et al. Invasive lianas are drivers of and passenger to altered soil nutrient availability in urban forests. **Biology Invasions**, v. 22, n. 3, p. 935-955, 2020.

WRB - IUSS Working Group. **World reference base for soil resources 2014**. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: FAO. 2015. 193 p. (World Soil Resources Reports, 106).

ZHANG, X. X. et al. A comparison between water uptake and root length density in winter wheat: effects of root density and rhizosphere properties. **Plant Soil**, v. 451, n. 1-2, p. 345-356, 2020.

CAPÍTULO II: MODELOS PREDITIVOS PARA ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMA DE CULTIVO DE ADUBAÇÃO VERDE EM CONDIÇÕES TROPICAIS DO NORDESTE DO BRASIL

RESUMO

O índice de qualidade do solo é um parâmetro ideal para avaliar a saúde e a capacidade do solo de sustentar uma alta produção de biomassa. No entanto, os modelos já existentes são baseados em dados locais e, portanto, faltam ferramentas de precisão para monitorar a qualidade do solo em sistemas de cultivo de longo prazo em condições tropicais. Neste estudo, foram caracterizados os atributos físicos e químicos do solo, a produção de biomassa da parte aérea e a densidade de raízes em um experimento de campo de seis anos, utilizando dez tratamentos distribuídos em três blocos: *Brachiaria decumbens* Stapf. cv. Basilisk, *Canavalia ensiformis* L. DC, *Crotalaria juncea* L, *Crotalaria ochroleuca* G. Don, *Crotalaria spectabilis* Roth, *Dolichos Lablab* L. Sweet, *Mucuna pruriens* L. DC, *Neonotonia wightii* (Wight & Arn.) J.A. Lackey, *Pennisetum glaucum* L e *Stizolobium aterrimum* Piper & Tracy. Os dados foram analisados por meio de análise de correlação de Pearson, análise de redundância, geração de modelos preditivos e um índice de qualidade do solo (IQS). A maioria dos atributos físicos e químicos do solo foram correlacionados entre si. A biomassa seca da parte aérea correlacionou-se positivamente com o estoque de carbono, K, macro e microporosidade do solo. As variáveis pH do solo, Al, Ca, Mg, K, Na, P disponível, estoque de carbono, densidade, microporosidade, macroporosidade e ponto de murcha permanente contribuíram para a produção primária líquida da planta. O maior valor de IQS foi observado nas parcelas cultivadas com *N. wightii*. Cerca de 33 modelos preditivos foram desenvolvidos para estimar os atributos do solo e a produção de biomassa da planta. Estes resultados destacam a importância de considerar espécies de plantas com alta produção de biomassa de raízes para o aumento dos teores de P, Ca e K, e estoque de carbono do solo, após incorporação de sua biomassa, e com isso, melhorar o crescimento da planta e a qualidade do solo em condições tropicais.

Palavras-chave: adubação verde; experimento de campo de longa duração; solo arenoso; índice de qualidade do solo.

1. Introdução

O sistema de cultivo adubação verde como uma prática fundamental de gestão da qualidade do solo e dos processos do ecossistema (i.e., fornecimento de matéria orgânica ao solo e ciclagem de nutrientes) tem sido amplamente relatado em escala regional e global (HE et al., 2020; KHAN et al., 2020). Dentre os principais efeitos ocasionados por esta prática destacam-se os atributos físicos e químicos do solo e a produção de biomassa da planta como sendo os mais relevantes (FERNÁNDEZ et al., 2020).

Nesses sistemas, as espécies cultivadas podem ser utilizadas com a finalidade de proteção do solo e como fonte de matéria orgânica (GABRIEL et al., 2021; TORRES et al., 2021), gerando benefícios importantes para os pequenos agricultores, tais como redução do uso de fertilizantes e outros condicionadores de solo (ZHOU et al., 2020). Inclusive, em regiões como o Nordeste do Brasil, essa prática pode reduzir até 69% dos custos totais com fertilizantes orgânicos (NASCIMENTO et al., 2021). Nesse contexto, é importante ter estimativas precisas da qualidade do solo, não só para os pequenos agricultores integrá-las ao planejamento do manejo do solo, mas também para atender aos requisitos da agricultura de baixo carbono propostos pelo governo brasileiro (STABILE et al., 2020; VINHOLIS et al., 2021).

No Brasil, diferentes modelos de qualidade do solo em escalas locais e regionais têm sido desenvolvidos até o momento, considerando principalmente os resultados de química e de biologia do solo (SANTOS et al., 2021). Contudo, faltam modelos que possibilitem uma visão mais precisa da qualidade do solo, sendo que a principal razão é a dificuldade de se obter dados em experimentos de longo prazo, especialmente se o modelo considerar possíveis mudanças nas condições meteorológicas (ANDRADE et al., 2020).

Neste estudo, foram utilizados dados de um sistema de cultivo de adubos verdes, já que o experimento é monitorado para avaliação dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, utilizando parcelas estabelecidas em ambiente tropical desde 2014. Os trabalhos anteriores que foram desenvolvidos nesta área demonstraram que as espécies utilizadas como adubos verdes foram essenciais para melhorar o conteúdo de carbono orgânico do solo, produção de biomassa seca da parte aérea e a diversidade e abundância da biota do solo (SOUZA et al., 2018; MELO; SOUZA; SANTOS, 2019; FORSTALL-SOSA et al., 2020; NASCIMENTO et al., 2021). No entanto, é preciso entender o papel da produção de biomassa da raiz no perfil do solo e como isso pode contribuir para a aumentar a sua qualidade.

Para entender este efeito foi levantada a hipótese de que as espécies de plantas com alta produção de biomassa de raízes, em uma escala temporal, podem melhorar a qualidade do solo,

conforme descrito por Laurindo et al. (2021). Com isso, o objetivo principal deste estudo foi de desenvolver modelos preditivos para um índice de qualidade do solo em um sistema de cultivo de adubação verde de longo prazo, levando em consideração variáveis indicadoras como biomassa seca de planta (parte aérea e raiz) e atributos físicos e químicos do solo.

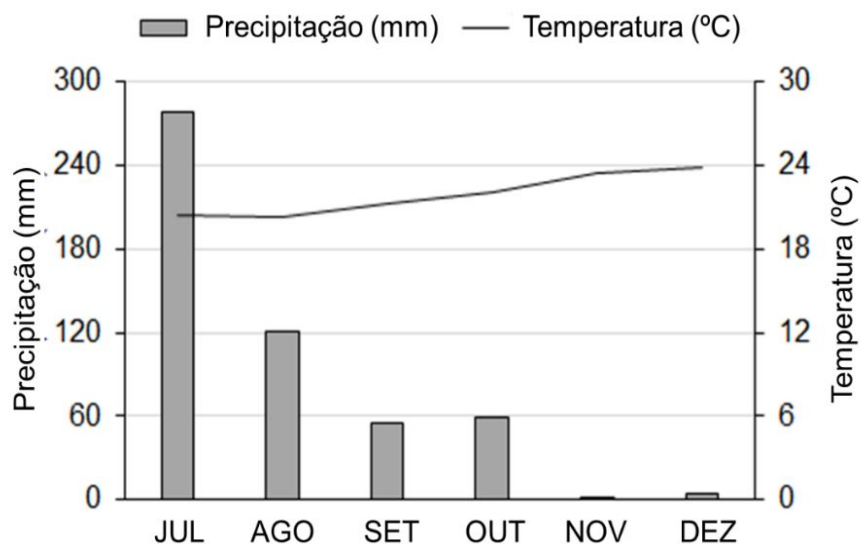
2. Material e métodos

2.1 Local do estudo, condições climáticas e tipo de solo

A amostragem foi realizada em um experimento de campo de seis anos, no período de julho a dezembro de 2019, na Estação Experimental “Chã-de-Jardim”, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba (CCA-UEPB), localizado em Areia, Paraíba, Brasil (06° 58’ 12” S, 35° 42’ 15” W, altitude 619 m acima do nível do mar). O clima na área experimental é do tipo As, de acordo com a classificação de Köppen (i.e., tropical com características de verão seco), com precipitação média anual e temperatura do ar de 1.330 mm e +22,5 °C, respectivamente (SILVA et al., 2019).

Os dados climáticos de precipitação mensal e temperatura média do ar para Areia, Paraíba, Brasil (julho a dezembro de 2019) (Figura 1) foram obtidos no site: <http://www.inmet.gov.br>. O solo da área experimental foi classificado como Neossolo Regolítico textura franco-arenosa (WRB, 2015).

Figura 1 Dados mensais de precipitação (barras cinzas) e temperatura do ar (linha preta) da área experimental em Areia, Paraíba, Brasil (julho a dezembro de 2019). Fonte: <http://www.inmet.gov.br>.



