



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

DANIEL DE OLIVEIRA SENA

**REUSO DE SEDIMENTOS DE RESERVATÓRIOS E SEUS IMPACTOS NOS
PARÂMETROS FÍSICO-HÍDRICOS EM SUBSTRATO AGRÍCOLA**

FORTALEZA

2023

DANIEL DE OLIVEIRA SENA

REUSO DE SEDIMENTOS DE RESERVATÓRIOS E SEUS IMPACTOS NOS
PARÂMETROS FÍSICO-HÍDRICOS EM SUBSTRATO AGRÍCOLA

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de graduação em agronomia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes
Costa

Coorientadora: Me. Gabriela Domingos Lima

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S477r Sena, Daniel de Oliveira.
Reuso de sedimentos de reservatórios e seus impactos nos parâmetros físico-hídricos em substrato agrícola / Daniel de Oliveira Sena. – 2023.
70 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Curso de Agronomia, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa.
Coorientação: Profa. Ma. Gabriela Domingos Lima.
1. Hidrossedimentologia. 2. Conservação da água. 3. Manejo do solo. 4. Hidrologia. 5. Disponibilidade hídrica. I. Título.

CDD 630

DANIEL DE OLIVEIRA SENA

REUSO DE SEDIMENTOS DE RESERVATÓRIOS E SEUS IMPACTOS NOS
PARÂMETROS FÍSICO-HÍDRICOS EM SUBSTRATO AGRÍCOLA

Monografia apresentada à Coordenação do
Curso de Agronomia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
título de Engenheiro Agrônomo.

Aprovada em: 23/06/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Gabriela Domingos Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Brennda Bezerra Braga
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.º Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

AGRADECIMENTOS

A Deus por me guiar e proteger até aqui.

Aos meus pais, Cláudio de Oliveira Gomes e Antônia Silva Sena de Oliveira.

Ao meu professor orientador Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa, pela orientação de meus trabalhos e formação em diversos campos.

A Brennda Bezerra Braga, Rodrigo Mendes Rodrigues, Gisele Torres de Oliveira, Gabriel Farias Pimentel Bezerra, Graziela Domingos Souza e Alonso dos Santos Severo, pela parceria e suporte na condução do experimento e compartilhamento de materiais, esforços e experiências.

Especialmente a Doutoranda Gabriela Domingos Lima pelo auxílio e acadêmico e pessoal durante toda a realização deste trabalho e à minha cara Srta. Mikaely Melo, pelo apoio, companheirismo e pela luz que cultivamos no trecho da jornada que compartilhamos.

Também aos meus demais professores de graduação e parceiros de trabalho, Raimundo Nonato de Assis Junior, Claudivan Feitosa de Lacerda, Joao Luiz Pinheiro Bastos, Ricardo Espíndola Romero, Ana Cláudia Nascimento Campos, Jaedson Cláudio Anunciato Mota, Fernando Felipe Ferreyra Hernandez, Patrik Luiz Pastori, Carmem Dolores Gonzaga Santos, José Carlos de Araújo, Pedro Henrique Augusto Medeiros e Elias Mendes Costa, pelas conversas, conselhos e exemplos que tiveram profundo impacto na construção de minha identidade pessoal e profissional.

A todas as pessoas que conheci no curso e na vida universitária que contribuíram para a construção do meu aprendizado – de modo recíproco, espero ter colaborado de alguma forma com o vosso.

Sou grato também à Universidade Federal do Ceará e ao Departamento de Engenharia Agrícola da UFC (DENA). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação Cearense de Amparo à Pesquisa (FUNCAP), pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Agência de Desenvolvimento do Ceará (ADECE), Secretaria de Desenvolvimento Econômico e Trabalho (SEDET-Ceará), Instituto Centro de Ensino Tecnológico (CENTEC), Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), e Programa Cientista-Chefe, pelo suporte financeiro e pela concessão de bolsas de estudo.

“(…)Car rien nes’t gratuit dans la vie.”

Michael Giacchino, compositor (1967)

RESUMO

O acúmulo de sedimentos no leito dos açudes ocorre como consequência de processos erosivos. Solo e matéria orgânica dos pontos mais altos do terreno são carregados pela água corrente até as cotas inferiores de uma bacia hidrográfica. Esse deslocamento de material implica dois problemas: perda da capacidade de armazenamento de água do reservatório e o acúmulo de nutrientes com a aceleração da eutrofização. Uma prática possível para manutenção de açudes e barragens seria a retirada desse material, visando evitar problemas como a eutrofização e recuperar a capacidade original do reservatório. Nesse contexto, existem finalidades para esse sedimento que podem impactar positivamente as atividades agrícolas e conseqüentemente o meio-ambiente. O reuso do sedimento como ferramenta de manutenção da fertilidade do solo, tanto em termos de química quanto de física do solo, tem se mostrado uma alternativa promissora para o manejo do solo. Portanto, objetiva-se avaliar os aspectos físico-hídricos do solo em decorrência da aplicação de diferentes quantidades de sedimentos de reservatório em vasos com o cultivo da cultura de milho. Foram utilizados cinco tratamentos, com diferentes níveis de sedimento do reservatório São Nicolau, Madalena – CE: 0 t.ha⁻¹ (testemunha), 25 t.ha⁻¹, 50 t.ha⁻¹, 75 t.ha⁻¹ e 100 t.ha⁻¹. Os parâmetros medidos em laboratório foram densidade global (Ds); densidade de partículas (Dp); porosidade (P); e condutividade hidráulica saturada (Ks). A capacidade de retenção de água também foi medida na casa de vegetação por meio de sensores automáticos de umidade conectados a um *datalogger*, e o consumo de água através do volume drenado coletado em cada irrigação. Observou-se diferença significativa ($\alpha = 0,05$) no teste da ANOVA para os resultados de demanda de água e Ks, e por meio de regressão linear foi construída uma linha de tendência com intervalo de confiança definido para a variação dos valores de Ks. Observou-se diminuição do Ks em função do aumento das doses de sedimento devido ao maior acúmulo de partículas finas no substrato.

Palavras-chave: hidrossedimentologia; conservação da água; manejo do solo; hidrologia; disponibilidade hídrica; semiárido.

ABSTRACT

The accumulation of sediments in the bed of weirs is a process resulting from the erosion occurrence. Soil and organic matter from higher points are carried by the streaming water to the lower points of a watershed. This displacement of material implies two problems: a diminished water storage capacity and the accumulation of nutrients with the probable occurrence of eutrophication. A common practice in the maintenance of reservoirs and dams is to remove this material, seeking to avoid problems such as eutrophication and recover the original capacity of the reservoir. However, there are other purposes for this sediment that can positively impact agricultural activities and consequently the environment. The reuse of this sediment as a tool for maintaining soil fertility, both in terms of chemistry and soil physics, has proven to be a promising soil management alternative. Therefore, this work aims to evaluate the performance of the addition of sediment to modify the physical-hydric properties of the soil in vases with maize cropping. Five treatments were used, with different levels of sediment in $t\cdot ha^{-1}$ from the São Nicolau reservoir in the city of Madalena – CE: 0 $t\cdot ha^{-1}$ (witness), 25 $t\cdot ha^{-1}$, 50 $t\cdot ha^{-1}$, 75 $t\cdot ha^{-1}$ e 100 $t\cdot ha^{-1}$. The parameters measured in the laboratory were soil-substrate density (Ds); particle density (Dp); porosity (P); and saturated hydraulic conductivity (Ks). The water retention capacity was also measured in the green house by automatic humidity sensors connected to a datalogger and the water consumption (water demand) through the collected drained volume from each irrigation. A significant difference ($\alpha = 0.05$) in ANOVA test was observed for the results of water demand and Ks, and through linear regression was constructed a trend line with a defined confidence interval for the variation of Ks values. A decrease in Ks was observed as a function of increasing sediment doses probably due to the greater accumulation of fine particles in the substrate.

Keywords: hydro-sedimentology; water conservation; soil management; hydrology; water availability; semiarid.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação da ideia geral do reuso de sedimentos na agricultura	20
Figura 2 - Apresentação dos parâmetros físico-hídricos observados neste estudo.....	24
Figura 3 - Resumo esquemático do experimento	31
Figura 4 - Área de pesquisa, local de coleta de sedimento e localização dos pontos de amostragem.....	32
Figura 5 - Padrão de arranjo dos vasos no croqui.....	34
Figura 6 - Distribuição da dose de sedimento e solo-substrato por vaso utilizado em cada tratamento.....	35
Figura 7 - Montagem do experimento e monitoramento nos estágios iniciais da cultura	36
Figura 8 - Retirada da camada superficial de 1 cm e das amostras compostas de solo-substrato depositadas em sacos plásticos	37
Figura 9 - Amostras secando em casa de vegetação, detalhe da malha da peneira utilizada e do peneiramento	38
Figura 10 - Preparo e mensuração dos cilindros metálicos para coleta de amostras indeformadas de solo-substrato	38
Figura 11 - Coleta das amostras indeformadas sendo realizada	39
Figura 12 - Balão volumétrico zerado com álcool da bureta.....	40
Figura 13 - Mesas de tensão e suportes e detalhe das amostras no ensaio	41
Figura 14 - Pesagem da amostra indeformada quando atingiu a Capacidade de campo (CCa) e após ter sido seca em estufa par obtenção da massa do solo-substrato seca	42
Figura 15 - Destaque para amostra com cilindro de carga fixado com fita adesiva e amostras na etapa de saturação.....	44
Figura 16 - Amostra sob observação e detalhe do cilindro de carga sobre a amostra em contato com recipiente de recarga hidráulica	45
Figura 17 - Bateria de cinco amostras sob observação.....	45
Figura 18 - Fluxograma da coleta de dados.....	46
Figura 19 - Sensores de umidade instalados nos vasos do experimento.	47
Figura 20 - Componentes do datalogger.....	48
Figura 21 - Instalação do conjunto de componentes do datalogger e detalhe para o sensor de umidade inserido no vaso	48
Figura 22 - Gráficos boxplot para os valores observados dos parâmetros testados	49
Figura 23 - Variação da condutividade hidráulica saturada (Ks) para os diferentes tratamentos	

e intervalo de confiança	53
Figura 24 - Comparação entre as diferentes taxas de infiltração observadas	54
Figura 25 - Resultados da medição da velocidade de infiltração básica (VIB) para os diferentes tratamentos	55
Figura 26 - Resposta dos sensores durante o período de irrigação	57
Figura 27 - Umidade no solo-substrato no período de irrigação com detalhamento para as semanas correspondentes aos 50, 70 e 90 dias após a semeadura (DAS)	58
Figura 28 - Registro de todos os períodos de depleção de umidade no solo-substrato	59
Figura 29 - Registro da curva de depleção de umidade diária no solo-substrato	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise física do solo da região (solo-substrato) e sedimento	33
Tabela 2 - Resultados da ANOVA para os ensaios a um nível de significância de 5%	51
Tabela 3 - Valores médios de densidade do solo-substrato para cada tratamento	52
Tabela 4 - Valores médios de porosidade para cada tratamento	53
Tabela 5 - Classificação das velocidades de infiltração básica	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	O semiárido, disponibilidade hídrica e convivência com a seca.....	15
2.2	Erosão, assoreamento e eutrofização de açudes do Ceará.....	17
2.3	Dinâmica de retirada e reuso do sedimento assoreado.....	19
2.4	Reuso de sedimento: química e fertilidade do solo.....	21
2.5	Reuso de sedimento: aspectos físico-hídricos do solo.....	24
2.5.1	<i>Densidade das partículas (D_p)</i>	24
2.5.2	<i>Densidade do solo-substrato (D_s)</i>	25
2.5.3	<i>Porosidade (P) e retenção de umidade</i>	26
2.5.3	<i>Condutividade hidráulica (K_s) e infiltração</i>	28
3	MATERIAL E MÉTODOS	31
3.2	Área de estudo.....	32
3.3	Propriedades do solo-substrato e sedimento.....	33
3.4	Montagem e condução do experimento.....	33
3.5	Coleta e preparo das amostras.....	37
3.6	Realização dos testes de infiltração.....	39
3.7	Análises laboratoriais.....	40
3.7.1	<i>Determinação da densidade das partículas (D_p)</i>	40
3.7.2	<i>Ensaio na mesa de tensão, secagem em estufa e pesagem das amostras</i>	41
3.7.3	<i>Determinação da densidade do solo-substrato (D_s)</i>	42
3.7.4	<i>Determinação da porosidade (P)</i>	43
3.7.5	<i>Determinação da condutividade hidráulica saturada (K_s)</i>	44
3.7.6	Instalação dos sensores de umidade e datalogger.....	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Avaliação do sedimento na resposta dos parâmetros físico-hídricos.....	49
4.2	Velocidade de infiltração básica (VIB).....	54
4.3	Variação temporal da umidade do solo-substrato com uso de sensores.....	57
4.4	Curva de depleção da umidade do solo-substrato.....	59
5	CONCLUSÕES	62
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1 INTRODUÇÃO

Em virtude da preocupação com os impactos da ação humana sobre os recursos naturais, os aspectos ambientais têm ganhado crescente destaque no campo da pesquisa científica. A exploração das reservas naturais para a produção de fertilizantes e seus efeitos sobre os ecossistemas por exemplo. Desse modo, estudos de fontes alternativas de insumos para a produção agrícola, como potencial do reuso de sedimentos tem se tornado mais frequentes nos últimos anos (SGARBI, 2008).

Nesse âmbito, o material erodido que se deposita no fundo de corpos d'água, quando bem manejado, torna-se um precioso recurso. Corroborando para minimizar ambos os problemas: perda da fertilidade do solo por erosão e assoreamento com potencial eutrofização. Na gestão de reservatórios, seja em grande ou pequena escala, há uma questão ambiental muito forte: o acúmulo de sedimentos e ao prejuízo da qualidade de água: a eutrofização. Realizar a retirada de sedimentos é um caminho para minimizar direta ou indiretamente vários dos problemas resultantes desse fenômeno. Não se trata apenas da preservação da qualidade da água visando seu uso pelas comunidades, o que por si só já seria muito plausível dado que a maior parte das doenças infecciosas e mortalidade em termos mundiais está associada à qualidade da água (SMITH & SCHINDLER, 2009).

O sedimento retirado dos reservatórios, pode ser usado para diversos fins desde a produção à recuperação de áreas degradadas. Os sedimentos possuem um grande potencial no cenário agrícola, inclusive de regiões do Semiárido brasileiro (CASTRO & ALMEIDA, 2012). Esse material pode ser utilizado como um promotor da fertilidade química e física do solo, substituindo alguns insumos exógenos, de custo elevado e preços voláteis do mercado de fertilizantes. Essa possibilidade permitiria aos produtores, principalmente os pequenos, uma posição de menor dependência do mercado de insumos agrícolas e, desse modo, diminuiria a sua vulnerabilidade frente às muitas incertezas do atual sistema de produção agrícola.

Os pequenos produtores, sobretudo aqueles da agricultura familiar, dificilmente possuem recursos para conduzir as culturas lançando mão da adubação convencional de modo eficiente. Há inúmeras limitações envolvidas que vão desde o recurso financeiro para aquisição de materiais até o simples acesso à informação sobre como realizar o processo. Eis a importância dos projetos de extensão das universidades e núcleos produtores de conhecimento. Por meio do conhecimento e do uso de novas técnicas e tecnologias, é possível reduzir em muito os impactos ambientais e ainda otimizar as atividades das propriedades familiares, tornando-as mais produtivas e rentáveis. Na era da informação, a percepção de que essa não é apenas uma

necessidade nacional, mas mundial, está cada vez mais difundida. Na agenda para o ano de 2030, por exemplo, um dos principais objetivos é alcançar o “desenvolvimento sustentável” através do fortalecimento dos “meios de implementação e parcerias globais” (FAO, 2019).

A proposta central de trabalhos como este é o reuso do sedimento de açudes não estratégicos como um complemento à adubação dos solos cultivados. O processo se dá desde a sua retirada das zonas de assoreamento, transporte, aplicação e incorporação às áreas de plantio como promotor dos atributos físico-hídricos e químicos do solo. A realocação desse material é uma alternativa econômica (Braga *et al.*, 2019) e ambientalmente atraente para o produtor, que pode utilizar o recurso local ou dos arredores de sua propriedade como insumo de produção.

No tocante ao uso de sedimentos como uma alternativa de insumo para potencializar a fertilidade do solo no âmbito da produção agrícola, há alguns pontos a serem considerados. O primeiro é que há naturalmente uma grande variação dos atributos dos solos entre as bacias hidrográficas e mesmo dentro de uma mesma bacia. Este estudo é, portanto, uma apresentação do potencial que o sedimento possui de ser considerado como uma alternativa de insumo. Desta forma, é importante dizer que se faz sempre necessária por parte do produtor a realização das análises de solo com o intuito de se conhecer o sedimento a ser usado e o seu real poder promotor da fertilidade do solo das áreas de cultivo.

A importância de se considerar os atributos físicos reside no fato de que estes estão intimamente ligados à fertilidade do solo de um modo geral. E por “fertilidade”, há uma tendência errônea de serem considerados apenas os atributos químicos, mas os físicos e estrutural também são atributos determinantes. Um solo que possua configurações químicas ótimas para o desenvolvimento das culturas pode apresentar uma textura demasiadamente argilosa, um elevado grau de compactação, uma má permeabilidade hidráulica ou ainda uma elevada pedregosidade. No mais, na agricultura convencional, a correção costuma ser bem menos viável quando se trata de problemas de natureza física e estrutural quando comparada à de atributos químicos do solo.

Dentre esses parâmetros indispensáveis à análise do potencial do reuso de sedimentos que também necessitam de serem avaliados, com relação às características físico-hídricas estão: sua capacidade de retenção de umidade, drenagem e aeração. Por essa perspectiva, o questionamento feito foi qual seria o impacto da aplicação de sedimento assoreado nesses parâmetros.

Diante do acima exposto, esse trabalho teve como objetivo avaliar os aspectos físico-hídricos do solo em decorrência da aplicação de diferentes quantidades de sedimentos de reservatório no substrato para o cultivo da cultura de milho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O semiárido, disponibilidade hídrica e convivência com a seca

O território cearense se encontra inserido na região do Semiárido nordestino no qual a precipitação média anual varia de 600 a 800 mm.ano⁻¹, sendo as chuvas escassas por longos períodos e distribuídas irregularmente durante o ano, concentrando-se entres os meses de fevereiro a maio (GUERRA *et al.*, 2020). O Ceará possui 12 regiões hidrográficas com uma considerável quantidade de espelhos d'água (DE MATOS, 2020). Dentre elas, a bacia hidrográfica do Banabuiú é caracterizada pela ocorrência de embasamento cristalino, com disponibilidade limitada e espacialmente heterogênea das águas subterrâneas. Em termos genéricos ela apresenta os seguintes tipos de solo: Planossolo, Neossolo, Organossolo, Argissolo e Luvisolo (BRAGA *et al.*, 2019). Logo, ao longo do tempo foi construída uma densa rede com mais de 1.000 reservatórios com áreas de superfície superior a 5 hectares geralmente construídos pela própria comunidade, na busca de adaptação à seca prolongada (PEREIRA *et al.*, 2019).

Uma definição amplamente usada para bacias hidrográficas diz que se trata de áreas nas quais e por meio das quais toda chuva que cai é drenada por riachos e rios secundários até um rio principal localizado em um ponto mais baixo de sua paisagem, sendo as bacias hidrográficas separadas umas das outras por uma linha divisória denominada “divisor de águas” (COGERH, 1997).

A bacia do Banabuiú tem seu clima local descrito como semiárido quente (BSh) de acordo com a classificação de Köppen, possuindo estação chuvosa concentrada entre fevereiro e maio, correspondendo a 75% da precipitação anual e sendo as médias anuais de precipitação da ordem de 770 mm e evapotranspiração potencial de 2.500 mm (BRAGA *et al.*, 2019; RODRIGUES *et al.*, 2019). No sistema de classificação de aptidão agrícola das terras, tais conformações configuram “grau moderado” de limitação por deficiência hídrica. Além disso, dada a influência das componentes climatológicas temperatura e umidade sobre o intemperismo das rochas, é possível concluir que o baixo volume de chuvas influenciou nas características orográficas e edáficas (LEPSCH, 2016). Os solos da região, por serem pouco evoluídos, configuram moderado grau de limitação a processos de mecanização em virtude de sua profundidade exígua (RAMALHO *et al.*, 1995).

O déficit hídrico, muito mais intenso em regiões de intensa evapotranspiração, prejudica o desenvolvimento das plantas cultivadas por fechamento dos estômatos e

comprometimento da fotossíntese e, conseqüentemente, da produtividade das culturas (TAIZ; ZEIGER, 2013). Sendo assim, a ocorrência de secas prolongadas tem sido um fator muito limitante para produção agrícola e a para a sobrevivência da população (KHAN *et al.*, 2005).

Em um cenário de recursos escassos outra complicação seria o fato da região do Semiárido ser tida como uma das mais populosas do mundo (SOUZA, 2015). Concernente a esse cenário, o semiárido tem sido o enfoque em uma série de estudos não só no âmbito climático, mas também social. Isso porque possui uma população altamente exposta física e socioeconomicamente às condições ambientais em uma posição de limitado acesso à tecnologia (MARENGO; TORRES & ALVES, 2017).

