



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO**  
**GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**JOÃO IVO RODRIGUES DE SOUSA**

**CARVÃO HIDROTÉRMICO EM SOLO CULTIVADO COM FEIJÃO-CAUPI SOB  
IRRIGAÇÃO COM E SEM SOLUÇÃO SALINA: EFEITOS NA ESTABILIDADE E  
RESISTÊNCIA TÊNซิล DE AGREGADOS**

**FORTALEZA**

**2023**

JOÃO IVO RODRIGUES DE SOUSA

CARVÃO HIDROTÉRMICO EM SOLO CULTIVADO COM FEIJÃO-CAUPI SOB  
IRRIGAÇÃO COM E SEM SOLUÇÃO SALINA: EFEITOS NA ESTABILIDADE E  
RESISTÊNCIA TÊNSIL DE AGREGADOS

Monografia apresentada ao Curso de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias, Departamento Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota

Coorientador: Me. Alexandre dos Santos Queiroz

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)

---

- S697c Sousa, João Ivo Rodrigues de.  
Carvão hidrotérmico em solo cultivado com feijão-caupi sob irrigação com e sem solução salina: efeitos na estabilidade e resistência tênsil de agregados / João Ivo Rodrigues de Sousa. – 2023.  
37 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. Jaedson Cláudio Anunciato Mota.  
Coorientação: Prof. Me. Alexandre dos Santos Queiroz.
1. Condicionadores de solo. 2. Salinidade do solo. 3. Qualidade física do solo. I. Título.  
CDD 630
-

JOÃO IVO RODRIGUES DE SOUSA

CARVÃO HIDROTÉRMICO EM SOLO CULTIVADO COM FEIJÃO-CAUPI SOB  
IRRIGAÇÃO COM E SEM SOLUÇÃO SALINA: EFEITOS NA ESTABILIDADE E  
RESISTÊNCIA TÊNSIL DE AGREGADOS

Monografia apresentada ao Curso de  
Agronomia do Centro de Ciências Agrárias,  
Departamento Ciências do Solo da  
Universidade Federal do Ceará, como requisito  
parcial à obtenção do título de Engenheiro  
Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Jaedson Cláudio  
Anunciato Mota  
Coorientador: Me. Alexandre dos Santos  
Queiroz

Aprovada em: 30 /11/2023.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Me. Alexandre dos Santos Queiroz  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Helon Hébano de Freitas Sousa  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Me. Ícaro Vasconcelos do Nascimento  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Cleuson e Antonia.

A toda minha família e amigos.

## AGRADECIMENTOS

A Deus de misericórdia, fonte de todo amor e conhecimento, por minha vida e sua proteção durante toda minha caminhada, e à Mãe santíssima de Jesus Cristo, por toda sua interseção e proteção.

Aos meus pais, Francisco Cleuson e Antonia Pereira. Ao meu pai, por todo amor, preocupações, orações, cuidado e incentivos nos estudos, sendo sempre um porto seguro e um amigo leal.

À minha mãe, minha fortaleza e rocha inabalável, que sempre vai ser a minha maior inspiração, que sempre torceu e torce pelo meu sucesso, mas principalmente por ser essa mulher tão amorosa, cuidadosa e incrível.

Aos seus irmãos Joilson e Francisca Jocilene, por todo amor, força e carinho e por sempre torcerem por mim.

Ao Prof. Jaedson Cláudio Anunciato Mota, por sua competência como professor, disponibilidade e principalmente sua excelente orientação.

Ao Me. Alexandre dos Santos Queiroz pela coorientação, pela amizade, conselhos, ajuda nas análises e o apoio na execução deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Helon Hébano de Freitas Sousa e à mestranda Débora Gonçalves da Silva por permitirem a coleta de dados referentes à Física do Solo no experimento que eles conduziram.

Aos participantes da banca examinadora Prof. Dr. Helon Hébano de Freitas Sousa e Me. Ícaro Vasconcelos do Nascimento pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao Grupo de Estudos em Física do Solo (GEFÍS), por toda a experiência que o grupo trouxe e todo o ensinamento também, que foi tão importante para a minha formação como engenheiro agrônomo.

Aos amigos que fiz no Laboratório de Física do Solo, que me ajudaram e compartilharam comigo todo o trabalho nesses anos, Angélica da Silva, Francisco José da Silva (Franzé), João Marcos e Tiago Muniz.

Aos amigos que fiz na graduação, Emanuel Magalhães, Erika Beatriz, Gabriel Greca, Ítalo Magalhães, Lenildo Melo, Leslyene Freitas, Matheus Medeiros, Nicole Ferreira,

Renan Gomes, Ramony Kelly, que compartilharam comigo momentos de alegrias e tristezas ao longo destes mais de cinco anos e que sem eles seria tudo mais difícil.

À Universidade Federal do Ceará, pela oportunidade de realização deste curso.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo que contribuiu amplamente com meu aprendizado científico e conclusão do curso.

À FINEP, por financiar esta pesquisa via projeto “Produção de materiais carbonáceos funcionais obtidos a partir de resíduos agroindustrial: uso como condicionador de solos no nordeste brasileiro.

À FUNCAP (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à SEDET (Secretaria de Desenvolvimento Econômico e Trabalho do Estado do Ceará), pelo apoio financeiro via Programa Cientista-Chefe em Agricultura ao projeto “Condicionador de solos obtido de resíduo agroindustrial para uso nas condições edafoclimáticas do nordeste brasileiro”.

A todos os amigos e familiares que contribuíram de alguma forma para minha formação e realização deste trabalho.

“Não temas, porque eu sou contigo, não te assombres, porque eu sou o teu Deus: eu te fortaleço e te ajudo, e te sustento com a destra de minha justiça.” (Isaías, 41;10).

## RESUMO

O feijão-caupi [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.], apresenta importância econômica, nutricional, social e cultural para o homem do campo do nordeste brasileiro. Encontrar formas de lidar com a salinidade de solos em região áridas e semiáridas é relevante uma vez que o excesso de sais no solo é limitador ao cultivo da maioria das culturas. A adição de condicionadores como o biocarvão hidrotérmico na tentativa de mitigar esses efeitos vem se demonstrando uma alternativa para reduzir os danos decorrentes da salinização em atributos físicos e químicos do solo. Nesse contexto, foram consideradas as hipóteses de que o hidrochar produzido do bagaço de caju, graças aos seus atributos como material carbonáceo, contribui para aumentar a estabilidade de agregados em água, reduz a resistência tênsil, e, de igual modo, mitiga os efeitos nocivos de acúmulo de sais sobre a estabilidade estrutural de solo cultivado com feijão caupi e irrigado com água salina. Assim, propôs-se como objetivo avaliar os efeitos de biocarvão hidrotérmico (hidrochar) de bagaço de caju sobre a estabilidade em água e resistência tênsil de agregados, incluindo a avaliação de seu potencial como mitigador dos efeitos nocivos do sódio sobre a estabilidade estrutural de solo cultivado com feijão-caupi e irrigado com água salina. Adicionalmente, objetivou-se definir a melhor dose de hidrochar que maximiza a estabilidade estrutural de solo cultivado e irrigado com água salina. O trabalho foi realizado em casa-de-vegetação pertencente ao Departamento de Ciências do Solo, na Universidade Federal do Ceará (UFC), no campus do Pici, em colunas de PVC contendo solo com estrutura preservada, cultivado com feijão caupi, considerando o delineamento inteiramente aleatorizado em esquema fatorial 5 x 2 x 2 (cinco doses de hidrochar: 0, 5, 10, 20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup>; duas águas para a irrigação: salina e não salina; duas camadas de solo a serem analisadas na coluna: 0-0,1 m e 0,2-0,3 m), com quatro repetições, totalizando 80 unidades de observação. Em seguida foi realizada a coleta de agregados em cada coluna para posterior análise de estabilidade e resistência tênsil de agregados. Os dados foram submetidos à análise de variância (Teste F) e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. Concluiu-se que a aplicação de hidrochar produzido do bagaço de caju no solo contribui para aumentar a estabilidade de agregados em água, sendo a dose de 40 Mg ha<sup>-1</sup> a mais efetiva, e que o biocarvão é eficiente na redução dos efeitos nocivos do acúmulo de sais sobre a estabilidade de agregados de solo cultivado com feijão-caupi e irrigado com água salina. Apesar de não ter sido constatado efeito de doses de biocarvão sobre a resistência tênsil de agregados, os efeitos benéficos de sua aplicação foram identificados ao mitigarem os efeitos danosos da salinidade na camada superficial do solo.