2.2 Histórico da área

O sistema de cultivo de adubação verde foi iniciado em 2014, utilizando os mesmos tratamentos em cada ano estudado, sendo que esta pesquisa faz parte da coleta de dados do sexto ano de avaliação.

As espécies de plantas utilizadas como adubos verdes pertencem às famílias Fabaceae e Poaceae e incluem *Canavalia ensiformis* (L.) DC, *Crotalaria juncea* L., *Crotalaria ochroleuca* G. Don, *Crotalaria spectabilis* Roth, *Lablab purpureus* (L.) Sweet, *Mucuna pruriens* (L.) DC, *Neonotonia wightii* (Wight & Arn.) JA Lackey, *Stizolobium aterrimum* Piper e Tracy, *Brachiaria decumbens* Stapf. cv. Basilisk e *Pennisetum glaucum* L.

Antes da instalação do experimento, a área foi utilizada para o cultivo de inhame. Nesse período foram feitas aplicações anuais com esterco bovino (10 t ha⁻¹) e fertilizante nitrogenado (20 kg ha⁻¹ de ureia, 46% N), não sendo realizado correção de solo e nem aplicação de herbicidas. Os tratos culturais como controle de plantas espontâneas e preparo de solo foram realizados de forma manual. Durante o período de cultivo de adubos verdes, a área experimental não recebeu aplicação de adubos orgânicos ou químicos e nem corretivos agrícolas (SOUZA et al., 2018).

2.3 Delineamento experimental

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados, com três blocos e dez tratamentos que consistiram de diferentes espécies de plantas, seguindo um sistema de monocultura por parcela. (Tabela 1). Cada parcela (6 × 4 m) continha oito linhas espaçadas 0,5 m entre si. Todas as espécies de plantas foram semeadas a uma taxa de semeadura de 400 sementes m², a 2 cm de profundidade.

Tabela 1 Espécies de plantas estudadas (oito espécies de Fabaceae e duas espécies de Poaceae) utilizadas como plantas de cobertura e suas características durante o experimento de campo.

Espécies de plantas	Família	Florescimento (dias)	Densidade de plantas (plantas parcela ⁻¹)
<i>Brachiaria decumbens</i>	Poaceae	180	480
<i>Canavalia ensiformis</i>	Fabaceae	70	480
<i>Crotalaria juncea</i>	Fabaceae	55	240
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	Fabaceae	55	240
<i>Crotalaria spectabilis</i>	Fabaceae	76	240
<i>Dolichos lablab</i>	Fabaceae	90	480
<i>Mucuna pruriens</i>	Fabaceae	124	240
<i>Neonotonia wightii</i>	Fabaceae	75	480
<i>Pennisetum glaucum</i>	Poaceae	66	480
<i>Stizolobium aterrimum</i>	Fabaceae	124	480

2.4 Amostragem de solo

As amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m, em cada parcela estudada, aos 90 dias após as espécies de adubos verdes serem incorporadas no perfil do solo. Para caracterização dos atributos químicos do solo, foram coletadas cinco amostras em linhas, por parcela, com auxílio de um trado holandês. Já para os atributos físicos, foram coletadas amostras indeformadas usando cinco cilindros metálicos (100 cm³) por parcela. As amostras de solos com estrutura deformada foram armazenadas em sacos plásticos rotulados, secas ao ar e, em seguida, passadas em peneira de malha de 2 mm para posterior análise (TEIXEIRA et al., 2017).

2.5 Atributos químicos do solo

Para caracterizar quimicamente o solo de cada parcela e profundidade, foram analisados: pH do solo, fósforo disponível, cátions trocáveis (K, Na, Ca, Mg e Al), soma de

bases, capacidade de troca catiônica, carbono orgânico do solo, saturação por bases e estoque de carbono orgânico do solo.

O pH do solo foi mensurado em uma suspensão de solo e água destilada (1: 2,5 v: v, suspensão solo: água). O P disponível foi extraído por Mehlich-1 e determinado por colorimetria. O método de extração com cloreto de potássio foi usado para determinar Al, Ca e Mg trocáveis (PAGE; MILLER; KEENEY, 1982), e o Mehlich-1 para determinar K e Na. A soma de bases foi calculada através do somatório dos cátions trocáveis: $SB\ (cmol_c\ kg^{-1}) = K + Na + Ca + Mg$, enquanto a capacidade de troca catiônica foi mensurada usando a seguinte equação: $CTC\ (cmol_c\ kg^{-1}) = [Soma\ de\ bases + (H+Al)]$. O carbono orgânico total foi estimado de acordo com a metodologia descrita por Okalebo; Gathia; Woomer (1993) com oxidação por via úmida com dicromato de potássio, e a saturação de base calculada pela equação: $V(\%) = [(SB/CTC) \times 100]$ (TEIXEIRA et al., 2017). O estoque de carbono foi calculado através do produto entre as variáveis carbono orgânico, densidade do solo e profundidade amostrada.

2.5.1 *Atributos físicos do Solo*

Para caracterizar fisicamente o solo de cada parcela e profundidade, foram determinados densidade do solo, microporosidade, porosidade total, macroporosidade, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, teor de água disponível, capacidade de aeração e capacidade de água disponível no solo.

A densidade do solo foi calculada por meio da relação entre a massa do solo seco e o volume do cilindro, conforme descrito por Grossman e Reinsch (2002). A microporosidade do solo foi determinada conforme a metodologia descrita por Teixeira et al. (2017), em que amostras de solo foram saturadas por um período de 48 h por adição gradual de água a uma bandeja de plástico, até atingir um nível de $\frac{2}{3}$ da altura dos cilindros, sendo posteriormente pesadas e submetidas a uma tensão de 6 kPa. Após isso, as amostras foram submetidas à secagem em estufa a 105°C por 48 h para obtenção dos valores da massa do solo seco.

A porosidade total foi estimada por meio da equação $PT = (Massa\ do\ solo\ saturado - Massa\ do\ solo\ seco / volume)$. A macroporosidade do solo foi determinada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade do solo. A capacidade de campo e o ponto de murcha permanente foram determinadas de acordo com Richards (1947), aplicando potenciais matriciais às amostras de solo em uma câmara de Richards com placa porosa. Os potenciais matriciais foram 10 kPa (capacidade de campo) e 1.500 kPa (ponto de murcha permanente). O conteúdo de água disponível foi calculado como a diferença entre a capacidade de campo e o

ponto de murcha permanente. A capacidade de aeração do solo e a capacidade de água disponível no solo foram calculadas de acordo com as equações propostas por Reynolds et al. (2002) e Assis et al. (2015), respectivamente.

2.6 *Produção de biomassa seca da parte aérea e densidade de raízes*

Todas as medições biométricas das plantas foram realizadas durante o período de floração das espécies em cada parcela estudada. Para avaliação da produção de biomassa seca da parte aérea foram selecionadas dez plantas com características homogêneas de altura e diâmetro caular. Em seguida, elas foram cortadas a 5 cm acima da superfície do solo, armazenadas em sacos de papel e secas em estufa a 65° C. Esses dados foram utilizados para estimar a produção de biomassa das plantas em kg ha⁻¹, seguindo o mesmo procedimento descrito em Forstall-Sosa et al. (2020), estimando o número de plantas por hectare e a biomassa seca da planta em kg ha⁻¹.

Para a coleta das raízes, foi utilizada metodologia proposta por Souza e Santos (2018), com coleta de dez monólitos de solo de dimensões 20 × 20 × 20 cm em cada parcela. Em seguida, esses monólitos foram envolvidos com papel filme e transportados até o laboratório com o menor distúrbio possível. Durante a análise, foram coletadas as raízes dos monólitos do solo e, logo em seguida, lavadas com auxílio de água destilada em uma peneira de malha de 0,5 mm. A biomassa seca da raiz (g) foi determinada após secagem das amostras por 48 h a 65 °C para estimativa da densidade radicular.

2.7 *Análises estatísticas*

Foram realizados para este estudo uma análise de correlação de Pearson e uma análise de redundância, a geração de modelos preditivos e um índice de qualidade do solo (IQS). A correlação de Pearson foi realizada usando a função *rcorr* do pacote *Hmisc* para examinar a correlação bivariada entre os atributos do solo e a aptidão da planta (i.e., biomassa seca de parte aérea e raiz). Em seguida, todas as variáveis dependentes foram transformadas em raiz quadrada para atender a distribuição normal dos dados e realizar os diagramas de redundância.

Os modelos preditivos foram criados usando a função *step* no pacote de estatísticas para verificar o efeito de variáveis individuais ou combinadas (i.e., atributos físicos e químicos do solo, biomassa seca da parte aérea e biomassa seca da raiz) em cada variável específica estudada. Os tratamentos e os anos de cultivos foram usados como efeito fixo, conforme

descrito por Rosenfield e Müller (2020). Parcelas e blocos foram incluídos como um efeito aleatório em cada modelo. Todos os dados foram analisados com o software estatístico R (R CORE TEAM, 2018).