Ao longo do tempo, diferentes governos e comunidades vêm buscando alternativas de convivência com a seca na região com a implantação de projetos de transposição e construção de reservatórios estratégicos e não estratégicos (SANTOS, 2019). Menescal *et al.* (2002), avaliando a disponibilidade de recursos, influências climáticas e a gestão dos recursos hídricos, somente no Estado do Ceará, estimou que apesar do número de açudes de todos os tamanhos e tipos ser de cerca de 30.000, somente a construção de açudes não resolve o problema da escassez hídrica, sendo necessárias outras formas de intervenção por parte da população e do governo por meio da implementação de políticas públicas. Desde então, para a Secretaria dos Recursos Hídricos, o número de reservatórios praticamente triplicou, alcançando um número próximo de 90.000 açudes no estado dentre os quais 155 são classificados como açudes estratégicos.

Os poços da região no geral não possuem vazões elevadas, pois a formação cristalina abrange cerca de setenta por cento da área denominada como “Polígono das Secas”, com aquíferos fissurais de vazão muito limitada (VIEIRA *et al.*, 2003). No mais, em virtude de serem os solos do semiárido rasos e da alta variabilidade o regime de chuvas, a construção de barragens mostra-se de vital importância (SCHMIDT, 2013). Os açudes não estratégicos, aqueles de menor porte, são fundamentais para o armazenamento de água, possibilitando seu uso em pequenas comunidades e propriedades rurais que estão distantes de açudes estratégicos. Por meio do armazenamento da água nesses açudes é possível conviver com a escassez hídrica durante a estação seca do ano (ARAÚJO; BRONSTERT, 2006). Apesar de sua importância, esses reservatórios sofrem com a retenção de sedimentos, diminuindo a capacidade (ARAÚJO; BRONSTERT, 2016) e qualidade da água dos mesmos (MANTEL; HUGHES & MULLER, 2010^a).

Além dessas estratégias de convívio com a seca, há ainda outras passíveis de serem adotadas como a cobertura e a incorporação de materiais que aumentem a capacidade de

retenção de umidade. A matéria orgânica é uma ótima alternativa, mas há indícios de que materiais de natureza mineral sejam um forte aliado na complementação da capacidade de retenção de umidade de uma dada camada de solo cultivado, e é aí que entraria o reuso de sedimento de açudes.

2.2 Erosão, assoreamento e eutrofização de açudes do Ceará

A erosão é um problema de ocorrência mundial que causa inúmeros prejuízos ambientais e econômicos (RODRIGUES *et al.*, 2013). Trata-se do desprendimento das partículas sólidas de material mais fino da superfície do solo por meio da ação dos agentes erosivos (FONSECA, 2010). Ela acontece mesmo sem interferência antrópica, sendo os agentes erosivos o ar, a água e o gelo que, sob influência da aceleração gravitacional são direcionados para o centro da terra deslocando partículas sólidas no processo (SUGUIO, 2003). Contudo, esse processo é frequentemente intensificado pela atividade humana que modifica as paisagens naturais em grande e pequena escala através do tempo. Quando o solo não está protegido com a vegetação ocorre um desprendimento mais intenso, pois as partículas da camada superficial são carregadas mais facilmente (FERREIRA, 2019).

O poder erosivo da chuva depende de componentes como duração, volume e intensidade. O processo de erosão é iniciado quando as gotas de chuva carregadas com energia cinética tocam as partículas do solo no escoamento superficial e, conseqüente, no carregamento desse material pela água. A desagregação também faz com que materiais mais finos ocupem o espaço dos poros diminuindo a permeabilidade do solo e intensificando o processo de escoamento (GUERRA, 2007).

No semiárido, a vegetação que não dispõe de folhas suficientes para proporcionar uma cobertura vegetal eficiente típica de caatinga hiperxerófila (SANTOS *et al.*, 2020), concomitantemente com as chuvas mal distribuídas e intensas sobre solos pouco evoluídos o risco de perdas de material sólido da superfície por erosão é maior (CABRAL, 2014). Neossolos litólicos, por exemplo, que são pouco evoluídos, cascalhentos e que apresentam afloramentos de rocha são classificados como vulneráveis pois possuem elevada suscetibilidade erosiva (FRANCISCO *et al.*, 2019). A formação de enxurradas devido ao comportamento da vegetação caducifólia de perder as suas folhas, principalmente ao final do período de seca, também é um fator ainda mais agravante (BERTOL *et al.*, 2007). Calderano *et al.* (2014) salientam que a classes mais sujeitas a erosão são os Argissolos e Neossolos. Os Neossolos por sua associação a declividades e pela pouca cobertura vegetal e os Argissolos pelo acúmulo de argila em

profundidade que limita a infiltração e favorece o escoamento superficial. Coincidentemente, esses dois tipos ocupam boa parte da bacia do Banabuiú, ocupando porções representativas das bacias do Ceará (SANTOS *et al.*, 2011).

No tocante à situação da área enfoque deste estudo, o trabalho de Cabral *et al.* (2016) demonstrou que mais de 50% das áreas mapeadas na bacia do Banabuiú apresentavam risco pelo menos moderado de erosão.

Se há erosão num ponto, há assoreamento no outro. A retenção de sedimentos, por sua vez, é decorrente do processo de assoreamento desse material erodido nas cotas inferiores da área da bacia. As partículas mais susceptíveis aos processos erosivos são as de menor diâmetro, como a argila, e por possuírem menor massa são carregadas via fluxo turbulento em direção à barragem (NAVAS *et al.*, 2009). Como resultado, observa-se um empobrecimento dos solos pelas perdas dos nutrientes carregados com os sólidos erodidos. Trabalhos anteriores mostraram que o principal meio de perda de nutrientes como o fósforo se dá pelo escoamento superficial (WITHERS, 2008). Uma das implicações mais diretas é a diminuição da qualidade da água com o acúmulo de nutrientes como P (fósforo) e N (nitrogênio) que são os mais diretamente relacionados aos problemas de eutrofização (SMITH, 2003). O teor e a qualidade da matéria orgânica possuem relevância nesse contexto, contribuindo para a liberação do fósforo para a coluna de água, uma vez que os ácidos orgânicos se associam aos metais de Fe e Al, anulando a adsorção do P no meio (SANTOS *et al.*, 2023).

O acúmulo de sólidos orgânicos e minerais depositados no fundo do açude também atuam de modo a diminuir sua capacidade de armazenamento de água ao longo do tempo (ARAÚJO, 2006). A preocupação da diminuição da capacidade de armazenamento de reservatórios estratégicos é muito válida e trata-se de um problema real. Contudo, há trabalhos que demonstram um benefício direto nesta questão decorrente da construção de açudes não estratégicos pelas comunidades. A rede desses pequenos e médios açudes atuaria de modo a barrar grande parte desse sedimento que seria carregado para os açudes estratégicos atenuando seu aporte ao longo do tempo (MALVEIRA; ARAÚJO; GÜNTNER, 2012). Se amplamente adotado, o reuso de sedimentos poderia vir a ser um positivo e considerável incremento nesse efeito gerado por esses açudes.

O sedimento acumulado, rico em nutrientes minerais e matéria orgânica promove a proliferação de macrófitas que possuem uma elevada taxa de respiração e ocupam grandes proporções da área superficial da água limitando a superfície de contato com o ar e as trocas gasosas. Como resultado, há alteração da turbidez da água, diminuição da difusão de oxigênio e a morte de espécies como peixes e insetos aquáticos, fenômeno amplamente conhecido como

eutrofização (SMITH & SCHINDLER, 2009).

Conforme elucidado por Medeiros *et al.* (2015), a retirada e reutilização desse sedimento assoreado reduziria seu acúmulo no reservatório e aumentaria seu volume de armazenamento. Desse modo, com o intuito de buscar manter a capacidade de armazenamento e a qualidade de água dos açudes ao decorrer do tempo, é importante que esses sedimentos sejam geridos adequadamente e o manejo do solo seja realizado de forma responsável, de modo a diminuir a ocorrência de erosão.

2.3 Dinâmica de retirada e reuso do sedimento assoreado

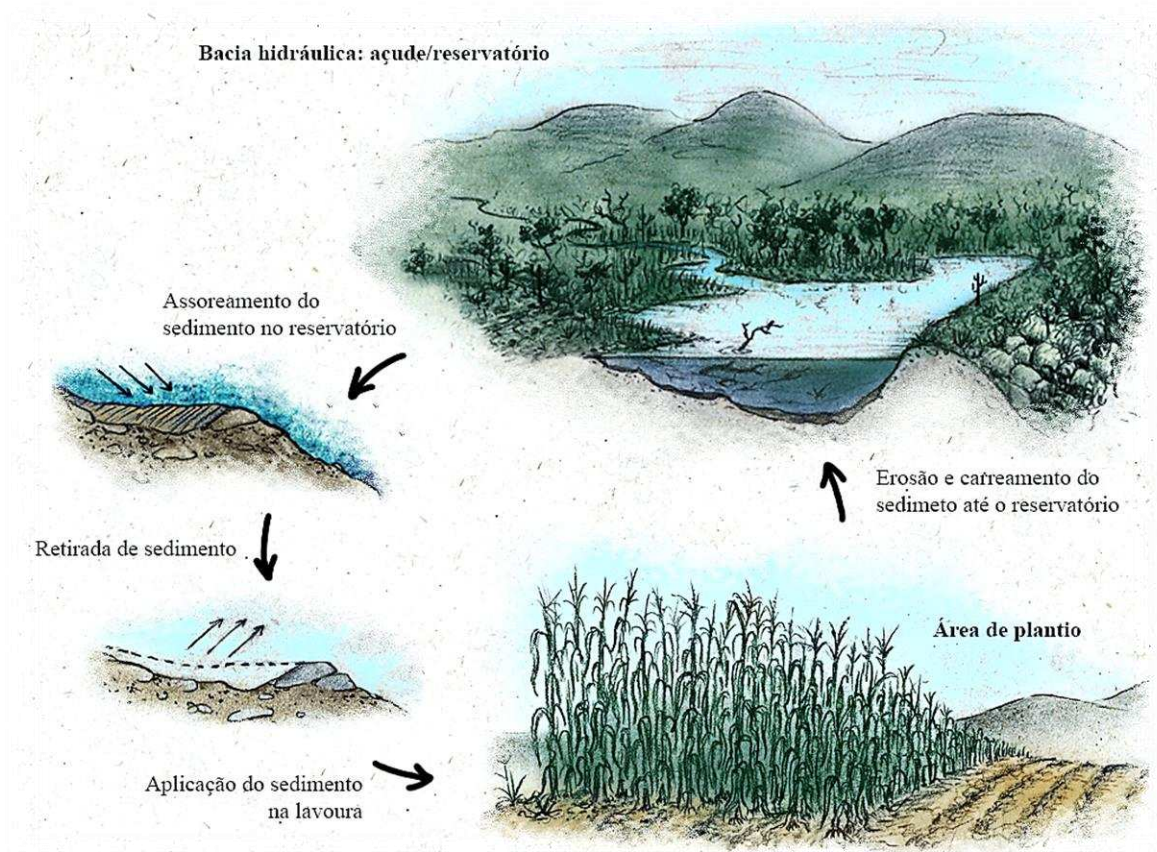
Na manutenção periódica de açudes e barragens usualmente é realizada a técnica de dragagem, que é retirada do sedimento dos reservatórios que, dentre outras finalidades, visa recuperar parcial ou totalmente sua capacidade com posterior deposição desse material em outro local (HERBICH, 2000). Por definição, o “dragado”, em termos bem amplos, é todo o material retirado ou deslocado do leito de corpos d’água, desde que não constitua bem mineral como metais preciosos por exemplo (CONAMA, 2004). Dentre seus constituintes estão partículas minerais de diferentes granulometrias, matéria orgânica e outros materiais (MONTEIRO, 2008).

A grande dificuldade existente no reuso de sedimento oriundo de dragagem é o fato de ser necessário o uso de maquinário especializado, o que não é um recurso acessível ao pequeno produtor de modo geral e na grande maioria das vezes não se mostrando viável. Uma alternativa muito mais viável seria a retirada desse material quando o nível do açude decresce ao ponto de expor seu leito. Esse comportamento é muito comum em pequenos reservatórios do semiárido que, devido à elevada taxa de evaporação, possuem sua eficiência hídrica em torno de 25% (VIEIRA *et al.*, 2003). Duque *et al.* (2004) já propunham a reutilização máxima dos recursos disponíveis nos pequenos açudes, e apesar de tratar-se da água disponível, dado que essa água seria perdida por evaporação, pode perfeitamente ser aplicado a questão do sedimento assoreado, aumentando a relação benefício/custo da implantação e manutenção dos reservatórios.

Dito isso, a retirada desse sedimento segue os seguintes passos: ao reservatório secar ao ponto de expor partes de seu leito, realiza-se a amostragem para as análises de solo e a depender da decisão após a interpretação destas, a retirada do material, seu transporte e deposição/aplicação em alguma área próxima. Evidentemente que esses procedimentos geram custos, Braga *et al.* (2019) consideraram em seu trabalho os custos totais da adubação do solo com sedimentos e fertilizantes comerciais complementares apresentam uma variação de R\$ 1023 a R\$ 1958 por hectare considerando dados disponíveis nas plataformas da Secretaria

de Infraestrutura do Estado do Ceará - SEINFRA / CE. A economia de recursos foi de 16 a 28% se comparados os custos totais da adubação alternativa com os custos da convencional a depender dos constituintes do sedimento.

Figura 1 – Representação da ideia geral do reuso de sedimentos na agricultura.



Fonte: elaborada pelo autor.

Dentre as inúmeras destinações possíveis para o sedimento, podem ser citadas a sua aplicação em construção de aterros, restauração e formação de habitats, recuperação de áreas de mineração, na formação de pastagens e adubação das culturas agrícolas em geral (CASTRO & ALMEIDA, 2012). Seu uso nas atividades agrícolas, no entanto, merece alguns cuidados com a possível presença de contaminantes que podem inviabilizar o consumo dos alimentos por pessoas e animais (CESAR *et al.*, 2015).

É pertinente ressaltar que a remoção do sedimento assoreado não dispensa o uso de medidas de diminuição dos processos erosivos, haja vista que trabalhos mostram que tão importante quanto fazer a retirada desse material é a diminuição do aporte futuro de sedimentos (KIANI, 2020). Nesse aspecto, o uso adequado da terra, bem como o emprego das práticas

conservacionistas tem se mostrado alternativas eficazes de diminuir as perdas de solo por erosão e preservar a qualidade da água dos reservatórios (ROCHA, 2018).

2.4 Reuso de sedimento: química e fertilidade do solo

A adição de fertilizantes orgânicos e minerais é uma etapa fundamental da atividade agrícola quando se almeja grandes produtividades, sendo determinante na questão da segurança alimentar (STRADA, 2023). O grande problema desse aspecto dos modelos produtivos atuais é justamente o custo de aquisição do insumo fertilizante. Os eventos do ano de 2021 e início de 2022 como a guerra da Ucrânia, o aumento do custo do gás natural e a crise dos containers elevaram os preços dos fertilizantes a atingirem máximas de dez anos (GLOBALFERT, 2022). Melo *et al.* (2023), analisando a comercialização de fertilizantes à luz das relações bilaterais entre Brasil e Rússia descrevem a dependência da produção brasileira das oscilações do mercado internacional de fertilizantes, exemplificando o quanto as mudanças geopolíticas poder vir a afetar diretamente nossa produção.

O Brasil nos dias de hoje figura entre os maiores produtores mundiais de alimentos e para manter-se nesse patamar de produção agrícola demanda o uso de quantidades consideráveis de fertilizantes. Em meados de 2020 a importação de fertilizantes foi de 29,4 milhões de toneladas (GLOBALFERT, 2020). Segundo Withers *et al.* (2018), por volta de 60% dos fertilizantes inorgânicos usados como fonte de fósforo na agricultura brasileira por exemplo eram importados. A preocupação com a dependência econômica e a sustentabilidade levou a elaboração de metas como estar apto a produzir 50% dos fertilizantes utilizados até 2050. O estado do Mato-Grosso, por exemplo, está a preparar políticas de redução da dependência de fertilizantes importados, buscando investir na produção local de fertilizantes fosfatados, organominerais e nitrogenados (GLOBALFERT, 2023).

Diante do exposto, o reuso do sedimento assoreado como adubo agrícola tem se mostrado uma alternativa ambiental promissora e economicamente viável, sobretudo para os pequenos produtores (BRAGA *et al.*, 2019). Esse sedimento é, muitas vezes, rico em nutrientes e pode voltar à natureza como um promissor complemento na incrementação da fertilidade do solo, a depender de sua qualidade nutricional (BRAGA *et al.*, 2017). Em seu trabalho, Braga *et al.* (2023), avaliando o potencial do reuso de sedimentos assoreados, observou que o sedimento utilizado, apesar de se assemelhar no quesito granulométrico, diferia em muito do solo da região quanto ao teor de matéria orgânica e macronutrientes (submetido à publicação). Os resultados de seu trabalho mostraram que houve incremento significativo na produção de biomassa das

plantas de milho cultivado em vaso, sendo a maior produtividade observada nos tratamentos contendo maiores doses de sedimento.

Os sólidos carregados pela ação das chuvas e ventos que compõem o sedimento tendem a ser aqueles de menor tamanho: material vegetal da serapilheira, por sua leveza, argila e silte das camadas mais expostas (SANTOS *et al.*, 2010). Esse é um dos motivos pelos quais os sedimentos assoreados superficiais tendem a ter uma predominância de partículas menores em relação àquelas dos perfis de solo donde vieram. Sua fase sólida é composta basicamente por areias finas, silte, argila e fragmentos de matéria orgânica, materiais de elevada superfície específica (SANTOS *et al.* 2023).

Na química do solo, um dos grandes indicativos de fertilidade que o sedimento influencia a depender do tipo de argila predominante é a CTC (SOARES *et al.*, 2011) A CTC é basicamente a quantidade máxima de cátions adsorvíveis que o complexo de coloides do solo consegue reter na zona de adsorção. Ela varia em função dos constituintes do solo, como por exemplo, a quantidade e a qualidade da matéria orgânica, o pH e o tipo de argila (KÖLLN *et al.*, 2023). Sabe-se que a CTC e CTA é muito mais elevada em solos pouco evoluídos em que predominam as argilas 2:1 em detrimento das argilas 1:1 conforme demonstrado por Melo *et al.* (1983) em seu trabalho.

Nesse quesito os solos do semiárido, por conta da sua natureza mineralógica e o processo de intemperismo denominado de bissialitização, tendem a possuir uma maior presença de argilas 2:1 (CÂMARA *et al.*, 2012 & MORO, 2023). Desse modo, o tamanho e a natureza das partículas juntamente com o teor de matéria orgânica são os componentes mais relevantes quando se pensa em CTC e retenção de umidade. Canet *et al.* (2003) observaram que a alta concentração de matéria orgânica, juntamente com o do teor de argila, provoca um aumento notável na capacidade de troca catiônica do solo, diminuindo as consequências das deficiências de micronutrientes e podendo atribuir uma maior disponibilidade de nutrientes e umidade do solo. De acordo com Silva *et al.* (2012), solos com maior teor de argila apresentam maior atividade microbológica, devido a sua maior capacidade de retenção de água e matéria orgânica. Sedimentos com maiores teores de argila, estão fortemente relacionados à disponibilidade dos minerais devido à atividade de microrganismos, a sua superfície específica e incremento na CTC do solo.

Ademais, a matéria orgânica, geralmente contida nos sedimentos, é um importante componente da fase sólida do solo, atuando em rotas de transporte, complexação e disponibilização de nutrientes (MARTIN-NETO *et al.*, 2023). Conforme comentado nos

tópicos anteriores, há ainda o ponto de que grande parte do fósforo constituinte da matéria orgânica ser perdido por processos erosivos. Dessa perspectiva a deposição de sedimento assoreado em áreas de cultivo é uma boa maneira de realocação do fósforo e outros nutrientes para as áreas de cultivo ou de perda (SANTOS *et al.*, 2023).

Todavia, a química e fertilidade do solo são assuntos complexos. A “lei do mínimo”, proposta por Justus Von Liebig em torno de 1840, afirma que a resposta de produtividade das culturas se dá como dependente do fator de produção que for mais escasso. Esse conceito é plenamente aplicável aos nutrientes disponíveis. Se algum macro ou micronutriente se encontrar em quantidade inferior a mínima requerida pela planta, por mais que os outros estejam nas concentrações ideais, ele será o limitante ao desenvolvimento da planta (STRADA, 2023). Desse modo, é importante ressaltar que apesar de uma melhoria esperada nos atributos químicos do solo, não há garantias de que o sedimento possua condições para substituir por completo a adubação química. A depender da composição do sedimento, é muito provável que algum macro ou micronutriente esteja em concentrações abaixo do mínimo exigido pela cultura o que evidencia a necessidade de outras fontes de aporte nesse nutriente no solo trabalhado. A adubação por meio do reuso de sedimentos seria uma forma complementar se substituir em parte os insumos convencionais visando mitigar impactos ambientais e custos de produção dos pequenos e médios agricultores (BRAGA *et al.*, 2019).