**Palavras-chave:** condicionadores de solo; salinidade do solo; qualidade física do solo.

## ABSTRACT

The cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) holds economic, nutritional, social, and cultural significance for farmers in the northeastern region of Brazil. Addressing soil salinity in arid and semi-arid areas is imperative, as elevated salt levels in the soil constrain the cultivation of most crops. The incorporation of amendments, such as hydrochar, has emerged as a viable strategy to alleviate the adverse effects of salinization on the physical and chemical attributes of the soil. In this context, hypotheses were formulated, positing that hydrochar derived from cashew bagasse, owing to its carbonaceous nature, contributes to augmenting aggregate stability in water, diminishing tensile strength, and similarly mitigating the deleterious impact of salt accumulation on the structural stability of soil cultivated with cowpea and irrigated with saline water. The overarching objective, therefore, was to assess the impact of hydrochar from cashew bagasse on water stability and the tensile strength of aggregates. This encompassed an evaluation of its potential as a mitigator of sodium's detrimental effects on the structural stability of soil cultivated with cowpea and irrigated with saline water. Additionally, the study aimed to ascertain the optimal dose of hydrochar that maximizes the structural stability of soil cultivated and irrigated with saline water. The investigation took place in a greenhouse affiliated with the Department of Soil Science at the Federal University of Ceará (UFC), located on the Pici campus. PVC columns containing soil with a preserved structure and cultivated with cowpea were employed. The experimental design followed a completely randomized factorial scheme of  $5 \times 2 \times 2$  (comprising five hydrochar doses: 0, 5, 10, 20, and 40 Mg ha<sup>-1</sup>; two irrigation waters: saline and non-saline; and two soil layers for analysis in the column: 0-0.1 and 0.2-0.3 m). The study incorporated four replications, resulting in a total of 80 observation units. Subsequently, aggregates were collected from each column for a detailed analysis of stability and tensile strength. The obtained data underwent analysis of variance (ANOVA), with mean comparisons executed using Tukey's test at a 5% significance level. It is concluded that the application of hydrochar produced from cashew bagasse contributes to increasing the stability of aggregates in water, with a dose of 40 Mg ha<sup>-1</sup> being the most effective, and that biochar is efficient in reducing the opposing effects of salt accumulation on the stability of soil aggregates cultivated with cowpea and irrigated with saline water. Although no effect of biochar doses on the tensile strength of aggregates, was found the beneficial effects of its application mitigating the harmful effects of salinity in the surface layer of the soil.

**Keywords:** soil conditioners; soil salinity; soil physical quality

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Regressão linear entre diâmetro médio ponderado e doses de biocarvão hidrotérmico (\*\*significativo a 1% de probabilidade) ..... 26
- Figura 2 – Interação entre doses de biocarvão, salinidade da água de irrigação e posição na coluna de solo para a resistência tênsil de agregados. Em cada figura, médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ..... 27
- Figura 3 – Interação entre doses de biocarvão e salinidade de água de irrigação (A) e doses de biocarvão e posição na coluna de solo (B) para o diâmetro médio ponderado de agregados. Médias seguidas pela mesma letra minúscula em cada dose de biocarvão, e mesma letra maiúscula entre as doses de biocarvão, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ..... 28
- Figura 4 – Resistência tênsil de agregados em função da salinidade da água de irrigação (A) e da posição na coluna de solo (B). Em cada figura, médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ..... 29
- Figura 5 – Interação entre doses de biocarvão e salinidade de água de irrigação (A) e doses de biocarvão e posição na coluna de solo (B) para a resistência tênsil de agregados. Médias seguidas pela mesma letra minúscula em cada dose de biocarvão, e mesma letra maiúscula entre as doses de biocarvão, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ..... 30
- Figura 6 – Interação entre salinidade da água de irrigação e posição na coluna de solo para a resistência tênsil de agregados. Médias seguidas pela mesma letra minúscula em cada posição na coluna de solo, e mesma letra maiúscula em cada concentração salina da água de irrigação entre as posições, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade..... 31

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Resumo da análise de variância para os dados de estabilidade de agregados (diâmetro médio ponderado) em função de doses de biocarvão, salinidade da água de irrigação e posição na coluna de solo .....	25
Tabela 2	– Resumo da análise de variância para os dados de resistência tênsil em função de doses de biocarvão, salinidade da água de irrigação e posição na coluna de solo .....	28
Tabela 3	– Interação entre doses de biocarvão, salinidade da água de irrigação e posição na coluna de solo para a resistência tênsil de agregados. Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade .....	31



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
DMP	Diâmetro Médio Ponderado
RT	Resistência Tênsil

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>16</b>
2.1	<b>Importância econômica do feijão-caupi .....</b>	<b>16</b>
2.2	<b>Salinidade do solo no contexto de ambiente semiárido .....</b>	<b>16</b>
2.2.1	<i>Efeitos da salinidade do solo sobre plantas cultivadas .....</i>	<b>17</b>
2.2.2	<i>Efeitos da salinidade sobre a estabilidade estrutural do solo .....</i>	<b>18</b>
2.3	<b>Biocarvão hidrotérmico: características e potencialidades para aplicação em solos agrícolas .....</b>	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
13.1	<b>Local de coleta do solo .....</b>	<b>21</b>
3.2	<b>Montagem das amostras .....</b>	<b>21</b>
3.3	<b>Instalação e condução do experimento em casa-de-vegetação .....</b>	<b>22</b>
3.4	<b>Estabilidade de agregados .....</b>	<b>23</b>
3.5	<b>Resistência tênsil de agregados .....</b>	<b>23</b>
3.6	<b>Análise dos dados .....</b>	<b>24</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>32</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>33</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp) é uma planta de origem Africana que foi trazida para o Brasil por colonizadores portugueses. Também conhecido popularmente como feijão-de-corda, é uma leguminosa amplamente cultivada por apresentar alta rusticidade, adaptabilidade, ciclo de maturação curto, ampla variabilidade genética e tolerância a estresses bióticos e abióticos (FREIRE FILHO *et al.*, 2011).

É uma das principais culturas de subsistência de pequenos agricultores das regiões Norte e Nordeste do Brasil, sobretudo no semiárido nordestino (SOUZA, 2017), sendo uma fonte de alimentação e renda para produtores da região. O feijão-caupi é uma importante fonte nutricional, rico em proteínas e carboidratos, e atua na regulação dos níveis de lipídios e açúcar, o que o torna relevante para a segurança alimentar de várias comunidades brasileiras.

Para que seja atingida elevada produtividade nas áreas com feijão-caupi é recomendado o uso de irrigação, o que pode acarretar problemas de salinidade no solo, visto que regiões áridas e semiáridas do mundo estão mais propensas a essa condição. A salinização nessas regiões está associada ao baixo índice pluviométrico, elevada evapotranspiração, drenagem deficiente e à irrigação com água de má qualidade ou mesmo as condições de formação desses solos. Acredita-se que cerca de 25% das áreas irrigadas encontrem-se salinizadas nas regiões áridas e semiáridas do mundo, fator que reduz severamente a produção agrícola.

O uso de água salina na irrigação provoca elevação da salinidade do solo, prejudicando os processos de absorção, transporte, assimilação e distribuição de nutrientes, acarretando diminuição no desenvolvimento e rendimento das plantas devido a redução na fotossíntese, transpiração e condutância estomática. A adição de sais no solo também pode afetar atributos físicos associados à estrutura do solo, por exemplo, dispersão de partículas, estabilidade e resistência tênsil dos agregados, infiltração e condutividade à água e ao ar.

Nesse contexto, o biocarvão hidrotérmico tem se destacado como um condicionador de solo bastante promissor para minimizar os danos causados pela salinização de solos. Esse material carbonáceo pode ser obtido de diversas biomassas, por exemplo, do bagaço de caju. Estudos têm demonstrado a influência de biocarvão no solo, melhorando a estrutura em decorrência das ligações que ocorrem entre este e a fração sólida do solo, o que favorece a formação e estabilização de agregados responsáveis pelo fluxo de ar e calor e armazenamento de água no solo.

Assim, foi considerada a hipótese de o hidrochar produzido do bagaço de caju,

graças aos seus atributos como material carbonáceo, contribuir para aumentar a estabilidade de agregados em água, reduzir a resistência tênsil, e, de igual modo, mitigar os efeitos nocivos do acúmulo de sais sobre a estabilidade estrutural de solo cultivado com feijão caupi e irrigado com água salina.

Como objetivos, foram definidos: avaliar efeitos de biocarvão hidrotérmico (hidrochar) de bagaço de caju sobre a estabilidade em água e resistência tênsil de agregados, incluindo a avaliação de seu potencial como mitigador dos efeitos nocivos do sódio sobre a estabilidade estrutural de solo cultivado com feijão-caupi [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] e irrigado com água salina. Adicionalmente, objetivou-se definir a melhor dose de hidrochar que maximiza a estabilidade estrutural de solo cultivado com feijão caupi e irrigado com água salina.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Importância econômica do feijão-caupi**

Historicamente, a produção de feijão-caupi no Brasil concentra-se nas regiões Nordeste (1,2 milhão de hectares) e Norte (55,8 mil hectares) do país. Entretanto, a cultura vem conquistando espaço na região Centro-Oeste, em decorrência do desenvolvimento de cultivares com características que favorecem o cultivo mecanizado. O feijão-caupi contribui com 35,6% da área plantada e 15% da produção de feijão total (feijão-caupi + feijão-comum) no país (SILVA, 2021).

O cultivo do feijão está se estendendo para a região dos cerrados das regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, sendo integrados aos arranjos produtivos como safrinha após as culturas da soja e do arroz, e, em alguns locais, como cultura principal. O feijão-caupi, na região dos cerrados, tem um custo muito competitivo, principalmente quando é cultivado em forma de safrinha, fator que tem feito aumentar o interesse dos produtores pela cultura. A oferta de um produto padronizado, de alta qualidade, em quantidade e com regularidade, vem despertando o interesse de agroindustriais de outras regiões e está contribuindo para a abertura de novos mercados para a cultura (OLIVEIRA, 2021).