2.8 Índice de qualidade do solo (IQS)

O IQS foi calculado utilizando a abordagem PCA-LSF-SQIw, conforme descrito por Forstall-Sosa et al. (2020), que combina os atributos físicos e químicos do solo e a produção de biomassa vegetal, mensurada em todas as parcelas estudadas. Com base nesta abordagem, foi desenvolvido um modelo (Eq. 1) para determinar o IQS.

Para geração deste modelo foi necessário realizar uma análise de componentes principais (ACP) para obtenção dos dados proporção explicada de cada vetor (i.e., o peso de cada atributo para o IQS) e os valores dos *escores* de cada variável analisada. Após a obtenção desses dados procedeu-se a escolha dos principais indicadores de qualidade do solo, levando em consideração os maiores valores obtidos com os *escores* e a quantidade de componentes principais fornecidos pela ACP. Portanto, de todas as variáveis analisadas nesta pesquisa, apenas seis foram consideradas como as mais representativas para o IQS, sendo elas: produção de biomassa da parte aérea e da raiz, teores de P, Ca e K e estoque de carbono do solo, conforme destacado na equação 1.

$$\text{Eq.1 } \text{SQI} = (53,94 \times \text{N} - \text{BR}) + (27,37 \times \text{N} - \text{P}) + (5,43 \times \text{N} - \text{BPA}) + (3,17 \times \text{N} - \text{Ca}) + (2,15 \times \text{N} - \text{K}) + (1,731 \times \text{N} - \text{ECS}) + 6,22$$

Em que: N - BR = valores normalizados de biomassa seca de raiz (g cm^{-3}), N - P = valores normalizados de P disponível (mg kg^{-1}), N - BPA = valores normalizados de biomassa seca de parte aérea (kg ha^{-1}), N - Ca = valores normalizados de Ca trocável ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), N - K = valores normalizados de K trocável (mg kg^{-1}) e N - ECS = valores normalizados de estoque de carbono do solo (t C ha^{-1}). Todos os valores normalizados foram obtidos dividindo-se a média de cada componente por seus respectivos *escores*, obtidos com a análise de ACP. Os valores mais altos de IQS indicaram um solo de alta qualidade, capaz de produzir uma alta quantidade de biomassa vegetal, sem ocasionar efeitos negativos ao ecossistema.

3. Resultados

De acordo com os resultados apresentados para a análise de correlação de Pearson, pode-se verificar que a maioria dos atributos físicos e químicos do solo estavam correlacionados entre si (Figura 3). O pH do solo apresentou correlação positiva com Ca ($p < 0,001$), Mg ($p < 0,001$), P disponível ($p < 0,001$), soma de bases ($p < 0,001$), estoque de carbono ($p < 0,001$) e densidade do solo ($p < 0,001$), porém correlacionou-se negativamente com Al ($p < 0,001$), Na ($p < 0,001$), H+Al ($p < 0,01$), biomassa seca da parte aérea ($p < 0,05$), biomassa seca da raiz ($p < 0,05$) e com todos os atributos físicos do solo ($p < 0,001$), exceto densidade e microporosidade do solo. O Al foi correlacionado positivamente com Na ($p < 0,001$) e H+Al ($p < 0,001$), mas foi correlacionado negativamente com Ca ($p < 0,001$), K ($p < 0,01$), P disponível ($p < 0,01$), soma de bases ($p < 0,001$), saturação por bases ($p < 0,001$), biomassa seca da raiz ($p < 0,05$) e microporosidade do solo ($p < 0,05$).

O Ca apresentou correlação positiva com P disponível ($p < 0,001$), soma de bases ($p < 0,001$), CTC ($p < 0,001$), saturação por bases ($p < 0,01$), biomassa seca da raiz ($p < 0,05$) e densidade do solo ($p < 0,01$), porém correlacionou-se negativamente com Na ($p < 0,001$), carbono orgânico ($p < 0,01$), estoque de carbono ($p < 0,01$) e com todos os atributos físicos do solo ($p < 0,001$), exceto densidade e microporosidade. O Mg foi positivamente correlacionado com P disponível, soma de bases ($p < 0,001$), CTC ($p < 0,001$), saturação por bases ($p < 0,001$) e densidade do solo ($p < 0,001$), enquanto foi correlacionado negativamente com Na ($p < 0,05$), H+Al ($p < 0,01$) e com todos os atributos físicos do solo ($p < 0,001$), à exceção da microporosidade.

O K apresentou correlação positiva com Na ($p < 0,01$), saturação por bases ($p < 0,001$), carbono orgânico ($p < 0,01$), estoque de carbono ($p < 0,001$), biomassa seca da parte aérea ($p < 0,001$) e com todos os atributos físicos do solo ($p < 0,001$), com exceção da densidade e microporosidade do solo; contudo, correlacionou-se negativamente com H+Al ($p < 0,001$), CTC ($p < 0,01$), biomassa da raiz ($p < 0,05$) e densidade do solo ($p < 0,01$).

O P disponível apresentou correlação positiva com soma de bases ($p < 0,001$), saturação por bases ($p < 0,001$) e densidade do solo ($p < 0,01$), mas foi negativamente correlacionado com K ($p < 0,001$), H+Al ($p < 0,001$), carbono orgânico ($p < 0,05$), biomassa seca da raiz ($p < 0,01$) e com todos os atributos físicos do solo ($p < 0,001$), exceto densidade e microporosidade. O Na foi positivamente correlacionado com H+Al ($p < 0,05$), carbono orgânico ($p < 0,001$), estoque de carbono ($p < 0,001$), biomassa seca da raiz ($p < 0,01$) e com todos os atributos físicos do solo ($p < 0,001$), exceto densidade e microporosidade, porém correlacionou-se negativamente com soma de bases ($p < 0,001$), CTC ($p < 0,01$), saturação por bases ($p < 0,001$) e densidade do solo ($p < 0,001$).

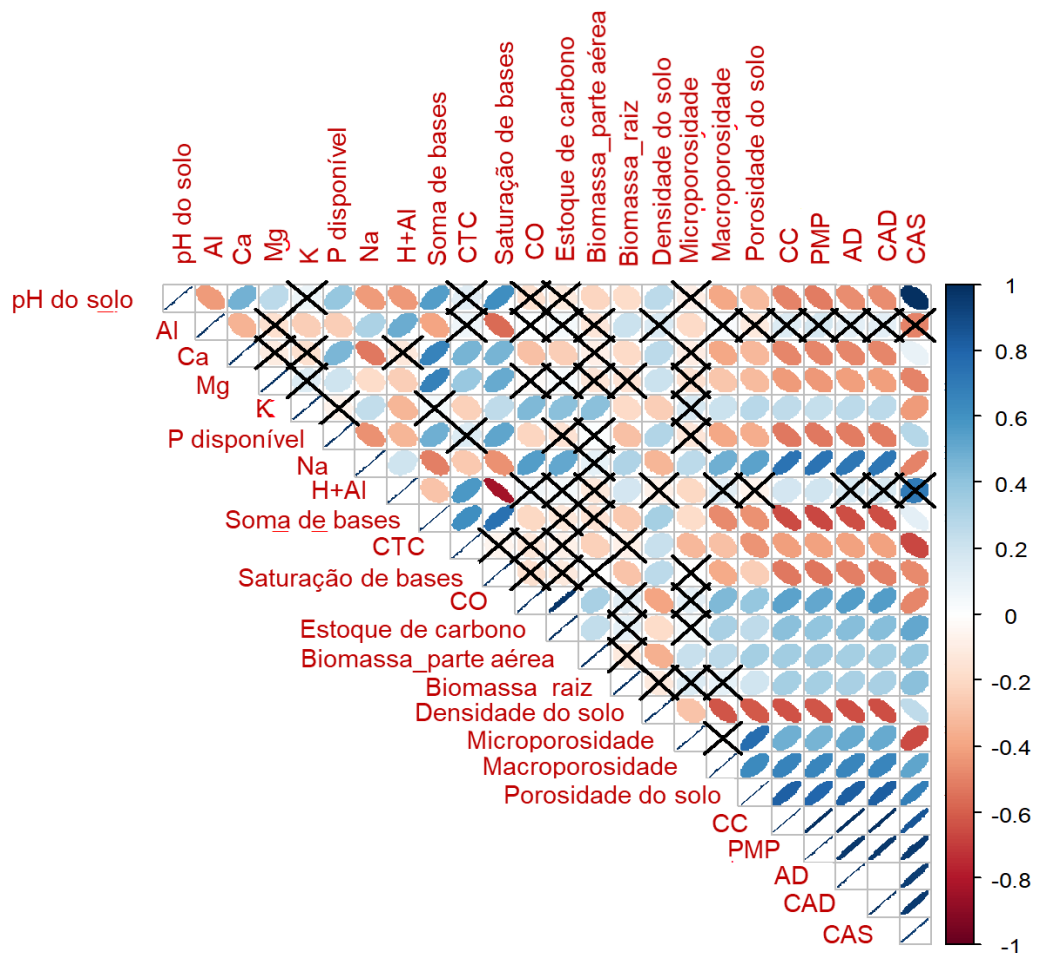
O H+Al foi positivamente correlacionado com a CTC ($p < 0,001$), biomassa seca da raiz ($p < 0,05$), capacidade de campo ($p < 0,05$) e ponto de murcha permanente ($p < 0,01$), enquanto foi negativamente correlacionado com a soma de bases ($p < 0,01$), saturação por bases ($p < 0,001$) e microporosidade do solo ($p < 0,05$). A soma das bases foi positivamente correlacionada com a CTC ($p < 0,001$), saturação por bases ($p < 0,001$) e densidade do solo ($p < 0,001$), enquanto correlacionou-se negativamente com carbono orgânico ($p < 0,05$), biomassa seca da raiz ($p < 0,01$) e com todos os atributos físicos do solo ($p < 0,001$), à exceção da densidade do solo.

