

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Caracterização de propriedades físico-hídricas de solo condicionado com
biochar de cana-de-açúcar**

Ícaro Monteiro Galvão

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

**Piracicaba
2023**

Ícaro Monteiro Galvão
Engenheiro Agrônomo

**Caracterização de propriedades físico-hídricas de solo condicionado com biochar
de cana-de-açúcar**

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JARBAS HONORIO DE MIRANDA**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Galvão, Ícaro Monteiro

Caracterização de propriedades físico-hídricas de solo condicionado com biochar de cana-de-açúcar / Ícaro Monteiro Galvão. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2023.

58 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Curva de retenção 2. Biocarvão 3. Bagaço-de-cana 4. Torta de filtro I. Título

DEDICATÓRIA

Dedico à minha querida avó Edna (in memoriam)
que sempre sonhou junto comigo com esse momento
mas infelizmente se foi antes de concretizar, mas sei que de onde
quer que esteja estará comemorando.
Obrigado por todo amor e apoio em todos os momentos Vó,
TE AMO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” campus da Universidade de São Paulo pela oportunidade de aprendizado profissional e estrutura fornecida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de doutorado.

À FAPESP pela disponibilização de verba para fabricação do biochar utilizados nesta pesquisa (Projeto FAPESP n. 2018/10164-4).

Ao professor Jarbas, que além de orientador se tornou um grande amigo durante essa trajetória. Muito obrigado pelo apoio, ensinamentos e compreensão durante esses anos. Sabemos que não foi fácil chegar até aqui, tendo passado por quase dois anos de pandemia e restrições de acesso a estrutura da universidade, mas sabemos que fizemos o melhor que foi possível dentro das adversidades.

A todos os professores da Pós-graduação no qual tive oportunidade de ser aluno, agradeço todos os momentos e conhecimentos compartilhados. Agradecimento especial ao professor Paulo Sentelhas, que infelizmente perdeu a batalha contra a COVID 19, pelo exemplo de profissional, amor pelo ensino e pela orientação na confecção de um artigo resultante de um trabalho de sua disciplina.

Agradeço ao professor Paulo Libardi e suas orientadas Thaís, Aline e Tamires pela amizade, momentos de descontração e principalmente no apoio nas análises de laboratório. Agradecimento especial à Thaís pela ajuda na análise dos dados.

Aos técnicos do laboratório de física do solo do departamento de engenharia de biosistemas, Gilmar e Paulinha pelo apoio em diferentes etapas do projeto.

Aos membros da banca por aceitar o convite e pelas sugestões que serão de grande importância na confecção de artigos de impacto.

Agradeço aos colegas do grupo GPEAS pela amizade e trocas de experiências durante esses anos.

Aos colegas da república Xibiu pela amizade, conversas aleatórias desde estatística até política, almoços, churrascos e todos os momentos de descontração.

Aos amigos que fiz na cidade de Piracicaba.

Um agradecimento especial a toda minha família e amigos que sonharam juntos comigo pela finalização de mais essa etapa na minha vida profissional. Sem o apoio e amor de vocês com certeza o caminho seria bem mais difícil.

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS.....	10
1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1. Cultivo de cana-de-açúcar: uso de resíduos e possíveis impactos.....	13
2.2. Biochar.....	14
2.2.1. Definições do biochar.....	14
2.2.2. Efeitos do biochar nas propriedades físico-química e biológica dos solos.....	15
2.2.3. Efeito do biochar nas propriedades físico-hídricas e retenção de água no solo	15
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
3.1. Local do experimento.....	17
3.2. Material de solo	17
3.3. Preparo do biochar	18
3.4. Caracterização físico-química do biochar.....	18
3.5. Determinação da capacidade de retenção de água pelo biochar (CRA %).....	20
3.6. Arranjo experimental: tratamentos e dosagens do biochar.....	20
3.7. Caracterização físico-hídrica do solo condicionado por biochar.....	21
3.7.1. Densidade do solo e densidade de partículas	21
3.7.2. Condutividade hidráulica do solo saturado	21
3.7.3. Porosidade total do solo.....	22
3.7.4. Curva de retenção de água no solo	23
3.7.5. Distribuição de poros e curvas de frequência de raios	25
3.7.6. Qualidade físico-hídrica dos solos condicionados por biochar	26
3.8. Análise dos resultados	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1. Caracterização físico-química do biochar.....	29
4.2. Variáveis físicas dos solos corrigidos com biochar de cana-de-açúcar	33
4.2.1. Densidade de partículas (Dp)	33
4.2.2. Densidade do solo.....	34

4.2.3. Porosidade do solo.....	35
4.2.4. Capacidade de aeração e armazenamento de água no solo.....	37
4.2.5. Espaço poroso preenchido por água.....	38
4.2.6. Condutividade hidráulica do solo saturado.....	39
4.2.7. Curva de retenção e água disponível no solo.....	39
5. CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS.....	55

RESUMO

Caracterização de propriedades físico-hídricas de solo condicionado com biochar de cana-de-açúcar

A demanda por tornar a cadeia produtiva do setor sucroenergético mais sustentável, exige um melhor aproveitamento de alguns resíduos gerados durante o processamento da cana-de-açúcar, tais como: bagaço de cana-de-açúcar e a torta de filtro. Uma alternativa é a transformação desses resíduos em biochar, com grande potencial para aplicação nas lavouras visando a melhoria na qualidade química, física e biológica dos solos. Dessa forma, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar os efeitos da aplicação de biochar nos atributos físico-hídricos de um solo de textura média, cujo material de biochar foi produzido a partir de diferentes matérias-primas e temperaturas de pirólise. O experimento foi conduzido junto ao Laboratório de Física de Solos, Departamento de Engenharia de Biosistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), localizada no município de Piracicaba – SP. O material de solo utilizado na pesquisa foi um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média. As matérias-primas para produção do biochar foram oriundas de resíduos da indústria sucroenergética da cana-de-açúcar, bagaço de cana-de-açúcar e torta de filtro, coletados em uma usina localizada no município de Charqueada-SP e pirolisados nas temperaturas de 250°C, 450°C e 650°C. Uma vez de posse do biochar produzido, foram caracterizadas as suas propriedades físico-químicas, bem como, a capacidade de retenção de água do biochar puro. Em seguida foram determinadas as doses com base em peso (2,5 e 5% p/p) e o biochar com granulometria < 2 mm, em cada unidade experimental e incorporados a 4 quilos de solo, colocados em vasos plásticos com drenagem facilitada e posteriormente saturados. Após 5 dias de incorporação do biochar e saturação do solo, foram coletadas amostras em anéis volumétricos para caracterização físico-hídricas do solo. Os atributos físico-hídricos avaliadas foram: densidade do solo e de partículas, porosidade do solo, espaço poroso cheio de água, capacidade de armazenamento de água no solo, capacidade de aeração do solo, condutividade hidráulica do solo saturado e a curva de retenção de água no solo. O experimento foi conduzido sob um delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial, sendo os seguintes fatores: 2 matérias-primas x 3 temperaturas de pirólise (250, 450 e 650 °C) x 2 doses (2,5 e 5 % p/p) e tratamento contendo solo puro. Também foi realizada uma estatística multivariada através da análise de componentes principais e os resultados mostrados em gráficos do tipo biplot. Os resultados obtidos, nas condições em que foi conduzida a pesquisa, demonstraram que o biochar alterou positivamente as propriedades físico-hídricas do solo. A combinação BC_TF 250°C 2,5% apresentou maior conteúdo de água disponível dentre todos os tratamentos, seguido dos tratamentos BC_TF 650°C 5%, BC_TF 450°C 5%, BC_BC 450°C 2,5%. Dessa forma, os tratamentos descritos anteriormente foram os que apresentaram maior potencial para aumentar a capacidade de água disponível em solos de textura média. O biochar por se tratar de um material orgânico carbonizado com alta capacidade de interagir com as partículas dos solos durante muitos anos, possuem elevado potencial para sequestro de carbono em solos tropicais, importante condição para atenuar o avanço das mudanças climáticas globais. A matéria-prima bagaço de cana, produziu biochar com maiores teores de carbono orgânico, sendo, portanto, a combinação BC_BC 450°C na dosagem de 2,5% a que apresenta elevado potencial para uso e produção comercial, em termos de sequestro de carbono no solo, promoção de aeração e alta capacidade de retenção de água.

Palavras-chave: Curva de retenção, Biocarvão, Bagaço de cana, Torta de filtro

ABSTRACT

Characterization of physical-hydric properties of soil conditioned with sugarcane biochar

The demand to make the production chain in the sugar-energy sector more sustainable requires better use of some waste generated during the processing of sugar cane, such as: sugar cane bagasse and filter cake. An alternative is the transformation of this waste into biochar, with great potential for application in crops to improve the chemical, physical and biological quality of soils. Therefore, the objective of this research was to evaluate the effects of biochar application on the physical-water attributes of a medium-textured soil, whose biochar material was produced from different raw materials and pyrolysis temperatures. The experiment was conducted at the Soil Physics Laboratory, Department of Biosystems Engineering, "Luiz de Queiroz" College of Agriculture (ESALQ/USP), located in the municipality of Piracicaba – SP. The soil material used in the research was a Red-Yellow Oxisol of medium texture. The raw materials for biochar production came from waste from the sugarcane sugar industry, sugarcane bagasse and filter cake, collected at a plant located in the municipality of Charqueada-SP and pyrolyzed at temperatures of 250°C, 450°C and 650°C. Once in possession of the biochar produced, its physicochemical properties were characterized, as well as the water retention capacity of the pure biochar. Then, doses were determined based on weight (2.5 and 5% w/w) and biochar with particle size < 2 mm, in each experimental unit and incorporated into 4 kilos of soil, placed in plastic pots with easy drainage and subsequently saturated. After 5 days of biochar incorporation and soil saturation, samples were collected in volumetric rings for physical-water characterization of the soil. The physical-water attributes evaluated were: soil and particle density, soil porosity, water-filled pore space, water storage capacity in the soil, soil aeration capacity, hydraulic conductivity of the saturated soil and the water retention curve. water in the soil. The experiment was conducted under a completely randomized design in a factorial scheme, with the following factors: 2 raw materials x 3 pyrolysis temperatures (250, 450 and 650 °C) x 2 doses (2.5 and 5% w/w) and treatment containing pure soil. Multivariate statistics were also performed using principal components analysis and the results were shown in biplot graphs. The results obtained, under the conditions under which the research was conducted, demonstrated that biochar positively altered the physical-water properties of the soil. The combination BC_TF 250°C 2.5% presented the highest available water content among all treatments, followed by the treatments BC_TF 650°C 5%, BC_TF 450°C 5%, BC_BC 450°C 2.5%. Therefore, the treatments described previously were those that showed the greatest potential for increasing the available water capacity in medium-textured soils. Biochar, as it is a carbonized organic material with a high capacity to interact with soil particles for many years, has a high potential for carbon sequestration in tropical soils, an important condition for mitigating the advancement of global climate change. The raw material sugarcane bagasse produced biochar with higher levels of organic carbon, therefore, the combination BC_BC 450°C at a dosage of 2.5% presents high potential for use and commercial production, in terms of carbon sequestration in the soil, promoting aeration and high water retention capacity.