Segundo dados da CONAB, a produção nacional do feijão-caupi em 2022 foi de 629,3 mil toneladas, com produtividade média de 702 kg ha<sup>-1</sup>, sendo constatada a maior produtividade no Distrito Federal (1410 kg ha<sup>-1</sup>) e a menor no Ceará (289 kg ha<sup>-1</sup>). A projeção para 2022-2023 é de uma produção nacional de 630 mil toneladas (IBRAFE, 2022).

A cultura do feijão-caupi possui importância, tanto como fonte de alimento quanto promotora de emprego e renda, promovendo relevante desenvolvimento agrícola nos âmbitos econômico e nutricional, desempenhando função socioeconômica principalmente para a população rural com poder aquisitivo mais reduzido (MEDEIROS, 2018).

### **2.2 Salinidade do solo no contexto de ambiente semiárido**

Solos que apresentam salinidade ocorrem predominantemente nas regiões áridas e semiáridas do mundo (WALTER *et al.*, 2018), ambientes em que as precipitações pluviais são baixas e associadas à baixa atividade bioclimática, ao menor grau de intemperismo, à drenagem deficiente e ao uso de água de má qualidade, conduzindo à formação de solos com alta concentração de sais (HOLANDA, 2006). No entanto, alguns solos apresentam-se salinizados independentemente da ação do homem, ou seja, são salinos por natureza (LIMA JUNIR; SILVA, 2010). As causas naturais da salinização são a presença de águas fluviais ricas em sais ou águas

subterrâneas salinas, elevada evaporação e baixa precipitação pluvial. Nessas regiões, o movimento ascendente da água do solo por capilaridade é um processo dominante e as taxas de precipitação pluvial são baixas para lixiviar os sais. Isto leva a um acúmulo de sais na camada superficial do solo.

Outra forma de salinização se dá pela adição de adubos via água de irrigação; quando esta tecnologia é utilizada sem nenhuma forma de manejo, torna-se um contribuinte intenso para o aumento de áreas com altas concentrações salinas (LIMA JUNIR; SILVA, 2010).

O aumento da população global e a pressão econômica para produção de alimentos têm ajudado sensivelmente para o incremento da área de solos degradados por salinidade e sodicidade, possivelmente, em decorrência do uso inadequado de terras marginais e do manejo inadequado da irrigação e do solo (RIBEIRO *et al.*, 2003 apud Pedrotti *et al.*, 2015). Os impactos da salinização dos solos afetam a dinâmica de organização espacial das populações, promovendo redução da produção agrícola, deslocamentos populacionais, colocando em evidência a segurança alimentar e a economia das comunidades (CASTRO; SANTOS, 2020).

### **2.2.1 Efeitos da salinidade do solo sobre plantas cultivadas**

Os problemas econômicos causados pela salinização do solo são difíceis de avaliar, pois a salinidade tem um efeito não linear na produtividade em determinado ambiente. Solos afetados com sais podem passar anos até começarem a apresentar problemas detectáveis de salinidade, podendo permanecer por anos em níveis moderados; entretanto, um acréscimo ainda que pequeno pode levar ao abandono de terras agrícolas em um curto período (PEDROTTI *et al.*, 2015).

A elevação na concentração salina pode acarretar limitações de crescimento e produtividade das culturas, em razão da redução do potencial osmótico no ambiente radicular e ocorrências simultâneas de toxicidade iônica e desequilíbrios nutricionais (LIMA *et al.*, 2018). Dessa forma, é comprometida uma série de processos, como síntese de proteínas, metabolismo de lipídios e fotossíntese (ESTEVES; SUZUKI, 2008).

Segundo Esteves e Suzuki (2008), consequências lesivas de elevada salinidade foram notadas em todas as partes da planta, provocando a morte ou diminuição da produtividade. Contudo, como em resposta aos danos provocados em decorrência do excesso de sal, muitas plantas ampliaram os mecanismos de tolerância por meio de exclusão e/ou compartimentalização de sais. Entretanto, a quantificação da tolerância à salinidade entre espécies correlacionadas é desafiadora em decorrência dos efeitos do estresse sobre o crescimento vegetal depender do tempo em que a planta estará exposta. Decorrido um breve

período de submissão ao estresse salino, espécies muito diferentes quanto à tolerância à salinidade podem apresentar diminuição similar de crescimento (WILLADINO; CAMARA, 2010).

### **2.2.2 Efeitos da salinidade sobre a estabilidade estrutural do solo**

Os Neossolos Flúvicos, classe do solo estudado nesta pesquisa, possuem grande aptidão agrícola, em função da sua localização na paisagem, ocorrendo naturalmente em áreas de várzea, com baixa suscetibilidade à erosão, possibilitando que a mecanização agrícola seja amplamente considerada. Entretanto, são solos que possuem como principal limitação o risco de inundação a que podem ser submetidos, propiciando a ocorrência de salinização e sodicidade (CUNHA et al., 2010), o que pode prejudicar a estrutura do solo, pois a adsorção de sódio pelos colóides do solo, decorrente de águas com elevados teores deste elemento, poderá acarretar a dispersão da fração de argila, logo, provocando a diminuição da permeabilidade do solo, seja à água ou ao ar (LIMA JUNIR; SILVA, 2010).

Altos teores de sais produzem variações nos atributos físicos e químicos do solo. Em solos com presença de sódio, ocorre a dispersão e modificação do estado de agregação das partículas, resultando em mudanças na estrutura, diminuindo a aeração, infiltração e condutividade hidráulica a índices inadequados para as plantas (CORDEIRO, 2001). De acordo com Gheyi *et al.*, (2016), o efeito dos sais sobre a estrutura do solo ocorre devido a interação eletroquímica existente entre os cátions e a argila. Também em decorrência da contração e expansão da argila, de acordo com o cátion que prevaleça na CTC, esta começa a se dispersar, acarretando problemas de permeabilidade por obstrução dos poros do solo. Sob essas condições, qualquer excesso de água provocará encharcamento na superfície do solo, inibindo a germinação de sementes e o crescimento das raízes das plantas, provocando deficiência na aeração do solo.

### **2.3 Biocarvão hidrotérmico: características e potencialidades para aplicação em solos agrícolas**

Estudiosos que viajaram pela Amazônia por volta da década de 1870 observaram manchas profundas de solo escuro, com alta fertilidade natural, condição não encontrada no solo de quase toda a região. Os solos amazônicos são altamente intemperizados, com baixa fertilidade, geralmente arenosos ou argilosos, com uma fina camada de húmus produzida pela floresta, ácidos, com baixa capacidade de troca catiônica (CTC), logo, pouco propícios para a

produção agrícola (REZENDE, 2011).

Essas manchas ficaram conhecidas como “Terra Preta”. Acredita-se que eram utilizadas por tribos e as áreas possuem como característica grandes manchas de terras enriquecidas com biomassa carbonizada (hoje cientificamente tratada como biocarvão) pelos agricultores. Evidências apontam que essas manchas possuam 7000 anos, com um teor três vezes maior de nitrogênio e potássio que os solos próximos e maior concentração de matéria orgânica. O biocarvão é mais resistente a degradação do que outras matérias orgânicas do solo devido a suas propriedades físicas e químicas, como a elevada densidade de cargas que propicia uma retenção de nutrientes muito maior, e a sua formação natural de partículas com estrutura química específica (NÓBREGA, 2011).

O termo biocarvão e carvão hidrotérmico é geralmente encontrado na literatura para designar materiais ricos em carbono obtido pela síntese de diversas biomassas, como estrume, bagaço de cana, madeiras (resto de poda) entre outros materiais. O *biochar* é produzido em recipiente hermeticamente fechado, sem oxigênio ou em baixas concentrações, e a temperaturas relativamente elevadas. Já o carvão hidrotérmico é produzido em um ambiente aquoso, em temperaturas mais baixas e com tempo maior de preparo (SOARES JÚNIOR, 2017).

A ação do biocarvão no solo está intrinsecamente ligada ao tipo de biomassa, tipo de pirólise, temperatura de queima e nível de oxigênio presente. Esses fatores reunidos vão determinar as propriedades físicas e químicas deste condicionador. A condição em que acontece a pirólise do material formado é um dos fatores mais relevantes do processo, pois esta etapa pode influenciar na estabilidade do biocarvão ao longo do tempo, bem como na sua capacidade de armazenar água, matéria orgânica natural e nutrientes no solo (SUN *et al.*, 2012).

De acordo com Rafiq *et al.* (2016), um dos fatores determinantes na característica do biocarvão é a temperatura, pois quando a biomassa é submetida a temperaturas baixas de queima o biocarvão tende a apresentar características físicas e químicas semelhantes às do material de origem, e, quando submetida a altas temperaturas as características são bem definidas e com baixa similaridade em relação ao material parental.