A CTC foi positivamente correlacionada com a densidade do solo ($p < 0,01$), mas negativamente correlacionada com a biomassa seca da parte aérea ($p < 0,05$) e com todos os atributos físicos ($p < 0,01$), com exceção da densidade do solo. A saturação de base foi negativamente correlacionada com a biomassa seca da raiz ($p < 0,01$) e com todos os atributos físicos ($p < 0,01$), com exceção da microporosidade do solo. O carbono orgânico do solo foi positivamente correlacionado com estoque de carbono ($p < 0,001$), biomassa seca da parte aérea ($p < 0,001$) e com todos os atributos físicos, exceto densidade do solo, com a qual apresentou correlação negativa ($p < 0,001$).

O estoque de carbono do solo foi positivamente correlacionado com a biomassa seca da parte aérea ($p < 0,01$) e com todos os atributos físicos ($p < 0,05$), exceto com a densidade do solo, a qual correlacionou-se negativamente ($p < 0,05$). A biomassa seca da parte aérea foi positivamente correlacionada com todos os atributos físicos ($p < 0,001$), exceto densidade do solo, a qual apresentou correlação negativa ($p < 0,05$). A biomassa seca da raiz foi positivamente correlacionada com todas as variáveis físicas ($p < 0,001$), com exceção da densidade do solo, macro e microporosidade do solo.

A densidade do solo foi negativamente correlacionada com todos os atributos físicos ($p < 0,001$), exceto microporosidade do solo. A microporosidade foi positivamente correlacionada com todos os atributos físicos do solo ($p < 0,01$). Todas as demais variáveis físicas do solo (i.e., macroporosidade, porosidade do solo, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, conteúdo de água disponível, capacidade de aeração do solo e capacidade de água disponível do solo) foram positivamente correlacionadas entre si (Figura 2).

Figura 2 Correlação entre os atributos do solo de espécies de plantas utilizadas como adubo verde em ecossistema tropical, Areia, Paraíba, Brasil. Os efeitos não significativos são representados por ×. CTC = capacidade de troca catiônica; CO = carbono orgânico; CC = capacidade de campo; PMP = ponto de murcha permanente; AD = água disponível; CAD = capacidade de água disponível no solo e CAS = capacidade de aeração do solo.



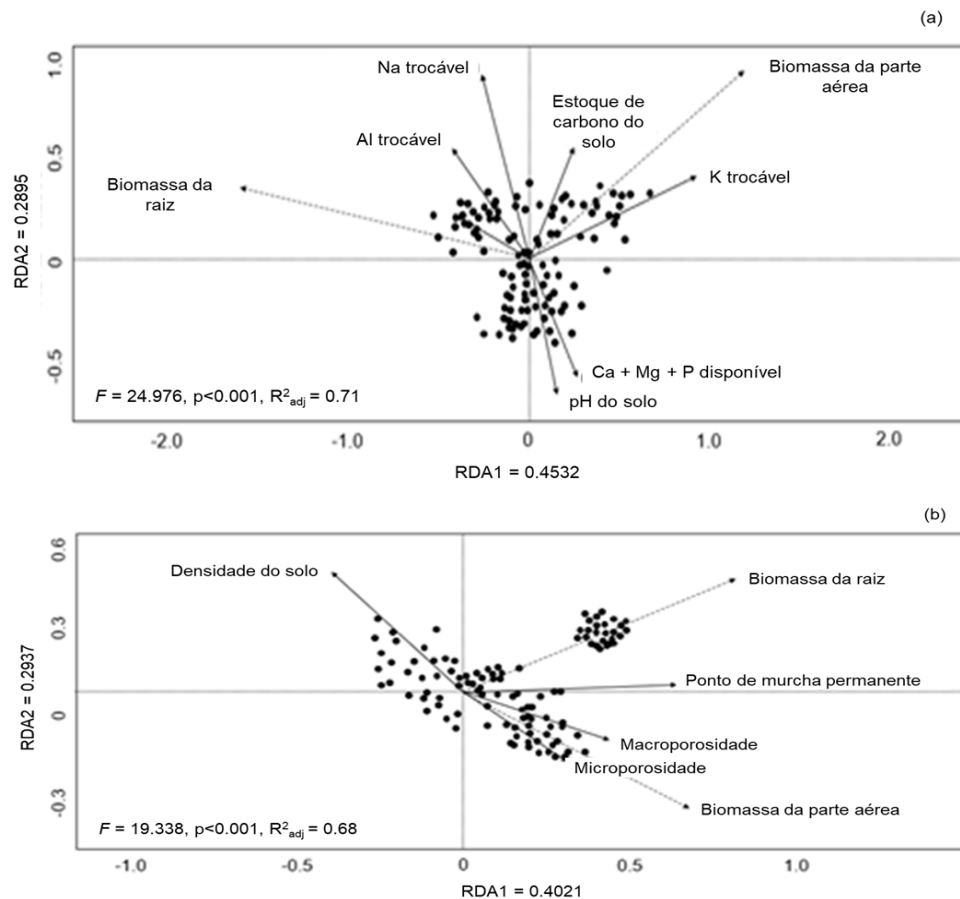
3.1 Análise de redundância

De acordo com os resultados da análise de redundância, a biomassa seca da parte aérea apresentou correlação com o estoque de carbono orgânico do solo, teor de K trocável (Figura 4a) e com a micro e a macroporosidade do solo (Figura 4b). Estes atributos explicaram cerca de 74,26% e 69,59% da variação da produção primária da planta (teste de permutação de Monte Carlo com permutação 999, $p < 0,001$), respectivamente.

Neste estudo, os principais fatores que contribuíram para a variação da produção primária da planta foram pH do solo, Al, Ca, Mg, K, Na, P disponível, estoque de carbono do

solo (Figura 3a), densidade, microporosidade, macroporosidade e ponto de murcha permanente (Figura 3b).

Figura 3 Análise de Redundância para a relação entre a produção primária (biomassa seca da parte aérea e da raiz) e os atributos químicos (a) e físicos (b) do solo.



3.2 Modelos preditivos multivariados para IQS

Com base nos resultados obtidos com o procedimento de *stepwise* foram desenvolvidos 33 modelos preditivos multivariados para estimativa da produção de biomassa seca da planta e os atributos químicos e físicos do solo em função das espécies cultivadas (tratamentos), anos estudados e interação entre a produção de biomassa seca e as mudanças nos atributos físicos e químicos do solo, em condições de ecossistema tropical. Todos os modelos propostos apresentaram diferenças significativas entre tratamentos e anos para diversas variáveis estudadas (Tabela 2).

Tabela 2 Modelos preditivos entre os atributos físicos e químicos do solo e a produção de biomassa da planta.