Keywords: Retention curve, Biochar, Sugarcane bagasse, Filter cake

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Biochar produzido a partir de resíduos de cana-de-açúcar torta de filtro (a) e bagaço de cana-de-açúcar (b)	18
Figura 2. Preparo do biochar através da peneira de 2 mm.	19
Figura 3. Anéis acondicionados no funil de Haines de placa porosa.....	23
Figura 4. (A) Câmera de pressão de Richards utilizadas para determinação da curva retenção de água nas amostras de solo misturadas com biochar; (B) Detalhe dos anéis acondicionados dentro câmara de pressão de Richards.	24
Figura 5. Teores de macronutrientes (%) presentes nos diferentes tipos de biochar em função da temperatura de pirólise. (A) biochar de torta de filtro e (B) biochar de bagaço de cana.	31
Figura 6. Teores de macronutrientes (%) presentes nos diferentes tipos de biochar em função da temperatura de pirólise. (A) biochar de torta de filtro e (B) biochar de bagaço de cana.	31
Figura 7. Capacidade de retenção de água (CRA %) dos biochars em função da temperatura de pirólise.	32
Figura 8. Curvas de retenção obtidas a partir de solos condicionados com biochar de bagaço de cana-de-açúcar (a) e torta de filtro (b) em diferentes temperaturas de pirólise e doses aplicada e do solo puro, sem adição de biochar.....	41
Figura 9. Curvas de frequência de raio de poros por intervalo de logaritmo do raio para os solos condicionados com biochar de bagaço de cana-de-açúcar (a) e torta de filtro (b) em diferentes temperaturas de pirólise e doses, em função do solo controle.	42
Figura 10. Distribuição percentual da porosidade dos solos em função das classes de tamanho.	43
Figura 11. Biplot com os PC1 e PC2 nos solos condicionados com biochar de bagaço de cana e solo controle para as variáveis Ds-densidade do solo; CC – capacidade de campo; PMP – ponto de murcha permanente. AD – água disponível para as plantas; PD – porosidade drenável; PT – porosidade total; Ksat – condutividade hidráulica do solo saturado; SAC – capacidade de aeração do solo; SWSC – capacidade de armazenamento de água no solo; macro, meso e microporos.....	47
Figura 12. Biplot com os PC1 e PC2 nos solos condicionados com biochar de torta de filtro e solo controle para as variáveis Ds-densidade do solo; CC – capacidade de campo; PMP – ponto de murcha permanente. AD – água disponível para as plantas; PD – porosidade drenável; PT – porosidade total; Ksat – condutividade hidráulica do solo saturado; SAC – capacidade de aeração do solo; SWSC – capacidade de armazenamento de água no solo; macro, meso e microporos.....	49
Figura 13. Biplot com os PC1 e PC2 nos solos condicionados com biochar de bagaço de cana, torta de filtro e solo controle para as variáveis Ds-densidade do solo; CC – capacidade de campo; PMP – ponto de murcha permanente. AD – água disponível para as plantas; PD – porosidade drenável; PT – porosidade total; Ksat – condutividade hidráulica do solo saturado; SAC – capacidade de aeração do solo; SWSC – capacidade de armazenamento de água no solo; macro, meso e microporos.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização química e granulométrica do Latossolo Vermelho Amarelo	17
Tabela 2. Caracterização físico-química do biochar produzido a partir da torta de filtro e bagaço de cana em base seca.....	29
Tabela 3. Densidade de partículas do solo corrigido com biochar de cana-de-açúcar em função de diferentes temperaturas de pirólise e doses de aplicação.	33
Tabela 4. Densidade do solo corrigido com biochar de cana de açúcar em função de diferentes temperaturas de pirólise e doses de aplicação.	34
Tabela 5. Porosidade total do solo corrigido com biochar de cana de açúcar em função de diferentes temperaturas de pirólise e doses de aplicação.	36
Tabela 6. Porosidade total do solo corrigido com biochar de cana-de-açúcar em função de diferentes temperaturas de pirólise e doses de aplicação.	36
Tabela 7. Capacidade de aeração do solo (SAC) no solo corrigido com biochar de cana de açúcar em função de diferentes temperaturas de pirólise e doses de aplicação.	37
Tabela 8. Capacidade de armazenamento de água no solo (SWSC) no solo corrigido com biochar de cana de açúcar em função de diferentes temperaturas de pirólise e doses de aplicação.	38
Tabela 9. Espaço poroso ocupado por água (WFPS) no solo condicionado por biochar de cana de açúcar em função de diferentes temperaturas de pirólise e doses de aplicação.	38
Tabela 10. Condutividade hidráulica do solo saturado corrigido com biochar de cana de açúcar em função de diferentes temperaturas de pirólise e doses de aplicação.	39
Tabela 11. Parâmetros de ajuste da curva de retenção de água em solos corrigidos com biochar de cana de açúcar em função de diferentes temperaturas de pirólise e doses de aplicação.....	40
Tabela 12. Conteúdo de volumétrico de água no solo (cm ³ cm ⁻³) correspondentes a capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (CC – PMP).....	44
Tabela 13. Autovalores e autovetores extraídos dos componentes principais obtidos pelos tratamentos de solo condicionados com biochar de bagaço de cana e solo controle.	46
Tabela 14. Autovalores e autovetores extraídos dos componentes principais obtidos pelos tratamentos de solo condicionados com biochar de torta de filtro e solo controle.	48
Tabela 15. Autovalores e autovetores extraídos dos componentes principais obtidos pelos tratamentos de solo condicionados com biochar de bagaço de cana, torta de filtro e solo controle.	50

1. INTRODUÇÃO

A agricultura vem passando por inúmeros processos de transformação em busca de alternativas para tornar a atividade agrícola cada vez mais sustentável e rentável. Essas alternativas visam o uso mais eficiente dos recursos naturais, diante da otimização do aproveitamento de resíduos gerados, promovendo além de recuperação de áreas degradadas, quando utilizados corretamente, bem como, o seu uso racional poderá evitar prejuízos econômicos e problemas de contaminação ambiental.

A indústria sucroenergética no Brasil apresenta grande importância econômica e sócio-ambiental e sabe-se que durante o processamento agroindustrial da produção do açúcar e do etanol é gerada uma grande quantidade de resíduos, dentre esses pode-se citar o bagaço de cana e a torta de filtro. Portanto, garantir o reaproveitamento adequado desses resíduos orgânicos é de suma importância para evitar descartes inapropriados e causar problemas de impacto ambiental.

Assim, alternativas de reaproveitamento de resíduos são cada vez mais estudadas, destacando-se mais recentemente a transformação dos resíduos sólidos em um material denominado de “biochar”, o qual é um biocarvão, obtido pela queima controlada em ambiente de oxigênio limitado e sob altas temperaturas, processo denominado de pirólise, a partir de uma biomassa de origem vegetal ou animal. Para Zhang et al. (2020), o biochar é reconhecido como uma fonte verde, segura e eficaz para melhorar a “saúde” do solo e pode vir a se tornar parte importante no contexto da agricultura moderna.

A utilização do biochar pode ser uma possibilidade de aplicação na agricultura, uma vez que apresenta potencial para melhoria da fertilidade dos solos, bem como, de suas propriedades físicas e biológicas, com possibilidade de uso para aumentar a capacidade de retenção de água e assim tornando-se um possível elemento que auxiliará no uso racional da água, obtendo-se uma economia na aplicação de água na agricultura e dessa forma auxiliar as plantas a suportarem períodos de déficit hídrico.

A demanda em tornar as cadeias produtivas mais sustentáveis, fez crescer ao longo dos anos as pesquisas com a utilização do biochar em áreas agrícolas. No entanto, há atualmente uma falta de compreensão dos efeitos do tipo de matéria-prima e da temperatura de pirólise nas propriedades físico-químicas do biocarvão e como podem afetar os atributos físico-hídricos dos solos.

As características físico-químicas do biochar irão depender basicamente da biomassa utilizada como matéria-prima, da temperatura de pirólise, e do tempo de interação do biochar com o solo. Essas características conferidas a cada tipo de biochar fazem de alguns deles um condicionador de solo interessante, além do alto potencial no sequestro de carbono, atuando na mitigação das mudanças climáticas, devido à sua lenta decomposição no ambiente e redução nas emissões de gases de efeito estufa.

Nesse sentido, alguns estudos, ainda incipientes, no setor sucroenergético vêm sendo feitos e têm mostrado que a transformação dos resíduos da indústria em biochar, para aplicação ao solo, pode ser uma alternativa potencial para utilização nas lavouras, visando melhoria do ambiente de produção, com possibilidade de recuperação de solos em processo de degradação, provocado pela agricultura intensiva.

Portanto, para que isso aconteça, é interessante que pesquisas continuem sendo feitas nas diferentes áreas de conhecimento agrônomo, uma vez que ainda é incipiente a utilização do biochar como condicionador de solo, especialmente visando a melhoria de suas características físicas e que possam aumentar a eficiência no uso de água na agricultura, particularmente em solos tropicais brasileiros.

Sendo assim, no contexto atual das mudanças climáticas, a identificação de práticas agrícolas, como aplicação do biochar, que podem aumentar a eficiência do uso de água pelas culturas, proporcionar melhoria no ambiente de crescimento radicular das plantas, além de promover o sequestro de carbono no solo é essencial para permitir sistemas agrícolas sustentáveis.

Diante desses aspectos, a hipótese principal da pesquisa é que o biochar será capaz de melhorar as propriedades de retenção e condução de água no solo, podendo proporcionar uso mais eficiente da água na agricultura e a partir desses resultados será possível identificar qual será a matéria-prima e temperatura de pirólise mais adequados para proporcionar incrementos de produção comercial.

O objetivo principal da presente pesquisa foi avaliar os efeitos da aplicação de diferentes tipos de biochar oriundos da indústria sucroenergética nos atributos físico-hídricos e na qualidade física de solos corrigidos e os objetivos específicos foram: i) realizar a caracterização físico-química de diferentes tipos de biochar oriundos a partir de diferentes matérias primas: bagaço de cana-de-açúcar e torta de filtro, e sob diferentes temperaturas de pirólise (250°C , 450 °C e 650 °C); ii) avaliar os efeitos da adição de diferentes doses de biochar, em solos de textura média, nos atributos físico-hídricos, relacionados a retenção e condução de água no solo e iii) realizar uma análise de estatística multivariada para entender as relações existentes entre as variáveis estudadas em função das diferentes fabricações de biochar.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cultivo de cana-de-açúcar: uso de resíduos e possíveis impactos

Atualmente, a cadeia produtiva de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma das mais importantes do agronegócio brasileiro em função de sua grande aptidão para geração de energia, produção de açúcar e etanol. Outro aspecto é que devido à atratividade do mercado de biocombustíveis e energética, o setor canavieiro passou por uma expansão no mercado interno e no mercado mundial. Ao longo dos anos, o cultivo de cana-de-açúcar expandiu-se para diversas regiões do país.

Segundo a Conab (2022) a área destinada a produção sucroalcooleira no Brasil na safra 2022/2023 é estimada em pouco mais de 8 milhões de hectares com produção de 573 milhões de toneladas. O estado de São Paulo é o apresenta maior importância nacional nesse seguimento com aproximadamente 49% da área produtiva nacional com produção estimada em aproximadamente 283 milhões de toneladas.

Essa expansão da cana-de-açúcar nos últimos anos vem ao encontro das altas demandas mundiais de bioenergia, objetivando reduzir a dependência de combustíveis à base de petróleo e mitigar as mudanças climáticas. No entanto, toda forma de expansão rápida da agricultura pode trazer inúmeros problemas ao ambiente produtivo, especialmente aos solos cultivados, que se não mitigados a tempo pode comprometer a sustentabilidade da produção canavieira em muitas áreas (BONINI DA LUZ et al., 2020; CHERUBIN et al., 2016).

Em paralelo ao possível processo de degradação dos ambientes de produção causado pela expansão das áreas, observa-se uma produção considerável de resíduos, gerados a partir do processamento agroindustrial da cana-de-açúcar, seja para produção de etanol ou açúcar. Dentre alguns desses resíduos, pode-se citar o bagaço da cana-de-açúcar e a torta de filtro.

O bagaço de cana-de-açúcar é o primeiro resíduo gerado no processamento agroindustrial da cana, sendo em média gerado de 140 a 280 kg para cada tonelada de cana processada e sua composição físico-química depende do tipo de solo cultivado, métodos de colheita e variedade plantada. O bagaço de cana devido a seu alto teor de celulose, hemicelulose e lignina na sua composição é considerado uma fonte viável para produção de etanol de segunda geração. Além dessa aplicação, o bagaço é bastante utilizado para compostagem, alimentação animal e para geração de energia elétrica através da queima (MELATI et al., 2017).

A torta de filtro é originada após a filtragem da calda de cana após processo de decantação, onde o açúcar residual é removido, ficando retido nos filtros o resíduo chamado de torta de filtro, sendo sua composição variando em função da variedade de cana, método de cultivo, tipo de solo e procedimentos que a cana passa durante o processamento. O destino da torta de filtro tem sido a aplicação nas lavouras na forma *in natura* ou compostado com outros materiais, principalmente devido a sua rica composição nutricional, como nitrogênio, fósforo, cálcio e magnésio (RABELO et al., 2015).

Ressalta-se que o aproveitamento racional e eficiente desses resíduos orgânicos é de suma importância para evitar descartes inapropriados e com possibilidade de causar problemas de contaminação ambiental.