Quanto aos atributos físicos do solo, o biocarvão quando incorporado ao solo tem a capacidade de modificar a arquitetura porosa do solo, alterando a conectividade dos poros, formato e volume (YU *et al.*, 2018). Segundo Mollinedo *et al.* (2015) essa capacidade é propiciada pelo tamanho das partículas que ele pode apresentar. As partículas de menor diâmetro do biocarvão quando comparadas com as de tamanho maior tendem a ter maior contato com as partículas do solo e, assim, mais facilmente se misturam e formam agregados por meio da interação entre a área superficial das partículas do biocarvão com as partículas do

solo (minerais ou orgânicas), acarretando aumento da microporosidade, além de ocupar os espaços porosos entre as partículas de maior tamanho do solo (BLANCO-CANQUI, 2017; LIU et al., 2017).

O tamanho, forma e estrutura interna das partículas do biocarvão têm a capacidade de influenciar diretamente na porosidade do solo, melhorando o armazenamento de água. Ressalta-se que a estrutura interna do biocarvão apresenta porosidade, favorecendo o armazenamento adicional de água no solo (MASIELLO *et al.*, 2015).

Os biocarvões frequentemente elevam a capacidade de retenção de água do solo, principalmente em solos de textura arenosa, diminuindo a densidade e aumentando a porosidade, sobretudo em doses mais elevadas, proporcionando melhorias na infiltração de água nos solos, propensos à impermeabilização superficial. Esse aumento na permeabilidade resulta em diminuição nas taxas de escoamento superficial e erosão (JOSEPH *et al.*, 2021).

Outro aspecto que pode ser melhorado com o uso de biocarvão como condicionador é o sequestro de carbono em solos. Vale destacar que é importante pré-requisito para a utilização do biochar no sequestro de carbono que ele seja mais estável do que a biomassa não tratada e que não cause efeitos negativos na produtividade das culturas e na estrutura do solo (BAMMINGER; MARSCHNE; JÜSCHKE, 2014). Como o carbono presente na biomassa é facilmente degradado por microrganismos, é liberado na forma de gases de efeito estufa. Entretanto, se a biomassa for pirolisada, o carbono presente é transformado em produtos carbonados sólidos com alta quantidade de carbono estável em sua estrutura, assim, permanecendo mais tempo no solo, tornando o biocarvão uma ótima alternativa para o sequestro de carbono e mitigação dos gases de efeito estufa (SANTOS, 2021).

Outro fator que pode ser influenciado pelo uso do biocarvão é a microbiota do solo. Segundo Allohverdi *et al.* (2021), a incorporação de *biochar* no solo influencia beneficentemente as populações microbianas, favorecendo o seu desenvolvimento. Ao avaliar a saúde e a abundância de microrganismos no solo, o *biochar* demonstrou beneficiá-las das seguintes maneiras: por meio da porosidade, que fornece abrigo e o desenvolvimento de comunidades microbianas no interior dos seus poros, diminuição da toxicidade de metais pesados, além da alteração de propriedades físicas e químicas do solo, como agregação, fornecimento de nutrientes, formação de novos poros, aeração, melhoria na alcalinidade/acidez ( MUKHERJEE *et al.*, 2014; GOROVTSOV *et al.*, 2020).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Local de coleta do solo**

O solo utilizado no experimento, um Neossolo Flúvico, foi coletado em Pentecoste-CE, na Fazenda Experimental Vale do Curu, pertencente à Universidade Federal do Ceará.

#### **3.2 Montagem das amostras**

A coleta e montagem das amostras se deu com auxílio de moldes de PVC para garantir a preservação da estrutura do solo. O primeiro molde (coluna), com 0,15 m de diâmetro e 0,40 m de altura, foi colocado na superfície do solo; em seguida, fez-se escavação do solo de modo a esculpir uma coluna de solo com diâmetro tangenciando a dimensão interna do molde. Assim, ao passo em que a escavação era realizada, o molde de PVC era inserido cuidadosamente na coluna de solo. Após a conclusão da escavação, já com o molde de PVC delimitando a coluna de solo, prolongou-se a escavação por mais 10 cm - isso para garantir a retirada da coluna de solo sem alterar a sua estrutura na base.

Em seguida, o molde de PVC foi retirado e, em seu lugar, colocado o segundo molde, também de PVC, com 0,2 m de diâmetro e 0,50 m de altura. Este molde foi posicionado de modo a manter a coluna de solo esculpida no centro, definindo, assim, um vão livre entre ele e a coluna de solo. É importante relatar que este segundo molde era constituído por duas metades longitudinais de tubo de PVC, ligadas por presilhas com dobradiça – o que permitia a total abertura e fechamento ao longo do eixo longitudinal.

No vão entre o molde de PVC e a coluna de solo foi adicionado, para evitar fluxos preferenciais de água, um polímero termofixo resultante da reação de polimerização entre um polioli e isocianato. Os dois componentes eram misturados instantes antes da aplicação, formando uma massa reagente expansível que, ao ser colocada no vão livre, expandia e polimerizava, preenchendo perfeitamente a lacuna entre o molde de PVC e a coluna de solo. O processo de expansão/polimerização dura poucos minutos.

É necessário registrar que, antes de posicionar o segundo molde no centro da coluna de solo, ele tinha as paredes untadas com vaselina para evitar a adesão do polímero expandido. Adicionalmente, por ocasião da modelagem da coluna no campo, foram mantidos cerca de 10 cm do material moldante para além da superfície do solo a fim de possibilitar a posterior aplicação de água à superfície do solo quando do cultivo.

### 3.3 Instalação e condução do experimento em casa-de-vegetação

O experimento foi instalado em Fortaleza-CE, em casa-de-vegetação pertencente ao Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará, considerando o delineamento inteiramente aleatorizado em esquema fatorial  $5 \times 2 \times 2$  (cinco doses de hidrochar: 0, 5, 10, 20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup>; duas águas para a irrigação: salina e não salina; duas camadas de solo a serem analisadas na coluna: 0-0,1 m e 0,2-0,3 m), com quatro repetições, com o solo das colunas sendo cultivado com feijão-caupi [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.], totalizando 80 unidades de observação.

O hidrochar utilizado foi produzido de bagaço de caju, em reator supercrítico de 10 L, com preenchimento de 80% do seu volume considerando a relação de bagaço:água igual a 1:6 (m:v). O reator foi aquecido a 250 °C por 4 h e o hidrochar resultante foi seco à sombra.

Para simular a aplicação do hidrochar ao solo em condição de campo, em cada coluna fez-se a alteração do solo nos primeiros 15 cm (simulando uma aração seguida de gradagem) e, na sequência, a incorporação do hidrochar nas doses relatadas anteriormente (se procedeu a mistura a fim de garantir homogeneização do hidrochar nos 15 cm de solo). Em seguida, a umidade do solo nas colunas foi elevada à capacidade de campo e mantida a incubação por 30 dias.

Após o período de incubação, fez-se a semeadura do feijão-caupi em cada uma das colunas. Foram colocadas cinco sementes e, 10 dias após a germinação, manteve-se apenas uma planta por coluna de solo. A lâmina de água aplicada via irrigação nas unidades experimentais correspondeu à média histórica da quadra chuvosa registrada nos últimos trinta anos (1990-2020) na fazenda agrícola em que o solo foi coletado, de modo que, diariamente era aplicada uma lâmina de 5,75 mm de solução salina ou água destilada, a depender do tratamento, ao longo do período experimental.

A irrigação se deu com água destilada, sem adição de sais, e com água salina preparada considerando a diluição de cloreto de sódio (NaCl), cloreto de cálcio (CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O) e cloreto de magnésio (MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O) em água destilada na proporção de 7:2:1, respectivamente, levando, segundo Richards (1954), à classificação da água salina a C2 – água de salinidade média (com condutividade elétrica entre 0,25 e 0,75 dS m<sup>-1</sup> a 25 °C). A drenagem foi mantida livre em todas as colunas.

Ao final do experimento as colunas de solo foram desmontadas e, no centro das camadas de 0-0,1 m e de 0,2-0,3 m fez-se a coleta de agregados considerando duas faixas de diâmetros. Para a primeira faixa foram considerados os agregados com diâmetro variando entre 7,93 mm e 4,76 mm (para análise quanto à estabilidade em água); para a segunda faixa, entre

25 mm e 19 mm (para análise quanto à resistência tênsil). Os agregados foram secos ao ar antes do procedimento analítico.

### 3.4 Estabilidade de agregados

A estabilidade de agregados foi determinada seguindo o método por via úmida para mensurar a quantidade e distribuição do tamanho dos agregados que são estáveis em água, e relacioná-los com os que não se desintegram mediante o processo de tamisação (KEMPER; ROSENAU, 1986).