Modelo	F-valor	Significância	R ² _{adj}
pH do solo ~ Ca + Mg + K + Na + tratamento + ano	16,25	< 0,001	0,21
pH do solo ~ capacidade de campo + ponto de murcha permanente + CAS + porosidade do solo + tratamento + ano	13,76	< 0,001	0,30
Al ~ Na + (H+Al) + tratamento + ano	24,15	< 0,001	0,28
Al ~ Ca + K + saturação por bases + microporosidade + tratamento + ano	18,11	< 0,001	0,36
Ca ~ P disponível + CTC + saturação por bases + tratamento + ano	36,81	< 0,001	0,47
Ca ~ Na + CAS + tratamento + ano	25,91	< 0,001	0,29
Mg ~ P disponível + soma de bases + CTC + saturação por bases + tratamento + ano	27,63	< 0,001	0,47
Mg ~ Na + (H+Al) + CAS + tratamento + ano	13,52	< 0,001	0,23
K ~ Na + saturação por bases + CO + biomassa seca da parte aérea + tratamento + ano	20,09	< 0,001	0,39
K ~ (H+Al) + biomassa seca da raiz + densidade do solo + tratamento + ano	10,61	< 0,001	0,19
P disponível ~ soma de bases + saturação por bases + densidade do solo + tratamento + ano	17,42	< 0,001	0,29
P disponível ~ (H+Al) + capacidade de campo + tratamento + ano	29,42	< 0,001	0,32
Na ~ CO + estoque de carbono + microporosidade + capacidade de campo + CAS + tratamento + ano	44,50	< 0,001	0,64
Na ~ soma de bases + CTC + saturação por bases + densidade do solo + tratamento + ano	14,30	< 0,001	0,30
(H+Al) ~ ponto de murcha permanente + tratamento + ano	4,72	< 0,05	0,03
(H+Al) ~ soma de bases + saturação por bases + microporosidade + tratamento + ano	694,1	< 0,001	0,94
Soma de bases ~ CTC + saturação por bases + tratamento + ano	330,6	< 0,001	0,98
Soma de bases ~ CO + macroporosidade + microporosidade + ponto de murcha permanente + CAS + tratamento + ano	26,95	< 0,001	0,52
CTC ~ densidade do solo + tratamento + ano	6,17	< 0,001	0,04
CTC ~ água disponível no solo + CAS + tratamento + ano	18,40	< 0,001	0,22
Saturação por bases ~ biomassa da raiz + microporosidade +	16,07	< 0,001	0,38

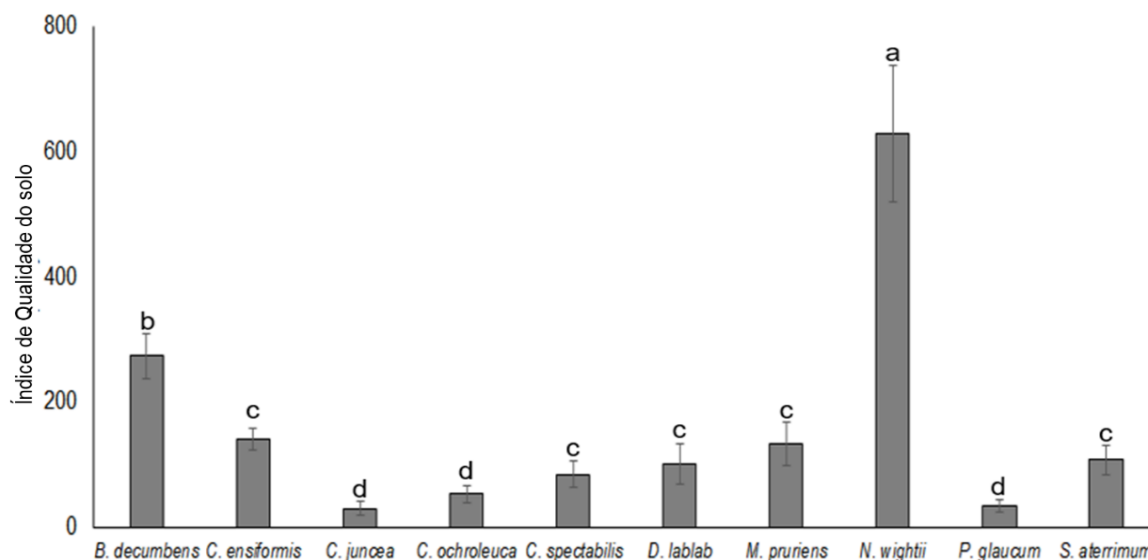
porosidade do solo + ponto de murcha permanente + CAS + tratamento + ano			
CO ~ estoque de carbono + densidade do solo + biomassa da parte aérea + capacidade de campo + água disponível no solo + tratamento + ano	1269,09	< 0,001	0,98
Estoque de carbono ~ densidade do solo + biomassa da parte aérea + microporosidade + capacidade de campo + água disponível no solo + tratamento + ano	8,56	< 0,001	0,24
Biomassa da parte aérea ~ densidade do solo + capacidade de campo + ponto de murcha permanente + CAS + tratamento + ano	8,87	< 0,001	0,20
Biomassa da raiz ~ ponto de murcha permanente + água disponível no solo + CAS + tratamento + ano	7,51	< 0,001	0,14
Densidade do solo ~ microporosidade + porosidade do solo + CAS + tratamento + ano	37,66	< 0,001	0,48
Microporosidade ~ macroporosidade + porosidade do solo + capacidade de campo + tratamento + ano	1383,00	< 0,001	0,97
Macroporosidade ~ CAS + tratamento + ano	106,4	< 0,001	0,46
Porosidade do solo ~ CAS + tratamento + ano	318,1	< 0,001	0,72
Capacidade de campo ~ ponto de murcha permanente + água disponível no solo + tratamento + ano	9251,00	< 0,001	0,99
Ponto de murcha permanente ~ água disponível no solo + CAS + tratamento + ano	924,7	< 0,001	0,93
Água disponível no solo ~ CAD + CAS + tratamento + ano	8223,02	< 0,001	0,99
CAD ~ CAS + tratamento + ano	1221,02	< 0,001	0,91

CAS = capacidade de aeração do solo; CTC = capacidade de troca catiônica; CO = carbono orgânico e CAD = capacidade de água disponível no solo.

3.3 Índice de qualidade do solo (IQS)

Os maiores valores de IQS foram encontrados em parcelas cultivadas com *N. wightii* ($628,65 \pm 109,57$), não havendo diferenças significativas entre *C. ensiformis*, *C. spectabilis*, *D. lablab*, *M. pruriens* e *S. aterrimum*. De forma geral, todas as espécies de adubos verdes influenciaram positivamente o IQS, após seis anos de cultivo e incorporação de resíduos no perfil do solo (Figura 4).

Figura 4 Índice de qualidade do solo (IQS) em um sistema de cultivo com diferentes espécies de adubos verdes.



3. Discussão

Os resultados deste estudo enfatizaram a influência do cultivo em longo prazo de espécies de adubos verdes nos atributos físicos e químicos do solo, produção de biomassa da parte aérea e da raiz e no IQS. De início, buscou-se entender como a incorporação de biomassa no perfil do solo criou um *feedback* positivo planta-solo que melhorou os atributos do solo ao longo do tempo, sem qualquer adição de fertilizantes orgânicos ou minerais.

Geralmente, a prática da adubação verde tem a capacidade de alterar os atributos físicos e químicos do solo devido à alta produção de biomassa e incorporação de seus resíduos na superfície, promovendo uma maior rizodeposição e ciclagem de nutrientes (PACHECO et al., 2017; HIRTE et al., 2018; ÇERÇIOĞLU et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2020; HU; CHABBI, 2021; LIU et al., 2021; MORTENSEN et al., 2021).

Por meio dos resultados apresentados nesta pesquisa, verificou-se correlações significativas entre todas as variáveis estudadas, incluindo o ecossistema do solo (representado pelos atributos físicos e químicos) e a produção primária da planta (representada pela produção de biomassa seca da parte aérea e da raiz). De acordo com os estudos realizados por Souza et al. (2018) e Melo; Souza e Santos (2019), as espécies de plantas usadas como adubo verde, como as leguminosas, podem promover mudanças positivas nos atributos do solo, aumentando

o estoque de carbono orgânico, a ciclagem de nutrientes, infiltração de água no solo e a capacidade de aeração do solo, principalmente, quando seus resíduos são totalmente incorporados no perfil do solo (AUSTIN et al., 2017, DEMIR; IŞIK, 2019; ASHWORTH; OWENS; ALLEN, 2020).

Neste estudo, foi observado que *N. wightii* apresentou uma alta produção de biomassa radicular e melhorou os teores de P, Ca e K e o estoque de carbono orgânico do solo por meio da incorporação de sua biomassa. Estes resultados estão de acordo com os estudos realizados por Nascente e Stone (2018), Souza et al. (2018) e Mortensen et al. (2021), que relataram que solos que recebem constantes adições de materiais orgânicos, ricos em nutrientes, podem apresentar mudanças positivas em seus atributos (i.e., carbono orgânico do solo, Ca, P disponível, densidade e porosidade do solo).

Foi verificado, também, que as variáveis microporosidade, macroporosidade, estoque de carbono e Al trocável apresentaram correlação significativa com a biomassa seca da raiz. De forma geral, as espécies de plantas com alta produção de biomassa radicular (i.e., *N. wightii* e *B. decumbens*) podem contribuir com a melhoria dos atributos do solo, através da liberação de exsudados radiculares e íons de H^+ , favorecendo a formação de bioporos, atividade microbiana e a porosidade do solo (RESTOVICH et al., 2019).