Práticas agrícolas intensivas, como preparo convencional do solo, tráfego intenso de máquinas, elevado uso de insumos podem levar a redução dos estoques de carbono do solo e causar a degradação da qualidade física, química e biológicas quando mal manejados (BARBOSA et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2016). Algumas estratégias e/ou alternativas são utilizadas para se evitar o esgotamento dos estoques de carbono em lavouras de cana-de-açúcar e melhorias na qualidade do solo, dentre elas pode-se citar a implantação de rotação de culturas, manutenção da

superfície do solo coberta com palha e também a aplicação de aditivos orgânicos como a torta de filtro, vinhaça e mais recentemente o condicionamento de solos com biochar, tornando-se em uma alternativa viável para reaproveitamento de resíduos com potencial de melhoria dos atributos do solo (BORDONAL et al., 2018; KHALID et al., 2019).

2.2. Biochar

2.2.1. Definições do biochar

O termo Biochar refere-se a um biocarvão pirogênico derivado de material orgânico, rico em carbono, originado pelo processo de combustão na ausência total ou parcial de oxigênio, principalmente de resíduos agrícolas, esterco animal, subprodutos de madeira industrial, entre outros (SEMIDA et al., 2019; KHALID et al., 2019). O processo de conversão termoquímica da biomassa em biocarvão na ausência de oxigênio é chamado de pirólise. A temperatura de pirólise varia de 200 °C a 1000 °C, podendo ser um processo de duração rápida ou lenta, sendo esta última a mais utilizada na produção dos biochars (LIAN; XIANG, 2017).

Wiersma et al. (2020) comentam que temperatura da pirólise controla a integridade da combustão e várias propriedades físico-químicas do biochar produzido, como área de superfície específica e teor de carbono, provavelmente também influencia a condutividade hidráulica saturada (Ksat) e a retenção de água do biochar puro, podendo promover melhorias nesses aspectos quando misturados ao solo. Alguns estudos encontraram uma diminuição mais forte em Ksat e aumento na retenção de água em um solo arenoso-argiloso alterado por biocarvão quando o mesmo foi produzido em temperatura mais alta (ESMAEELNEJAD et al., 2016).

As propriedades físico-químicas conferidas aos biochar é dependente da matéria-prima, dos métodos, temperatura e tempo de pirólise para sua produção.

Wang et al. (2015) em sua pesquisa compararam as propriedades físico-químicas de biochars produzidos a partir de matéria-prima lenhosa e gramíneas produzidas em três temperaturas de pirólise (300, 450 e 600°C). Os resultados experimentais mostraram que os tipos de matéria-prima e a temperatura de pirólise afetaram o rendimento de produção do biochar, a estabilidade térmica, composição elementar, conteúdo de componentes não combustíveis (NCC), valores de pH, áreas de superfície. Em geral, os autores constataram que biochars de alta temperatura apresentaram, maior área superficial e maior concentração em cátions alcalinos. Além disso, os biocarvões feitos de matérias-primas lenhosas tinham maior área de superfície, mas menores teores de NCC do que os feitos de gramíneas nas mesmas condições.

Além dos fatores matéria-prima e temperatura de pirólise, o tempo de incubação do biochar nos solos pode influenciar em seus atributos físico-químicos, uma vez que com o tempo, o biochar irá sofrer decomposições químicas e microbianas, que lhes conferirão características únicas de interação com as propriedades dos solos (SUN et al., 2014; WANG et al., 2015; PURAKAYASTHA et al., 2019).

Nos últimos anos tem aumentado o número de pesquisas com aplicação do biochar em áreas agrícolas. Esses estudos são amplos e com aplicações bastante variáveis, devido principalmente às diferentes características dos biochars produzidos. Wiersma et al. (2020) comentam que compreender os efeitos das diferentes matérias-primas, tempo e temperatura que estão submetidos no processo de pirólise, nas propriedades dos solos, são importantes para identificar e definir as melhores condições de fabricação do biochar com aplicações mais eficientes na agricultura. Além dos fatores intrínsecos ao biochar, os possíveis efeitos produzidos são fortemente influenciados pelo tipo de

planta, clima, das propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos, das doses aplicadas e do ambiente de produção.

2.2.2. Efeitos do biochar nas propriedades físico-químicas e biológicas dos solos

O biochar apresenta capacidade de interagir com diferentes elementos do solo e influenciar em suas características químicas, físicas e biológicas resultando em vários benefícios agrícolas e ambientais (KHALID et al., 2019). Quando adicionado ao solo pode atuar melhorando as atividades microbianas no solo (IRFAN et al. 2019), retenção de nutrientes e sua biodisponibilidade (PARVAGE et al., 2013), melhoria da qualidade do solo, alterações nas características físico-químicas dos solos como aumento da capacidade de troca catiônica (PURAKAYASTHA et al., 2019). Essas características conferem ao biochar propriedades importantes, podendo influenciar na dinâmica de pesticidas no solo (KHALID et al., 2019), remediação de solos poluídos (O'CONNOR, et al., 2019), importante papel no sequestro de carbono, devido a seu tempo de residência nos solos (PAUSTIAN et al., 2016), atuando na mitigação das mudanças climáticas (MAJUMDER et al., 2019; SHIN et al., 2019), além de aplicações múltiplas na agricultura.

Irfan et al. (2019) estudaram os efeitos do biochar do bagaço de cana-de-açúcar aplicado com três níveis (0; 0,5 e 1% C ha⁻¹) em base de carbono equivalente na presença e ausência de adubação nitrogenada (46 kg N ha⁻¹) no cultivo do trigo e observaram que as correções do solo com biochar promoveram aumento do carbono orgânico do solo, carbono orgânico dissolvido, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana, as atividades das enzimas urease e desidrogenase, além do N inorgânico e conteúdo de água no solo, enquanto reduzem a densidade do solo e a salinidade do solo no cultivo do trigo. Os autores concluíram que a adição de biocarvão derivado do bagaço de cana-de-açúcar pode ser utilizada para melhorar a saúde do solo, o status de nutrientes e as funções biológicas do solo calcário.

Khalid et al. (2019) em seu trabalho de revisão sobre a ação de pesticidas em solos corrigidos com biochar observaram que a aplicação do biochar ao solo afeta muito a sorção/dessorção de pesticidas, biodegradação e lixiviação no solo. A sorção/dessorção de pesticidas em superfícies de biochar depende das características físico-químicas destes, tais como: (i) estrutura e composição química, (ii) porosidade, área superficial, (iii) pH e proporções elementares e (iv) grupos funcionais de superfície. Essas características físico-químicas do biochar que podem influenciar na dinâmica dos pesticidas no solo são dependentes do tipo de matéria-prima e das condições de produção.

2.2.3. Efeito do biochar nas propriedades físico-hídricas do solo

Nos sistemas de produção agrícola, o biochar pode atuar como condicionador de solo para melhorar sua qualidade, possibilitando aumentar o crescimento das plantas. Nesse sentido, o biochar pode atuar diretamente no fornecimento de nutrientes às plantas ou indiretamente pela melhoria do ambiente do solo, ajudando a reduzir a lixiviação de nutrientes, com melhoria na eficiência do uso dos fertilizantes (PARVAGE et al., 2013; PURAKAYASTHA et al., 2019) e pode influenciar nas propriedades hídricas do solo (DUARTE et al., 2019). A possibilidade do aumento na capacidade de retenção de água no solo mediante a aplicação do biochar faz com que este apresente elevado potencial de utilização na agricultura com foco na economia de água em áreas irrigadas ou até

mesmo possibilitar o cultivo em áreas de sequeiro, totalmente dependente das chuvas, auxiliando as culturas a passarem por períodos mais longos sujeitos ao déficit hídrico. Efeitos positivos são relatados por diversos autores para diferentes culturas.

Guo et al. (2020) estudaram os efeitos no crescimento e fisiologia do tomateiro em solo com adição de 2 % (p/p) de biochar de palha de *Miscanthus*, pirolisada a 700 °C e irrigação deficitária em ambiente protegido. O biochar conferiu um aumento na capacidade de retenção de água no solo e minimizou os efeitos negativos da irrigação deficitária e aumentou a eficiência no uso da água pelo tomateiro.

Tanure et al. (2019) verificaram que altas doses de biochar de casca de eucalipto (40 e 60 g kg⁻¹) promoveram uma melhoria no desenvolvimento, atividades fisiológicas e estado nutricional das plantas de milho submetidas a diferentes condições de umidade do solo. Da mesma forma, Danso et al. (2019), estudaram o potencial do uso do biochar em solos degradados no cultivo do milho sob irrigação deficitária. Os resultados encontrados foram semelhantes ao cultivo sob irrigação plena. Os autores comentam que o uso do biochar pode ser uma opção viável de gestão da água para os agricultores economizarem água de irrigação.

Segundo Ramlow et al. (2019), combinar estratégias de irrigação por déficit e, ao mesmo tempo, aumentar o armazenamento de água por meio do uso do biochar, pode minimizar o estresse hídrico das culturas e reduzir o consumo total de água. Os autores ainda destacam sobre a importância de direcionar o tempo e a quantidade do tratamento para déficit de irrigação, a fim de maximizar a retenção de água pelo biochar, e assim reduzir o estresse hídrico das culturas.

Wiersma et al. (2020) estudaram a retenção de água no solo, condutividade hidráulica do solo saturado e hidrofobicidade de seis diferentes tipos de biochar (palha de *Miscanthus*, casca de arroz, lodo de esgoto, colza, palha de trigo e serragem) e duas temperaturas de pirólise (550 e 700°C) na dose de 10 ton ha⁻¹. Os autores verificaram que para casca de arroz a 700 °C houve uma redução significativa no conteúdo de água saturado, cerca de 43 % comparado à temperatura de 550 °C, redução na disponibilidade de água para as plantas e condutividade hidráulica do solo saturado. Esses resultados foram atribuídos à elevada hidrofobicidade (não afinidade com a água) observada para o biochar de casca de arroz. A incorporação de biochar nas doses testadas em solos arenosos não influenciaram na retenção de água no solo, bem como, na condutividade hidráulica do solo saturado e a hidrofobicidade.

A hidrofobicidade do material influencia nas propriedades hidráulicas do solo e é influenciado pela temperatura de pirólise. Devido a elevada variabilidade na composição dos biochars produzidos, os autores comentaram que os efeitos da temperatura de pirólise e tipos de matérias-primas nas propriedades do solo ainda são pouco conhecidos e com resultados ainda bastante contrastantes na literatura (WIERSMA et al., 2020). Ressaltando a importância de estudar diferentes matérias-primas e condições de pirólise para atestar o seu potencial de uso em áreas agrícolas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local do experimento

O experimento foi conduzido junto ao Laboratório de Física de Solos, Departamento de Engenharia de Biosistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), localizada no município de Piracicaba – SP (22° 43’ 33” S, 47° 38’ 00” O, com 511 m de altitude).

3.2. Material de solo

O solo utilizado nessa etapa foi um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média, oriundos da região de Piracicaba-SP, típico das regiões produtoras do estado de São Paulo. A caracterização física e química do solo pode ser conferida pela Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização química e granulométrica do Latossolo Vermelho Amarelo

Características	Resultados
pH CaCl ₂	5,41
M.O. (g dm ⁻³)	42,4
Ca (mmolc dm ⁻³)	36,7
Mg (mmolc dm ⁻³)	23,7
K (mmolc dm ⁻³)	2,46
Al (mmolc dm ⁻³)	0
H+Al (mmolc dm ⁻³)	16,5
P (mg dm ⁻³)	55,9
S (mg dm ⁻³)	8,5
SB(mmolc dm ⁻³)	62,9
CTC (mmolc dm ⁻³)	79,4
B (mg dm ⁻³)	0,34
Cu (mg dm ⁻³)	0,6
Fe (mg dm ⁻³)	21
Mn (mg dm ⁻³)	12,9
Zn (mg dm ⁻³)	6,2
V (%)	79
m (%)	0
Areia Total (g kg ⁻¹)	760
Areia Grossa (g kg ⁻¹)	300
Areia Fina (g kg ⁻¹)	460
Silte (g kg ⁻¹)	41
Argila (g kg ⁻¹)	199
Textura	Franco Arenoso

3.3. Preparo do biochar

As matérias-primas para produção do biochar foram oriundas de resíduos da indústria sucroenergética da cana-de-açúcar: bagaço de cana-de-açúcar e torta de filtro.

As coletas foram realizadas em uma usina localizada próxima ao município de Charqueada, SP. Após a coleta, as matérias-primas foram levadas para pirólise na empresa SPPT Pesquisa e Tecnologia, localizada em Mogi Mirim-SP. A pirólise consistiu em uma queima lenta da matéria-prima com oxigênio limitado sob as temperaturas de 250°C, 450°C e 650°C. Dessa forma, foram produzidos três diferentes tipos de biochar para cada material, de acordo com a temperatura de queima na pirólise (Figura 1). A temperatura de pirólise é um dos principais responsáveis pela variação na composição físico-química do biochar produzido e podem promover diferentes efeitos quando aplicados aos solos (ZHANG et al., 2021).