A tamisação das amostras foi realizada utilizando um oscilador elétrico vertical, contendo dois conjuntos de peneiras com as respectivas malhas de abertura 4,76; 2,0; 1,0; 0,5 e 0,25 mm. A massa de agregados em cada peneira foi expressa em cinco classes de diâmetro (7,93-4,76 mm, 4,76-2,00 mm, 2,00-1,00 mm, 1,00-0,50 mm e 0,50-0,25 mm), o que permitiu estimar a percentagem de agregados estáveis em cada classe e na amostra, de acordo com as Equações 1 e 2, respectivamente,

$$\% \text{ de agregados estáveis por classe} = [(M_a - M_p) / M_s - M_w - \Sigma M_p] \times 100, \quad (1)$$

$$\% \text{ de agregados estáveis na amostra} = [(\Sigma M_a - \Sigma M_p) / M_s - M_w - \Sigma M_p] \times 100, \quad (2)$$

em que  $M_a$  corresponde à massa de agregados aparentes na classe,  $M_p$  à massa de partículas primárias na classe,  $M_s$  à massa da amostra original antes do tamisamento e  $M_w$  à massa de água na amostra inicial de agregados.

O diâmetro médio ponderado (DMP), considerado um índice de agregação do solo (VAN BAVEL, 1949), foi calculado considerando o somatório dos produtos entre o diâmetro médio ( $X_i$ ) e a fração ( $W_i$ ) de agregados estáveis em cada classe, Equação 3,

$$DMP = \Sigma(X_i \cdot W_i). \quad (3)$$

### 3.5 Resistência tênsil de agregados

Foram utilizados agregados com diâmetro entre 19 mm e 25 mm (ALMEIDA, 2009). De cada coluna de solo foram coletados seis agregados, sendo três em cada camada de 0-0,1 m e três na camada de 0,2-0,3 m, totalizando 240 agregados. Cada agregado de solo teve sua massa medida em balança analítica e, terminado este procedimento, foram realizados os ensaios de resistência tênsil utilizando um atuador eletrônico linear a uma velocidade constante

de  $0,03 \text{ mm s}^{-1}$  (TORMENA *et al.*, 2008).

A resistência tênsil em solo seco foi medida em instrumento portátil, TS-Soil (OLIVEIRA *et al.*, 2021), utilizando célula de carga com capacidade de suporte até 50 kgf. Cada agregado foi individualmente colocado na posição mais estável entre duas placas metálicas: uma inferior, fixa à base do equipamento, e outra superior móvel que liga à extremidade da célula de carga do atuador eletrônico linear.

O valor da carga empregada para a ruptura tênsil foi registrado por um sistema eletrônico de aquisição de dados. Depois de cada procedimento de ruptura, uma porção da amostra do agregado teve sua massa mensurada em balança analítica para, posteriormente, ser submetida à secagem em estufa a  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  até massa constante, para cálculo do teor de água no agregado de solo. A resistência tênsil (RT) foi estimada, segundo Dexter e Kroesbergen (1985), considerando a Equação 4,

$$RT = (0,576 P)/D^2 10^3, \quad (4)$$

em que RT é a resistência tênsil de agregados (kPa), 0,576 a constante de proporcionalidade da relação entre o estresse compressivo aplicado e o estresse tênsil gerado no interior do agregado, P a força aplicada (N), e D o diâmetro efetivo do agregado (m). O diâmetro efetivo do agregado foi mensurado pela Equação 5 (WATTS; DEXTER, 1998),

$$D = D_m (M/M_o)^{0,333}, \quad (5)$$

uma vez que  $D_m$  é o diâmetro médio dos agregados  $[(19 + 25)/2]$ , em mm], explicado pela média dos tamanhos da abertura das peneiras, M a massa do agregado individual seco a  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  (g), e  $M_o$  a massa média dos agregados secos a  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  (g).

### 3.6 Análise dos dados

Os dados foram submetidos à análise de variância (Teste F) e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância, com auxílio do software ASSISTAT 7.7 (SILVA e AZEVEDO, 2016), considerando, como relatado anteriormente, o delineamento inteiramente aleatorizado em esquema fatorial  $5 \times 2 \times 2$  (cinco doses de hidrochar: 0, 5, 10, 20 e  $40 \text{ Mg ha}^{-1}$ ; duas águas para a irrigação: salina e não salina; duas camadas de solo a serem analisadas na coluna: 0-0,1 m e 0,2-0,3 m), com quatro repetições, totalizando 80 unidades de observação.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve efeito significativo de doses de biocarvão, salinidade da água de irrigação (salina e não salina) e posições na coluna de solo (superfície, 0-0,1 m; e subsuperfície, 0,2-0,3 m), Tabela 1, sobre a estabilidade de agregados em água pelo teste F a 1% de significância. Também foi possível observar diferença estatística significativa pelo teste F a 1% na interação doses e salinidade da água de irrigação, além de haver diferença estatística a 5% de significância para a interação doses e posição na coluna de solo. A interação doses, salinidade e posição não foi significativa.

Tabela 1. Resumo da análise de variância para os dados de estabilidade de agregados (diâmetro médio ponderado) em função de doses de biocarvão, salinidade da água de irrigação e posição na coluna de solo.

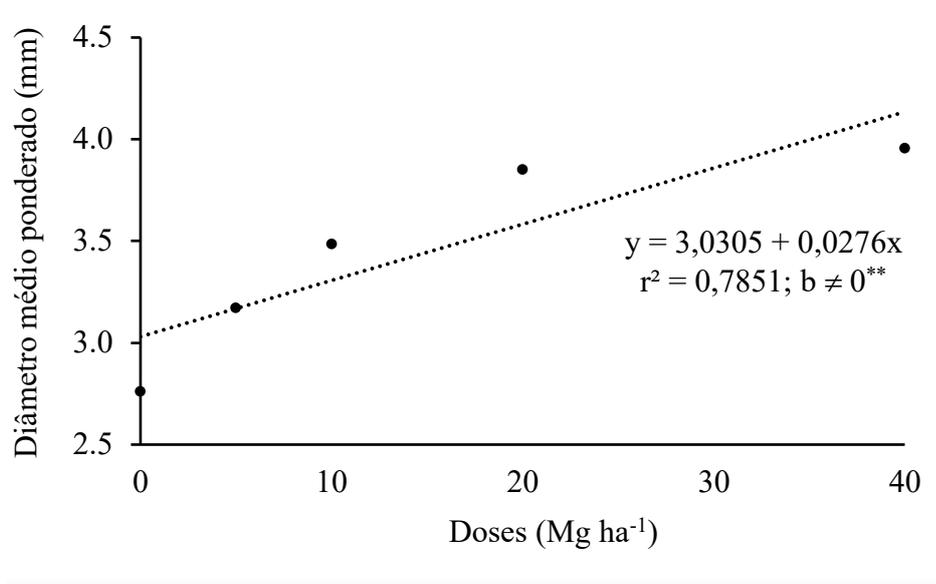
Fontes de variação	GL	SQ	QM	F
Doses de biocarvão	4	15,53621	3,8845	10,4981**
Salinidade da água de irrigação	1	6,55641	6,55641	17,7212**
Posição na coluna de solo	1	65,13880	65,13880	175,0626**
Doses x Salinidade	4	15,87836	3,96959	10,7293**
Doses x Posição	4	3,74741	0,93685	2,5322*
Salinidade x Posição	1	0,29263	0,29263	0,7910 <sup>ns</sup>
Doses x Salinidade x Posição	4	3,01286	0,75321	2,0358 <sup>ns</sup>
Tratamentos	19	110,16268	5,79804	15,6714**
Resíduo	60	22,19851	0,36998	
Total	79	132,36119		

Fonte: elaborado pelo autor.

\*Significativo a 5% de probabilidade. \*\*Significativo a 1% de probabilidade. <sup>ns</sup>Não significativo.

Houve aumento do diâmetro médio ponderado (DMP) com o aumento das doses de biocarvão (Figura 1), com modelo linear bem ajustado aos dados experimentais observados. O coeficiente angular apresentou-se significativo a 1% de probabilidade, portanto  $b \neq 0$ , indicando que as variações do DMP são explicadas em cerca de 78,5% por variação nas doses de biocarvão (coeficiente de determinação da regressão linear,  $r^2$ , igual a 0,7851). O aumento do DMP está relacionado com a maior quantidade de agregados retida nas peneiras com malhas de maior diâmetro de abertura, ou seja, a quantidade de agregados estáveis retida nas peneiras com maior abertura de malha é indicativa de agregados de maior diâmetro com alta estabilidade em água (WIECHETECK, 2021).

Figura 1. Regressão linear entre diâmetro médio ponderado e doses de biocarvão hidrotérmico (\*\* significativo a 1% de probabilidade).