HAQUE *et al.* (2016), ao testarem o uso de sedimentos oriundos de uma lagoa onde havia uma criação de peixes na adubação de pastagens, observaram um aumento significativo da produção de biomassa das plantas. Estudos como esse mostram que existem alternativas muito viáveis e promissoras de se otimizar o sistema de produção nas propriedades da agricultura familiar. Capra *et al.* (2015), testando os benefícios do reuso de sedimentos em solos da Região do Mediterrâneo, constataram melhorias nos atributos físico-químicos de solos degradados, recuperando sua eficiência agrônômica pelo aumento do teor de nutrientes e CTC.

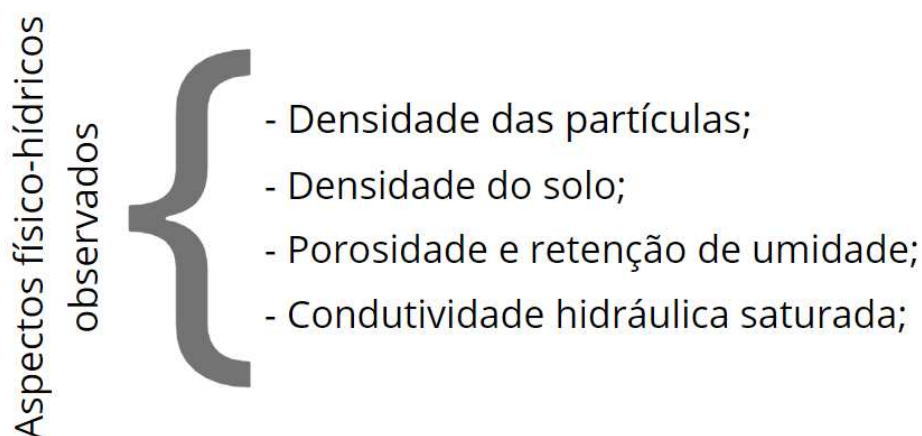
Dos Santos *et al.* (2016), analisando propriedades químicas de sedimentos, observaram que o sedimento oriundo de um dos reservatórios de sua área de pesquisa, apresentou composição propícia para ser usado na agricultura com uma concentração de nutrientes capaz de satisfazer a maioria das necessidades das culturas. Em contrapartida, no mesmo trabalho, o sedimento oriundo de outra bacia hidráulica apresentou limitações químicas por apresentar uma alta salinidade. Esses resultados salientam a importância de se verificar as propriedades químicas do solo, bem como da área de cultivo para fins de análise de compatibilidade e cálculos de aplicação do sedimento a ser utilizado. Vale também pontuar que é preciso cuidados na utilização de sedimentos. A ocorrência de contaminação com xenobióticos, metais pesados

e microrganismos nocivos às plantas e animais é uma possibilidade. Eis, portanto, a importância de se caracterizar química e biologicamente o sedimento a ser utilizado (FONSCECA *et al.* 2003).

2.5 Reuso de sedimento: aspectos físico-hídricos do solo

A importância de se considerar os atributos físicos do solo já foi discutida anteriormente neste trabalho. Além dos motivos citados, sabe-se que conhecimento dessas propriedades é o que irá determinar o dimensionamento dos sistemas de irrigação e manejo das culturas, sendo de vital importância para a atividade agrícola. De modo análogo, o sucesso de outros diversos manejos também depende do conhecimento dessas propriedades (TESTEZLAF, 2017).

Figura 2 – Apresentação dos parâmetros físico-hídricos observados neste estudo.



Fonte: elaborada pelo autor.

É no solo onde a planta encontra os elementos fundamentais para seu nascimento, crescimento e produção, mas para que isso ocorra, não são indispensáveis somente os atributos químicos, mas também os fatores físicos e biológicos.

2.5.1 Densidade das partículas (D_p)

A D_p pode ser entendida como a relação entre a massa de uma amostra de solo e o volume ocupado pelos componentes sólidos da amostra. A D_p apresenta importância como indicador de qualidade em médio prazo, indicador do arranjo mineralógico, velocidade de sedimentação de partículas em líquidos e determinação indireta da porosidade (CARVALHO *et*

al., 2004).

O método do balão volumétrico (MBV), proposto por KIEHL (1979) e EMBRAPA (1997), foi utilizado para determinação da Dp neste experimento. O processo está descrito com mais detalhes nos tópicos da metodologia. Gubiani *et al.* (2006) propõem o uso de um método “alternativo” mais preciso e rápido para determinação da Dp. Em seu trabalho eles compararam o MBV com uma adaptação do mesmo a qual chamaram de “método do balão volumétrico modificado (MBVmod)”. A diferença entre os métodos basicamente constitui a modificação de algumas etapas como o ajuste da aferição no menisco dos balões volumétricos com fita adesiva previamente com 50 mL de álcool. Nos demais aspectos as metodologias em quase nada se diferem, exceto pelo uso da massa do álcool gasto na bureta em vez de seu volume como é feito no método convencional. Através da densidade conhecida, e de mudanças sutis na equação, os autores afirmam uma precisão maior de 1% e estatisticamente significativa com um nível de significância de 5% e um tempo total gasto 17% menor.

2.5.2 Densidade do solo-substrato (Ds)

A densidade do solo-substrato, por sua vez, é uma relação entre massa de solo seco e seu volume conforme mostrado mais adiante na equação (2), sendo afetada por modificações na estrutura e no arranjo e volume dos poros (KLEIN, 2008). Ela tem sido usada como medida da qualidade devido às suas relações intrínsecas com outros atributos como porosidade, capacidade de retenção de umidade e condutividade hidráulica (MARTINS *et al.*, 2009).

Dentre os métodos de determinação da Dp listados do artigo de Pires *et al.* (2011), que comparou os valores de densidade global entre solos submetidos a diferentes manejos, utilizando-se de métodos convencionais estão: o anel volumétrico (MAV), o torrão parafinado (MTP) e a tomografia computadorizada (MTC). Esses métodos são descritos a seguir.

O método do torrão parafinado (MTP) consiste na coleta e secagem ao ar de torrões de solo indeformados. A metodologia é bem simples. O torrão é esculpido, seco em estufa, pesado e impermeabilizado com parafina para ser mergulhado na água. A diferença entre os volumes inicial e final de água, observada pelas marcações da proveta, indica o volume do torrão. De posse do volume e da massa, pelo cálculo de densidade, se obtém a densidade global do solo em questão. Essa poderia ser uma alternativa viável, contudo existem desvantagens da técnica como o uso de uma substância derivada do petróleo como a parafina. Silva *et al.* (2003), buscando alternativas mais sustentáveis, caracterizaram fisicamente a cera de abelha *Apis mellifera* em relação à parafina e testaram seu uso como impermeabilizante do exterior dos

torrões para determinação da densidade do solo. Os resultados do estudo foram satisfatórios nos dois quesitos: a cera e a parafina possuem tempo e ponto de fusão, densidade específica e tempo de solidificação semelhantes aos da parafina e é um substituto viável.

A tomografia computadorizada (MTC) está dentre as técnicas modernas classificadas como nucleares. Ela é muito utilizada em estudos que visam entender o efeito da compactação do solo, permitindo a determinação de diversos parâmetros físicos, bem como a identificação e localização exatas dos pontos de heterogeneidade. O por meio do seu uso o analista tem mais acurácia para delimitar as zonas do gradiente de densidade e umidade por exemplo (PIRES *et al.*, 2010). Além de muito precisa, é uma técnica ágil e não destrutiva, contudo possui um custo elevado de equipamentos e uma demanda de conhecimentos técnicos específicos (TIMM *et al.*, 2004).

Anel volumétrico (MAV) é dentre todos o mais utilizado e é tido como padrão. Esse método foi proposto pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA em 1997 e se caracteriza basicamente pelo uso de um cilindro metálico oco e de diâmetro interno e altura conhecidos. No espaço interno do cilindro fica contida a amostra de solo indeformado cujo volume é relacionado à massa do solo indeformado seca em estufa. O MAV foi o método escolhido por sua simplicidade e pelo fato de laboratório em que foram realizadas as análises já dispor dos materiais. No mais, dada a limitação de recursos no momento da realização das análises haveria de se considerar o custo da cera de abelha que, apesar de ser considerado um subproduto da apicultura oneraria ainda mais a condução das análises.

2.5.3 Porosidade (P) e retenção de umidade

A porosidade total pode ser entendida como uma porção do volume de solo indeformado que é ocupado por moléculas de água e ar que compõem a solução e a atmosfera do solo respectivamente (FREITAS *et al.*, 1994). São classificados como microporos, também denominados capilares, são aqueles com diâmetro menor que 0,05 mm. Eles basicamente são responsáveis pela capacidade de retenção de umidade por capilaridade. Os macroporos, são aqueles com diâmetro maior que 0,05 mm pelos quais ocorre a percolação de água pelo perfil do solo durante o encharcamento e circulação de ar que permite as trocas gasosas entre os organismos vivos presentes, inclusive, a porção radicular das plantas (BRADY *et al.*, 2009).

A importância do atributo porosidade atrelada também ao quesito resistência à penetração, influenciando diretamente a ramificação e desenvolvimento das raízes das plantas e, conseqüentemente, na capacidade de captação de água e nutrientes (BARBOSA, 2020). A Ds

é um grande indicativo da porosidade, ou seja, quanto mais denso for o solo pior será sua estruturação e menor a sua porosidade e, de um modo geral, configurações como essas são tidas como limitantes para o desenvolvimento das culturas (KIEHL, 1979).

O volume de macro e microporos possui forte efeito na produtividade dos cultivos. No Semiárido nordestino, mais especificamente no interior do estado da Bahia, Lima *et al.* (2021) avaliaram a produtividade de solos de propriedades familiares submetidos a diferentes manejos e caracterizaram os atributos físicos, dentre eles a porosidade. Os resultados observados no estudo foram um elevado grau de compactação e baixo volume de poros, indicando a ocorrência de perdas de produtividade por parte dos agricultores locais. Collares *et al.* (2006), determinando as propriedades físicas e o intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Vermelho distrófico arênico, também observaram uma diferença significativa estatisticamente, a um nível de significância de 5%, em média de 700 kg.ha⁻¹ de produtividade entre áreas compactadas que apresentavam um menor volume de poros e áreas sem compactação, ambas de plantio direto, para o cultivo de feijão. Ainda na mesma linha de pensamento, avaliando os efeitos da compactação sobre um Latossolo Vermelho textura média, Freddi *et al.* (2007) observaram um decréscimo da produtividade da cultura de milho à medida que a porosidade era reduzida e aumentada a resistência à penetração.

Foi adotada a metodologia do manual da EMBRAPA (1997) para determinação a porosidade total do solo, macro e microporosidade, sendo a obtenção da microporosidade, por meio do método da mesa de tensão, também descrito no mesmo manual e mais detalhadamente apresentado no material e métodos desse trabalho.

Diversos outros trabalhos de suma relevância para o tema também utilizaram a mesma metodologia. Sales *et al.* (2010) avaliaram as alterações estruturais de um neossolo quartzarênico em função de diferentes usos e manejos, percebendo sensibilidade do atributo macroporosidade para com os diferentes usos e sua relação diretamente proporcional a outros atributos físicos do solo como a condutividade hidráulica saturada.

Lima *et al.* (2009), por sua vez, estudando correlações lineares e espaciais dos atributos da planta e do solo, identificou a microporosidade como o melhor atributo avaliador da qualidade física, sendo representativo para balizar a produção de forragem de milho. Nos resultados do trabalho a massa fresca de forragem produzida por m² decrescia na medida que decrescia a microporosidade. Evidentemente, como mencionado nos parágrafos anteriores, a microporosidade está relacionada a uma maior capacidade de retenção de umidade, fator que em muito incrementa determinadamente o alcance da produção.

A retenção de umidade também está muito relacionada à textura e ao manejo do solo.

Carvalho *et al.* (1999) denotaram não só a relevância do manejo como o uso do plantio direto no incremento da retenção de umidade como também registraram que em camadas inferiores, onde havia um maior teor de argila, havia também uma maior predominância e microporos e, desse modo, uma maior capacidade do solo de reter umidade.

2.5.3 Condutividade hidráulica (K_s) e infiltração

Por uma abordagem conceitual, a condutividade hidráulica saturada do solo (K_s) pode ser entendida como o fluxo de massa de água através do perfil quando a componente gravitacional do potencial hídrico supera a componente matricial. Num viés prático, ela é a velocidade com que a água percola o perfil de solo (EMBRAPA, 1979). Ela é tida como uma das propriedades de maior peso quando se considera o movimento de água e solutos. Seu ponto máximo é atingido quando o solo se encontra saturado (MESQUITA *et al.*, 2004).

Em meados de 1856, Henry Darcy estudou o movimento da água em colunas de areia homogênea e concluiu que a vazão, unidade de volume por um determinado tempo, é diretamente influenciada pelo tamanho da área da seção transversal, pela diferença de carga piezométrica através de um filtro e sendo inversamente proporcional ao comprimento desse filtro. O fruto desse estudo foi uma equação que possibilitou a quantificação do movimento da água através de meios porosos saturados (MESQUITA *et al.*, 2001). Essa equação posteriormente passou a se chamar Lei de Darcy e está ilustrada a seguir na equação (1):

$$Q = K \cdot A \frac{(h_1 - h_2)}{L} \quad (1)$$

Em que: K = constante de proporcionalidade; A = área da seção transversal; h_1 = altura 1; h_2 = altura 2; L = comprimento do filtro.

Os trabalhos de Darcy foram uma imensa contribuição à comunidade científica. Desde muito tempo diversos estudos e técnicas se tornaram possíveis graças à sua participação nesses campos de estudo, e com a física do solo não é diferente. Diversas metodologias de campo e laboratório que visam determinar a taxa de infiltração de água no solo baseiam-se em seus princípios.

O método escolhido para a determinação da condutividade hidráulica neste trabalho é

uma adaptação do “permeâmetro de carga constante” proposto pela EMBRAPA (1997) que, por sua vez, também é uma adaptação dos princípios que regem a equação de Darcy. Ele é descrito em mais detalhes no material e métodos deste trabalho. Basicamente, conforme descrito do manual, a medida quantitativa da condutividade hidráulica é obtida através da aplicação da equação de Darcy após cerca de 7 a 8 horas de andamento do teste ou quando os valores, volumes de água coletados, atingirem a estabilidade.

Devido ao fato de informar sobre a capacidade de condução de água, solutos e outras substâncias químicas, a K_s deve ser corretamente determinada. Trata-se de um atributo de peso nas decisões do uso dos recursos solos e água, como o dimensionamento de sistemas de irrigação por exemplo. Isso porque a K_s está diretamente associada ao processo de infiltração da água, sendo indicador do potencial perda de solo e fertilizantes por erosão, lixiviação e do movimento de outras partículas sólidas para camadas mais profundas do perfil (MESQUITA *et al.*, (2004).

Dentre os fatores que podem influenciar a K_s está o grau de compactação, pois altera toda a dinâmica de água, solutos e aeração do sistema solo (LIBARDI *et al.*, 1982; LANDINA *et al.*, 1984). Trabalhos defendem o uso da K_s atrelada à D_s como indicativos do grau de compactação. O que é pertinente, pois um solo adensado cuja estrutura está deformada apresenta uma diminuição da sua porosidade, principalmente a macroporosidade, responsável pela aeração e principal canal de condução de água quando o solo se encontra saturado (SOUZA *et al.*, 2020). De Araújo Pedron *et al.* (2011), verificando o comportamento da K_s e a capacidade de retenção de água em perfis de Neossolos Litólicos e Neossolos Regolíticos derivados de arenito no Rio Grande do Sul, observaram uma diminuição do atributo K_s em amostras com elevada densidade e baixa macroporosidade. O resultado em seu trabalho foi que os menores valores de K_s estão associados aos valores mais elevados de densidade e os mais baixos de macroporosidade, o que evidencia que há uma correlação clara de diminuição da K_s à medida que o solo se torna mais compactado. No trabalho de Mesquita *et al.* (2004) também é pontuado que o próprio trânsito de animais, veículos e maquinário agrícola contribuem para o aumento da compactação e conseqüente diminuição da K_s .

A grande preocupação que reside no fato de a K_s ser afetada é, além da dificuldade de a água adentrar as camadas mais inferiores e das raízes terem dificuldade de penetrá-lo, a propensão à erosão que esse mesmo solo irá apresentar. Mesquita *et al.* (2004) mencionam que a K_s , por estar relacionada à intensidade do fluxo de água, tem forte relação com a dinâmica dos fluidos e com a própria capacidade de infiltração. Logo, uma K_s baixa pode ser um indício da formação mais rápida do escoamento superficial sobre o solo e ocorrência de erosão. Sales

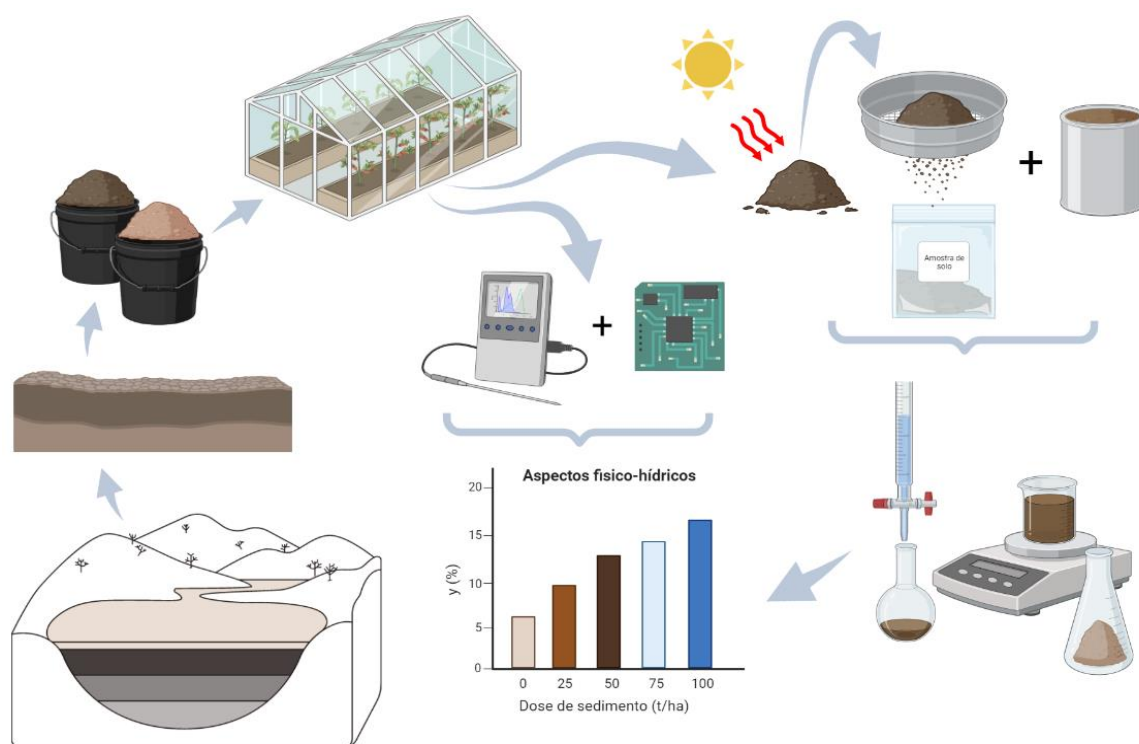
et al. (1999) ao estimar a velocidade de infiltração básica (VIB), avaliando sua associação com outras propriedades físicas de um Latossolo Roxo e um Podzólico Vermelho-Amarelo, concluíram que a K_s e a D_s se mostram adequadas para se estimar a VIB dos solos.

Quanto à metodologia escolhida para se determinar a VIB nos testes de infiltração foi a dos “anéis concêntricos”. Um método antigo e eficiente amplamente utilizado no mundo e preferido dentre muitos por seu custo relativamente baixo e por sua simplicidade (NIYAZI *et al.*, 2022). Burgy *et al.* (1956) realizou um dos trabalhos pioneiros no tema quando testou o uso de um único anel em comparação com os dois anéis concêntricos, não encontrando diferença significativa entre os resultados das técnicas para as condições do experimento. No entanto, sabe-se que o uso de dois anéis é preferível e recomendado em vez de se usar apenas um por conferir maior acurácia às medições. Simões *et al.* (2005) concluem em seu trabalho que é possível estimar a VIB utilizando apenas um único anel, mas seria necessária a aplicação de um fator de correção a depender do tipo de solo. Mitigando erros por diminuir a dispersão lateral de água durante a infiltração. Usualmente as dimensões dos anéis concêntricos são 20 e 40 cm de diâmetro e estes são enterrados a uma camada significativa de 15 cm (ZWIRTES *et al.*, 2013). Arend & Horton (1942), mensurando os impactos da intensidade e energia das chuvas na infiltração dos solos, utilizaram a profundidade de 4 polegadas, o que seria equivalente a 10,16 cm. Segundo trabalhos mais recentes como o de Jobbágy *et al.* (2023) essa profundidade pode variar a depender do nível de compactação da camada mais superficial sobre a qual os anéis são inseridos, sendo indicados anéis com uma das bordas cortantes para causar a menor deformação possível.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi dividido entre a coleta de solo na região de várzea do reservatório e nas proximidades, no transporte desse material para o Campus do Pici em Fortaleza – CE e montagem do ensaio em casa de vegetação. A coleta de dados seguiu então dois caminhos, conforme ilustra o fluxograma da Figura 3, os dados de umidade dos vasos e seu foram coletados ao longo do experimento e as amostras de solo-subtrato e sedimentos foram coletadas após o encerramento do experimento e enviadas para análise no laboratório de física dos solos.