A biomassa seca da parte aérea correlacionou-se positivamente com a densidade do solo, teor de P disponível e pH do solo. Esse resultado pode estar relacionado com a alta deposição e incorporação de resíduos vegetais na superfície, que de certa forma, altera a densidade do solo, melhorando a capacidade de aeração, estrutura e a disponibilidade de nutrientes no solo (ADEKIYA et al., 2019; ISLAM et al., 2019; ZHANG et al., 2019).

Para o IQS, os maiores valores foram observados em parcelas cultivadas com as espécies de Fabaceae em comparação com as plantas de Poaceae. Esses resultados estão coerentes com os de Santos et al. (2021) que também obtiveram maiores valores de IQS (0,57) em parcelas cultivadas com leguminosas (i.e., *C. ensiformis*) em comparação a outros sistemas de cultivo com gramíneas (0,10). De uma forma geral, as leguminosas tendem a contribuir com a maior deposição de nitrogênio no perfil do solo, o que contribui para a melhoria dos ciclos biogeoquímicos, equilíbrio de nutrientes e, consequentemente, restauração da produtividade das culturas (PEREIRA et al., 2018).

Neste estudo, foi verificado que a espécie *N. wightii* contribuiu com os maiores valores para o IQS e que, dentre as espécies estudadas, essa foi a que apresentou um sistema radicular perene mais denso e robusto, com uma alta produção de raízes e capacidade de regeneração. Tais fatores foram fundamentais para que a espécie contribuísse para um valor de IQS maior

em comparação às demais espécies de plantas (XAVIER; VIEIRA, 2018). Inclusive, dentre os indicadores avaliados neste estudo, a produção de raízes finas foi o que mais contribuiu para alteração da qualidade do solo, conforme demonstrado na equação de IQS gerada nesta pesquisa.

Outro fator importante a ser mencionado é que o acúmulo de nutrientes em adubos verdes varia de acordo com a espécie utilizada e a disponibilidade de água e nutrientes no solo (ARMSTRONG et al., 2018; WANG et al., 2018; DAYOUB et al., 2017). Nesse sentido, os baixos valores do IQS nas parcelas cultivadas com *C. juncea* e *P. glaucum* podem estar relacionados com a baixa produção de biomassa e as alterações na fertilidade do solo promovidas por estas espécies de plantas (TEÓFILO et al., 2020).

4. Considerações finais

A adubação verde em longo prazo afetou positivamente os atributos do solo e a produção de biomassa das espécies cultivadas. O uso de *N. wightii* promoveu a obtenção do maior valor de IQS, melhorando a produção de biomassa de raízes, a disponibilidade de P, Ca e K e o estoque de carbono orgânico do solo. Ao todo, foram desenvolvidos cerca de 33 modelos preditivos para estimar os atributos físicos e químicos do solo e a produção de biomassa de plantas.

REFERÊNCIAS

- ADEKIYA, A. O. et al. 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**, v. 18, n. 2, p. 218-223, 2019.
- ANDRADE, V. H. G. Z. et al. Artificially intelligent soil quality and health indices for “next generation” food production systems. **Trends in Food Science & Technology**, v. 107, p. 195-200, 2020.
- ARMSTRONG, R. D. et al. Effects of long-term rotation and tillage practice on grain yield and protein of wheat and soil fertility on a Vertosol in a medium-rainfall temperate environment. **Crop and Pasture Science**, v. 70, n. 1, p. 1-15, 2018.
- ASHWORTH, A. J.; OWENS, P. R.; ALLEN, F. L. Long-term cropping systems management influences soil strength and nutrient cycling. **Geoderma**, v. 361, n. 114062, p. 1-7, 2020.
- ASSIS, P. C. R. et al. Atributos físicos do solo em Sistemas de Integração Lavoura Pecuária-Floresta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, n. 19, v. 4, p. 309-316, 2015.
- AUSTIN, E. E. et al. Cover crop root contributions to soil carbon in a no-till corn bioenergy cropping system. **GCB Bioenergy**, v. 9, n. 7, p. 1252–1263, 2017.
- ÇERÇİOĞLU, M. et al. Effect of cover crop management on soil hydraulic properties. **Geoderma**, v. 343, p. 247–253, 2019.
- DAYOUB, E. et al. Traits affecting early season nitrogen uptake in nine legume species. **Heliyon**, v. 3, n. 2, p. 1-21, 2017.
- DEMIR, Z.; IŞIK, D. Effects of cover crops on soil hydraulic properties and yield in a persimmon orchard. **Bragantia**, v. 78, n. 4, p. 596-605, 2019.
- FERNÁNDEZ, M. et al. Short rotation coppice of leguminous tree *Leucaena* spp. improves soil fertility while producing high biomass yields in Mediterranean environment. **Industrial Crops and Products**, v. 157, n. 00244, p. 1-11, 2020.
- FORSTALL-SOSA, K. S. et al. Soil macroarthropod community and soil biological quality index in a green manure farming system of the Brazilian semi-arid. **Biologia**, v. 76, n. 3, p. 907-917, 2020.
- GABRIEL, J. L. et al. Cover crops reduce soil resistance to penetration by preserving soil surface water content. **Geoderma**, v. 386, n. 114911, p. 1-18, 2021.
- GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. The solid phase. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Eds.). **Methods of soil analysis: Part 4 Physical Methods**. Madison, Estados Unidos: SSSA Book Series: 2002. p. 201-414.

HE, H. B. et al. Effects of Italian ryegrass residues as green manure on soil properties and bacterial communities under an Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* L.)-rice (*Oryza sativa* L.) rotation. **Soil and Tillage Research**, v. 196, n. 104487, p. 1-12, 2020.

HIRTE, J. et al. Below ground carbon inputs to soil via root biomass and rhizodeposition of field-grown maize and wheat at harvest are independent of net primary productivity. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 265, p. 556–566, 2018.

HU, T.; CHABBI, A. Does the higher root carbon contribution to soil under cropping cycles following grassland conversion also increase shoot biomass? **Science of The Total Environment**, v. 756, n. 141684, p. 1-9, 2021.

ISLAM, M. M. et al. Green manuring effects on crop morpho-physiological characters, rice yield and soil properties. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 25, n. 1, p. 303-312, 2019.

KHAN, M. I. et al. Short term effects of different green manure amendments on the composition of main microbial groups and microbial activity of a submerged rice cropping system. **Applied Soil Ecology**, v. 147, n. 103400, p. 1-9, 2020.

LAURINDO, L. K. et al. Arbuscular mycorrhizal fungal community assembly in agroforestry systems from the Southern Brazil. **Biologia**, v. 76, n. 4, p. 1099-1107, 2021.

LIU, R. et al. Effects of ground cover management on improving water and soil conservation in tree crop systems: a meta-analysis. **Catena**, v. 199, n. 104986, p. 1-8, 2021.

MELO, L. N.; SOUZA, T. A. F.; SANTOS, D. Transpiratory rate, biomass production, and leaf macronutrient content of different plant species cultivated on a Regosol in the Brazilian semiarid. **Russian Agricultural Sciences**, v. 45, n. 2, p. 147-153, 2019.

MORTENSEN, E. O. et al. Short-term cover crop carbon inputs to soil as affected by long-term cropping system management and soil fertility. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 311, n. 107339, p. 1-10, 2021.

NASCENTE, A. S.; STONE, L. F. Cover crops as affecting soil chemical and physical properties and development of upland rice and soybean cultivated in rotation. **Rice Science**, v. 25, n. 6, p. 340-349, 2018.

NASCIMENTO, G. S. et al. Soil physico-chemical properties, biomass production, and root density in a green manure farming system from tropical ecosystem, North-eastern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 21, n. 6, p. 2203-2211, 2021.

OKALEBO, J. R.; GATHIA, K. W.; WOOMER, P. L. **Laboratory methods of plant and soil analysis**: a working manual. Nairobi, Kenya: Tropical Soil Biology and Fertility Programme. 1993. 88 p.

OLIVEIRA, F. C. C. et al. Soil physical properties and soil organic carbon content in northeast Brazil: long-term tillage systems effects. **Scientia Agricola**, v. 77, n. 4, p. 1-6, 2020.

PACHECO L. P. et al. Biomass and nutrient cycling by cover crops in Brazilian Cerrado in the state of Piauí. **Caatinga**, v. 30, n. 1, p. 13-23, 2017.

PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. **Methods of Soil Analysis**: part 2 chemical and microbiological properties. 2 ed. Madison: Estados Unidos: American Society of Agronomy. 1982.

PEREIRA A. P. A. et al. Acacia changes microbial indicators and increases c and n in soil organic fractions in intercropped *Eucalyptus* plantations. **Front Microbiol.** 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00655>. Acesso em 25 de fev de 2021.