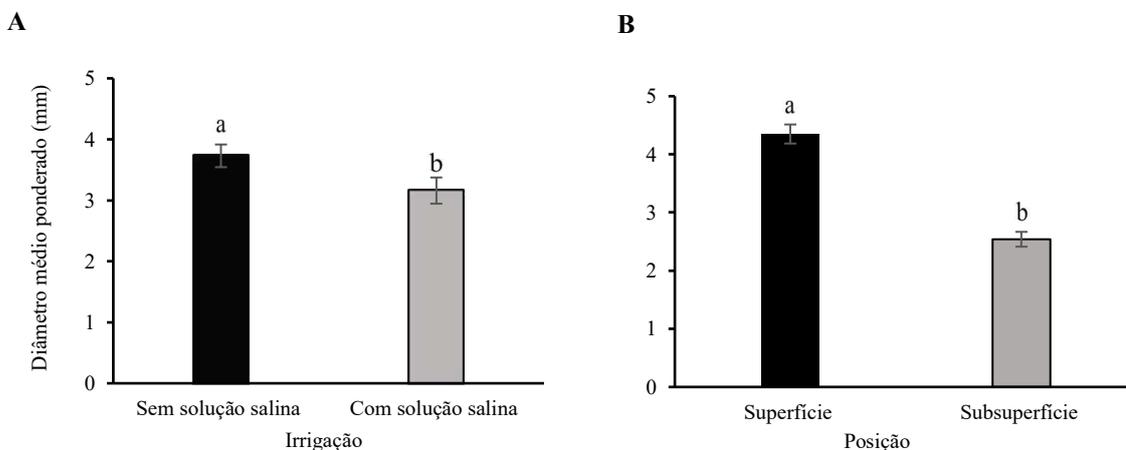


Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base nos resultados observados, constata-se que a aplicação do biocarvão, por favorecer o aumento do diâmetro médio ponderado, resulta em melhoria da qualidade física do solo, já que a estabilidade de agregados está relacionada com a resiliência estrutural do solo e sua potencialidade em propiciar ambiente favorável a boa produtividade agrícola, visto que são melhoradas as condições de penetração das raízes, de equilíbrio da temperatura do solo e de a difusão de gases, de infiltração e armazenamento de água (HARTLEY; RIBY; WATERSON, 2016), benefícios decorrentes da maior quantidade de macroagregados.

O diâmetro médio ponderado foi menor nos solos que foram irrigados com solução salina (Figura 2A), fato que pode estar relacionado com o efeito da troca de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  por  $\text{Na}^+$  nos locais de troca catiônica, acarretando a dispersão das partículas do solo (XIE *et al.*, 2020), tendo em vista que a estrutura do solo é amplamente impactada pela salinidade do solo e que os sais possuem efeitos complexos nos processos de formação e destruição de agregados do solo (TANG; SHE; WANG, 2020).

Figura 2. Diâmetro médio ponderado em função da salinidade da água de irrigação (A) e da posição na coluna de solo (B). Em cada figura, médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

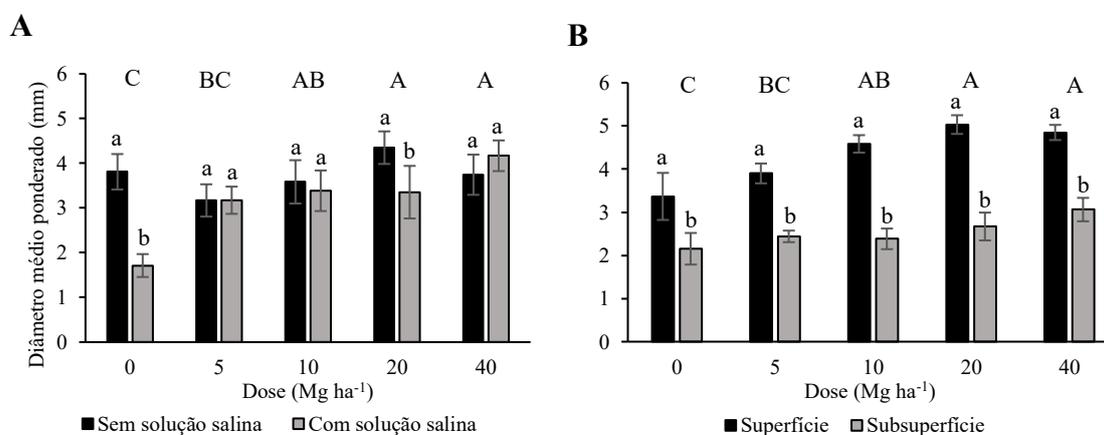


Fonte: Elaborada pelo autor.

Os agregados presentes na superfície da coluna de solo (0-0,1 m) apresentaram diâmetro médio ponderado superior aos da subsuperfície (0,2-0,3 m), figura 2B, o que evidencia efeitos benéficos da matéria orgânica que já estava naturalmente na superfície do solo e do biocarvão que foi aplicado na camada mais superficial. Dado este resultado, ficou evidenciada a pouca ou nenhuma mobilidade do biocarvão às camadas mais profundas do solo visto que não houve efeito mitigador deste sobre os sais em subsuperfície (camada de 0,2-0,3 m) – mas isso não exclui a possibilidade de haver mobilidade do biocarvão em solos mais arenosos e com boa conectividade entre poros de maior tamanho.

Foi constatada diferença significativa do DMP no tratamento controle e a dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup>, com os maiores valores médios nos tratamentos com irrigação sem solução salina (Figura 3A). Observou-se redução no DMP quando o solo foi submetido à irrigação com solução salina na ausência de biocarvão, e que a adição do biocarvão hidrotérmico resultou em aumento do DMP nos solos irrigados com solução salina. É possível observar na Figura 3B que houve diferenças estatísticas, segundo o teste de Tukey a 5% de significância, entre o DMP dos agregados coletados em superfície (0-0,1 m) e subsuperfície (0,2-0,3 m) para todas as doses aplicadas, com os maiores valores de DMP sendo constatados na camada mais superficial do solo, resultado associado à maior quantidade de matéria orgânica presente nessa camada do solo e à incorporação do biocarvão.

Figura 3. Interação entre doses de biocarvão e salinidade de água de irrigação (A) e doses de biocarvão e posição na coluna de solo (B) para o diâmetro médio ponderado de agregados. Médias seguidas pela mesma letra minúscula em cada dose de biocarvão, e mesma letra maiúscula entre as doses de biocarvão, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Fonte: elaborada pelo autor.

Com a análise de variância para os dados de resistência tênsil (Tabela 2) foi possível observar diferença estatística significativa pelo teste F a 1% de probabilidade para os tratamentos e interações entre eles. O teste F não foi aplicado para o tratamento doses de biocarvão visto se tratar de variável quantitativa. Adicionalmente, é importante ressaltar que a análise de regressão não evidenciou significância para as doses de biocarvão aplicadas.

Tabela 2. Resumo da análise de variância para os dados de resistência tênsil em função de doses de biocarvão, salinidade da água de irrigação e posição na coluna de solo.

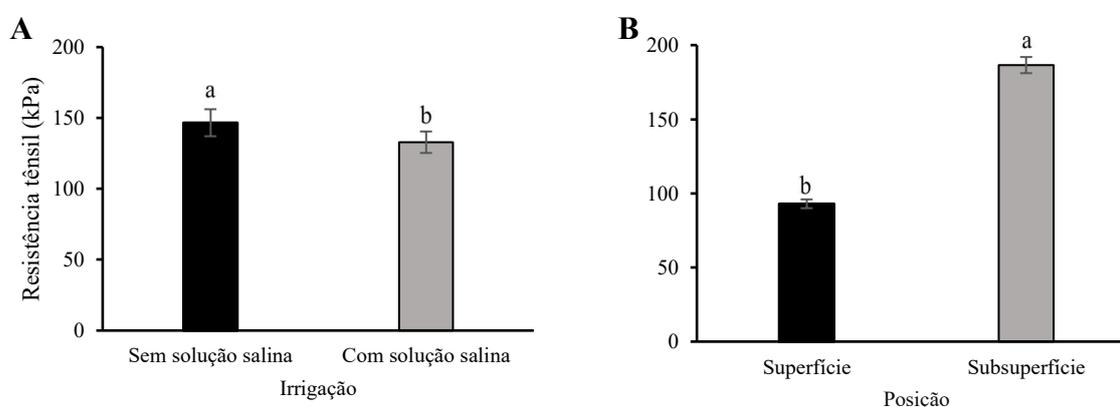
Fontes de variação	GL	SQ	QM	F
Doses de biocarvão	4	614,98968	153,7474	0,4750 <sup>ns</sup>
Salinidade da água de irrigação	1	3782,29713	3782,2971	11,6865 <sup>**</sup>
Posição na coluna de solo	1	175042,88794	175042,8879	540,8454 <sup>**</sup>
Doses x Salinidade	4	12048,26249	3012,0656	9,3066 <sup>**</sup>
Doses x Posição	4	12013,25058	3003,3126	9,2796 <sup>**</sup>
Salinidade x Posição	1	3640,25292	3640,2529	11,2476 <sup>**</sup>
Doses x Salinidade x Posição	4	8622,56096	2155,6402	6,6605 <sup>**</sup>
Tratamentos	19	215764,50170	11356,02641	35,0877 <sup>**</sup>
Resíduo	60	19418,80948	323,64682	
Total	79	132,36119		

Fonte: elaborado pelo autor.

\*Significativo a 5% de probabilidade. \*\*Significativo a 1% de probabilidade. <sup>ns</sup>Não significativo.

A resistência tênsil foi maior em condições de irrigação sem solução salina (Figura 4A) e os agregados presentes na superfície apresentaram resistência tênsil inferior aos da subsuperfície (Figura 4B). A resistência tênsil pode ser influenciada por uma série de fatores, como teor de argila e mineralogia, teor de argila dispersa e matéria orgânica do solo. Nessa perspectiva, as maiores quantidades de matéria orgânica na superfície do solo favorecem maior porosidade do agregado, o que resulta em diminuição do número de ligações entre as partículas e, portanto, se a força destas ligações não for incrementada, ocorre redução da resistência tênsil (TORMENA; FIDALSKI; JUNIOR, 2008).