Figura 3 – Resumo esquemático do experimento

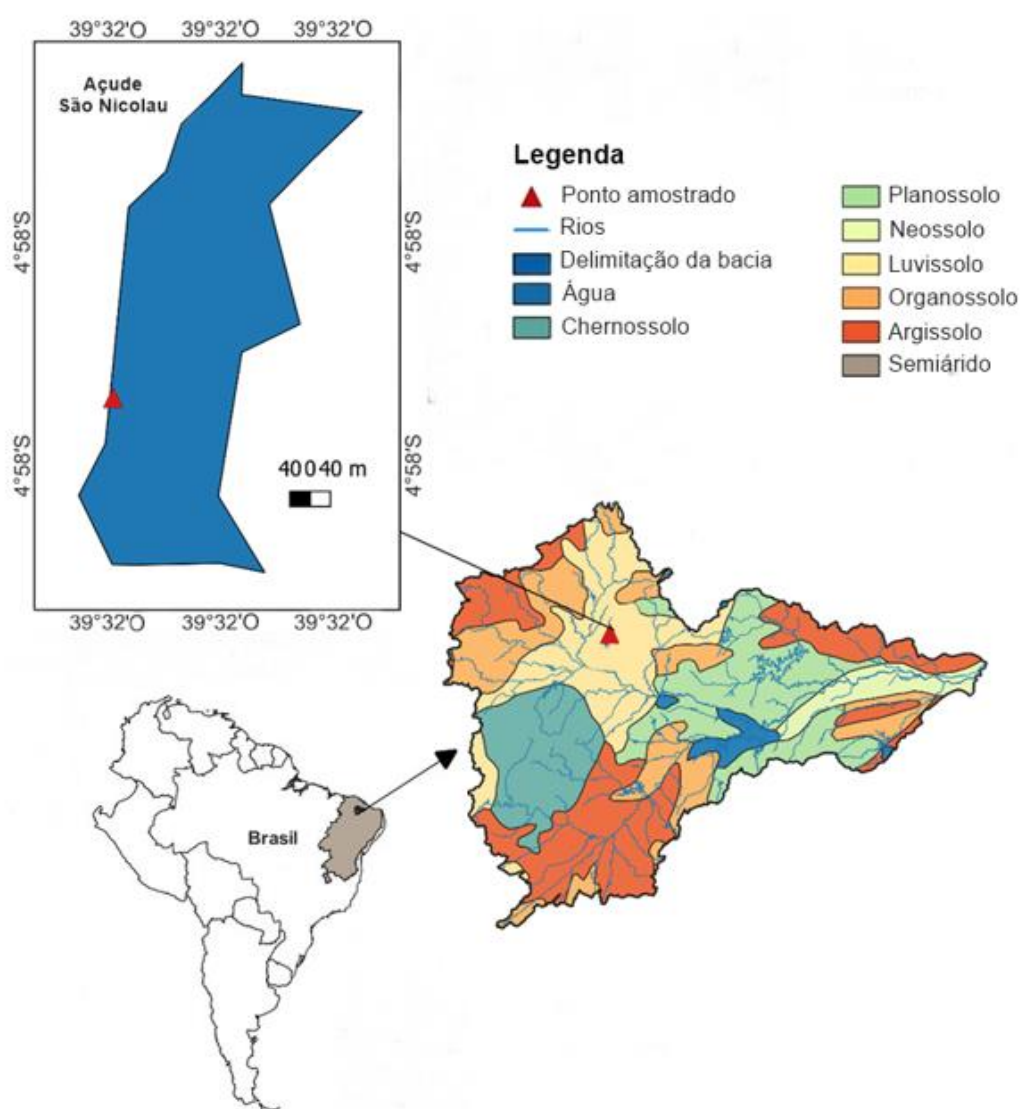


Fonte: elaborada pelo autor.

3.2 Área de estudo

O sedimento foi coletado no açude São Nicolau, que possui 890.000m³ de capacidade de armazenamento de água, aproximadamente 36,10 km² de área de drenagem e está localizado no município de Madalena - CE, região compreendida pela Bacia do Banabuiú (Figura 4). Solo-substrato, neste trabalho, é a designação do solo retirado de de uma região próxima à bacia hidráulica, seco, destorroado, peneirado, homogeneizado e utilizado para preenchimento dos vasos. O material foi coletado na região da bacia hidrográfica, nas proximidades do reservatório, ou mais especificamente nas coordenadas: 5°01'09.2"S, 39°33'12.4"O.

Figura 4 - Área de pesquisa, local de coleta de sedimento e localização dos pontos de amostragem.



Fonte: elaborada pelo autor.

A coleta de solos e sedimentos ocorreu em janeiro de 2021. O sedimento foi coletado na zona de várzea do açude quando o reservatório se encontrava parcialmente seco. Por sua vez, o solo-substrato foi coletado do solo da região abrangida pela bacia hidrográfica em Madalena - CE, nas coordenadas: 5°01'09.2"S, 39°33'12.4"O, em uma área de solo exposto nas proximidades do reservatório. A amostragem do solo e sedimento foi precedida pela limpeza da superfície para remoção de serrapilheira, e o material foi coletado na camada de até 20 cm de profundidade.

3.3 Propriedades do solo-substrato e sedimento

O solo-substrato e o sedimento foram analisados para que se tornassem conhecidas suas características. O material coletado passou por análise laboratorial prévia e, segundo a classificação por meio do triângulo textural proposta por Lemos (1996) e da granulometria, pode-se afirmar que o solo da região possui textura de areia franca, ao passo que o sedimento possui textura franco-arenosa de acordo com os dados da Tabela 1.

Tabela 1 - Análise física do solo da região (solo-substrato) e sedimento utilizados.

	%			Densidade (g.cm ⁻³)		M.O (g.kg ⁻¹)
	Areia	Silte	Argila	Solo-substrato	Partículas	
Solo da região	73	21	5,5	1,67	2,62	8,46
Sedimento SN	68,6	22,6	8.8	1,17	2,54	15,41

*SN: abreviação do nome do reservatório São Nicolau.

3.4 Montagem e condução do experimento

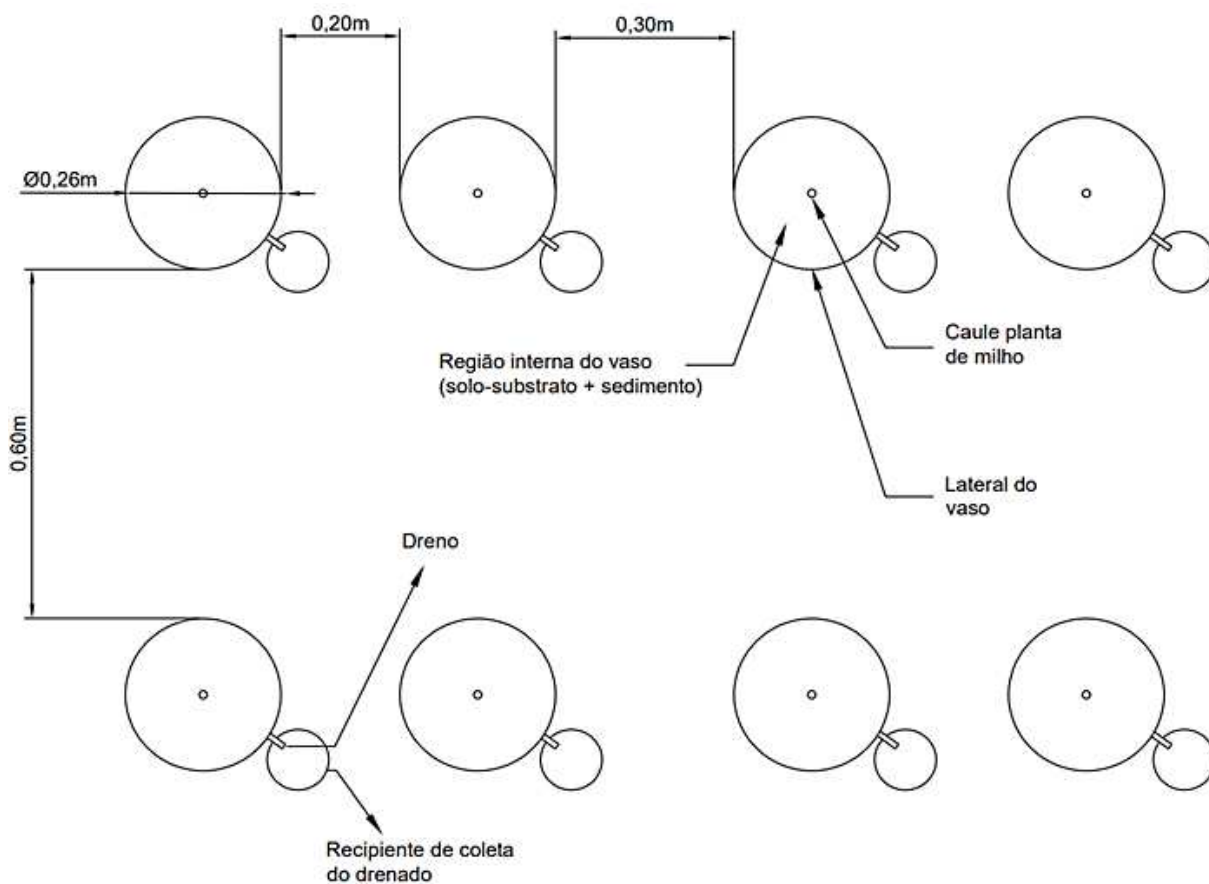
O material coletado no município de Madalena – CE foi transportado até Fortaleza, onde foi conduzido o experimento no período de Agosto a Novembro de 2021, em casa de vegetação localizada na Estação Agrometeorológica da Universidade Federal do Ceará (3° 44'45.3"S; 38°34'56.1"W).

Durante os meses de experimento, a umidade aparente dentro da estufa variou entre 30 e 72%, com uma média de 52%, e a temperatura teve média de 35,7 °C, variando de 29,1 a 43,9 °C. Um pluviômetro foi instalado dentro da casa de vegetação para medição da chuva, contudo não foi verificada precipitação durante o experimento.

O ensaio principal do qual derivou este experimento foi realizado com oitenta vasos,

mais especificamente dez tratamentos, quatro repetições e dois vasos por repetição. Os vasos possuíam drenos conectados a recipientes próximos para a coleta de drenado, utilizados no monitoramento da irrigação, e foram dispostos conforme mostra a Figura 5. Os drenos coletavam o volume de água e coloides que era devolvido a vaso na irrigação seguinte com o intuito de repor os nutrientes lixiviados para as plantas no vaso.

Figura 5 – Padrão de arranjo dos vasos no croqui.

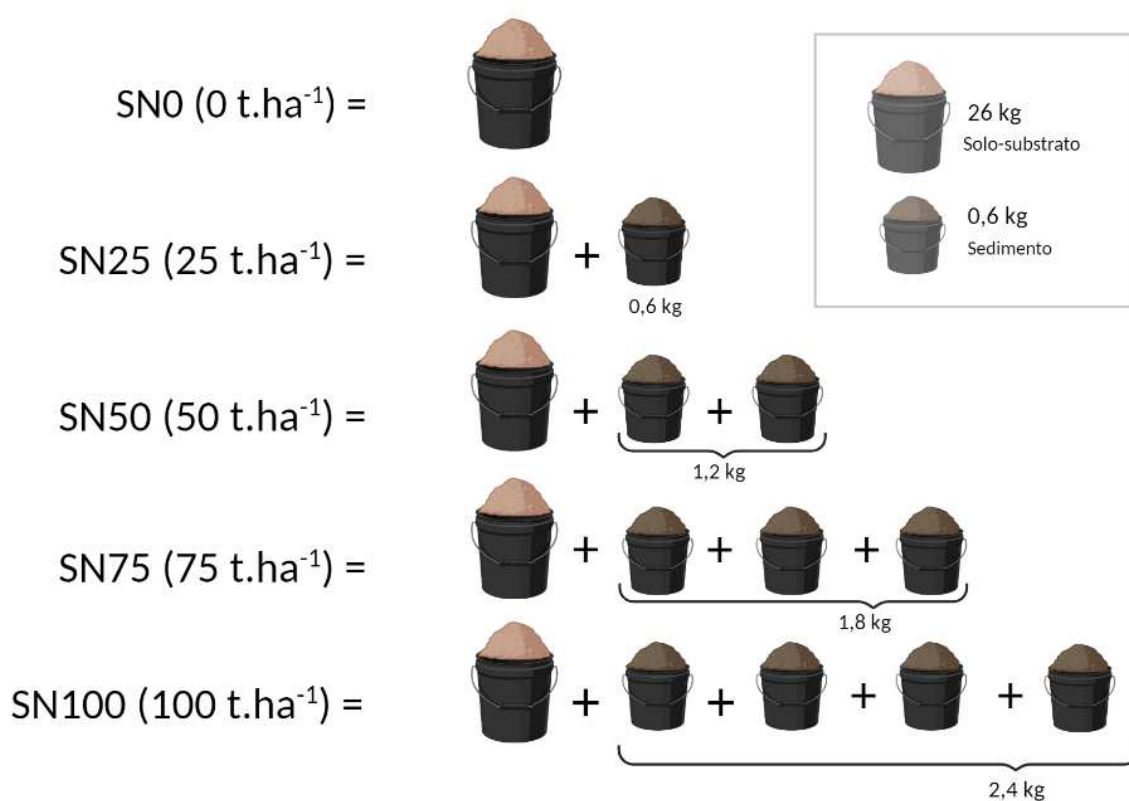


Fonte: elaborada pelo autor.

Com respeito ao número total de tratamentos, no experimento principal de Braga *et al.* (2023) foram analisados 10 tratamentos de dois diferentes reservatórios (submetido à publicação). O delineamento experimental utilizado, conforme consta no trabalho, foi inteiramente casualizado com arranjo fatorial 2: (solo da região com adição de sedimento do açude São Nicolau e solo da região com adição de sedimento do açude São Joaquim) x 4 (massas de sedimento de 0,6, 1,2, 1,8, 2,4 kg), além de dois tratamentos controles: o primeiro com o substrato contendo apenas o solo da região e um tratamento contendo solo da região + fertilizante químico (NPK) na quantidade de 100% da recomendação nutricional (RN) de 100 kg de nitrogênio por hectare, de acordo com Coelho (2008).

Neste trabalho, no entanto, que é uma abordagem do ponto de vista da física do solo de parte do experimento de Braga *et al.* (2023), foram utilizados apenas cinco dos tratamentos acima. Foi mantida a testemunha, contendo apenas solo-substrato (sem adição de sedimento) e cada tratamento foi formado por quatro repetições, sendo cada tratamento composto por uma diferente dose de sedimento de respectivamente: 0, 0,60, 1,20, 1.80 e 2.40 kg por vaso (submetido à publicação). Na Figura 6 é possível observar esses diferentes níveis de dosagem de sedimento oriundo do açude São Nicolau.

Figura 6 – Distribuição da dose de sedimento e solo-substrato por vaso utilizado em cada tratamento.



Fonte: elaborada pelo autor.

Os pesos foram escolhidos após observar a viabilidade financeira até uma quantidade de 100 t.ha⁻¹ de aplicação de sedimentos, com isso, chamamos de 100 a quantidade de sedimentos equivalente ao que seria o máximo recomendado considerando o limite viável da prática de reuso (BRAGA *et al.*, 2019). O termo SN100 corresponde a 100% dessa quantidade por vaso (2,4 kg), enquanto os termos 75, 50 e 25 são porcentagens desta dose máxima.

O sedimento foi então destorroado e peneirado, e adicionado seco aos vasos, sendo misturado ao solo-substrato manualmente, na camada superficial, alcançando em torno de até 10

cm de profundidade da coluna de sólidos contida no vaso. A Figura 7 é um registro do processo sendo realizado já nos vasos em casa de vegetação.

Figura 7 – Montagem do experimento e monitoramento nos estágios iniciais da cultura.



Fonte: Lima, 2022.

As plantas foram semeadas no dia 26 de julho de 2021, no espaçamento de 0,3 m entre plantas e 0,6 m entre fileiras de plantas. As sementes de milho (*Zea mays L.*), foram semeadas em baldes de plástico (20L). As plantas foram irrigadas em dias alternados até o solo-substrato atingir a capacidade de campo em cada irrigação. Após a suspensão da irrigação, aos 95 DAS, iniciou-se a segunda fase do registro de dados de umidade. Houve mais dois eventos de irrigação: aos 11 dias e aos 19 dias após o fim do ciclo da cultura.

3.5 Coleta e preparo das amostras

A coleta de todas as amostras foi feita entre os dias 24 e 25 de março de 2022 no local onde foi conduzido o experimento. Foram utilizadas uma série de ferramentas, dentre as quais pode-se citar, um amostrador tipo Uhland, uma faca de mesa, espátulas, baldes, pano para limpeza das ferramentas, bandejas, sacos plásticos, etiquetas e prancheta de anotações para condução da coleta.

Para as análises de densidade das partículas (D_p), foram coletadas cinco amostras compostas de solo-substrato para cada um dos tratamentos. As amostras foram coletadas com o uso de espátula diretamente dos vasos, depositadas em sacos e identificadas, levadas à casa de vegetação, secas à temperatura e umidade ambiente, sendo revolvidas periodicamente e peneiradas para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Foi usada uma peneira de 10 mesh (2 mm) e diâmetro do anel de 20 cm, conforme estabelecido pela EMBRAPA (1979). A sequência de figuras abaixo mostra etapas do processo.

Figura 8 - Retirada da camada superficial de 1 cm e das amostras compostas de solo-substrato depositadas em sacos plásticos.



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 9 - Amostras secando em casa de vegetação, detalhe da malha da peneira utilizada e do peneiramento.



Fonte: elaborada pelo autor.

Para a coleta de amostras indeformadas foram usados cilindros metálicos de espessura, peso, altura e diâmetro conhecidos. A Figura 10 mostra a preparação e registros de medidas. Foram adicionadas a cada cilindro ligas elásticas de látex N° 18 e tecido do tipo “morim” recortado em formato circular.

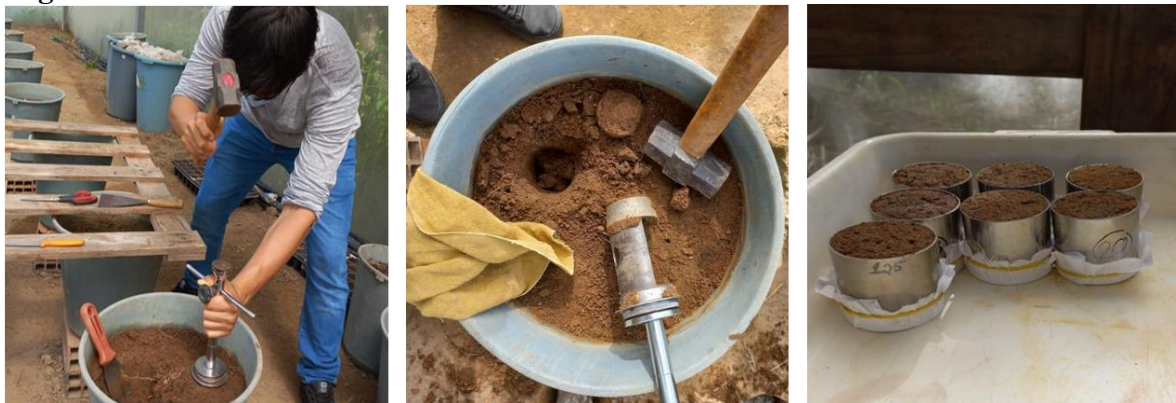
Figura 10 – Preparo e mensuração dos cilindros metálicos para coleta de amostras indeformadas de solo-substrato.



Fonte: elaborada pelo autor.

As amostras indeformadas de solo-substrato foram usadas para a realização das análises de densidade global (D_s), porosidade e condutividade hidráulica saturada (K_s). Ao todo foram coletadas 25 amostras dos vasos na casa de vegetação com a utilização de um amostrador tipo Uhland conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Coleta das amostras indeformadas sendo realizada.



Fonte: elaborada pelo autor.

3.6 Realização dos testes de infiltração

Na determinação da VIB para os tratamentos, as laterais dos vasos que continham o solo-substrato desempenharam a função do cilindro externo e um cano de PVC serrado de DN100 e diâmetro interno de 98 mm foi utilizado juntamente com uma régua de PVC enterrado a uma profundidade de cerca de uma polegada (2,54 cm) no solo-substrato.

Em seguida iniciou-se o procedimento com a fixação e o enchimento dos anéis externo e interno de cada tratamento, sendo o anel interno enchido até 50 mm. Foi marcado o volume infiltrado por meio da leitura da marcação na régua, anotando-o em uma tabela impressa em papel e fixada a uma prancheta, reabastecendo o volume dos cilindros quando necessário.