R CORE TEAM R. **A language and environment for statistical computing**. Vienna, Áustria: R Foundation for Statistical Computing, 2018. Disponível em: <https://www.R-project.org/>

RESTOVICH, S. B. et al. Combining cover crops and low nitrogen fertilization improves soil supporting functions. **Plant Soil**, v. 442, n. 1-2, p. 401-417, 2019.

REYNOLDS, W. D. et al Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, v. 110, n. 1-2, p. 131-146, 2002.

RICHARDS, L. A. Pressure-membrane apparatus, conduction and use. **Agricultural Engineering**, Madison, v. 28, n. 10, p. 451-454, 1947.

ROSENFELD, M. F.; MÜLLER, S. C. Plant traits rather than species richness explain ecological processes in subtropical forests. **Ecosystems**, v. 23, n. 1, p. 52-66, 2020.

SANTOS, W. P. et al. Soil quality assessment using erosion-sensitive indices and fuzzy membership under different cropping systems on a Ferralsol in Brazil. **Geoderma Regional**, v. 25, n. 00385, 2021.

SILVA, S. A. I. et al. Avaliação dos componentes de produção em variedades crioulas de fava cultivadas no Agreste da Paraíba. **Revista Ciências Agrárias**, v. 42, n. 3, p. 731-742, 2019.

SOUZA, A. V. S. S. et al. Agronomic evaluation of legume cover crops for sustainable agriculture. **Russian Agricultural Sciences**, v. 44, n. 1, p. 31-38, 2018.

SOUZA, T. A. F.; SANTOS, D. Effects of using different host plants and long-term fertilization systems on population sizes of infective arbuscular mycorrhizal fungi. **Symbiosis**, v. 76, n. 2, p. 139-149, 2018.

STABILE, M. C. et al. Solving Brazil's land use puzzle: Increasing production and slowing Amazon deforestation. **Land Use Policy**, v. 91, n. 104362, p. 1-6, 2020.

TEIXEIRA, P. C. et al. (Ed.) **Manual de métodos de análise do solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

TEÓFILO, T. M. S. et al. Phytoextraction of diuron, hexazinone, and sulfometuron-methyl from the soil by green manure species. **Chemosphere**, v. 256, n. 127059, p. 1-10, 2020.

TORRES, M. A. R. R. et al. Soil organic matter and nutrient improvement through cover crops in a Mediterranean olive orchard. **Soil and Tillage Research**, v. 210, n. 104977, p. 1-11, 2021.

VINHOLIS, M. D. M. B. et al. The effect of meso-institutions on adoption of sustainable agricultural technology: a case study of the Brazilian Low Carbon Agriculture Plan. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, n. 124334, p.1-11, 2021.

WANG, L. et al. Nitrogen fertilization improved water-use efficiency of winter wheat through increasing water use during vegetative rather than grain filling. **Agricultural Water Management**, v. 197, p. 41-53, 2018.

WRB - IUSS Working Group. **World reference base for soil resources 2014**. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: FAO. 2015. 193 p. (World Soil Resources Reports, 106).

XAVIER, P. B.; VIEIRA, H. D. Physiological potential of seeds of Perennial Soybean cv. Comum Coated with different materials. **American Journal of Plant Sciences**, v. 9, n. 1, p. 1-12, 2018.

ZHANG, D. et al. Building up the soil carbon pool via the cultivation of green manure crops in the Loess Plateau of China. **Geoderma**, v. 337, p. 425-433, 2019.

ZHOU, G. et al. Co-incorporation of green manure and rice straw improves rice production, soil chemical, biochemical and microbiological properties in a typical paddy field in southern China. **Soil & Tillage Research**, v. 197, n. 104499, p. 1-9, 2020.

ANEXOS

Anexo 1. Valores médios (Média $\pm$ DP) dos atributos químicos do solo em parcelas cultivadas com diferentes espécies de adubos verdes.

Espécies de plantas	pH do solo	Ca (cmol _c kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	Mg (cmol _c kg ⁻¹)	Na (cmol _c kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	H+Al (cmol _c kg ⁻¹)	CTC (cmol _c kg ⁻¹)	SB (cmol _c kg ⁻¹)	V (%)	CO (g kg ⁻¹)	ECS (t C ha ⁻¹)
<i>B. decumbens</i>	5,6 $\pm$ 0,2	2,00 $\pm$ 0,7	37,00 $\pm$ 0,2	0,80 $\pm$ 0,2	0,02 $\pm$ 0,0	7,43 $\pm$ 0,1	2,30 $\pm$ 0,5	5,40 $\pm$ 0,7	7,43 $\pm$ 0,1	50,44 $\pm$ 0,7	7,90 $\pm$ 1,7	12,41 $\pm$ 0,7
<i>C. ensiformis</i>	5,3 $\pm$ 0,2	1,80 $\pm$ 0,5	36,00 $\pm$ 1,2	0,80 $\pm$ 0,2	0,02 $\pm$ 0,0	13,02 $\pm$ 0,1	2,30 $\pm$ 0,5	5,20 $\pm$ 0,8	13,02 $\pm$ 0,1	51,87 $\pm$ 0,5	8,00 $\pm$ 1,0	11,64 $\pm$ 1,4
<i>C. juncea</i>	5,4 $\pm$ 0,1	1,70 $\pm$ 0,6	28,00 $\pm$ 1,7	0,80 $\pm$ 0,2	0,02 $\pm$ 0,0	5,70 $\pm$ 0,2	2,30 $\pm$ 0,5	5,10 $\pm$ 0,6	5,70 $\pm$ 0,2	46,80 $\pm$ 0,5	7,30 $\pm$ 1,4	11,44 $\pm$ 1,6
<i>C. ochroleuca</i>	5,4 $\pm$ 0,2	1,30 $\pm$ 0,1	34,70 $\pm$ 0,8	1,00 $\pm$ 0,4	0,03 $\pm$ 0,0	7,18 $\pm$ 0,2	2,10 $\pm$ 0,6	4,70 $\pm$ 0,5	7,18 $\pm$ 0,2	47,21 $\pm$ 0,7	8,20 $\pm$ 1,0	12,19 $\pm$ 1,0
<i>C. spectabilis</i>	5,4 $\pm$ 0,3	1,50 $\pm$ 0,3	21,00 $\pm$ 1,0	1,00 $\pm$ 0,3	0,02 $\pm$ 0,0	11,81 $\pm$ 0,1	2,70 $\pm$ 0,8	5,50 $\pm$ 0,8	11,81 $\pm$ 0,1	42,65 $\pm$ 0,9	7,50 $\pm$ 0,1	12,57 $\pm$ 1,2
<i>D. lablab</i>	5,4 $\pm$ 0,2	1,60 $\pm$ 0,3	34,00 $\pm$ 1,7	0,90 $\pm$ 0,2	0,02 $\pm$ 0,0	7,76 $\pm$ 0,2	2,40 $\pm$ 0,4	5,10 $\pm$ 0,6	7,76 $\pm$ 0,2	48,79 $\pm$ 0,6	7,50 $\pm$ 0,2	13,17 $\pm$ 0,8
<i>M. pruriens</i>	5,1 $\pm$ 0,2	1,20 $\pm$ 0,1	32,50 $\pm$ 0,6	1,20 $\pm$ 0,4	0,03 $\pm$ 0,0	4,77 $\pm$ 0,0	2,60 $\pm$ 0,6	5,10 $\pm$ 0,7	4,77 $\pm$ 0,0	43,93 $\pm$ 0,4	8,40 $\pm$ 0,1	13,55 $\pm$ 1,6
<i>N. wightii</i>	5,2 $\pm$ 0,1	1,60 $\pm$ 0,3	27,50 $\pm$ 1,1	1,00 $\pm$ 0,2	0,02 $\pm$ 0,0	6,79 $\pm$ 0,0	2,60 $\pm$ 0,4	5,40 $\pm$ 0,6	6,79 $\pm$ 0,2	50,54 $\pm$ 0,6	6,70 $\pm$ 0,2	12,82 $\pm$ 1,1
<i>P. glaucum</i>	5,5 $\pm$ 0,2	1,50 $\pm$ 0,2	38,50 $\pm$ 0,8	0,90 $\pm$ 0,2	0,02 $\pm$ 0,0	5,87 $\pm$ 0,1	2,50 $\pm$ 0,4	5,20 $\pm$ 0,6	5,87 $\pm$ 0,1	51,40 $\pm$ 0,5	8,40 $\pm$ 0,1	12,06 $\pm$ 1,4
<i>S. aterrimum</i>	5,2 $\pm$ 0,2	1,40 $\pm$ 0,1	34,10 $\pm$ 1,0	1,30 $\pm$ 1,0	0,03 $\pm$ 0,0	9,50 $\pm$ 0,1	2,90 $\pm$ 0,4	5,80 $\pm$ 0,7	9,50 $\pm$ 0,1	43,71 $\pm$ 0,5	8,90 $\pm$ 0,1	11,42 $\pm$ 1,3