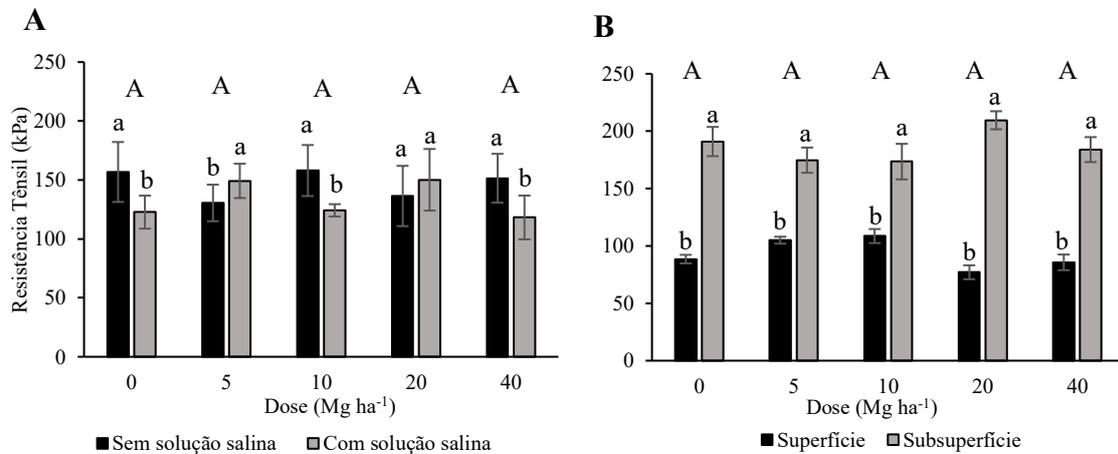
Figura 4. Resistência tênsil de agregados em função da salinidade da água de irrigação (A) e da posição na coluna de solo (B). Em cada figura, médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A condição de irrigação sem solução salina foi a que apresentou maior resistência tênsil para todas as doses (Tabela 5A), com exceção da dose de 5 Mg ha<sup>-1</sup> que apresentou menor resistência tênsil em irrigação com solução salina, segundo o teste de Tukey a 5% de significância. A posição subsuperfície apresentou maiores valores de resistência tênsil em todas as doses de biochar incorporadas ao solo (Tabela 5B). Uma explicação, seja em condição natural do solo ou com a incorporação do biocarvão na superfície do solo por ocasião da aração, é a 'não ou pouca mobilidade do biocarvão por entre os poros do solo estudado, fazendo com que este não tenha chegado na camada mais subsuperficial do solo (0,2-0,3 m), e, assim, não ter ocorrido sua interação com as partículas minerais do solo.

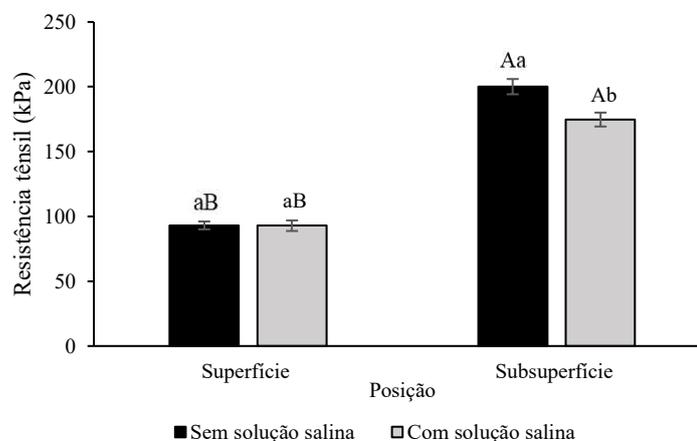
Figura 5. Interação entre doses de biocarvão e salinidade de água de irrigação (A) e doses de biocarvão e posição na coluna de solo (B) para a resistência tênsil de agregados. Médias seguidas pela mesma letra minúscula em cada dose de biocarvão, e mesma letra maiúscula entre as doses de biocarvão, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Não houve diferenças estatísticas para a resistência tênsil na superfície (0-0,1 m) em decorrência das soluções de irrigação (água salina e não salina). Por outro lado, em subsuperfície (0,2-0,30 m) as irrigações com solução salina resultaram em menor resistência tênsil de agregados (Figura 6). A comparação dos dados segundo o teste de Tukey a 5% de significância evidenciou agregados com menor resistência tênsil em superfície, o que pode ser explicado pelos efeitos benéficos já relatados da matéria orgânica presente na superfície do solo e biocarvão incorporado como tratamento.

Figura 6. Interação entre salinidade da água de irrigação e posição na coluna de solo para a resistência tênsil de agregados. Médias seguidas pela mesma letra minúscula em cada posição na coluna de solo, e mesma letra maiúscula em cada concentração salina da água de irrigação entre as posições, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base nos dados da Tabela 3, os menores valores de resistência tênsil foram observados para os agregados coletados na superfície do solo (camada de 0-0,1 m) independentemente da salinidade da água de irrigação, fato atribuído aos efeitos benéficos do biocarvão aplicado como tratamento e à matéria orgânica já presente na superfície do solo. Ferreira *et al.* (2011) encontraram relação linear da resistência tênsil de agregados com a quantidade de matéria orgânica no solo, indicando aumentos proporcionais à redução dos teores de C orgânico, condição que é encontrada em subsuperfície quando comparada à superfície do solo.

Adicionalmente, apesar de não ter havido efeito significativo de doses de biocarvão sobre a resistência tênsil de agregados, constatou-se efeito benéfico do hidrochar na camada superficial do solo quando irrigado com água salina – com redução significativa da resistência tênsil – evidenciando efeito mitigador sobre os sais.

Tabela 3. Interação entre doses de biocarvão, salinidade da água de irrigação e posição na coluna de solo para a resistência tênsil de agregados. Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúsculas na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Doses	Resistência Tênsil (kPa)			
	Sem solução salina x Superfície	Sem solução salina x Subsuperfície	Com solução salina x Superfície	Com solução salina x Subsuperfície
0 Mg ha <sup>-1</sup>	90,56 aC	222,99 aA	86,48 abC	158,93 bcB
5 Mg ha <sup>-1</sup>	98,94 aB	162,09 bA	111,06 aB	187,40 abA
10 Mg ha <sup>-1</sup>	102,56 aB	213,41 aA	114,64 aB	133,55 cB
20 Mg ha <sup>-1</sup>	71,65 aB	201,11 aA	82,43 abB	217,88 aA
40 Mg ha <sup>-1</sup>	101,79 aC	201,13 aA	69,59 bcC	166,75 bcB

Fonte: elaborada pelo autor.

## 5 CONCLUSÕES

A aplicação de hidrochar produzido do bagaço de caju ao solo contribui para aumentar a estabilidade de agregados em água, sendo a dose de 40 Mg ha<sup>-1</sup> a mais efetiva.

O hidrochar é eficiente na redução dos efeitos nocivos do acúmulo de sais sobre a estabilidade de agregados do solo cultivado com feijão-caupi e irrigado com água salina.

Apesar de não ter sido constatado efeito de doses de biocarvão sobre a resistência tênsil de agregados, os efeitos benéficos de sua aplicação foram identificados ao mitigarem os efeitos danosos da salinidade na camada superficial do solo.

## REFERÊNCIAS

- ALLOHVERDI, T.; MOHANTY, A. K.; ROY, P.; MISRA, M. A review on current status of biochar uses in agriculture. **Molecules**, 2021.
- ALMEIDA, B.G.; SILVA, A.P.; RAINE, S.R.; FIGUEIREDO, G.C. Evaluation of automotive varnish as a coating for density measurements of soil clods. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, p. 449-452, 2009.
- BAMMINGER, C.; MARSCHNER, B.; JÜSCHKE, E. An incubation study on the stability and biological effects of pyrogenic and hydrothermal biochar in two soils. **European Journal of Soil Science**, v. 65, n. 1, p. 72–82, 2014.
- BLANCO-CANQUI, H. Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. **Science Society of America Journal**, v. 81, p. 687-711, 2017.
- CASTRO, F. C.; SANTOS, A. M. DOS. Salinity of the soil and the risk of desertification in the semiarid region. **Mercator**, v. 19, n. 1, p. 1–13, 2020.
- CORDEIRO, G. G. Salinidade em áreas irrigadas. EMBRAPA Semi-Árido, Petrolina/PE, N° 51, 2001.
- CUNHA, T. J. F.; PETRERE, V. G.; SILVA, D. J.; MONTEIRO, A.; MENDES, S.; MELO, R. F.; OLIVEIRA NETO, M. B. DE; SILVA, M. S. L.; ALVAREZ, I. A. Principais solos do Semiárido tropical brasileiro: caracterização, potencialidades, limitações, fertilidade e manejo. In: SA, I. B.; SILVA, P. C. G. da. (Ed.). *Semiárido Brasileiro: Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação*. p.49-88. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010.
- DEXTER, A.R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v. 31, p. 139-147, 1985.
- ESTEVES, B. S.; SUZUKI, M. S. Efeito da salinidade sobre as plantas. **Oecologia Brasiliensis.**, 12 (4): 662-679, 2008.
- FERREIRA, A. O.; SÁ, J. C. M.; GIAROLA, N. F. B. G.; HARMS, M. G.; MIARA, S.; BAVOSO, M. A.; BRIEDIS, C.; NETTO, C. Q. Variação na resistência tênsil de agregados em função do conteúdo de carbono em dois solos na região dos campos gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35:437-445, 2001.
- FREIRE FILHO, F.R.; RIBEIRO, V.Q.; ROCHA, M. M.; SILVA, K.J.D.; NOGUEIRA, M.S.R.; RODRIGUES, E.V. FeijãoCaupi no Brasil: produção, melhoramento genético, avanços e desafios. Embrapa Meio Norte, Teresina, 84 p. 2011.
- GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. Manejo da salinidade na agricultura: Estudo básico e aplicados / 2.ed. Fortaleza, **INCTSal**, 2016.
- GOROVTSOV, A. V.; MINKINA, T. M.; MANDZHIEVA, S. S.; PERELOMOV, L. V.; SOJA, G.; ZAMULINA, I. V.; RAJPUT, V. D.; SUSHKOVA, S. N.; MOHAN, D.; YAO, J. The mechanisms of biochar interactions with microorganisms in soil. **Environmental**