Sendo assim, a escolha de um amplo espectro de temperaturas teve como objetivo produzir diferentes biochars a partir da cana-de-açúcar e duas matérias primas diferentes, para posterior estudo dos efeitos quando aplicados aos solos.



Figura 1. Biochars produzidos a partir de resíduos de cana-de-açúcar torta de filtro (a) e bagaço de cana-de-açúcar (b)

3.4. Caracterização físico-química do biochar

Uma vez concluído o processo de pirólise determinou-se o rendimento final do processo, expresso pela fração entre a massa total da biomassa da matéria-prima original e a massa do biochar produzido.

Após a preparação do biochar, foi feito o peneiramento do material para granulometria < 2 mm (Figura 2), retirada uma amostra e enviada ao laboratório para caracterização físico-química.



Figura 2. Preparo do biochar através da peneira de 2 mm.

Para determinação da composição química as amostras foram secas em estufa à 65 °C, por aproximadamente 48 horas até peso constante conforme Brasil (2017).

A densidade foi determinada pela relação massa/volume e expressa em g cm^{-3} conforme Equação 1.

$$D_b = \frac{M_b}{V} \quad (1)$$

Em que:

D_b = densidade do biochar (g cm^{-3});

M_b = massa do biochar seco (g);

V = volume (cm^3).

Para determinação do pH utilizou-se um pHmetro de bancada, após mistura de uma amostra de biochar com solução de CaCl_2 0,01 mol L^{-1} . O carbono orgânico (%) foi determinado pelo método via-úmida com oxidação com dicromato seguido de titulação. Os teores de nutrientes foram determinados pelas seguintes metodologias: Nitrogênio total (%) por digestão sulfúrica (Kjeldahl); Fósforo (P_2O_5) – determinação por espectrofotômetro pelo método da solução de vanadomolibdica; Potássio (K_2O) e Sódio (Na) extração ácida e fotometria de chama; Enxofre (S) – extração ácida e determinação por gravimetria pelo método do sulfato de bário; Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Zinco (Zn) – extração com HCl e determinação por espectrofotômetro de absorção atômica; Boro (B) – espectrofotometria da azometina-H; Capacidade de troca catiônica (CTC) – determinado por titulometria (BRASIL, 2017). Os teores de Matéria Orgânica Total, Resíduo Mineral Insolúvel (RMI), Resíduo Mineral (RM) e Resíduo Mineral Total (RMT) foram determinados por combustão em Mufla e expressos em porcentagem (ALCARDE, 2009).

3.5. Determinação da capacidade de retenção de água pelo biochar (CRA %)

Para essa avaliação considerou-se que o material orgânico apresentou sua máxima quantidade de água retida, após saturação e cessada a drenagem, quando a amostra foi submetida a uma tensão de 10 cm de coluna de água ou 1kPa (10hPa), conforme metodologia do MAPA (2007).

Para realização dessa análise foi feito o preenchimento de anéis metálicos com o biochar, mantendo a densidade original das amostras. As bases dos anéis foram vedadas com tela e amarradas com uma liga de plástico. Após o preenchimento, os anéis foram colocados em bandejas para saturação por 24 horas, em lâmina de água localizada abaixo 0,5 cm da borda superior. Depois da saturação as amostras foram colocadas sobre a mesa de tensão e submetida a tensão de 10 cm de coluna de água (1 kPa ou 10 hPa) até atingir o equilíbrio constante. Cessada a drenagem (cerca de 48 horas), foi feita a secagem das amostras em estufa a 65 °C até massa constante, para determinação do peso seco da amostra. Após obtenção da massa úmida e massa seca a capacidade de retenção de água do biochar em porcentagem foi determinada conforme Equação (2).

$$\text{CRA (\%)} = \frac{(\text{Mu} - \text{Ms})}{V} \cdot 100 \quad (2)$$

Em que:

Mu = massa úmida do biochar após submetida a tensão de 10 cm, g;

Ms = massa seca do biochar, após secagem em estufa, g; e

V = volume do anel, cm³.

3.6. Arranjo experimental: tratamentos e dosagens do biochar

Para a condução da pesquisa, adotou-se os tratamentos em esquema fatorial 2 x 3 x 2 + solo sem biochar, totalizando-se 13 tratamentos com 3 repetições, conforme descrição a seguir:

- 1) Duas matérias primas: bagaço de cana e torta de filtro;
- 2) Três temperaturas de pirólise: 250°C, 450°C e 650°C;
- 3) Duas doses de aplicação: 2,5% e 5 % (p/p)
- 4) Solo sem aplicação do biochar (tratamento controle).

As dosagens aplicadas de biochar constituem em um dos principais fatores para se observar efeito do produto quando incorporado ao solo. Por se tratar de um produto de fabricação própria uma dose padrão ainda não foi definida, sendo assim, adotou-se nessa pesquisa doses determinadas com base em peso (2,5 % e 5%) de acordo com pesquisas envolvendo este tipo de aplicação, para entendimento dos efeitos nas propriedades físicas do solo (SAFFARI et al., 2021; KAMEYAMA et al., 2012).

Após essa definição das doses, o biochar com granulometria < 2 mm, em cada unidade experimental foi incorporado a 4 quilos de solo, colocados em vasos plásticos com drenagem facilitada e posteriormente saturados. Após 5 dias de incorporação do biochar e saturação do solo, foram coletadas amostras em anéis volumétricos para

caracterização físico-hídricas do solo e posterior determinação de indicadores de qualidade. Coletou-se por vaso, um anel de aproximadamente 100 cm³ e dois anéis de 50 cm³.

3.7. Caracterização físico-hídrica do solo condicionado por biochar

3.7.1. Densidade do solo e densidade de partículas

Para determinação da densidade do solo, foram utilizadas amostras de solo indeformadas coletadas em anéis volumétricos de aproximadamente 100 cm³. Após a coleta, o material de solo foi seco em estufa a 105°C por aproximadamente 48 horas, até atingir massa constante. A determinação do volume do cilindro foi feita a partir de medidas do diâmetro interno e externo com auxílio de um paquímetro digital. Após a obtenção da massa de solo seco e volume do cilindro, a densidade do solo foi calculada pela Equação 3 (TEIXEIRA et al., 2017).

$$D_s = \frac{M_s}{V} \quad (3)$$

Em que:

D_s = densidade do solo (g cm⁻³);

M_s = massa do solo seco (g);

V = volume do anel cilíndrico (cm³).

Para avaliação da densidade de partículas (Equação 4) para todos os tratamentos utilizou-se amostra de solo deformada e secas em estufa a 105 °C. A determinação foi feita com o auxílio de um picnômetro a gás (Flint; Flint, 2002).

$$D_p = \frac{M_s}{V_s} \quad (4)$$

Em que:

D_p = densidade de partícula (g cm⁻³);

M_s = massa do solo seco (g);

V = volume que os sólidos ocupam (cm³).

3.7.2. Condutividade hidráulica do solo saturado

Para determinação da condutividade hidráulica foram utilizadas amostras de solo indeformadas e coletadas em anéis cilíndricos de aproximadamente 100 cm³. As amostras foram inicialmente postas para saturar por 24 h, com lâmina de água 0,5 cm abaixo do topo do anel.

Após a saturação das amostras foi feita a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado por meio de um permeâmetro de carga constante. A condutividade foi estimada a partir da percolação de água pela amostra de solo saturada aplicando-se uma carga hidráulica constante.

O volume de água percolado em um determinado tempo foi coletado e medido. A medida da condutividade hidráulica é obtida por meio da aplicação da equação de Darcy (JAČKA et al., 2018; TEIXEIRA et al., 2017). O procedimento de cálculo pode ser conferido pela Equação 5:

$$K_{sat} = \frac{(Q \cdot L)}{A \cdot (L + h)} \quad (5)$$

Em que:

K_{sat} = condutividade hidráulica do solo saturado (cm h^{-1});

=

Q = vazão ($\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$);

L = altura da coluna de solo no permeâmetro de carga constante (cm);

A = área do cilindro (cm^2);

h = altura da lâmina de água (constante) sobre o material de solo (cm);

t = tempo de percolação (horas).

3.7.3. Porosidade total do solo

A porosidade total do solo (PT) é a fração do volume de solo total possível de ser ocupado por água ou ar, e seu conhecimento é importante para entender a dinâmica da água e solutos no solo. A PT foi calculada a partir das densidades do solo e densidade de partículas (Equação 6).

$$PT = \left(1 - \frac{D_s}{D_p}\right) \cdot 100 \quad (6)$$

Em que:

D_s = densidade do solo (g cm^{-3});

D_p = densidade de partículas do solo (g cm^{-3}).

3.7.4. Curva de retenção de água no solo

A curva de retenção de água no solo, reflete a relação entre o conteúdo de água no solo e a energia com que ela está retida nos poros do solo. Para confecção da curva de retenção de água no solo foram coletadas amostras de solo indeformadas por anéis volumétricos de aproximadamente 50 cm³. Foram coletadas duas amostras por unidade experimental, correspondente a todos tratamentos e suas respectivas repetições.

Em condições de laboratório, os anéis foram preparados, cobrindo a sua base com tecido poroso e preso com uma liga de elástico para evitar perda de solo durante o processo. Foi retirado o excesso de solo dos anéis, de modo a manter o volume de solo igual ao volume interno do anel volumétrico.

As amostras foram submetidas a um processo de saturação por água deionizada por aproximadamente 24 horas (TEIXEIRA et al., 2017). Para confecção da curva de retenção de água no solo foram utilizados dois equipamentos: funil de Haines de placa porosa (Figura 3) para determinação das tensões de 1, 2, 4, 6, 10 cm kPa e para as tensões de 30, 50, 100, 450 e 1500 kPa foi utilizada a câmara de pressão de Richards (1965) (Figura 4).

Após o equilíbrio e cessado a drenagem da água em cada ponto das tensões aplicadas, as amostras foram pesadas e posteriormente submetidas a tensões maiores, até atingir o ponto de murcha permanente (PMP) a 1500 kPa.



Figura 3. Anéis acondicionados no funil de Haines de placa porosa

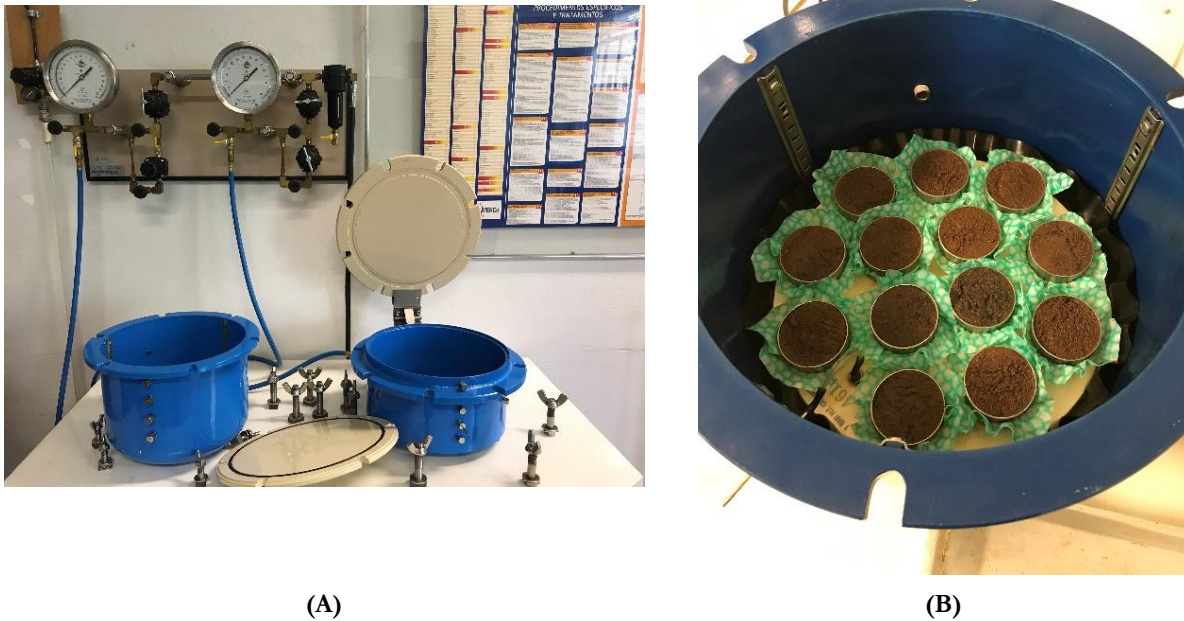


Figura 4. (A) Câmara de pressão de Richards utilizadas para determinação da curva retenção de água nas amostras de solo misturadas com biochar; (B) Detalhe dos anéis acondicionados dentro câmara de pressão de Richards.