Fonte de variação	<i>F</i> -valor	<i>F</i> -valor	<i>F</i> -valor	<i>F</i> -valor	<i>F</i> -valor	<i>F</i> -valor	<i>F</i> -valor	<i>F</i> -valor	<i>F</i> -valor	<i>F</i> -valor	<i>F</i> -valor	<i>F</i> -valor
Espécie de planta	4,67** _*	3,91***	3,24**	1,41 ^{ns}	0,98 ^{ns}	36,83***	3,03**	2,48*	0,66 ^{ns}	1,28 ^{ns}	1,78 ^{ns}	2,11 ^{ns}
Profundidade do solo	7,31**	0,58 ^{ns}	71,63***	9,02**	2,48 ^{ns}	1,17 ^{ns}	36,93***	2,62 ^{ns}	9,16**	33,79***	4,00*	2,19 ^{ns}
Interação	0,39 ^{ns}	0,48 ^{ns}	1,58 ^{ns}	0,74 ^{ns}	0,30 ^{ns}	0,58 ^{ns}	1,08 ^{ns}	0,83 ^{ns}	0,41 ^{ns}	0,50 ^{ns}	0,68 ^{ns}	0,00 ^{ns}
Efeito do bloco	0,54 ^{ns}	0,10 ^{ns}	1,63 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,42 ^{ns}	3,80 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,28	0,30 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,70 ^{ns}
CV	2,9	9,8	6,0	15,6	10,6	10,9	10,9	6,8	9,0	8,0	8,2	7,9

Anexo 2. Valores médios (Medias ± DP) dos atributos físicos do solo em parcelas cultivadas com adubos verdes.

Espécies de plantas	Densidade do solo (g cm ⁻³)	Porosidade do solo (m ³ m ⁻³)	Microporosidade (m ³ m ⁻³)	Macroporosidade (m ³ m ⁻³)	Capacidade de campo (m ³ m ⁻³)	Ponto de murcha permanente (m ³ m ⁻³)	Água disponível (m ³ m ⁻³)	Capacidade de aeração do solo (mm)	Capacidade água disponível do solo (mm × 10 ³)
<i>B. decumbens</i>	1,37 ± 0,0	0,43 ± 0,0	0,34 ± 0,0	0,08 ± 0,0	0,08 ± 0,0	0,04 ± 0,0	0,041 ± 0,005	0,21 ± 0,7	4,00 ± 0,1
<i>C. ensiformis</i>	1,39 ± 0,0	0,42 ± 0,0	0,33 ± 0,0	0,08 ± 0,0	0,08 ± 0,0	0,04 ± 0,0	0,034 ± 0,005	0,22 ± 0,8	3,00 ± 0,2
<i>C. juncea</i>	1,39 ± 0,0	0,42 ± 0,0	0,33 ± 0,0	0,09 ± 0,0	0,08 ± 0,0	0,04 ± 0,0	0,039 ± 0,003	0,23 ± 0,6	3,20 ± 0,1
<i>C. ochroleuca</i>	1,39 ± 0,0	0,41 ± 0,0	0,33 ± 0,0	0,08 ± 0,0	0,07 ± 0,0	0,04 ± 0,0	0,036 ± 0,004	0,23 ± 0,5	3,40 ± 0,2

<i>C. spectabilis</i>	1,38 ± 0,0	0,42 ± 0,0	0,34 ± 0,0	0,08 ± 0,0	0,07 ± 0,0	0,03 ± 0,0	0,040 ± 0,007	0,23 ± 0,8	4,50 ± 0,1
<i>D. lablab</i>	1,40 ± 0,0	0,42 ± 0,0	0,34 ± 0,0	0,08 ± 0,0	0,08 ± 0,0	0,04 ± 0,0	0,044 ± 0,001	0,21 ± 0,6	4,20 ± 0,2
<i>M. pruriens</i>	1,39 ± 0,0	0,42 ± 0,0	0,32 ± 0,0	0,09 ± 0,0	0,08 ± 0,0	0,04 ± 0,0	0,037 ± 0,002	0,21 ± 0,7	3,70 ± 0,5
<i>N. wightii</i>	1,40 ± 0,0	0,42 ± 0,0	0,34 ± 0,0	0,07 ± 0,0	0,08 ± 0,0	0,04 ± 0,0	0,042 ± 0,005	0,21 ± 0,6	4,40 ± 0,2
<i>P. glaucum</i>	1,39 ± 0,0	0,43 ± 0,0	0,33 ± 0,0	0,09 ± 0,0	0,09 ± 0,0	0,04 ± 0,0	0,042 ± 0,006	0,22 ± 0,6	4,20 ± 0,1
<i>S. aterrimum</i>	1,39 ± 0,0	0,42 ± 0,0	0,33 ± 0,0	0,09 ± 0,0	0,07 ± 0,0	0,04 ± 0,0	0,038 ± 0,001	0,24 ± 0,0	3,10 ± 0,3
Fonte de variação	<i>F</i> -valor	<i>F</i> -valor	<i>F</i> -valor	<i>F</i> -valor	<i>F</i> -valor	<i>F</i> -valor	<i>F</i> -valor	<i>F</i> -valor	<i>F</i> -valor
Espécie de planta	0,32 ^{ns}	0,22 ^{ns}	1,19 ^{ns}	0,67 ^{ns}	2,02 ^{ns}	1,86 ^{ns}	2,25*	2,25*	2,25*
Profundidade do solo	11,04**	6,83*	8,62**	0,9 ^{ns}	1,96 ^{ns}	7,04*	0,70 ^{ns}	0,70 ^{ns}	0,70 ^{ns}
Interação	0,26 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,99 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,66 ^{ns}	0,66 ^{ns}	0,66 ^{ns}
Efeito de bloco	0,08 ^{ns}	2,57 ^{ns}	33,69***	30,24***	0,37 ^{ns}	0,7 ^{ns}	4,12*	0,42 ^{ns}	4,12*
CV	1,6	3,4	4,8	16,5	7,2	9,9	9,6	12,3	9,6

Anexo 3. Valores médios (Média $\pm$ DP) dos atributos químicos e físicos do solo em profundidades de 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m.

Atributos do solo	0,0-0,1 m	0,1-0,2 m
pH do solo	5,3 $\pm$ 0,2	5,4 $\pm$ 0,3
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	1,10 $\pm$ 0,2	0,9 $\pm$ 0,5
K (mg kg ⁻¹)	40,20 $\pm$ 0,1	24,4 $\pm$ 0,7
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	1,47 $\pm$ 0,1	1,31 $\pm$ 0,1
Na (cmol _c kg ⁻¹)	0,03 $\pm$ 0,0	0,04 $\pm$ 0,0
Fósforo (mg kg ⁻¹)	8,00 $\pm$ 0,2	7,04 $\pm$ 0,3
H+Al (cmol _c kg ⁻¹)	2,24 $\pm$ 0,4	2,77 $\pm$ 0,5
Capacidade de troca catiônica (cmol _c kg ⁻¹)	4,94 $\pm$ 0,4	4,96 $\pm$ 0,5
Soma de Bases (cmol _c kg ⁻¹)	2,91 $\pm$ 0,6	2,58 $\pm$ 0,5
Saturação de bases (%)	56,57 $\pm$ 0,8	48,15 $\pm$ 0,7
Carbono orgânico (g kg ⁻¹)	8,20 $\pm$ 0,1	7,6 $\pm$ 0,1
Estoque de carbono (t C ha ⁻¹)	12,87 $\pm$ 0,1	11,78 $\pm$ 0,1
Densidade do solo (g cm ⁻³)	1,42 $\pm$ 0,0	1,46 $\pm$ 0,0
Porosidade do solo (m ³ m ⁻³)	0,40 $\pm$ 0,0	0,06 $\pm$ 0,0
Microporosidade (m ³ m ⁻³)	0,33 $\pm$ 0,0	0,31 $\pm$ 0,0
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)	0,07 $\pm$ 0,0	0,38 $\pm$ 0,0
Capacidade de campo (m ³ m ⁻³)	0,08 $\pm$ 0,0	0,08 $\pm$ 0,0
Ponto de murcha permanente (m ³ m ⁻³)	0,042 $\pm$ 0,0	0,045 $\pm$ 0,0
Água disponível (m ³ m ⁻³)	0,04 $\pm$ 0,0	0,03 $\pm$ 0,0
Capacidade de aeração do solo (mm)	0,23 $\pm$ 0,0	0,21 $\pm$ 0,0

Capacidade de água disponível (mm × 10 ³)	4,00 ± 0,0	3,00 ± 0,0
---	------------	------------