**Geochemistry and Health**, v. 42, n. 8, p. 2495–2518, 2020.

HARTLEY, W.; RIBY, P.; WATERSON, J. Effects of three different biochars on aggregate stability, organic carbon mobility and micronutrient bioavailability. W. Hartley et al. / **Journal of Environmental Management**, 181, 770-778, 2016.

HOLANDA, A. C. **Desenvolvimento inicial de espécies arbóreas em ambiente degradado por saís**. 2006. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Centro de Saúde e Tecnologia Rural, Universidade Federal de Campinas, Patos, 2006.

Instituto Brasileiro de Feijão e Pulses – IBRAFE. **Cenário brasileiro do Feijão-caupi**. 2022. Disponível em: <https://www.ibrafe.org/artigo/cenario-brasileiro-do-feijao-caupi>. Acessado em: 19 de novembro de 2023.

JOSEPH, S.; COWIE, A.L.; VAN ZWIETEN, L.; BOLAN, N.; BUDAI, A.; BUSS, W.; CAYUELA, M.L.; GRABER, E.R.; IPPOLITO, J.A.; KUZYAKOV, Y.; LUO, Y.; OK, Y.S.; PALANSOORIYA, K.N.; SHEPHERD, J.; STEPHENS, S.; WENG, Z.; LEHMANN, J. How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. **GCB Bioenergy**, 2021.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.) *Methods of soil analysis. Part I. Physical and mineralogical methods*. Madison, WI: **Soil Science Society of America**, 1986. p. 425-442. (Agronomy Monograph N. 9).

LIMA, G. S.; DIAS, A. S.; GHEYI, H. R.; ANJOS SOARES, L. A.; ANDRADE, E. M. G. Saline water irrigation and nitrogen fertilization on the cultivation of colored fiber cotton. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 1, p. 151–160, 2018.

LIMA JUNIOR, J.; SILVA, A. L. Estudo do processo de salinização para indicar medidas de prevenção de solos salinos. **Enciclopedia Biosfera**, v. 6, n. 11, 2010.

LIU, Z.; DUGAN, B.; MASIELLO, C. A.; GONNERMANN, H. M. Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. **PLoS ONE**, v. 12, n. 6, 1 jun. 2017.

MASIELLO, C., DUGAN, B., BREWER, C., SPOKAS, K., NOVAK, J., LIU, Z., SORRENTI, G. Biochar effects on soil hydrology. In: Lehmann, J., JOSEPH, S. editors. **Biochar for Environmental Management Science, Technology and Implementation**. 2. ed. London, UK: Routledge. p.541-560. 2015.

MEDEIROS, J. E. **Caracterização Morfológica, Agronômica e análise multivariada de genótipos de feijão-caupi**. 2018. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Melhoramento Genético de Plantas) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2018.

MOLLINEDO, J.; SCHUMACHER, T. E.; CHINTALA, R. Influence of feedstocks and pyrolysis on biochar's capacity to modify soil water retention characteristics. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 114, p. 100–108, 2015.

MUKHERJEE, A.; ZIMMERMAN, A. R.; HAMDAN, R.; COOPER, W. T. Physicochemical changes in pyrogenic organic matter (biochar) after 15 months of field aging. **Solid Earth**, v.

5, n. 2, p. 693–704, 2014.

OLIVEIRA, A. M. C. DE; MELO NETO, B.; ROCHA, M. DE M.; SILVA, M. R. DA; OLIVEIRA, M. R. DE. Produção de alimentos na base do feijão-caupi (*Vigna unguiculata*): importância nutricional e benefícios para a saúde. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 14, 2021.

OLIVEIRA, L.S.; QUEIROZ, A.S.; LOPES, A.S.; SILVA, F.G.; MOTA, J.C.A. Forma e diâmetro de agregados como fontes de variação na resistência tênsil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 16, p. 117-121, 2021.

NÓBREGA, I. P. C. **Efeitos do Biochar nas propriedades físicas e químicas do solo**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.

PEDROTTI, A.; CHAGAS, R. M.; RAMOS, V. C.; PRATA, A. P. N.; LUCAS, A. A. T.; SANTOS, P. B. Causas e consequências do processo de salinização dos solos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria**, v. 19, n. 2, maio-ago. 2015, p. 1308-1324.

RAFIQ, M. K.; BACHMANN, R. T.; RAFIQ, M. T.; SHANG, Z.; JOSEPH, S.; LONG, R. L. Influence of pyrolysis temperature on physico-chemical properties of corn stover (zea mays l.) biochar and feasibility for carbon capture and energy balance. **PLoS ONE**, v. 11, n. 6, 2016.

REZENDE, E. I. P.; ANGELO, L. C.; SANTOS, S. S. DOS; MANGRICH, A. S. Biochar & carbon sequestration. **Revista Virtual de Química**, v. 3, n. 5, p. 426–433, 2011.

SANTOS, E. B. Biocarvão (biochar): alternativa potencial para sequestro de carbono no solo e mitigação de gases do efeito estufa. 2021. **Bocaina**. Disponível em: <https://biologiadaconservacao.com.br/cienciaemacao-biocarvao> .Acessado em: 19 de novembro de 2023.

SILVA, F.A.S.; AZEVEDO, C.A.V. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research**, v.11, n.39, p.3733-3740, 2016.

SOARES JÚNIOR, F. H. **Carbonização hidrotérmica para a obtenção de sistemas inorgânicos-carbono: compósitos magnéticos e carbono hidrotérmico contendo nutrientes**. 2017. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SOUZA, D. B. **Acondicionamento de sementes de feijão caupi em diferentes embalagens**. Monografia (Bacharelado em Agronomia) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Petrolina, 2017.

SUN, H.; HOCKADAY, W. C.; MASIELLO, C. A.; ZYGOURAKIS, K. Multiple controls on the chemical and physical structure of biochars. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 51, n. 9, p. 1587–1597, 2012.

SILVA, K.J.D. Estatísticas da produção. In: Estatísticas da produção. Embrapa Meio-Norte,

20 dez. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao-caupi/pre-producao/socioeconomia/estatisticas-da-producao#:~:text=No%20Brasil%2C%20historicamente%2C%20a%20produ%C3%A7%C3%A3o,que%20favorecem%20o%20cultivo%20mecanizado>. Acesso em: 17 out. 2023.

TANG, S.; SHE, D.; WANG, H. Effect of salinity on soil structure and soil hydraulic characteristics. **Canadian Journal of Soil Science**. 101: 62–73, 2021.

TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; JUNIOR, W. R. Resistência tênsil e friabilidade de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:33-42, 2008.

VAN BAVEL, C. H. M. Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 14, n. 1, p. 20-23, 1949.

XIE, W.; CHENB, Q.; WUC, L.; YANGA, H.; XUA, J.; ZHANGA, Y. Coastal saline soil aggregate formation and salt distribution are affected by straw and nitrogen application: A 4-year field study. **Soil & Tillage Research**, 198, 2020.

WATTS, C.W.; DEXTER, A.R. Soil Friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, v. 49, p. 73-84, 1998.

WALTER, J.; LÜCK, E.; BAURIEGEL, A.; FACKLAM, M.; ZEITZ, J. Seasonal dynamics of soil salinity in peatlands: A geophysical approach. **Geoderma**, v. 310, p. 1–11, 2018.

WIECHETECK, L. H. **Biocarvão e calcário como condicionadores de solos cultivados**. Tese (Doutorado em Agronomia – Área de Concentração: Agricultura) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2021.

WILLADINO, L.; CAMARA, T. R. Tolerância das plantas à salinidade: aspectos Fisiológicos e Bioquímicos. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer** - Goiânia, vol.6, N.11; 2010. Pág.2-23.

YU, X.; LU, S. Reconfiguration of macropore networks in a silty loam soil following biochar addition identified by X-ray microtomography and network analyses. **European Journal of Soil Science**, v. 70, n. 3, p. 591–603, 2019.