Os intervalos de coleta seguram os seguintes intervalos em minutos: uma repetição de um minuto, duas de dois minutos, duas de cinco minutos, duas de dez minutos e pelo menos três repetições de 15 minutos. Em uma coluna era preenchido o tempo acumulado e em outra registrada a hora da medição, ao passo que a leitura em mm na régua e a lâmina reposta em mm eram registradas em outras duas colunas. Após os registros, deu-se o início do preenchimento das outras colunas: diferença entre a medição anterior e a atual, infiltração acumulada (soma das diferenças) e, por fim, a velocidade ou taxa de infiltração VIB. A Figura 12 se trata dos momentos iniciais do teste de infiltração, mais especificamente, do ajuste dos cronômetros e divisão das funções.

3.7 Análises laboratoriais

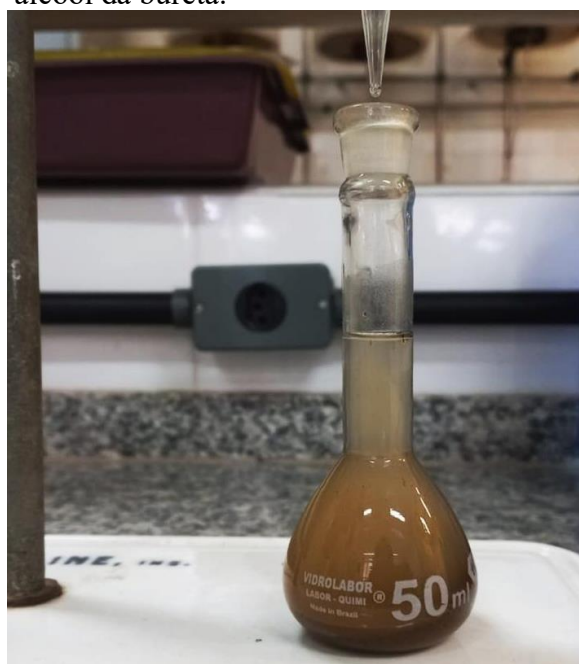
As análises realizadas em laboratório foram concernentes aos parâmetros físico-hídricos: densidade das partículas (D_p), densidade do solo-substrato (D_s), porosidade do solo, condutividade hidráulica saturada (K_s). Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal do Ceará, coordenado pelo Dr. Prof. Jaedson Cláudio Anunciato Mota e pertencente ao Departamento de Ciências do Solo do Centro de Ciências Agrárias (CCA) - UFC.

3.7.1 Determinação da densidade das partículas (D_p)

Seguindo a metodologia do balão volumétrico de Kiehl *et al.* (1979), foram adotadas três repetições para cada tratamento das quais foram pesados 20g que, depositados em recipientes metálicos de massa conhecida, posteriormente foram submetidos à secagem em estufa a 105°C por 24 horas para obtenção da TFSE.

Após a secagem, cada amostra foi resfriada em dessecador, pesada e transferida para o interior de um balão volumétrico de 50 mL, sendo considerada no cálculo da D_p o valor da massa de solo-substrato seco em estufa. O volume interno do balão foi completado com álcool etílico hidratado 99,8° INPM, para tal utilizou-se uma bureta zerada, sendo o volume gasto de álcool registrado, conforme mostrado na Figura 13.

Figura 12 - Balão volumétrico zerado com álcool da bureta.



Fonte: elaborada pelo autor.

3.7.2 *Ensaio na mesa de tensão, secagem em estufa e pesagem das amostras*

Nos ensaios cuja finalidade seria determinar a densidade do solo-substrato e porosidade, foi adotada a metodologia da mesa de tensão do “Manual de análises físicas do solo” da EMBRAPA (1997).

As amostras foram submetidas a um umedecimento até atingirem a capacidade de campo (Cca) em bandejas por um período mínimo de 8 horas. Em seguida nas câmaras das mesas de tensão, as amostras saturadas foram acomodadas em placas de cerâmica porosas sob uma tensão de 0,6 mca até atingirem o equilíbrio, isto é, o ponto de máxima saturação dos microporos. Sempre com a verificação da ocorrência da quebra da coluna d’água.

As Figuras 14 e 15 são registros do procedimento executado. Na Figura 14 está a bateria de mesas de tensão fixada à parede do laboratório e o detalhe da mesa de tenção, sendo possível perceber a posição da placa porosa e das amostras colocadas cuidadosamente e em conjunto sobre a mesa. A Figura 15 por fim se trata da pesagem de cada amostra úmida após sair da mesa de tensão e após finalizada a secagem em estufa. A diferença de massa da amostra nos dois momentos corresponde à umidade da mesma antes da secagem.

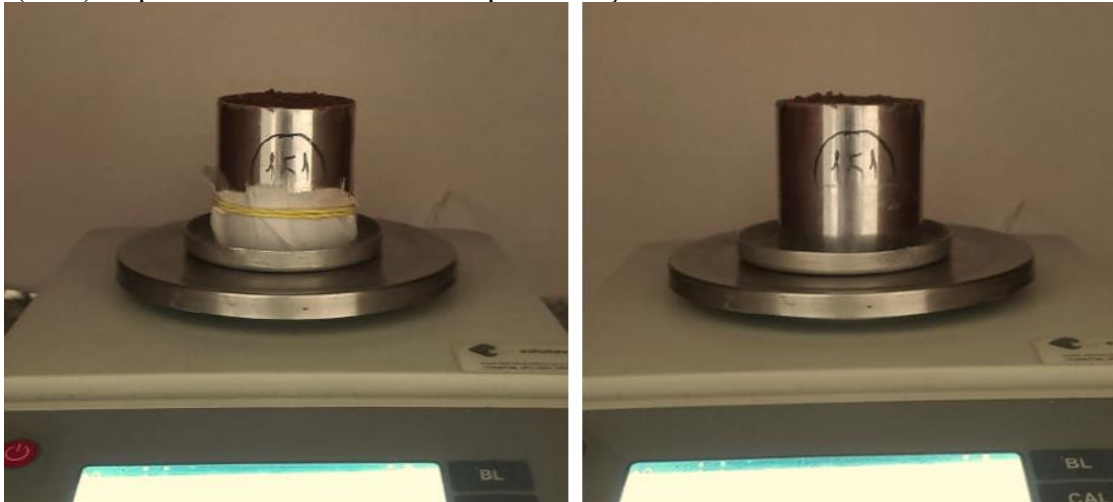
Figura 13 - Mesas de tensão e suportes e detalhe das amostras no ensaio.



Fonte: elaborada pelo autor.

Uma vez atingido o ponto de equilíbrio, a amostra foi pesada em balança de precisão, sendo obtida a massa de solo-substrato úmido (Msu).

Figura 14 - Pesagem da amostra indeformada quando atingiu a Capacidade de campo (CCa) e após ter sido seca em estufa par obtenção da massa do solo-substrato seca.



Fonte: elaborada pelo autor.

As amostras úmidas foram levadas à estufa a 105°C por 24h para obtenção da massa de solo-substrato seco (M_{ss}) que possibilitou serem determinadas a densidade, bem como porosidade total e microporosidade do “solo” em questão. Para tal, foram retiradas a liga e o pano por motivos de segurança devido à alta temperatura e baixa umidade da estufa, sendo suas respectivas massas descontadas de cada amostra individualmente.

3.7.3 *Determinação da densidade do solo-substrato (D_s)*

A metodologia adotada neste trabalho foi a MAV da EMBRAPA por sua simplicidade e precisão. O valor da Massa de solo-substrato seco (M_{ss}) foi dividido pelo volume total interno do cilindro (V_t) que continha a amostra indeformada. Desse modo foi determinada a densidade do solo (D_s) conforme demonstra a equação (2):

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_t} \quad (2)$$

Em que: D_s = densidade do solo-substrato ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); M_{ss} = massa do solo-substrato seco (g); V_t = volume total do cilindro (cm^3).

3.7.4 Determinação da porosidade (P)

A porosidade do solo-substrato foi determinada nos parâmetros porosidade total (P) e macroporosidade ou porosidade de aeração (α_{ar}), também denominada porosidade de aeração. No cálculo da porosidade total foram consideradas a densidade das partículas (Dp) e a massa do solo-substrato seco (Mss) para a obtenção do volume de solo-substrato (Vs) e o volume total interno do cilindro (Vt) conforme as equações (3) e (4):

$$V_s = \frac{M_{ss}}{D_p} \quad (3)$$

Em que: Vs = volume do solo-substrato (cm³); Mss = massa do solo-substrato seco (g); Dp = densidade das partículas (g.cm⁻³);

De posse do dado “volume do solo-substrato” prosseguiu-se da seguinte forma:

$$P = \frac{(V_t - V_s)}{V_s} \cdot 100 \quad (4)$$

Em que: Vs = volume do solo-substrato (cm³); Vt = volume total do cilindro (cm³); P: porosidade total (%).

Sabe-se que a macroporosidade (α) equivale à porosidade total (P) quando subtraída a microporosidade. O volume de água (Vw) retido nos microporos é calculado pela diferença de massa entre o solo-substrato úmido (Msu) e solo-substrato seco (Mss). Dado que a densidade da água é de 1 g.cm⁻³, o volume de água (Vw) foi então considerado no cálculo para a obtenção da microporosidade. Conforme é demonstrado nas equações (5) e (6):

$$M_{su} - M_{ss} = M_w = V_w \quad (5)$$

Em que: Msu = massa do solo-substrato úmido (g); Mss = massa do solo-substrato seco (g); Mw = massa de água (g); Vw = volume da água retida nos microporos (cm³);

$$\alpha = P - \left(\frac{V_w}{V_t} \cdot 100 \right) \quad (6)$$

Em que: V_w = volume da água retida nos microporos (cm^3); V_t = volume total do cilindro (cm^3); P = porosidade total (%); α_{ar} = porosidade de aeração.

3.7.5 Determinação da condutividade hidráulica saturada (K_s)

A condutividade hidráulica saturada (K_s) foi realizada em laboratório, utilizando-se três repetições (amostras indeformadas) para cada tratamento. A cada cilindro metálico foi adicionado outro acima de igual diâmetro e espessura, fixado com fita adesiva para conter a carga hidráulica aplicada.

Para ocorrer a saturação do substrato, cada amostra foi inicialmente depositada em uma bandeja contendo água cujo nível era correspondente a dois terços da altura do cilindro metálico. As análises foram feitas em baterias de 6 repetições com o uso de um permeâmetro de carga constante. Abaixo do suporte do permeâmetro, o percolado foi coletado em béquers de 250 mL em intervalos constantes de 1 hora, sendo o valor adotado a média dos três últimos valores registrados para cada amostra.

As Figuras 16,17 e 18 ilustram as etapas de junção dos cilindros metálicos, saturação das amostras em uma bandeja com água e posterior realização do teste de condutividade hidráulica em uma bancada adaptada do laboratório de física dos solos.

Figura 15 – Destaque para amostra com cilindro de carga fixado com fita adesiva e amostras na etapa de saturação.



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 16 - Amostra sob observação e detalhe do cilindro de carga sobre a amostra em contato com recipiente de recarga hidráulica.



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 17 - Bateria de cinco amostras sob observação.



Fonte: elaborada pelo autor.

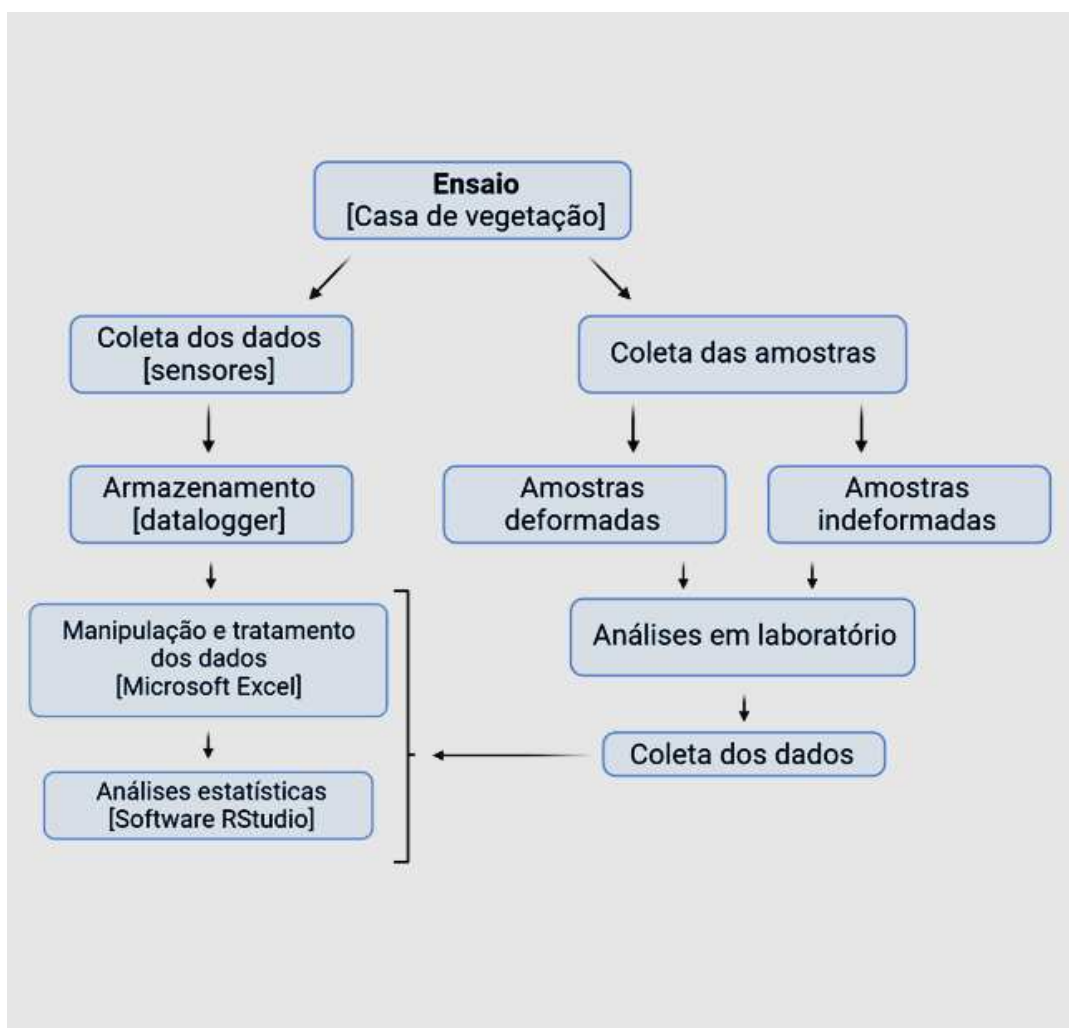
Terminadas as medições, foi realizado o cálculo da condutividade hidráulica saturada para cada amostra. O modelo de equação utilizado foi proposto pela EMBRAPA (1979) e segue abaixo na equação (7):

$$K_s = \frac{Q \cdot L}{A \cdot h \cdot t} \quad (7)$$

Em que: K_s = condutividade hidráulica saturada ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); Q = volume do percolado (cm^3); L = altura do bloco do solo-substrato (cm); h = altura do bloco do solo-substrato e coluna de água, em cm; A = área do cilindro, em (cm^2); t = tempo de percolação (h).

Uma vez de posse de todos os dados relativos ao experimento, foram utilizados os softwares Microsoft Excel para organização e manipulação de dados e o RStudio para a realização das análises estatísticas. A Figura 19 apresenta um esquema do fluxo de dados ao longo da realização desse trabalho.

Figura 18 – Fluxograma da coleta de dados.



Fonte: elaborada pelo autor.

3.7.6 Instalação dos sensores de umidade e datalogger

Foram instalados sensores de umidade para se observar o comportamento da água no solo durante o período de irrigação, bem como para a obtenção da curva de depleção da umidade. Os sensores realizaram a medição da umidade, registrada na unidade de milivolt (mV) em intervalos de dez minutos. Os sensores foram instalados no experimento aos 47 dias após a semeadura, sendo as medições realizadas do dia 11/09/2021 até 10/02/2022. A Figura 20 mostra os sensores de umidade instalados nos vasos e o monitoramento dos mesmos e das plantas de milho.

Figura 19 - Sensores de umidade instalados nos vasos do experimento.



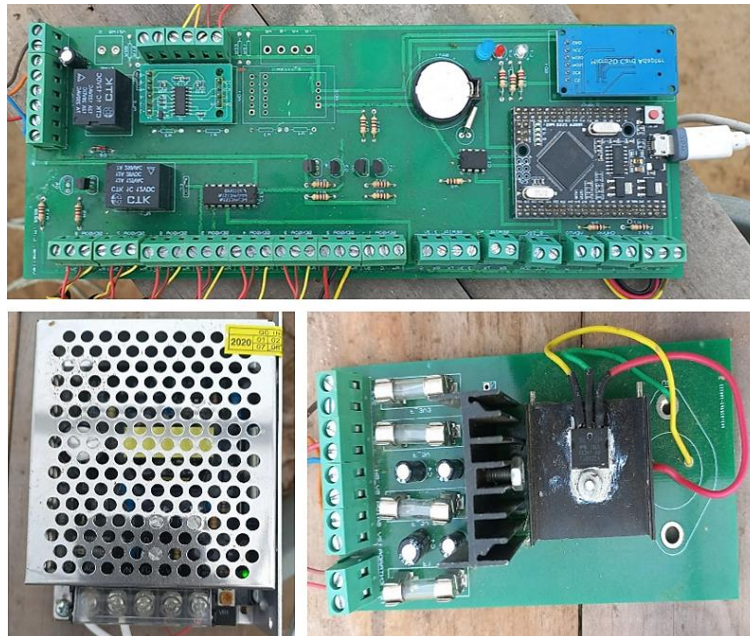
Fonte: Lima, 2022

Os equipamentos fixos para detecção da variação de umidade foram desenvolvidos durante o experimento, estes sensores monitoram a umidade continuamente e apresenta dispositivo de armazenamento (*datalogger*). A fabricação foi realizada em cooperação com o professor Lucas Melo Vellame, no âmbito de sua bolsa de pós-doutorado no Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola – PPGEA/UFC.

Alguns dos componentes do *datalogger* estão mostrados na Figura 21, dentre eles, é possível observar a placa de fusíveis, a placa de conexão dos sensores com o Arduino e a fonte

de 12 V utilizada (ARAÚJO *et al.*, 2021). O histórico de medição foi coletado periodicamente por meio da interface do aplicativo PNCF, também desenvolvido pelo mesmo grupo de pesquisa.

Figura 20 – Componentes do *datalogger* do sistema de monitoramento da umidade do solo



Fonte: Lima, 2022

Figura 21 – Instalação do conjunto de componentes do datalogger e detalhe para o sensor de umidade inserido no vaso.



Fonte: Lima, 2022

Ao fim do experimento, a irrigação foi suspensa para acelerar a senescência das plantas. Sendo assim, depois da obtenção da curva de depleção de umidade, o conjunto de sensores e *datalogger* foram recolhidos, e os dados armazenados em cartões de memória conectados ao arduino foram transferidos para o computador, processados e tratados.

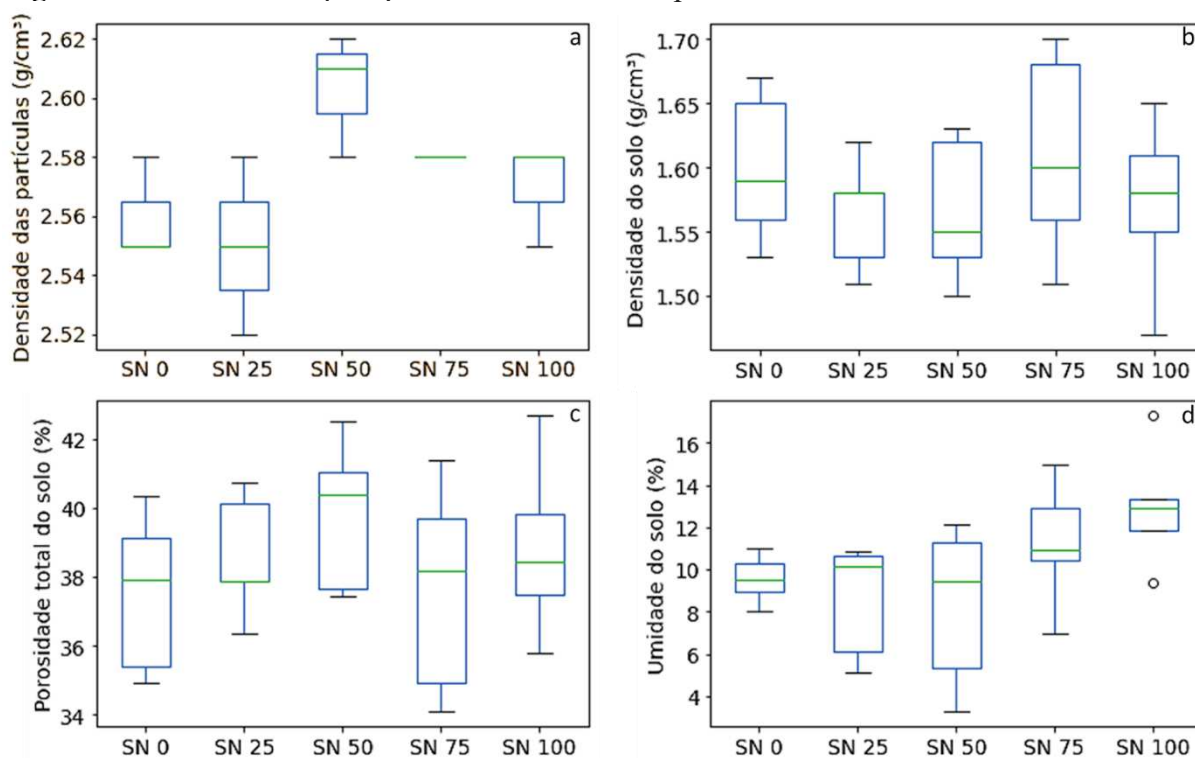
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação do sedimento na resposta dos parâmetros físico-hídricos

Os resultados obtidos, tanto os laboratoriais quanto aqueles dos registros coletados em casa de vegetação, mostram que a adição de sedimento pode contribuir para a melhoria dos atributos físico-hídricos do solo.