Ao final as amostras foram secas em estufa até atingir peso constante, por aproximadamente 48 horas à 105°C. Após obtenção da massa de solo seco, os anéis foram desmontados, pesados e com auxílio de um paquímetro digital feitas as medias de altura e diâmetro internos e assim calcular o volume interno do anel volumétrico de cada amostra com precisão. De posse do volume exato da amostra e da diferença entre a massa de solo úmido, após equilíbrio em cada tensão, e do solo seco, foi calculado o conteúdo volumétrico de água em cada tensão.

Após a coleta dos dados foi realizado o ajuste numérico da CRA utilizando-se o modelo RETC segundo o modelo de van Genuchten (1980) (Equação 7). O conteúdo referente à capacidade de campo (CC) foi aquele correspondente a tensão de 10 kPa e o conteúdo de água referente ao ponto de murcha permanente (PMP) foi aquele correspondente a tensão de 1500 kPa. Após determinação da umidade do solo na capacidade de campo (CC), e no ponto de murcha permanente (PMP). O conteúdo de água disponível às plantas (AD) foi calculado pela diferença entre CC e PMP em cada um dos tratamentos. A porosidade drenável foi calculada pela diferença dos conteúdos de água retidos entre as tensões de 1 kPa e 10 kPa.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (7)$$

Em que:

θ = conteúdo volumétrico, em equilíbrio com o potencial mátrico, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;

θ_r = conteúdo volumétrico de água residual, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;

θ_s = conteúdo volumétrico de água na saturação, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;

n, m = parâmetros de ajuste do solo; adimensional;

α = parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão, cm^{-1} ; e

3.7.5. Distribuição de poros e curvas de frequência de raios

A distribuição do tamanho de poros foi obtida por meio da teoria da capilaridade. A classificação por classes de tamanho foi considerado Macroporos (com poros com raio acima de 40 μm e $\tau = 4$ kPa), Mesoporos (40 a 15 μm ; $\tau =$ de 4 kPa a 10 kPa), e Microporos (<15 μm , $\tau < 10$ kPa) (BREWER, 1964; PESSOA; LIBARDI, 2022). A aplicação do modelo de distribuição do tamanho de poros foi realizada pela substituição na Equação 7 do ψm pelo raio equivalente (r) conforme a equação da capilaridade:

$$|\psi m| = \frac{2\sigma}{\rho g r} \quad (8)$$

Onde a equação 6 torna-se:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + \left(\frac{A}{r}\right)^n\right]^m} \quad (9)$$

Em que:

$$A = \frac{2\sigma\alpha}{\rho g}$$

$\sigma =$ o coeficiente de tensão superficial do líquido (0,07194 N m⁻¹)

$\rho =$ a densidade da água (1000 kg m⁻³)

$g =$ a aceleração da gravidade (9,8 m.s⁻²)

$r =$ raio do poro equivalente (μm).

Pela diferenciação da equação de ajuste da curva θ em função de $\log r$ (equação 9) foi obtida a equação da curva diferencial da curva de retenção (Equação 10):

$$\frac{d\theta}{d\log(r)} = \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_s} m n (A)^n r^{-n} \left[1 + (A)^n r^{-n}\right]^{-m-1} \quad (10)$$

O valor do raio equivalente do poro mais frequente (r_{max}) foi obtido pela derivada da Equação 10 igualada a zero:

$$r_{\max} = \frac{2\sigma\alpha}{\rho g} \left(\frac{1}{m}\right)^{\frac{-1}{n}} \quad (11)$$

3.7.6. Atributos físico-hídricos dos solos condicionados por biochar

Com base nas avaliações físico-hídricas do solo realizadas, foram obtidos parâmetros de qualidade física dos solos relacionados com o armazenamento de água e ar no solo (CHERUBIN et al., 2016; REYNOLDS et al., 2002), como:

- a) **espaço poroso cheio de água (WFPS):** calculado pela razão entre a umidade volumétrica em -6 kPa pela porosidade total (PT) (Equação 12):

$$\text{WFPS} = \frac{\theta (6\text{kPa})}{\text{PT}} \quad (12)$$

Em que:

WFPS = espaço poroso cheio de água

$\theta (6\text{kPa})$ = conteúdo de água contido na tensão de 6 kPa ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

PT = porosidade total do solo (%).

- b) **capacidade de armazenamento de água no solo (SWSC):** definida como sendo a razão entre o conteúdo de água na capacidade de campo e porosidade total (Equação 13).

$$\text{SWSC} = \frac{\text{CC}}{\text{PT}} \quad (13)$$

Em que:

SWSC = capacidade de armazenamento de água no solo

CC = conteúdo de água na capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

PT = porosidade total do solo (%).

- c) **capacidade de aeração do solo (SAC):** calculada como a razão entre poros drenados até a capacidade de campo e porosidade total (Equação 14):

$$\text{SAC} = \frac{\text{Act}}{\text{PT}} \quad (14)$$

Em que:

- SAC = capacidade de aeração do solo;
 ACt = volume de poroso drenados da saturação até a CC ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$);
 PT = porosidade total do solo ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$).

Esses parâmetros foram selecionados para uso porque fornecem estimativas quantitativas diretas da capacidade de um solo de armazenar a água e permitir aeração na zona radicular necessários para o crescimento pleno das culturas (REYNOLDS et al., 2002).

3.8. Análise dos resultados

Os dados foram obtidos mediante um delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial ($2 \times 3 \times 2$ + Controle), sendo os fatores: 2 matérias-primas (bagaço de cana e torta de filtro) x 3 temperaturas de pirólise (250, 450 e 650 °C) x 2 doses de aplicação (2,5 e 5 % com base em massa) e um tratamento controle (solo sem biochar).

Os dados foram testados quanto à normalidade e após comprovada a normalidade, foi feita análise e variância e encontrada significância pelo teste F (5%), as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste Tukey com 5% de significância. A eficiência de ajuste das curvas de retenção pelo modelo de van Genuchten (1980) foi avaliada com base no coeficiente de determinação (R^2) e através do erro quadrático médio (RMSE), sendo calculado pela diferença entre os valores observados experimentalmente e os ajustados pelo modelo, conforme Equação 15:

$$\text{RMSE} = \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}{n}} \right) \quad (15)$$

Em que:

- a_i - dados observados;
 \bar{a}_i - média dos dados observados;
 b_i - dado simulado pelo modelo;
 n - número de observações

Foi feita análise multivariada através da análise de componentes principais (PCA) e a visualização dos dados por meio de gráficos biplot, representando os dois primeiros componentes (PC1 e PC2) de maior peso. As análises estatísticas e posterior confecção dos gráficos foram feitas com auxílio dos softwares Agroestat, Minitab, Excel e Origin.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização físico-química do biochar

Pela Tabela 2, pode-se conferir a caracterização físico-química, concentração total de micronutrientes do biochar, nas diferentes matérias-primas (Torta de Filtro e Bagaço de Cana) e pirólises. A concentração total dos macronutrientes pode ser conferida pelas Figuras 5 e 6. As características foram avaliadas segundo a influência pela matéria-prima (biochar de torta de filtro (BC_TF) e biochar de bagaço de cana (BC_BC)) e pela temperatura de pirólise (250, 450, 650 °C).

Tabela 2. Caracterização físico-química do biochar produzido a partir da torta de filtro e bagaço de cana em base seca.

Características	Biochar Torta de Filtro (BC_TF)			Biochar Bagaço de Cana (BC_BC)		
	250 °C	450 °C	650 °C	250 °C	450 °C	650 °C
Rendimento (%)	44,5	35,7	36,3	45,4	35,6	37,8
Densidade (g cm⁻³)	0,48	0,59	0,46	0,12	0,19	0,13
pH (CaCl₂)	5,5	6,5	7,4	4,4	4,5	5,6
MO total (%)	19,37	11,8	15,58	54,17	28,67	44,45
C orgânico (%)	9,6	5,4	7,5	28,8	14,7	23,4
RMT (%)	77,21	87,99	84,28	45,16	71,07	53,79
RM (%)	11,88	15	18,41	7,25	10,18	10,53
RMI (%)	65,33	72,99	65,87	37,91	60,89	43,26
Relação C/N	10	11	18	87	70	53
Cu (mg kg⁻¹)	27	35	45	25	35	35
Mn (mg kg⁻¹)	665	1177	1188	443	595	634
Zn (mg kg⁻¹)	97	122	147	65	77	80
Fe (mg kg⁻¹)	23646	26901	28751	15500	24000	24497
B (mg kg⁻¹)	2	2	3	3	3	5
Na (mg kg⁻¹)	325	350	450	425	425	550
CTC (mmolc kg⁻¹)	270	120	130	160	140	130

RMT - Resíduo mineral total; RM-resíduo mineral; RMI-resíduo mineral insolúvel

Em termos de rendimento da produção da pirólise (%) observou-se que tanto para o biochar de torta de filtro (BC_TF) quanto para bagaço de cana (BC_BC), os maiores valores foram alcançados para a pirólise de 250°C e notou-se uma redução dos valores à medida em que se aumentava a temperatura, destacando-se a temperatura de 450 °C para ambas as matérias-primas. Tal fato também foi observado em outras pesquisas para diversas matérias-primas (MCBEATH et al., 2015; YUAN et al., 2015). Mcbeath et al. (2015) comentam que o declínio do rendimento com o aumento da temperatura de produção do biochar ocorre principalmente devido a decomposição térmica da

celulose e hemicelulose em temperaturas mais baixas inicialmente, seguido pela conversão de outros materiais orgânicos com o aumento da temperatura de pirólise.

Em relação à característica física da densidade, pode-se observar que o biochar advindo da torta de filtro apresentou maiores valores de densidade em relação ao biochar derivado do bagaço de cana, para todos os valores de temperatura de pirólise. A variável densidade está estreitamente ligada ao material utilizado como matéria-prima na produção do biochar, em que nesse caso bagaço de cana apresenta densidade menor que a torta de filtro.

O BC_TF apresentou maiores valores de pH comparado ao BC_BC e maiores incrementos com a temperatura, variando de 5,5 a 7,4 no BC_TF tornando-se ligeiramente alcalino (valor médio de 6,46), enquanto BC_BC variou de 4,4 a 5,6, da menor à maior temperatura, sendo então um biochar com características mais ácidas (valor médio de 4,83). Cely et al. (2015) relatam que a magnitude do aumento do pH durante a pirólise é altamente dependente do tipo de matéria-prima. Zornoza et al. (2016) comentam que o uso de biochars alcalinos pode ser benéfico para reduzir a acidez em alguns solos, mas também ter impactos negativos em solos com baixa capacidade tampão. Esses autores recomendam que a queima da matéria-prima em baixas temperaturas devem ser optadas para evitar incremento muito grande no pH para correção agrônômica.

Em valores médios, em relação à porcentagem de matéria orgânica, foi observado para o biochar de torta de filtro um valor médio de 15,58%. Já para o biochar de bagaço de cana observou-se um valor médio de 42,43%. Ou seja, o biochar advindo da matéria prima bagaço de cana apresentou quase 3 vezes o valor de matéria orgânica em relação à torta de filtro. E outro fato a ser observado é que para a pirólise de 250 °C para ambas as matérias primas, foram encontradas as maiores porcentagens de matéria orgânica. Fato relacionado diretamente com a porcentagem de C orgânico, apresentando os maiores valores para o biochar de bagaço de cana.

O conteúdo de cinzas, representado pelo resíduo mineral total (RMT), apresentaram uma tendência de aumentar os valores em função da temperatura de pirólise, indicando que os conteúdos catiônicos e aniônicos permanecem no biochar, e estes compostos alcalinos favoreceram o aumento do pH conforme a temperatura, como observado nesta pesquisa (Tabela 2). Os maiores valores de RMT (%) foram alcançados para a pirólise de 450 °C, para ambas as matérias primas. Comportamento semelhante foi observado por Zornoza et al. (2016) e Taherymoosavi et al. (2016).