Apesar da dificuldade de se encontrar evidências claras e valores com diferença estatística significativa da intensidade das modificações, dada a limitação de recursos para a realização do experimento, ainda foi possível obter resultados promissores. Esses resultados estão ilustrados nos gráficos *boxplot* da Figura 23 e na Tabela 2 e se seguem descritos em tópicos.

Figura 22 - Gráficos *boxplot* para os resultados dos parâmetros testados.



Fonte: Torres, 2021.

Tabela 2 - Resultados para os parâmetros físico-hídricos obtidos pela ANOVA com significância de 5%.

	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Média dos quadrados	F	Valor P
Densidade das partículas (Dp)					
Tratamentos	4	0,005356	0,0013390	3,033	0,0704*
Resíduos	10	0,004414	0,0004414		
Densidade do solo-substrato (Ds)					
Tratamentos	4	0,00842	0,002106	0,53	0.715*
Resíduos	20	0,07943	0,003971		
Porosidade total (Pt)					
Tratamentos	4	17,15	4,288	0,716	0.591*
Resíduos	20	119,80	5,990		
Microporosidade (Pw)					
Tratamentos	4	76.62	19.156	2.356	0.0885*
Resíduos	20	162.63	8.131		
Condutividade hidráulica saturada (Ks)					
Tratamentos	4	513,9	128,46	9,38	0.000106
Resíduos	10	66,3	6,63		

*Valor $P > 0,05$: não se rejeita a hipótese nula de que as médias são iguais.

Fonte: elaborada pelo autor.

Os resultados das análises para densidade das partículas não diferiram significativamente entre si após a realização da análise de variância para um $\alpha = 0.05$. Este resultado está demonstrado na tabela 2 pelo valor P maior que 0,05. Desse modo, foi utilizada em cálculos posteriores a média da densidade das partículas de cada respectivo tratamento. O uso das médias de cada tratamento se deve à busca de uma maior acurácia dos resultados, a saber, na determinação de parâmetros como a porosidade do solo-substrato. O valor médio para a densidade das partículas foi de $2,57 \text{ g.cm}^{-3}$.

A densidade das partículas é uma característica relevante, pois influencia diretamente a textura do solo (MANTOVANI, 1987). Em estudo realizado por Dantas *et al.* (2012), os autores avaliaram a densidade das partículas do solo em perímetro irrigado no Ceará, e observaram que não houve diferença significativa de densidade com diferentes cultivos/manejos (banana irrigada, milho irrigado e vegetações naturais próximas) em diferentes profundidades do solo, obtendo densidade média de aproximadamente $2,6 \text{ g.cm}^{-3}$, corroborando com obtido na presente pesquisa. Em pesquisa realizada no estado do Maranhão,

Duarte *et al.* (2020) analisaram um neossolo quartzarênico, tipo de solo que também apresenta elevada expressão da fração areia em sua composição, e observaram que a densidade das partículas variou de 2,2 a 2,9 g.cm⁻³, sendo a média em torno de 2,7 g.cm⁻³, concordando com os resultados obtidos neste trabalho.

Quanto à densidade global do solo substrato também não foram observadas diferenças significativas para um $\alpha = 0.05$, como pode ser visto na Tabela 3 e no gráfico b da Figura 23. Os resultados do ensaio não apresentaram um padrão de variação da densidade do solo-substrato em função das diferentes proporções de sedimentos adicionadas. Esse resultado está expresso na Tabela 3.

Uma possível justificativa para essa baixa variação nas amostras, bem como na densidade das partículas, está ligada à semelhança textural entre o sedimento do açude São Nicolau e o solo do local de coleta conforme demonstrado por Nunes *et al.* (2014). Esses resultados destoam daquele obtido por Carvalho *et al.* (2020), que concluiu que os sedimentos assoreados da área em torno do local de estudo usado apresentam altas frações de argila.

Tabela 3 - Valores médios de densidade do solo-substrato para cada tratamento.

Tratamentos	Quantidade de sedimento aplicada (t.ha⁻¹)	Densidade média do solo-substrato (g.cm⁻³)
T0	0	1.60
T5	25	1.56
T6	50	1.57
T7	75	1.61
T8	100	1.57

Fonte: elaborada pelo autor.

No parâmetro porosidade do solo-substrato, foram obtidos valores médios para cada tratamento para porosidade total e macroporosidade, expressos na Tabela 4 e na Figura 23, gráficos “c” e “d”, com uma variação de 25 a pouco mais de 31%. Em termos gerais, os resultados indicam uma boa capacidade de aeração do solo-substrato dado o volume de poros livres de água na capacidade de campo (Cca). Este resultado é positivo à vista de substratos cultiváveis, pois é vital para a maioria das culturas haver pelo menos 10% do volume do solo ocupado por ar, para que assim ocorram as trocas gasosas entre as raízes e o meio externo (BARBOSA, 2020).

Ainda é possível observar que o tratamento SN100 apresentou um dos maiores valores para porosidade total e um dos menores valores para porosidade de aeração, o que indica uma elevada microporosidade. Isso se deve provavelmente à maior presença de partículas finas. Esse maior percentual de microporos é um indicativo muito forte de que as propriedades físico-

hídricas do solo-substrato, principalmente no tocante à capacidade de retenção de umidade, foram alteradas devido à adição de sedimento. O percentual de microporos está tão intimamente ligado com a umidade do solo que é empregado, segundo alguns métodos descritos, para representar a capacidade de campo (DE OLIVEIRA, *et al.*, 1971).

Tabela 4 - Valores médios de porosidade para cada tratamento.

Tratamentos	Quantidade de sedimento aplicada (t.ha ⁻¹)	α_T (%)	α_{ar} (%)
Solo-substrato	0	37.55	28.00
SN25	25	38.59	30.01
SN50	50	39.80	31.52
SN75	75	37.66	26.42
SN100	100	38.84	25.89

Fonte: elaborada pelo autor.

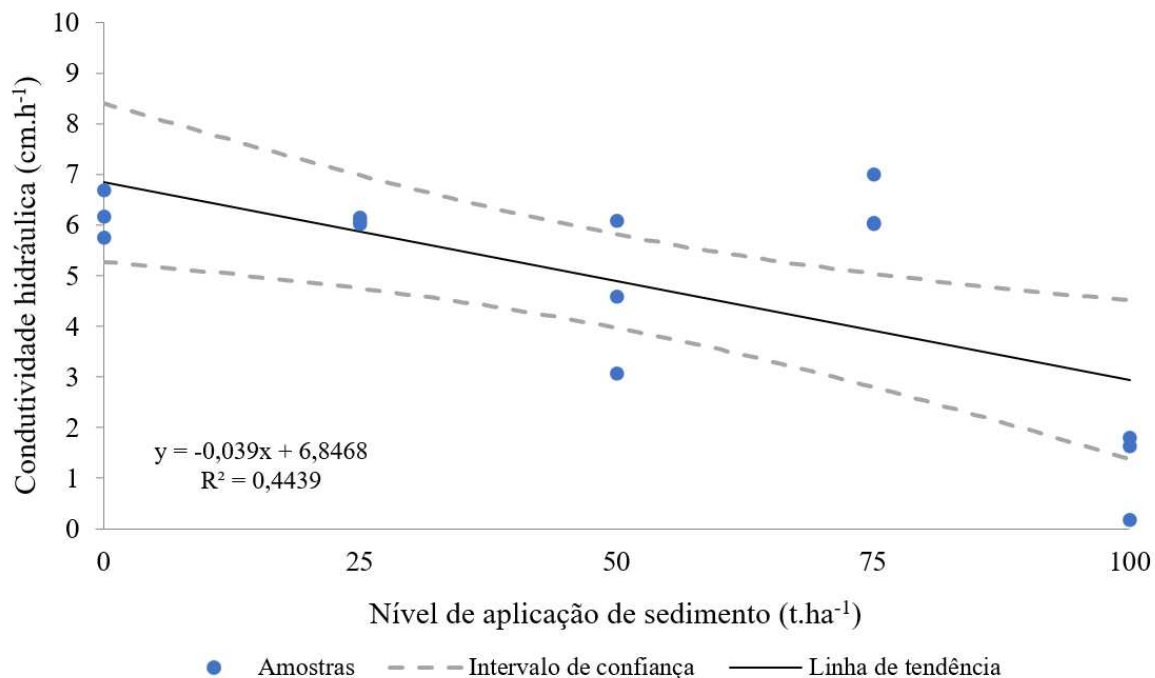
Ainda sobre a capacidade de retenção de umidade, a variação entre o percentual de volume total ocupado por água para as diferentes amostras ocorreu em função do aumento da dose de sedimento. Nas amostras que não continham sedimento (SN 0) foram observados os menores valores de umidade na C_{ca} , variando entre 8% e 10%. Em contrapartida, no tratamento com a máxima dose de sedimento (SN 100) foi observada a maior umidade na C_{ca} , variando de 10% a mais de 15%, o que indica uma maior capacidade de comportar umidade nos microporos e, portanto, uma maior capacidade de retenção de umidade observada no tratamento (GUERRINI, 2004). Solos com maior teor de partículas finas / matéria orgânica apresentam melhor capacidade de retenção de umidade ao longo do tempo, principalmente se aliada a práticas conservacionistas (BORGES, 2014).

A condutividade hidráulica saturada (K_s) variou significativamente entre os tratamentos, com uma K_s média variando em torno de 15 a 20 cm.h⁻¹ exceto o SN 100. O aumento da fração de sedimento atuou de modo a reduzir a condutividade hidráulica devido à quantidade de material fino adicionado nos vasos, implicando também na diminuição do percentual de macroporos (FUENTES, 2018). Desse modo, pôde-se constatar que a K_s tende a diminuir com a adição de sedimento, devido a sua maior fração de argila e silte quando comparado ao solo-substrato conforme ilustrado na Figura 24.

Marquesi *et al.* (2010) avaliaram diferentes tipos de solo e observaram que a distribuição granulométrica influencia diretamente na porosidade e K_s , onde solos com maior teor de argila apresentaram menor K_s e porosidade, ou seja, a água infiltra com maior dificuldade. Esse comportamento foi esperado, apesar do tratamento SN75 estar fora do intervalo de confiança (Figura 24), os outros tratamentos seguiram esse padrão. O tratamento

apresentou condutividade superior ao do tratamento controle, isso pode ser explicado pela possibilidade de as amostras terem sido alteradas durante sua extração e preparo, sofrendo compactação conforme Mesquita *et al.* (2004) demonstram em seu trabalho.

Figura 23 - Variação da condutividade hidráulica saturada (Ks) para os diferentes tratamentos e intervalo de confiança.



Fonte: elaborado pelo autor.

O teste estatístico mostrou que as médias de Ks diferem entre os tratamentos para um $\alpha = 0,05$ (Tabela 3), tendendo a diminuir conforme se aumenta a dose de sedimento.

A diminuição da Ks em função da maior presença de partículas finas também foi um resultado obtido por Dantas *et al.* (2012). Esse resultado pode ser muito benéfico para os sistemas de cultivo em solos arenosos que naturalmente possuem elevada Ks, diminuindo a velocidade de percolação e perdas de água durante a irrigação.

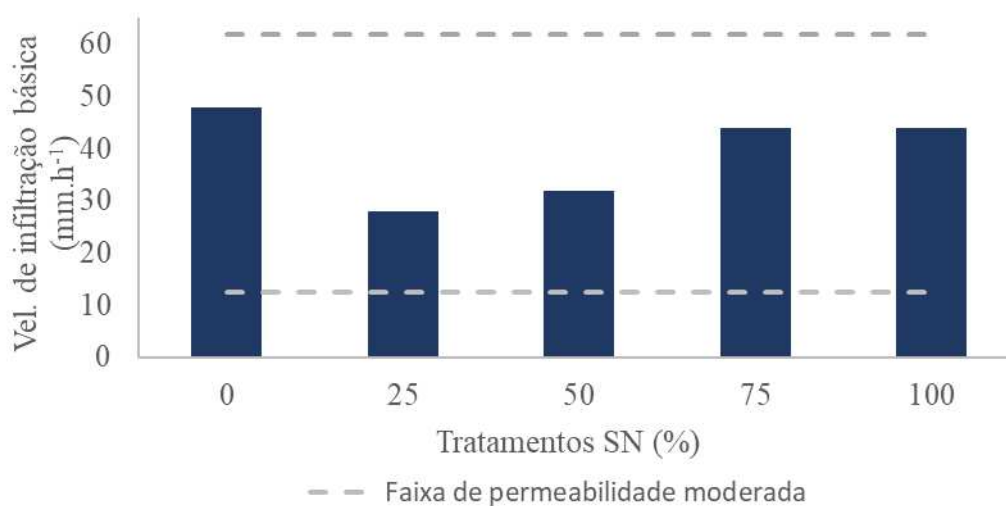
Trabalhos estudaram o uso da adição de materiais finos como bentonita em solos arenosos, visando justamente esse fim (CHAVES, 2016). Young *et al.* (2009) buscaram reduzir a Ks de um solo arenoso com a adição de poliacrilamida e observaram a diminuição da condutividade saturada. Valliant *et al.* (2002) buscaram alternativas de reduzir a Ks nos canais de transmissão de água para irrigação, visando minimizar as perdas por infiltração.

4.2 Velocidade de infiltração básica (VIB)

Tratando-se da avaliação da Velocidade de Infiltração Básica (VIB), não foi observada variação dos valores da VIB em função da adição de sedimento entre os tratamentos. Foram obtidos durante a medição para os tratamentos SN 0, SN 25, SN 75 e SN 100 os respectivos valores na ordem de 48, 28, 32, 44 e 44 mm.h^{-1} . O gráfico da Figura 25 é um comparativo dos resultados entre os tratamentos, enquanto os gráficos da Figura 26 são os resultados obtidos durante a execução do procedimento.

A VIB obtida para os diferentes tratamentos se encontra dentro dos limites para a classificação de “moderada” segundo o United States (1951) conforme mostra a Figura 25, estando essa classificação descrita na Tabela 5.

Figura 24 – Resultados da medição da velocidade de infiltração básica (VIB) para os diferentes tratamentos.



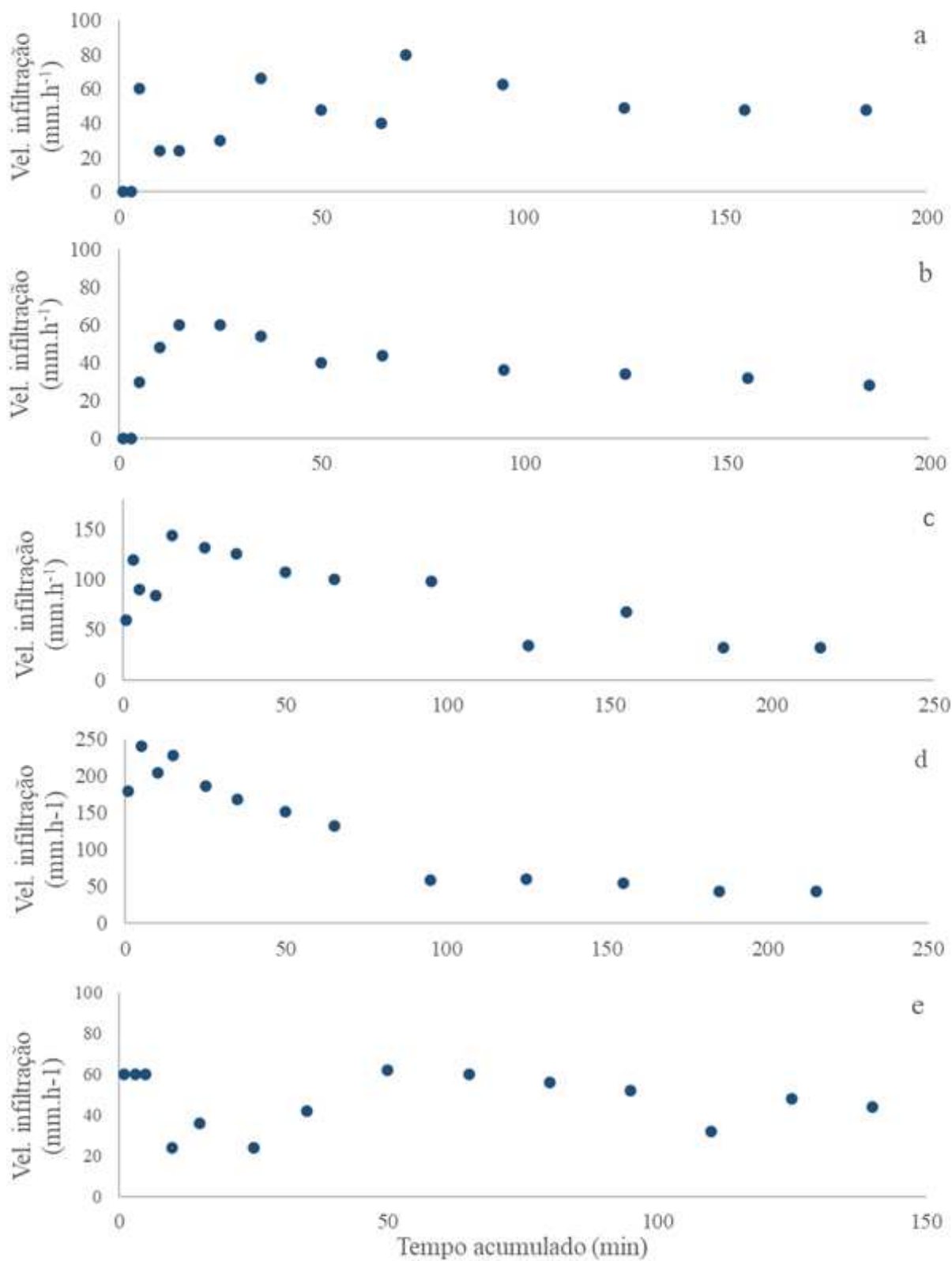
Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 5 – Classificação das velocidades de infiltração básica.

Classe de permeabilidade	Infiltração básica (mm.h^{-1})
Muito rápida	> 250,0
Rápida	250,0 a 125,0
Moderadamente rápida	124,0 a 63,0
Moderada	62,0 a 12,5
Moderadamente lenta	12,4 a 5,0
Lenta	4,9 a 1,3
Muito lenta	< 1,3

Fonte: EMBRAPA, 2006.

Figura 25 – Resultados da medição da VIB para os diferentes tratamentos.



*As letras “a”, “b”, “c”, “d” e “e” são respectivamente a SN0, SN25, SN50, SN75 e SN100.

Fonte: elaborada pelo autor.

Como é possível observar na Figura 26, não há um padrão de variação das leituras da VIB entre os tratamentos. Isso se deve tanto à ocorrência de erros durante a execução dos testes de infiltração como também à provável ocorrência de outros fatores. Um deles é o fato de a área do vaso ser muito pequena e de as raízes em decomposição das plantas de milho haverem sido retiradas do local e estarem em estado de decomposição acentuado, gerando rotas irregulares de infiltração devido à formação de cavidades no solo-substrato. Isso foi percebido pela formação de bolhas de ar que subiam subitamente à superfície da água que preenchia os anéis durante a realização dos testes, aumentando a irregularidade da percolação da água nos vasos.