O aumento no teor de cinzas, que representa o componente da matéria não volátil, ocorre em detrimento a redução dos teores de Carbono, Nitrogênio (N) e Enxofre (S) com o aumento da temperatura (Figura 5 e 6). Assim, de maneira geral, constatou-se que em menor valor de temperatura (250 °C) maior é o conteúdo de voláteis, sendo provavelmente um maior indicativo de um grande componente de carbono lábil que vai reduzindo com o aumento da temperatura de pirólise (MCBEATH et al., 2015; TAHERYMOOSAVI et al., 2016). Esses resultados mostram que biochars produzidos em temperaturas elevadas podem produzir um material orgânico com carbono mais estável.

Além da temperatura, a composição química do material orgânico utilizado para produção do biochar também é um indicador da estabilidade do biochar produzido. Pela Tabela 2 pode-se verificar que o bagaço de cana produziu um biochar de elevada relação C/N quando comparado o BC_TF. Com relação a temperatura observa-se comportamento inverso entre as matérias-primas, aumentando C/N em função da temperatura no BC_TF e reduzindo no BC_BC.

Além desses aspectos, a redução no rendimento de produção, resultando no aumento no teor de cinzas promoveu, proporcionalmente, uma elevação nas concentrações totais dos nutrientes minerais Ca, Mg, P, K, Cu, Mn, Zn, B e também do Na, que não são perdidos por volatilização (ZORNOZA et al., 2016) (Figuras 5 e 6). Com o aumento da temperatura é observado que o P e o Ca são os elementos de maior concentração na torta de filtro

(Figura 5) e o potássio como sendo o elemento mais presente no bagaço de cana (Figura 6). De maneira geral o BC_TF apresentou maiores teores totais para todos os nutrientes em comparação ao BC_BC, reforçando a influência da matéria-prima nas características do biochar produzido.

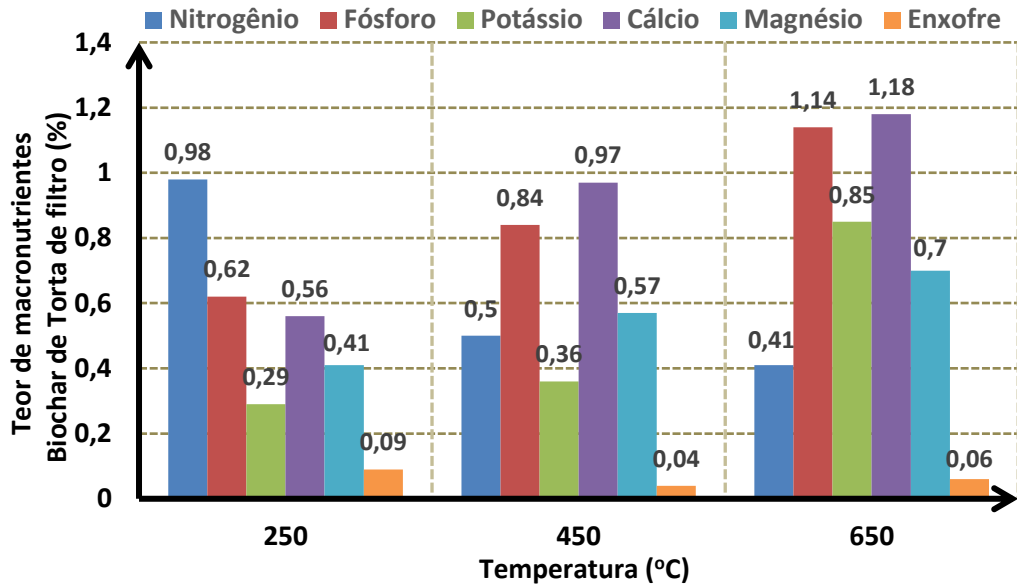


Figura 5. Teores de macronutrientes (%) presentes nos diferentes tipos de biochar em função da temperatura de pirólise. (A) biochar de torta de filtro e (B) biochar de bagaço de cana.

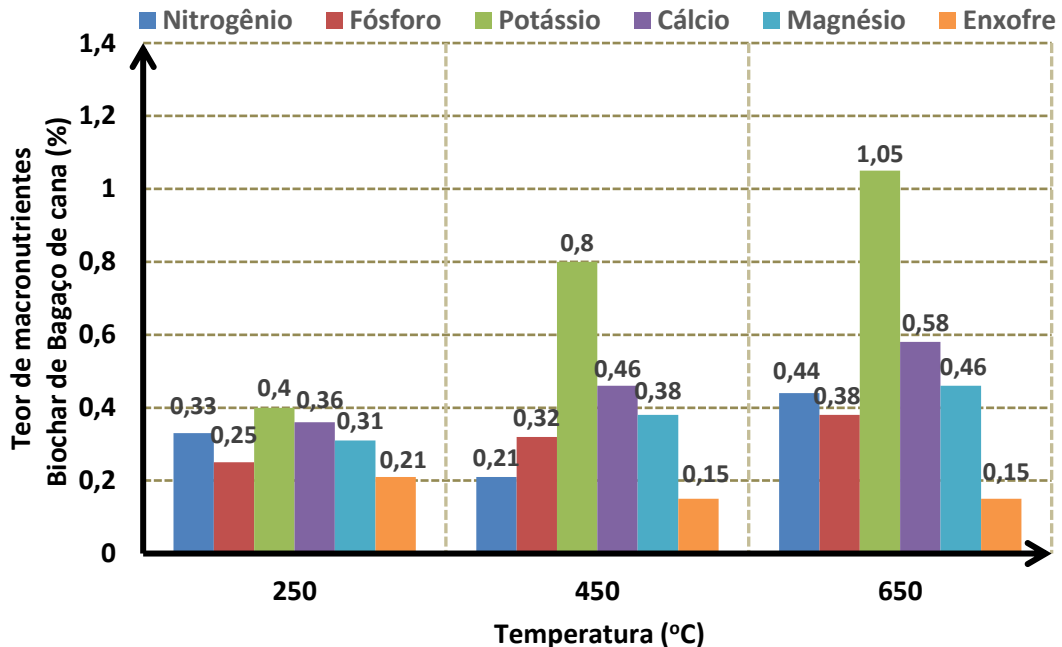


Figura 6. Teores de macronutrientes (%) presentes nos diferentes tipos de biochar em função da temperatura de pirólise. (A) biochar de torta de filtro e (B) biochar de bagaço de cana.

A capacidade de troca catiônica (CTC) dos biochars, que representa a quantidade total de cátions que podem ser adsorvidos na superfície do biochar, foi afetado pela temperatura de produção e características da matéria-prima. A CTC dos biochars de bagaço de cana e torta de filtro reduzem à medida que aumenta a temperatura. Para o BC_TF a CTC variou entre 270 e 130 mmolc kg⁻¹ (valor médio de 137,33) e no BC_BC entre 160 e 130 mmolc kg⁻¹

da menor temperatura (250 °C) até a maior temperatura (650 °C) (valor médio de 143,33). É observado então que a matéria-prima torta de filtro apresenta uma significativa redução na CTC com o incremento da temperatura de pirólise.

A redução na CTC com o aumento da temperatura pode ser devido à transformação de grupos funcionais orgânicos com a temperatura de carbonização, uma vez que após aquecimento ocorre formação de grupos carboxílicos que podem reter cátions; entretanto, esse grupo funcional e os grupos hidroxila diminuem progressivamente com a temperatura (ZORNOZA et al., 2016; CELY et al., 2015; ZHANG et al., 2021).

O uso agrônômico de resíduos com elevada CTC melhora as características do solo, pelo aumento na capacidade de reter cátions nutrientes, deixando-os disponíveis às plantas, podendo reduzir também a lixiviação e até mesmo imobilizar elementos traços e tóxicos às plantas e microbiota do solo.

Pela Figura 7 pode-se conferir a capacidade de retenção de água (CRA) dos diferentes tipos de biochars produzidos, representados em porcentagem. Notou-se que a CRA (%) apresentou um incremento nas porcentagens à medida em que se aumentava os valores da temperatura de pirólise, destacando-se para o biochar produzido pelo bagaço de cana, na temperatura de pirólise de 450 °C. Já para o biochar advindo da torta de filtro, apresentou o mesmo comportamento, porém o maior valor foi alcançado pela temperatura de pirólise de 650 °C.

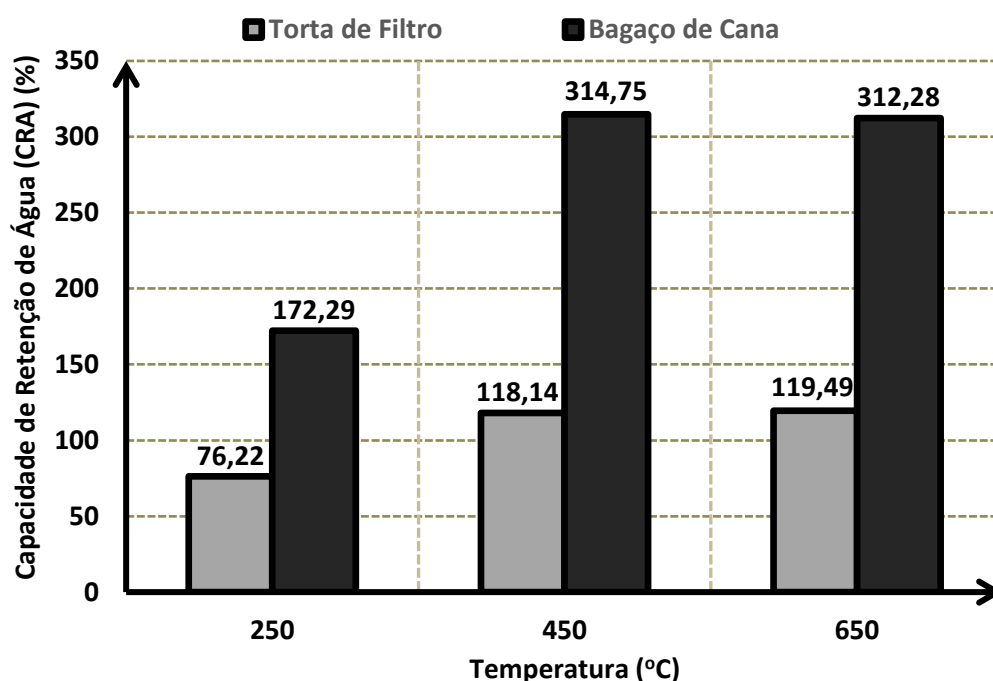


Figura 7. Capacidade de retenção de água (CRA %) dos biochars em função da temperatura de pirólise.

A explicação do aumento da CRA em função do aumento de temperatura para ambas as matérias-primas estudadas está na mudança da hidrofobicidade do material com a temperatura, uma vez que a hidrofobicidade do biochar reduz com o aumento da temperatura de pirólise (WIERSMA et al., 2020). O biochar do bagaço de cana e a torta de filtro aumentaram em aproximadamente 83 % e 57 % CRA, respectivamente. A partir da temperatura de 450 °C ocorreu uma estabilidade na retenção de água pelo biochar até 650 °C.

A redução da hidrofobicidade do biochar, e aumento na capacidade de retenção de água com a temperatura está relacionado com a perda dos compostos lábeis com grupos funcionais de superfície alifática em altas temperaturas de pirólise. Dessa forma, os biochars produzidos a baixas temperaturas, devido a maior presença desses

grupos funcionais alifáticos, aliados à baixa porosidade e área superficial têm menos afinidade com água (DAS; SARMAH, 2015).

Diante disso, é natural se pensar que biochars com baixa hidrofobicidade deva ser priorizado para correção de solos visando melhorias nas propriedades hidráulicas dos solos. No entanto, Zornoza et al. (2016) comentam que o envelhecimento do biochar no solo pode modificar suas características hidrofóbicas iniciais devido as reações com os componentes do solo e decomposição microbiana ao longo do tempo. Os autores enfatizam ainda, que a incerteza sobre a relevância da hidrofobicidade do biochar recém produzido a longo prazo é alta e recomendam que seja feito um monitoramento contínuo dos efeitos sobre as propriedades hidráulicas do solo ao longo do tempo, independente da matéria-prima.

4.2. Variáveis físicas dos solos corrigidos com biochar de cana-de-açúcar

4.2.1. Densidade de partículas (Dp)

A densidade de partículas (Dp) dos solos corrigidos com biochar variaram em função da temperatura de pirólise, doses e matéria-prima (Tabela 3). Para solos tropicais a literatura considera o valor médio para densidade de partículas de 2,65 g cm⁻³, que é considerado a faixa de densidade dos minerais predominante nos solos. Os valores encontrados foram próximos a esse valor médio de referência, no entanto é observado sutis diferenças entre os tratamentos em função do biochar adicionado.