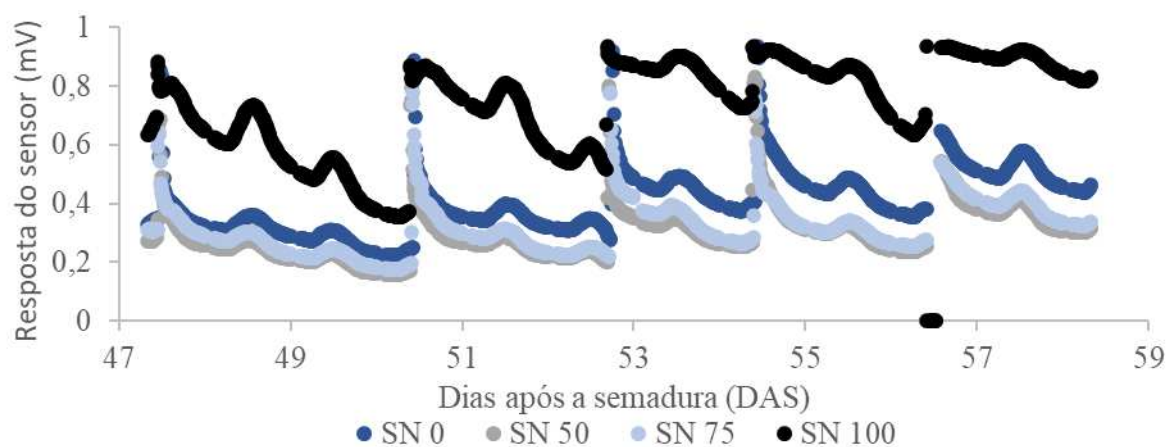
Um outro fator que pode ter contribuído para o comportamento anormal dos dados finais da VIB, bem como daqueles obtidos durante a realização dos testes foi a camada superficial de lodo e muco secos, gerando uma crosta sobre a superfície do vaso. Essa crosta se comportou num primeiro momento com uma camada de impedimento à infiltração, explicando os baixos valores obtidos nos momentos iniciais da medição.

Devido à limitação do número de amostras, realizar um número de três repetições não se mostrou viável, pois interferiria na quantidade de amostras indeformadas que poderiam ser coletadas dado que o cilindro utilizado ocupava quase toda área útil do vaso. Desse modo, a determinação da VIB foi muito mais uma medida de acompanhamento e observação do que de fato uma coleta de dados representativos dos tratamentos para análise estatística.

4.3 Variação temporal da umidade do solo-substrato com uso de sensores

Nas Figuras 27, 28 e 29 é possível observar o registro de umidade pelo sensor conectado ao *datalogger* e uma visível diferença de comportamento de umidade entre substratos comparados. O tratamento SN0, denominado testemunha por não ter adição de sedimento, possui uma amplitude de umidade muito maior em relação ao SN100 (dose máxima de sedimento). Apesar da ligeira diferença textural, o sedimento em SN100 continha um maior teor de matéria orgânica, que por possuir maior superfície específica e influenciar positivamente no aumento da porosidade, atua na melhoria da capacidade de retenção de água dos solos (PEREIRA, 2018). De modo geral, uma maior proporção de argila e partículas finas também está relacionado com um melhor desempenho na retenção de água e nutrientes (GORAYEB, 2005). Os picos de umidade ocorrem devido a irrigação, que foi realizada até o substrato do tratamento atingir a saturação, o decaimento da umidade ocorre devido a perda de água por evapotranspiração.

Figura 26 – Resposta dos sensores durante o período de irrigação.

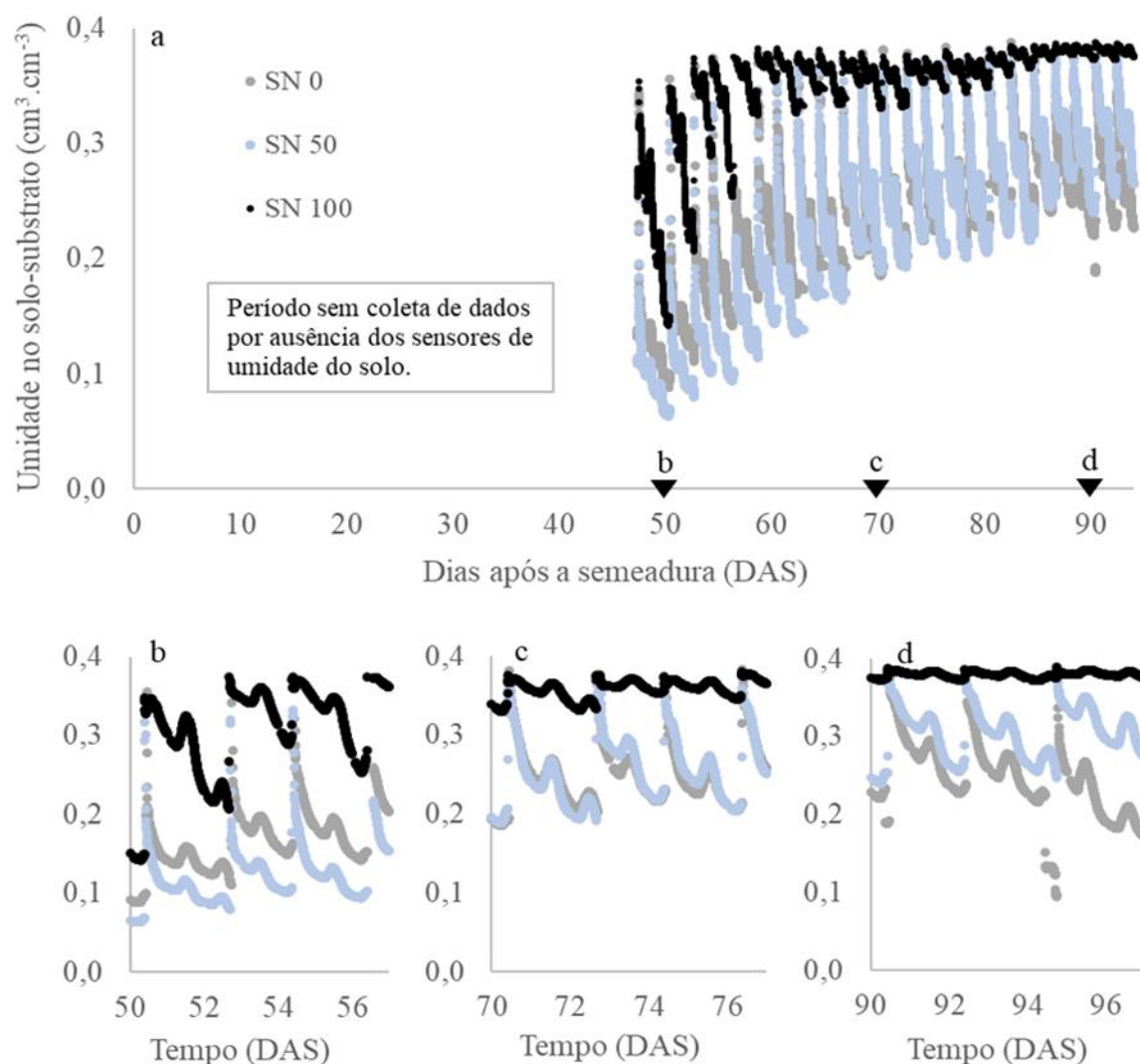


Fonte: elaborado pelo autor.

Inicialmente, no período de maior amplitude da umidade do solo-substrato, foi notado que a percolação da água era mais rápida pelas laterais do vaso, indicando haver um fluxo preferencial pelo espaço entre a área do vaso e o substrato, em virtude do menor impedimento mecânico ao movimento da água nesse espaço. Nesse aspecto, observou-se também que o desenvolvimento do sistema radicular das plantas no espaço entre os agregados e as paredes laterais dos vasos, diminuindo as perdas decorrentes do fluxo preferencial na lateral de cada vaso (ARAÚJO, 2015). Esse comportamento tem forte relação com a adaptação das plantas que evoluíram de modo a conduzir seu sistema radicular para regiões de maior umidade, fenômeno conhecido como “hidrotropismo”, abordado em trabalhos como os de Melo *et al.* (2021).

Ao decorrer do período de irrigação, a redução de umidade ocorreu de forma cada vez menos intensa. Os dados dos sensores de umidade mostraram que a capacidade de retenção de umidade do solo-substrato foi ampliada, sendo as perdas reduzidas. Por meio da observação do comportamento dos dados de umidade do solo, é possível inferir que a adição de sedimento implicou melhoria dos atributos físico-hídricos, o que fica mais evidenciado na Figura 28.

Figura 27 – Umidade no solo-substrato no período de irrigação com detalhamento para a semanas correspondentes aos 50, 70 e 90 dias após a semeadura (DAS).

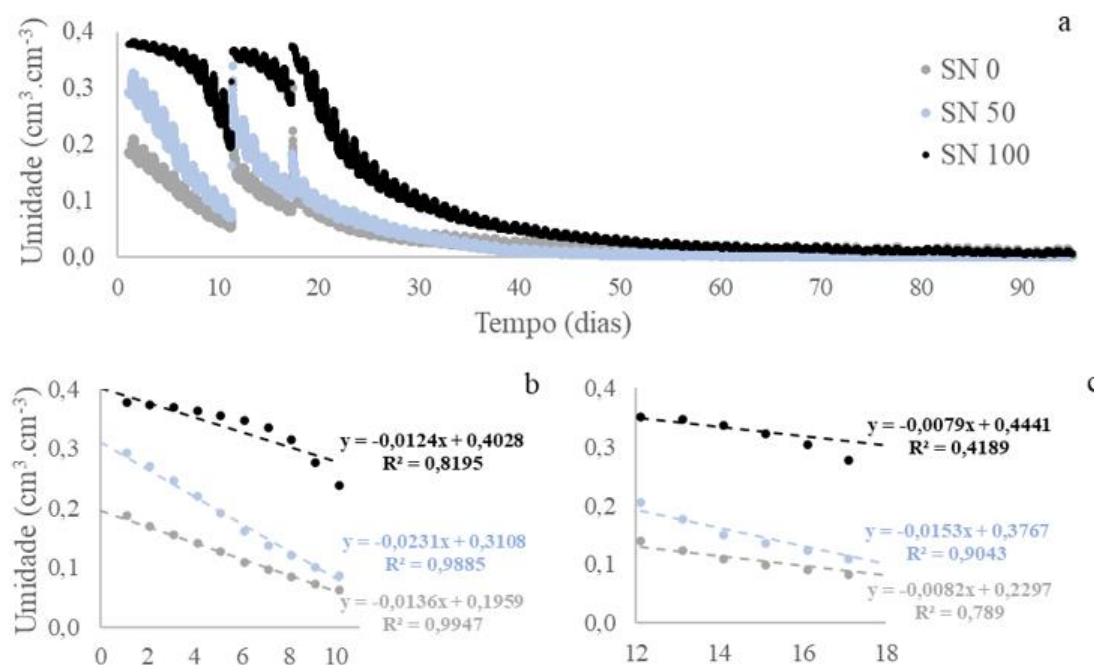


Fonte: elaborado pelo autor.

4.4 Curva de depleção da umidade do solo-substrato

Foi monitorado o comportamento da umidade ao longo do tempo, visando se obter a curva de depleção de umidade. Essa curva ilustrada nos gráficos “a”, “b”, “c” e “d” da Figura 29 representa o decaimento da umidade no solo-substrato após a suspensão da irrigação.

Figura 28 – Registro de todos os períodos de depleção de umidade no solo-substrato.

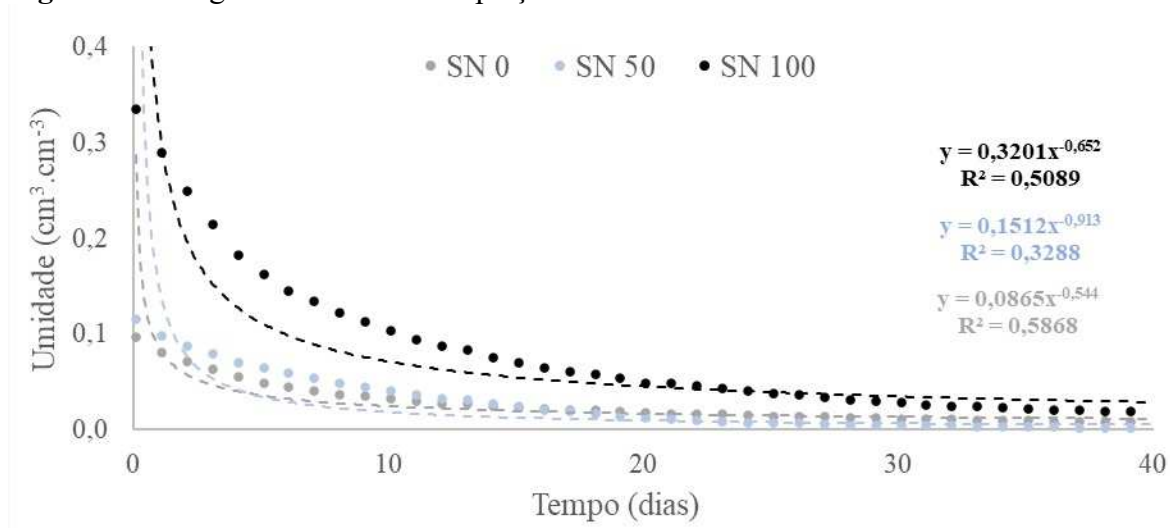


Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 29 ilustra o comportamento da umidade após a suspensão da rotina de irrigação das plantas no gráfico “a” em intervalos de dez minutos e nos demais em dados diários com linhas de tendência elaboradas para representar numericamente a taxa de decaimento da umidade.

Além da diminuição da variação da umidade durante todo o período de irrigação, é evidenciada a melhoria na capacidade de retenção de umidade pelo comportamento da curva de depleção de umidade menos acentuada no tratamento com a maior dose de sedimento. A taxa com que a umidade decresceu nos tratamentos foi representada por equações lineares nos períodos iniciais de decaimento conforme mostram os gráficos “b” e “c” da Figura 29. Contudo, o modelo potencial mostrado na Figura 30 foi o que melhor se adequou ao comportamento dos dados com um coeficiente de determinação acima de 0,98 para as séries de dados. Costa *et al.* (2012), analisando a curva de depleção da água nos solos da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA), observaram comportamento similar.

Figura 29 – Registro da curva de depleção de umidade diária no solo-substrato.



Fonte: elaborado pelo autor.

De um modo geral, além da diminuição da variação da umidade durante todo o período de irrigação registrado é evidenciada a melhoria na capacidade de retenção de umidade pelo comportamento da curva de depleção de umidade menos acentuada no tratamento com a maior dose de sedimento. Como é possível observar na figura acima, a diferença entre os tratamentos reside no fato de o decaimento da umidade ser muito menos acentuado no vaso com maior volume de sedimento, indicando uma maior capacidade deste de reter umidade.

Nesse aspecto, tanto um aumento na superfície específica como o incremento direto e indireto do teor de matéria orgânica pela adição do sedimento podem ser os fatores responsáveis por esse resultado. O incremento direto se dá pela matéria orgânica já contida no sedimento alterar as proporções totais desse componente no vaso, e o incremento indireto por conta dos nutrientes e melhorias que propiciaram um maior desenvolvimento de biomassa das plantas e, portanto, um melhor desenvolvimento radicular conforme observado por Braga *et al.* (2023).

Acredita-se que a umidade no tratamento com maior dose de sedimento se manteve por mais tempo devido a presença de argila, que permite maior retenção de umidade no solo-substrato por capilaridade devido à sua maior superfície específica. A partir disso, vê-se que a devolução de material fino ao solo erodido permite um ganho ambiental e financeiro, quando observamos que a água aplicada ao solo estará presente por mais tempo na profundidade correspondente à zona das raízes. Essa provável melhoria em muito beneficiaria os pequenos e médios produtores que possuem pouca disponibilidade hídrica e tecnológica em sua propriedade.

Não obstante, o tênue aumento no percentual e microporos é um grande indício de que os estudos observando os impactos do reuso de sedimento assoreado sobre as propriedades físico-hídricas do solo podem gerar resultados muito mais expressivos. Sobretudo, se realizados com maior profundidade e com maior incentivo no quesito disponibilidade de recursos. Desse modo, valeria a pena, a realização de trabalhos futuros para avaliar os mesmos quesitos, principalmente nos parâmetros de microporosidade, capacidade de retenção e curva de depleção de umidade com um volume vai robusto de dados, isto é, com uma maior ênfase no princípio “repetição” da experimentação agrícola.

5 CONCLUSÕES

A adição de sedimento atuou de modo a modificar alguns dos atributos físico-hídricos do solo-substrato testados. Dentre os níveis de aplicação de 0 t.ha^{-1} , 25 t.ha^{-1} , 50 t.ha^{-1} , 75 t.ha^{-1} e 100 t.ha^{-1} , o maior nível foi que forneceu os resultados mais expressivos.

A condutividade hidráulica saturada apresentou correlação negativa com relação ao aumento da quantidade de sedimento. Esse resultado mostrou-se significativo na realização da ANOVA para um nível de significância de 5%. A densidade das partículas, a densidade global do solo-substrato e a porosidade não apresentaram resultados significativos na ANOVA para um nível de significância de 5%. A capacidade de retenção de umidade apresentou correlação positiva com o aumento do nível de aplicação. Foi também observada uma maior umidade nos vasos monitorados e um padrão de aumento do percentual de microporos em função do aumento da quantidade de sedimento.

Apesar de a microporosidade não apresentando diferença significativa na ANOVA, para um nível de significância de 5%, provavelmente pelo insuficiente número de amostras, os parâmetros apresentam um promissor campo de estudo. É plenamente possível afirmar que maiores resultados podem ser obtidos no que concerne à melhoria da retenção de umidade do solo-substrato e na diminuição da infiltração. Esses efeitos teriam impacto direto redução de perdas de água e nutrientes no Semiárido.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHARYA, S.; SHARMA, S. K.; KHANDEGAR, V. **Assessment of groundwater quality by water quality indices for irrigation and drinking in South West Delhi, India**. Data in brief, v. 18, p. 2019-2028, 2018.

ALLEN, R. G. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements** - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. **Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, p. 382-388, 2009.

ANUÁRIO DO CEARÁ. **Microrregiões geográficas, 2016**. Disponível em: <<https://www.anuariodoceara.com.br/microrregiões-geográficas/microrregiões-geográficas/>>. Acesso em: 30/02/2023.

ARAÚJO, G. P.; VELLAME, L. M.; COSTA, J. A.; COSTA, C. A. G. **A low-cost monitoring system of stem water content: Development and application to Brazilian forest species**. Smart Agricultural Technology, v. 1, p. 100012, 2021.

ARAÚJO, J. C.; BRONSTERT, A. **A method to assess hydrological drought in semi-arid environments and its application to the Jaguaribe River basin, Brazil**. Water International, 2016.

AYANTUNDE, A. A.; COFIE, O.; BARRON, J. **Multiple uses of small reservoirs in crop-livestock agro-ecosystems of Volta basin: Implications for livestock management**. Agricultural Water Management, v. 204, p. 81-90, 2018.

BARBOSA, T. C. S. *et al.* **Qualidade física do solo em áreas sob manejo agroecológico e convencional**. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 7, p. 48899-48909, 2020.

BERTOL, O. J. *et al.* **Perdas de solo e água e qualidade do escoamento superficial associadas à erosão entre sulcos em área cultivada sob semeadura direta e submetida às adubações mineral e orgânica**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 31, p. 781-792, 2007.

BORGES, T. K. S. *et al.* **Effect of conservation practices on soil moisture and maize (*Zea mays* L.) cropping in the semi-arid northeast of Brazil**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 38, p. 1862-1873, 2014.

BORTOLUZZI, Edson Campanhola *et al.* **Efeito da calagem na relação entre solo e água**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 2621-2628, 2008.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. Bookman Editora, 2009.

BRAGA, B. B. *et al.* **Biomass production and antioxidative enzyme activities of sunflower plants growing in substrates containing sediment from a tropical reservoir**. J Agric Sci, v. 9, n. 5, p. 1-12, 2017.

BRAGA, B. B. *et al.* **From waste to resource: Cost-benefit analysis of reservoir sediment**

reuse for soil fertilization in a semiarid catchment. *Science of the total environment*, v. 670, p. 158-169, 2019.

BRAGA, B. B. **Potencial de reuso de sedimento assoreado em açudes na agricultura irrigada na bacia hidrográfica do Banabuiú.** 2019.

BRAGA, B. B. *et al.* **Avaliação do crescimento e produção de biomassa de plantas de milho e das propriedades físicas do solo com adição de sedimentos assoreado de reservatórios superficiais de regiões tropicais.** 2023. No prelo

BURGY, R. H.; LUTHIN, J. N. **A test of the single-and double-ring types of infiltrometers.** *Eos, Transactions American Geophysical Union*, v. 37, n. 2, p. 189-192, 1956.

CABRAL, L. J. R. S.; VALLADARES, G. S.; DE AQUINO, C. M. S. **Erosividade das chuvas em parte do alto curso do rio Banabuiu-sertão central do Ceará.** *REVISTA EQUADOR*, v. 3, n. 2, p. 51-61, 2014.

CABRAL, L. J. R. S.; VALLADARES, G. S.; DE AQUINO, R. P. **Susceptibilidade à erosão das terras do alto curso do Rio Banabuiú, no sertão central do Ceará, usando lógica nebulosa.** *ACTA GEOGRÁFICA*, p. 103-113, 2016.

CALDERANO FILHO, B. *et al.* **Susceptibilidade dos solos à erosão na área de entorno do reservatório da usina hidrelétrica de Tombos (MG).** *REVISTA GEONORTE*, v. 5, n. 23, p. 670-675, 2014.

CALDERANO, S. B. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo.** 2011.

CÂMARA, E. R. G. *et al.* **Parent rock–pedogenesis relationship: How the weathering of metamorphic rocks influences the genesis of Planosols and Luvisols under a semiarid climate in NE Brazil.** *Geoderma*, v. 385, p. 114878, 2021.

CANET, R. *et al.* **Agricultural use of sediments from the Albufera Lake (eastern Spain).** *Agriculture, ecosystems & environment*, v. 95, n. 1, p. 29-36, 2003.

CAPRA, G. F. *et al.* **Lake-dredged material (LDM) in pedotechnique for the restoration of Mediterranean soils affected by erosion/entisolization processes.** *Journal of Soils and Sediments*, v. 15, p. 32-46, 2015.

CARVALHO, E. J. Maklouf; FIGUEIREDO, M. S.; COSTA, L. M. **Comportamento físico-hídrico de um Podzólico Vermelho-Amarelo câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 34, p. 257-265, 1999.

CARVALHO, R.; GOEDERT, W. J.; ARMANDO, M. S. **Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, p. 1153-1155, 2004.

CARVALHO, T. *et al.* **Reservoir sediment characterisation by diffuse reflectance spectroscopy in a semiarid region to support sediment reuse for soil fertilization.** *Journal of Soils and Sediments*, v. 22, n. 9, p. 2557-2577, 2022.

CARVALHO, T. R. A. **Caracterização de sedimento de reservatórios por espectroscopia**

como suporte para prática de reuso do sedimento em região semiárida. 2020. 57 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

CASTRO, S. M.; ALMEIDA, J. R. **Dragagem e conflitos ambientais em portos clássicos e modernos: uma revisão.** Sociedade & Natureza, v. 24, p. 519-533, 2012.

CESAR, R. *et al.* **Proposta de um índice de risco ecológico para disposição sustentável de sedimentos de dragagem em Latossolos e Chernossolos.** Geosciences= Geociências, v. 34, n. 2, p. 275-285, 2015.

CHAVES, L. H. G.; TITO, G. A.; GUERRA, H. O. C.; VASCONCELOS, A. C. F. **Uma abordagem agrônômica: alternativa de comercialização de bentonita.** CONTECC, 2016.

COELHO, A. M. *et al.* **Fertilidade de solos: nutrição e adubação do milho.** 2008.

COLLARES, G. L. *et al.* **Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 41, p. 1663-1674, 2006.

COSTA, Carlos Alexandre Gomes. **Umidade do solo e disponibilidade hídrica na zona das raízes em condições naturais de caatinga preservada.** 2012.

COSTA, M. R. *et al.* **Water Footprint of soybean, cotton, and corn crops in the western region of Bahia State.** Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 26, p. 971-978, 2021.

DANTAS, J. D. N. *et al.* **Qualidade de solo sob diferentes usos e manejos no Perímetro Irrigado Jaguaribe/Apodi, CE.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 16, p. 18-26, 2012.

DA SILVA, F. H. B. B.; DE ARAUJO FILHO, J. C.; DA LUZ, L. R. Q. P. **Propriedades físico-hídricas de solos de uma área na Bacia do Jatobá-PE.** Embrapa Solos. Comunicado Técnico, 2006.

DE ARAÚJO PEDRON, F. *et al.* **Condutividade e retenção de água em Neossolos e saprolitos derivados de arenito.** Revista Brasileira de Ciência do solo, v. 35, n. 4, p. 1253-1262, 2011.

DE ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. **Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil.** Hydrological Sciences Journal, v. 51, n. 1, p. 157-170, 2006.

DE BARROS, C. S. H. N.; DOS SANTOS, M. L. A. **A seca e o DNOCS no Piauí.** Picos, 2019.

DE FREITAS, P. L.; BLANCANEAUX, P. **Metodologia de pesquisa em manejo do solo: estrutura e porosidade do solo.** Metodologias para investigacion en manejo de suelos, p. 25, 1994.

DE LIMA, B. R. *et al.* **Caracterização física de solos sob diferentes usos e manejos em propriedades de agricultura familiar em Candiba-Bahia.** Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 1, p. 1220-1233, 2021.

DE MATOS, A. P.; SABIÁ, R. J. **Estudo da pegada hídrica e fluxos de água virtual na**

comercialização dos produtos hortifrutigranjeiros no semiárido nordestino com ênfase no estado de Ceará. 2020.

DE OLIVEIRA, L. B.; DE MELO, V. **Correlação entre o equivalente de umidade e a microporosidade em solos do Nordeste. I. Solos podzolizados.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 6, n. 1, p. 173-176, 1971.

DE SOUSA, C. F. *et al.* **Organização das nações unidas para agricultura e alimentação.** Anais do fórum de iniciação científica do UNIFUNEC, v. 2, n. 2, 2011.

DOS SANTOS, A. L. P.; NETO, J. A. B.; CRAPEZ, M. A. C. **Aplicabilidade de Sedimentos Estuarinos em Solos com Baixa Aptidão Agrícola: Efeito na Fertilidade do Solo, Nutrição e Crescimento das Plantas.** Geochimica Brasiliensis, v. 30, n. 1, p. 12-12, 2016.

DOS SANTOS, H. G. *et al.* **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada.** 2011.

DUARTE, J. F. B. *et al.* **Atributos físico-hídricos de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes usos.** Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v. 14, n. 2, p. 3968, 2020.

DUQUE, J. G. **O Nordeste e as lavouras xerófilas.** Banco do Nordeste do Brasil, 2004.

FERREIRA, P. A. H. **O papel da cobertura vegetal na proteção do solo contra a erosão através do Ensino Baseado em Casos.** 2019.

FLACH, R. *et al.* **Water productivity and footprint of major Brazilian rainfed crops—A spatially explicit analysis of crop management scenarios.** Agricultural Water Management, v. 233, p. 105996, 2020.

FONSECA, R. M. F.; BARRIGA, F. J. A. S.; CONCEIÇÃO, P. I. S. T. **Clay minerals in sediments of Portuguese reservoirs and their significance as weathering products from over-eroded soils: a comparative study of the Maranhão, Monte Novo and Divor Reservoirs (South Portugal).** International Journal of Earth Sciences, v. 99, p. 1899-1916, 2010.

FONSECA, R.; BARRIGA, F. J. A. S.; FYFE, W. S. **Dam reservoir sediments as fertilizers and artificial soils. Case studies from Portugal and Brazil.** In: Proceedings of International Symposium of the Kanazawa University, Japan. 2003.

FRANCISCO, P. R. M. *et al.* **Caderno de pesquisa, ciência e inovação** v. 2, n. 2, 2019.

FREDDI, O. S. *et al.* **Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 31, p. 627-636, 2007.

FUENTES, W. M.; HURTADO, C.; LASCARRO, C. **On the influence of the spatial distribution of fine content in the hydraulic conductivity of sand-clay mixtures.** Earth Sciences Research Journal, v. 22, n. 4, p. 239-249, 2018.

GLOBALFERT. **Importação de fertilizantes bate recorde em 2020.** GlobalFert, 08 de janeiro de 2021. Disponível em: <https://globalfert.com.br/analises/importacao-de-fertilizantes-bate-recorde-em-2020/>. Acesso em: 10 junho. 2023.

GLOBALFERT. **Mato Grosso prepara política para reduzir dependência de importação de fertilizantes.** GlobalFert, 17 de março de 2023. Disponível em: <https://globalfert.com.br/noticias/negocios/mato-grosso-prepara-politica-para-reduzir-dependencia-de-importacao-de-fertilizantes/>. Acesso em: 10 junho. 2023.

GLOBALFERT. **Preços dos fertilizantes podem remodelar a dinâmica da agricultura.** GlobalFert, 11 de fevereiro de 2022. Disponível em: <https://globalfert.com.br/noticias/mercado/precos-dos-fertilizantes-podem-remodelar-a-dinamica-da-agricultura/>. Acesso em: 10 junho. 2023.

GORAYEB, A. *et al.* **Aspectos geoambientais, condições de uso e ocupação do solo e níveis de desmatamento da bacia hidrográfica do rio Curu, Ceará-Brasil.** GEOGRAFIA (Londrina), v. 14, n. 2, p. 85-106, 2005.

GRAFTON, R. **Quentin et al. The paradox of irrigation efficiency.** Science, v. 361, n. 6404, p. 748-750, 2018.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo: exatidão, precisão e tempo de processamento.** Ciência Rural, v. 36, p. 664-668, 2006.

GUERRA, A. T.; DA SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações.** Bertrand Brasil, 2009.

GUERRA, A. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: conceitos, temas e aplicações.** Ed. Bertrand. Rio de Janeiro, v. 2992, 2007.

GUERRA, M. D. F.; DE SOUZA, M. J. N.; DA SILVA, E. V. **Veredas da Chapada do Araripe: subespaços de exceção no semiárido do estado do Ceará, Brasil.** Ateliê Geográfico, v. 14, n. 2, p. 51-66, 2020.

GUERRINI, I. A.; TRIGUEIRO, R. M. **Atributos físicos e químicos de substratos compostos por biossólidos e casca de arroz carbonizada.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, p. 1069-1076, 2004.

HAQUE, M. M. *et al.* **Reuse of fish pond sediments as fertilizer for fodder grass production in Bangladesh: Potential for sustainable intensification and improved nutrition.** Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 216, p. 226-236, 2016.

HERBICH, J. B. **Handbook of dredging engineering.** McGraw-Hill Companies, 1992.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics.** Academic press, 2013.

JOBÁGY, J. *et al.* **Evaluation of Soil Infiltration Variability in Compacted and Uncompacted Soil Using Two Devices.** Water, v. 15, n. 10, p. 1918, 2023.

KHAN, A. S. *et al.* **Efeito da seca sobre a produção, a renda e o emprego agrícola na microrregião geográfica de Brejo Santo e no estado do Ceará.** Revista Econômica do Nordeste, v. 36, n. 2, p. 242-262, 2005.

KIANI, M. *et al.* **Internal phosphorus loading in a small shallow Lake: Response after**

- sediment removal.** Science of the Total Environment, v. 725, p. 138279, 2020.
- KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia; relações solo-planta.** Ceres, 1979.
- KLEIN, V. A. **Física do Solo. 2.ed.** Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2012. 240 p.
- KÖLLN, O. T.; SILVA, S. R.; PALUDETTO, A. **O solo: a base para a produção vegetal.** 2023.
- LANDINA, M. M.; KLEVENSKAYA, I. L. **Effect of soil compaction and moisture content on biological activity, nitrogen fixation, and composition of soil air.** Soviet soil science (USA), 1984.
- LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos.** Oficina de textos, 2016.
- LIBARDI, P. L. *et al.* **An approximate method of estimating soil water diffusivity for different soil bulk densities.** Water Resources Research, v. 18, n. 1, p. 177-181, 1982.
- LIMA, R. C. *et al.* **Aspectos lineares e espaciais da correlação entre a produtividade de forragem de milho e a porosidade do solo sob plantio direto.** Engenharia Agrícola, v. 29, p. 40-51, 2009.
- MALVEIRA, V. T. C.; ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A. **Hydrological impact of a high-density reservoir network in semiarid northeastern Brazil.** Journal of Hydrologic Engineering, v. 17, n. 1, p. 109-117, 2012.
- MANTEL, S. K.; MULLER, N. W. J.; HUGHES, D. A. **Ecological impacts of small dams on South African rivers Part 2: Biotic response—abundance and composition of macroinvertebrate communities.** Water Sa, v. 36, n. 3, p. 361-370, 2010.
- MANTOVANI, E. C. **Compactação do solo.** 1987.
- MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. **Drought in Northeast Brazil—past, present, and future.** Theoretical and Applied Climatology, v. 129, p. 1189-1200, 2017.
- MARTIN-NETO, L. *et al.* **Estrutura e natureza química da matéria orgânica do solo.**
- MARTINS, M. V. *et al.* **Correlação linear e espacial entre a produtividade do feijoeiro e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico de Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul.** Acta Scientiarum. Agronomy, v. 31, p. 147-154, 2009.
- MDLETSHE, Z. M. *et al.* **Effects of saline water consumption on physiological responses in Nguni goats.** Small Ruminant Research, v. 153, p. 209-211, 2017.
- MELLO, F. A. F. *et al.* **Fertilidade do solo.** São Paulo: Nobel, p. 45-72, 1983.
- MELO, F. G. de *et al.* **Efeitos sobre o agronegócio: uma análise da comercialização de fertilizantes a partir das relações bilaterais entre Brasil e Rússia.** Efeitos sobre o Agronegócio: uma análise da comercialização de fertilizantes a partir das relações bilaterais entre Brasil e Rússia. 2023.

MELO, H. C. **Plantas: Biologia Sensorial, Comunicação, Memória e Inteligência**. Editora Appris, 2021.

MENESCAL, R. A. *et al.* **Gestão dos Recursos Hídricos e a Garantia do Abastecimento Humano de Grandes Aglomerados Urbanos no Semi-Árido—O Caso de Fortaleza**. Artigo submetido a aprovação para publicação na Revista da ABRH—Especial Semi-Árido, 2002.

MESQUITA, M. G. B. de *et al.* **Caracterização estatística da condutividade hidráulica saturada do solo**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2001.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. **A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo**. *Ciência Rural*, v. 34, p. 963-969, 2004.

MONTEIRO, M. T. **Fitorremediação de rejeito contaminado proveniente do Canal do Fundão, na Baía de Guanabara-RJ**. Rio de Janeiro, 2008.

MORO, L. *et al.* **Geoquímica de Luvissole sob diferentes sistemas de manejo no Semiárido brasileiro**. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v. 11, n. 1, 2023.

NIYAZI, B. *et al.* **A Comparative Analysis of Infiltration Models for Groundwater Recharge from Ephemeral Stream Beds: A Case Study in Al Madinah Al Munawarah Province, Saudi Arabia**. *Water*, v. 14, n. 11, p. 1686, 2022.

NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos solos – ensaios de laboratório**. São Carlos: EESC-USP, 1995.

NUNES, A. A. L. *et al.* **Qualidade do solo em unidades de manejo agroflorestal e mata nativa em neossolo flúvico no município de Irauçuba-CE**. 2014.

PEREIRA, B. *et al.* **Assessment of the geometry and volumes of small surface water reservoirs by remote sensing in a semi-arid region with high reservoir density**. *Hydrological Sciences Journal*, v. 64, n. 1, p. 66-79, 2019.

PEREIRA, E. B. **Produção de composto orgânico**. 2018.

PEREIRA, L. S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. **Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving**. *Agricultural water management*, v. 108, p. 39-51, 2012.

PIRES, L. F. *et al.* **Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution**. *Soil and Tillage Research*, v. 110, n. 2, p. 197-210, 2010.

PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; TIMM, L. C. **Comparação de métodos de medida da densidade do solo**. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 33, p. 161-170, 2011.

R CORE TEAM (2016). **R: a language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Available in: 2008<<https://www.R-project.org>>. Acesso em: 10 de junho, 2016.

RIGDEN, A. J. *et al.* **Combined influence of soil moisture and atmospheric evaporative demand is important for accurately predicting US maize yields**. *Nature Food*, v. 1, n. 2, p. 127-133, 2020.

RIGDEN, A. J. *et al.* **Combined influence of soil moisture and atmospheric evaporative demand is important for accurately predicting US maize yields.** *Nature Food*, v. 1, n. 2, p. 127-133, 2020.

ROCHA, Pablo A. *et al.* **Bell pepper cultivation under different irrigation strategies in soil with and without mulching.** *Horticultura brasileira*, v. 36, p. 453-460, 2018.

RODRIGUES, G. C. *et al.* **Modelling economic impacts of deficit irrigated maize in Brazil with consideration of different rainfall regimes.** *Biosystems engineering*, v. 116, n. 1, p. 97-110, 2013.

RODRIGUES, H. A.; PEREIRA, W. G.; SILVESTRE, F. E. R. **Aspectos quantitativos e qualitativos das águas superficiais da bacia hidrográfica-Banabuiú.** *Cadernos de Ensino, Ciências & Tecnologia*, v. 1, n. 3, p. 270-279, 2019.

SALES, L. E. O. *et al.* **Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 34, p. 2091-2095, 1999.

SALES, L. E. O. *et al.* **Qualidade física de Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes sistemas de uso agrícola.** *Ciência e Agrotecnologia*, v. 34, p. 667-674, 2010.

SANTOS, A. M. S. *et al.* **Variabilidade espacial do banco de sementes em área de Caatinga no Nordeste do Brasil.** *Ciência Florestal*, v. 30, p. 542-555, 2020.

SANTOS, C. R. **Impacto antropogênico ao aporte de fósforo em sedimentos superficiais da bacia hidrográfica do Rio Sergipe.** 2023.

SANTOS, G. G.; GRIEBELER, N. P.; DE OLIVEIRA, L. F. C. **Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, p. 115-123, 2010.

SCHMIDT, D. M.; MATTOS, A. **Dinâmica dos regimes de precipitação e vazão da bacia hidrográfica do alto Piranhas-Açu-PB.** *Sociedade e Território*, v. 25, n. 2, p. 67-77, 2013.

SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS. **Relatório de Cálculo das Afluências aos Reservatórios Estratégicos do Ceará: Definição das Vazões Oficiais aos reservatórios estratégicos do Ceará: definição das vazões oficiais.** 2021.

SGARBI, Vitor S. *et al.* **Os jargões da sustentabilidade: uma discussão a partir da produção científica nacional.** *Anais do Encontro Nacional de Gestão Empresarial e Meio Ambiente* - Engema, São Paulo, Brasil, v. 10, 2008.

SILVA, A. *et al.* **Evaluation of application of basalt powder effects in soil fertility and *Eucalyptus benthamii* nutrition.** *Floresta*, v. 42, n. 1, p. 69-76, 2012.

SILVA, E. M. B. *et al.* **Utilização de cera de abelhas na determinação da densidade do solo.** *Revista brasileira de ciência do solo*, v. 27, p. 955-959, 2003.

SILVA, F. G. **Condutividade hidráulica do solo saturado e fluxo preferencial em amostras**

confinadas de terra. 2015.

SIMÕES, W. L.; FIGUEIRÊDO, V. B.; SILVA, E. L. **Uso do cilindro infiltrômetro único em diferentes solos.** Engenharia Agrícola, v. 25, p. 359-366, 2005.

SMITH, V. H. **Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem.** Environmental Science and Pollution Research, v. 10, p. 126-139, 2003.

SMITH, V. H.; SCHINDLER, D. W. **Eutrophication science: where do we go from here?.** Trends in ecology & evolution, v. 24, n. 4, p. 201-207, 2009.

SOARES, Ricardo *et al.* **Origem, Distribuição e biodisponibilidade de metais em águas, sedimentos e solos de um trecho da sub-bacia do rio Paraibuna, MG, Brasil.** 2011.

SOUZA, B. I.; MENEZES, R.; CÁMARA ARTIGAS, R. **Efeitos da desertificação na composição de espécies do bioma Caatinga, Paraíba/Brasil.** Investigaciones geográficas, n. 88, p. 45-59, 2015.

SOUZA, L. M. *et al.* **Compactação do solo e o impacto na variação espacial de atributos físico-hídricos e produtividade da soja.** 2020.

STRADA, J. **Fertilizantes: calcanhar de Aquíles na sustentabilidade?.** 2023.

SUGUIO, K. **Geologia sedimentar.** Editora Blucher, 2003.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo.** 2017.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: métodos, sistemas e aplicações.** Campinas: Unicamp/FENAGRI, 2017, 215p.

TIMM, L. C. *et al.* **Avaliação da densidade do solo usando métodos convencionais e nucleares.** A inserção da engenharia agrícola em projetos nacionais; caderno de resumos, 2004.

TIMM, L. C.; REICHARDT, K. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações.** 2008.

UNITED STATES. Department of Agriculture. Soil Survey Division. Soil Conservation Service. **Soil Survey Staff. Soil survey manual.** Washington, 1951. 503p.

URACH, F; REICHERT, J. M. **Estimativa da retenção de água em solos para fins de irrigação.** 2007.

VALLIANT, J. **"Canal seepage reduction demonstration using polyacrylamides in the ditch and water: Arkansas River Valley of Colorado."** In Proc. Central Plains Irrigation Short Course and Exposition, Lamar, CO, pp. 5-6. 2002.

VARGAS, D. *et al.* **Assisting global rainwater harvesting practitioners: a decision support tool for tank sizing method selection under uncertainty.** Environmental Science: Water Research & Technology, v. 5, n. 3, p. 506-520, 2019.

VIEIRA, V. P. P. B. **Desafios da gestão integrada de recursos hídricos no semi-árido.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 8, n. 2, p. 7-17, 2003.

WITHERS, P. J. A. *et al.* **Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture.** Scientific Reports, v. 8, n. 1, p. 1-13, 2018.

WITHERS, P. J. A.; JARVIE, H. P. **Delivery and cycling of phosphorus in rivers: a review.** Science of the total environment, v. 400, n. 1-3, p. 379-395, 2008.

YOUNG, M. H., *et al.* **"Reducing saturated hydraulic conductivity of sandy soils with polyacrylamide."** Soil Science Society of America Journal 73, no. 1, p. 13-20, 2009.

ZWIRTES, A. L. *et al.* **Utilização do infiltrômetro de cornell e dos anéis concêntricos para determinação da infiltração de água em um Latossolo Vermelho.** Semina: Ciências Agrárias, v. 1, n. 34, p. 3489-3499, 2013.