Tabela 3. Densidade de partículas do solo corrigido com biochar de cana-de-açúcar em função de diferentes temperaturas de pirólise e doses de aplicação.

DENSIDADE DE PARTÍCULAS (g cm ⁻³)				
PIRÓLISE	BIOCHAR		DOSE	
	BAGAÇO DA CANA (BC_BC)	TORTA DE FILTRO (BC_TF)	2,50%	5%
250 °C	2,63 cB	2,66 bA	2,65 b ^{ns}	2,64 b
450 °C	2,65 bB	2,68 aA	2,67 aA	2,65 bB
650 °C	2,67 a ^{ns}	2,67 ab	2,66 ab ^{ns}	2,67 a
DOSES	BAGAÇO DA CANA (BC_BC)	TORTA DE FILTRO (BC_TF)	SOLO PURO	
	2,50%	2,65 ^{ns} B	2,67 ^{ns} A	2,67
	5%	2,64 B	2,66 A	

ns - não significativo ao nível de 5 % pelo teste F da ANOVA. Letras minúsculas na coluna e maiúsculas na linha indicam que as médias não diferem entre si ao nível de 5 % de significância pelo teste Tukey. BC_BC = Biochar de bagaço de cana-de-açúcar; BC_TF= biochar de torta de filtro.

De maneira geral observa-se que os biochars produzidos a partir do bagaço de cana (BC_BC) apresentaram menor densidade de partículas quando comparado ao biochar da torta de filtro (BC_TF). As temperaturas de pirólise também promoveram mudanças, sendo a temperatura de 250 °C a que apresentou menor densidade de partículas em ambas as matérias-primas.

Já as temperaturas 450 °C e 650 °C não diferiram no BC_TF e para o BC_BC a temperatura de 650 °C foi a que apresentou maiores médias de Dp. As doses usadas na correção praticamente não foram responsáveis para alterar os valores significativamente de Dp, apenas as médias da temperatura de 450 °C foram maiores na dose de 2,5 % em comparação com a dose de 5%. Blanco-Canqui (2017) comentam que a aplicação de biochar pode reduzir a densidade de partículas dos solos devido à baixa densidade de partículas do biochar e seus efeitos tendem a ser maiores com o aumento nas taxas de aplicação.

4.2.2. Densidade do solo

Para a variável densidade do solo, observou-se comportamento semelhante a densidade de partículas, em que a correção dos solos com o biochar de diferentes temperaturas e doses foram responsáveis por causar alterações nessas variáveis (Tabela 4).

Tabela 4. Densidade do solo corrigido com biochar de cana de açúcar em função de diferentes temperaturas de pirólise e doses de aplicação.

DENSIDADE DO SOLO (g cm ⁻³)				
PIRÓLISE	BIOCHAR		DOSE	
	BAGAÇO DA CANA (BC_BC)	TORTA DE FILTRO (BC_TF)	2,50%	5%
250 °C	1,13 b B	1,22 ^{ns} A	1,21 ^{ns} A	1,14 ^{ns} B
450 °C	1,15 ab B	1,23 A	1,22 A	1,15 B
650 °C	1,18 a A	1,20 A	1,21 A	1,17 B
DOSE	BAGAÇO DA CANA (BC_BC)	TORTA DE FILTRO (BC_TF)	SOLO PURO	
2,50%	1,19 a B	1,23 ^{ns} A	1,23	
5%	1,10 b B	1,20 A	1,23	

ns - não significativo ao nível de 5 % pelo teste F da ANOVA. Letras minúsculas na coluna e maiúsculas na linha indicam que as médias não diferem entre si ao nível de 5 % de significância pelo teste Tukey. BC_BC = Biochar de bagaço de cana-de-açúcar; BC_TF= biochar de torta de filtro.

De maneira geral observou-se que o biochar tem a propriedade de reduzir a densidade do solo, especialmente o produzido a partir do bagaço de cana-de-açúcar. Na interação entre matéria-prima e temperatura de pirólise, o BC_BC apresentou solos com menor densidade quando comparado ao BC_TF, exceto estatisticamente para 650°.

Já analisando o efeito da temperatura de pirólise em cada uma das matérias primas, observou-se que a temperatura de produção do biochar de torta de filtro não influenciou na densidade do solo.

No entanto, essa variável é importante para matéria prima bagaço de cana, uma vez quando o biochar foi produzido a 250° e misturado ao solo promoverá maior redução na densidade do solo. Quando analisado o efeito da dose do biochar aplicado em função da matéria-prima e da temperatura de pirólise na densidade do solo, é observado que de maneira geral a dose de 5% promoveu redução da densidade do solo em praticamente todos os tratamentos, sendo a única exceção o BC_TF, não sendo observada diferença estatística entre as doses de 2,5 e 5 %.

O biochar, material orgânico e de elevada porosidade, apresenta densidades menores que as partículas minerais dos solos (ZHANG et al., 2021), e quando aplicados aos solos apresentam possibilidade de reduzir significativamente a densidade do solo através do efeito de mistura ou diluição (BLANCO-CANQUI, 2017). Mudanças tornam-se geralmente maiores com o aumento nas taxas de aplicação do biochar conforme relatado por Omondi et al. (2016) e observados por Tanure et al. (2019), Yang e Lu (2021) e Dokoochaki et al. (2017).

De modo geral o BC_BC promoveu redução média de 6 % na densidade do solo quando comparado com o solo puro, com densidade de $1,23 \text{ g cm}^{-3}$, e de 5 % com o BC_TF. Já o BC_TF, em média, praticamente não foi capaz de promover reduções significativas na densidade, comparado com o solo puro, cerca de 1 %. Visto a importância da densidade do solo como um parâmetro físico de qualidade relacionado com o grau de compactação e consequente distribuição e conectividade dos poros, que afetam o movimento da água e do ar através do solo (RAZZAGHI; OBOUR; ARTHUR, 2020), sua determinação se faz necessária para melhor entendimento do ambiente de crescimento radicular das plantas. A redução da densidade do solo promovidos pelos biochars, especialmente de origem do bagaço de cana, se torna importante para aplicação em solos agrícolas degradados e sujeitos a compactação, a fim de promover melhor ambiente para o crescimento radicular e aumentar a produção. As reduções promovidas na densidade do solo pelo biochar são variáveis e dependentes do tipo de biochar produzido em função da matéria-prima, tipo de solo, tamanho de partícula do biochar, taxa de aplicação e tempo de incubação (BLANCO-CANQUI, 2017; ZHANG et al., 2021).

4.2.3. Porosidade do solo

A porosidade total dos solos corrigidos apresentou-se estatisticamente maiores de maneira geral no BC_BC quando comparado ao BC_TF nas temperaturas de pirólise de 250 °C e 450 °C (Tabela 5).

Já as temperaturas de pirólise não influenciaram na porosidade em ambas as matérias-primas. Com relação as doses aplicadas, foi observado que o aumento da dose promoveu um aumento na porosidade total dos solos corrigidos, independente da temperatura ou da matéria-prima estudada. De maneira geral a correção do solo com biochar proporcionou maior porosidade ao mesmo quando comparado ao solo não corrigido, independente da matéria-prima utilizada. HARDIE et al., (2014) em sua pesquisa constataram que a correção de solos com biochar pode promover o aumento em sua porosidade total e comentam também que esse aumento pode ser função da criação de poros grandes ao redor das partículas de biochar aplicados ao solo. Resultado semelhante também foram encontrados por ALGHAMDI; ALKHASHA; IBRAHIM (2020).

Tabela 5. Porosidade total solo corrigido com biochar de cana de açúcar em função de diferentes temperaturas de pirólise e doses de aplicação.

POROSIDADE TOTAL (%)				
PIRÓLISE	BIOCHAR		DOSE	
	BAGAÇO DA CANA	TORTA DE FILTRO	2,50%	5%
	(BC_BC)	(BC_TF)		
250 °C	57,1 ^{ns} A	53,9 ^{ns} B	54,5 ^{ns} B	56,7 ^{ns} A
450 °C	56,6 A	54,1 B	54,2 B	56,5 A
650 °C	55,8 ^{ns}	54,9	54,2 B	56,2 A
DOSES				
2,50%	54,8 b ^{ns}	53,8	SOLO PURO	
5%	58,2 aA	54,8 B	53,6	

ns - não significativo ao nível de 5 % pelo teste F da ANOVA. Letras minúsculas na coluna e maiúsculas na linha indicam que as médias não diferem entre si ao nível de 5 % de significância pelo teste Tukey. BC_BC = Biochar de bagaço de cana-de-açúcar; BC_TF= biochar de torta de filtro.

A porosidade do solo é uma variável de grande importância para avaliação da qualidade física do solo, uma vez que está diretamente envolvida na dinâmica da água e gases no solo. Sua determinação e avaliação de acordo com a distribuição em classes de tamanho ajuda a compreender como se dá a dinâmica de água e de gases no solo sob as diferentes práticas de manejo (DEXTER, 2004).

Analisando os tratamentos individualmente pela Tabela 6, pode-se conferir que em termos de porosidade total, os BC_BC, 450°C na dosagem 5%, BC_BC, 250°C na dosagem 5% e BC_BC, 650°C na dosagem 5% foram aqueles que obtiveram maiores valores, respectivamente.

Tabela 6. Porosidade total do solo corrigido com biochar de cana-de-açúcar em função de diferentes temperaturas de pirólise e doses de aplicação.

Tratamentos	Porosidade total (%)
BC_BC 250°C 2,5%	56
BC_BC 250°C 5%	58
BC_BC 450°C 2,5%	55
BC_BC 450°C 5%	59
BC_BC 650°C 2,5%	54
BC_BC 650°C 5%	58
BC_TF 250°C 2,5%	52
BC_TF 250°C 5%	55
BC_TF 450°C 2,5%	54
BC_TF 450°C 5%	54
BC_TF 650°C 2,5%	55
BC_TF 650°C 5%	55
Solo Puro	54

4.2.4. Capacidade de aeração e armazenamento de água no solo

As variáveis capacidade de aeração do solo (SAC) e capacidade de armazenamento de água no solo (SWSC) indicam como está a distribuição do total de poros do solo entre o armazenamento de água e aeração (Tabelas 7 e 8).

Esses índices são bastante sensíveis as diferentes práticas de manejo. Na literatura é indicada que solos de boa qualidade física devem ter a proporção de pelo menos 0,66 para SWSC e 0,34 para SAC (REYNOLDS et al., 2002).

De maneira geral, em todos os tratamentos foram observados elevados valores de capacidade de aeração do solo (SAC), inclusive no tratamento controle, indicando que os solos apresentaram elevada aeração, acima do limite mínimo de 0,34 (Tabela 7). Esses valores foram encontrados em solos com predomínio de poros grandes e bem estruturados.

O biochar produzido a partir do bagaço de cana (BC_BC) promoveu maior valor de capacidade de aeração aos solos (SAC), cerca de 18,5% quando comparado ao biochar de torta de filtro (BC_TF) na temperatura de 250 °C. Foi observado comportamento semelhante para a médias das doses de 5%, sendo estas 13,2 % maiores para BC_BC.

Proporcionalmente os valores de SWSC (Tabela 8) foram menores que o valores mínimo de referência de 0,66, conforme REYNOLDS et al. (2002). Para esta variável observa-se que a adição do biochar de torta de filtro (BC_TF) pirolisado a 250 °C e na dose de 5% em média promoveu aumento na SWSC quando comparado ao biochar de bagaço de cana (BC_BC). Já na média para todos os tratamentos, a dose de 2,5% na temperatura de 250 °C teve maior SWSC quando comparado com a média dos biochars aplicado em 5%. Comportamento inverso foi observado para SAC, onde observa-se que o BC_BC promove maior aeração do solo, conforme observado também maior porosidade total para os solos condicionados com esse biochar (Tabela 5).

Tabela 7. Capacidade de aeração do solo (SAC) no solo corrigido com biochar de cana de açúcar em função de diferentes temperaturas de pirólise e doses de aplicação.

CAPACIDADE DE AERAÇÃO DO SOLO (SAC)				
PIRÓLISE	BIOCHAR			
	BAGAÇO DA CANA (BC_BC)	TORTA DE FILTRO (BC_TF)		
	250 °C	0,534 ^{ns} A	0,435 ^{ns} B	
450 °C	0,481	0,438		
650 °C	0,479	0,462		
DOSES	BAGAÇO DA CANA (BC_BC)	TORTA DE FILTRO (BC_TF)		
	2,50%	0,473 ^{ns}	0,437 ^{ns}	SOLO PURO
	5%	0,522 A	0,453 B	0,476

ns - não significativo ao nível de 5 % pelo teste F da ANOVA. Letras minúsculas na coluna e maiúsculas na linha indicam que as médias não diferem entre si ao nível de 5 % de significância pelo teste Tukey. BC_BC = Biochar de bagaço de cana-de-açúcar; BC_TF= biochar de torta de filtro.

Tabela 8. Capacidade de armazenamento de água no solo (SWSC) no solo corrigido com biochar de cana de açúcar em função de diferentes temperaturas de pirólise e doses de aplicação.

CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO (SWSC)				
PIRÓLISE	BIOCHAR		DOSE	
	BAGAÇO DA CANA	TORTA DE FILTRO	2,50%	5%
	(BC_BC)	(BC_TF)		
250 °C	0,465 ^{ns} B	0,564 ^{ns} A	0,552 ^{ns} A	0,478 ^{ns} B
450 °C	0,518	0,561	0,555	0,524
650 °C	0,520	0,537	0,525	0,532
DOSES				
2,50%	0,526 ^{ns}	0,562 ^{ns}	SOLO PURO	
5%	0,477 B	0,546 A	0,523	

ns - não significativo ao nível de 5 % pelo teste F da ANOVA. Letras minúsculas na coluna e maiúsculas na linha indicam que as médias não diferem entre si ao nível de 5 % de significância pelo teste Tukey. BC_BC = Biochar de bagaço de cana-de-açúcar; BC_TF= biochar de torta de filtro.

4.2.5. Espaço poroso preenchido por água

A elevada aeração do solo influenciou o espaço poroso cheio de água dos solos (WFPS) (Tabela 9). Para essa variável o limite crítico é de 0,70, sendo a partir desse valor, indicam excesso de água no solo e redução da aeração, onde as reações de desnitrificação dos solos são favorecidas, devido a limitação de oxigênio (WIENHOLD et al., 2009). Em todos os tratamentos pode-se observar que os valores ficaram abaixo do valor crítico.

Em relação às matérias-primas foi observado que o BC_TF apresentou valores médios superiores ao BC_BC quando a pirólise foi realizada a 250°C e aplicado na dose de 5%. No geral, foi notado que o BC_BC quando aplicado promoveu uma maior aeração aos solos quando comparado ao BC_TF.

Tabela 9. Espaço poroso ocupado por água (WFPS) no solo condicionado por biochar de cana de açúcar em função de diferentes temperaturas de pirólise e doses de aplicação.

ESPAÇO POROSO CHEIO DE ÁGUA (WFPS)				
PIRÓLISE	BIOCHAR		DOSE	
	BAGAÇO DA CANA	TORTA DE FILTRO	2,50%	5%
	(BC_BC)	(BC_TF)		
250 °C	0,581 ^{ns} B	0,643 ^{ns} A	0,645 ^{ns} A	0,580 ^{ns} B
450 °C	0,625	0,650	0,643	0,632
650 °C	0,612	0,626	0,609	0,629
DOSES				
2,50%	0,625 ^{ns}	0,639 ^{ns}	SOLO PURO	
5%	0,587 B	0,640 A	0,612	

ns - não significativo ao nível de 5 % pelo teste F da ANOVA. Letras minúsculas na coluna e maiúsculas na linha indicam que as médias não diferem entre si ao nível de 5 % de significância pelo teste Tukey. BC_BC = Biochar de bagaço de cana-de-açúcar; BC_TF= biochar de torta de filtro.

4.2.6. Condutividade hidráulica do solo saturado

Apesar de observadas as diferenças entre as matérias-primas, temperatura de pirólise e doses para as variáveis densidade, porosidade do solo e capacidade de armazenamento e aeração do solo, pode-se dizer que essas diferenças não refletiram significativamente em alterações para os valores de condutividade hidráulica do solo saturado (Tabela 10). WIERSMA et al. (2020) em seu experimento com diferentes matérias-primas não observaram efeitos significativos da temperatura de pirólise na condutividade hidráulica do solo saturado.

No entanto, de modo geral observou-se que solos condicionados com biochars, principalmente de bagaço de cana-de-açúcar, no geral, reduziram em até 68% os valores dessa variável quando comparado ao tratamento controle (solo sem aplicação), especialmente quando foram utilizadas doses com 2,5 % p/p. Já o biochar de torta de filtro em média, na dosagem de 5%, conferiu a menor redução na condutividade hidráulica do solo saturado quando comparado com o solo sem aplicação, em torno de 35%.

JACHKA et al. (2018) estudaram os efeitos da aplicação de biochar em solos contrastantes e concluíram que a aplicação de biochar foi capaz de diminuir a condutividade hidráulica dos solos, principalmente em solos mais grosseiros. Esses autores atribuem a redução na condutividade hidráulica do solo saturado ao “inchaço” intenso do biochar, e ressaltam ainda a capacidade desse tipo de material ser uma opção potencial para lidar com a seca especialmente em solos mais grosseiros além do potencial de aumentar a retenção de água no solo.

Tabela 10. Condutividade hidráulica do solo saturado corrigido com biochar de cana de açúcar em função de diferentes temperaturas de pirólise e doses de aplicação.

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO – K _{sat} (cm h ⁻¹)				
PIRÓLISE	BIOCHAR		DOSE	
	BAGAÇO DA CANA (BC_BC)	TORTA DE FILTRO (BC_TF)	2,50%	5%
250 °C	8,98 ^{ns}	13,66 ^{ns}	8,9 ^{ns}	13,74 ^{ns}
450 °C	9,07	10,15	6,96	12,26
650 °C	10,06	11,59	8,66	13,0
DOSES				
2,50%	6,88 ^{ns}	9,47 ^{ns}	SOLO PURO	
5%	11,86	14,14	21,7	

ns - não significativo ao nível de 5 % pelo teste F da ANOVA. Letras minúsculas na coluna e maiúsculas na linha indicam que as médias não diferem entre si ao nível de 5 % de significância pelo teste Tukey. BC_BC = Biochar de bagaço de cana-de-açúcar; BC_TF= biochar de torta de filtro.

4.2.7. Curva de retenção e água disponível no solo

Pela Tabela 11 podem ser conferidos os valores dos parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água para os diferentes tratamentos de solos condicionados com biochar. Foi utilizado o modelo RETC e com a opção de ajuste numérico pelo modelo de van GENUCHTEN (1980) o qual se mostrou eficiente para todos os solos, conforme observado os valores de R², e minimização dos valores dos erros entre o observado e o ajustado confirmado pelos baixos valores encontrados de RMSE.

Os valores de R^2 calculados variaram de 0,97 para o tratamento BC_BC, 650 °C na dose de 5%, até valores de ajustes de 0,99 para os tratamentos BC_BC, 250°C na dosagem de 2,5%, BC_BC, 450°C na dosagem de 2,5%, BC_TF, 250°C na dosagem de 2,5%, BC_TF, 450°C na dosagem de 2,5% e BC_TF, 650°C na dosagem de 2,5%. Os valores de RMSE calculados confirmam o reduzido erro nos ajustes dos modelos, sendo encontrado o menor valor de 0,004 para os tratamentos BC_BC, 450°C na dosagem de 2,5% e BC_TF, 250°C na dosagem de 2,5% e o maior valor de RMSE de 0,0010 para BC_BC, 650°C na dosagem de 2,5% e BC_TF, 450°C na dosagem de 5%.

Para o ajuste numérico dos dados experimentais pelo modelo de van GENUCHTEN (1980), foi necessário adotar a condição de contorno $\theta_r \Rightarrow 0$, afim de evitar ajustes com parâmetros θ_r negativos, uma vez que o conteúdo de água residual é um parâmetro de ajuste numérico no qual o potencial mátrico tende ao infinito. Os tratamentos BC_BC, 450°C na dosagem de 2,5%, BC_TF, 250°C na dosagem de 2,5%, BC_TF, 450°C na dosagem de 2,5%, BC_TF, 450°C na dosagem de 5%, apresentaram valores de ajuste de θ_r iguais a zero.

O conteúdo de água na saturação (θ_s) pode ser associado à porosidade total do solo que vem a ser preenchida por água. Para essa variável, os maiores valores foram encontrados para os solos corrigidos com BC-BC sempre com a dosagem de 5% p/p, sendo que os tratamentos BC_BC, 450°C na dosagem de 5% e BC_BC, 650°C na dosagem de 5% apresentam os maiores valores, sendo estes aproximadamente 8% maior que o tratamento com solo puro, seguido do tratamento BC_BC, 250°C na dosagem de 5%,

Já o tratamento BC_TF, 250°C na dosagem de 2,5% apresentou menor valor de conteúdo de água saturado ($0,5235 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), sendo aproximadamente 5% menor que o solo puro e os demais variaram nas umidades entre $0,5446$ e $0,5620 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Quando observado os valores de n , de maneira geral os solos corrigidos com BC_BC apresentaram maiores valores, sendo o tratamento BC_BC 250°C 5% com maior valor (1,548) dentre todos. Para o parâmetro m , os valores encontrados seguiram a tendência do n , uma vez que são dependentes ($m=1/n$). Os valores de α variaram de 0,0511 no tratamento BC_BC, 250°C na dosagem de 2,55% até 0,1241 nos tratamentos BC_TF, 450°C nas dosagens de 2,5 e 5%.

Tabela 11. Parâmetros de ajuste da curva de retenção de água em solos corrigidos com biochar de cana de açúcar em função de diferentes temperaturas de pirólise e doses de aplicação

	θ_r	θ_s	α	n	m	R^2	RMSE
BC_BC 250°C 2,5%	0,0604	0,5584	0,0511	1,431	0,301	0,99	0,0005
BC_BC 250°C 5%	0,1002	0,5883	0,0605	1,507	0,336	0,98	0,0009
BC_BC 450°C 2,5%	0	0,5593	0,0775	1,256	0,204	0,99	0,0004
BC_BC 450°C 5%	0,0157	0,5931	0,0773	1,290	0,225	0,98	0,0009
BC_BC 650°C 2,5%	0,0950	0,5446	0,0693	1,351	0,260	0,97	0,0010
BC_BC 650°C 5%	0,0270	0,5913	0,0767	1,300	0,231	0,98	0,0009
BC_TF 250°C 2,5%	0	0,5235	0,0610	1,239	0,193	0,99	0,0004
BC_TF 250°C 5%	0,0204	0,5505	0,0892	1,251	0,201	0,98	0,0007
BC_TF 450°C 2,5%	0	0,5514	0,1241	1,207	0,171	0,99	0,0005
BC_TF 450°C 5%	0	0,5636	0,1241	1,217	0,178	0,98	0,0010
BC_TF 650°C 2,5%	0,0518	0,5568	0,0795	1,319	0,242	0,99	0,0005
BC_TF 650°C 5%	0,0149	0,5620	0,0660	1,275	0,216	0,98	0,0008
Solo Controle	0,0527	0,5477	0,0704	1,343	0,255	0,98	0,0007

θ_r - conteúdo volumétrico de água residual ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); θ_s - conteúdo volumétrico de água na saturação residual ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); α , n e m (parâmetros empíricos de ajuste da equação); R^2 (coeficientes de determinação).

Pela Figura 8 podem ser conferidas as curvas de retenção de água no solo com os pontos observados e os ajustados pelo modelo de van GENUCHTEN (1980) para solo condicionado com biochar de bagaço de cana e torta de filtro respectivamente, em função do tratamento de solo sem adição do biochar.

De maneira geral observa-se uma semelhança no comportamento das curvas para todos os tratamentos de biochar e com o solo sem adição do biochar. Conforme comentado anteriormente, observa-se graficamente (Figura 8) que os tratamentos de BC_BC nas diferentes temperaturas e doses de 5% foram os que apresentaram maiores valores de umidade na saturação. Conforme observado na Tabela 11, para os tratamentos de biochar de bagaço de cana, apenas o BC_BC, 650°C na dosagem de 2,5 % apresentou umidade na saturação menor que o tratamento controle, no entanto este foi o tratamento com maior umidade no PMP, demonstrando um aumento na sua capacidade de retenção de água em tensões maiores, principalmente quando aplicado tensões acima de 50 kPa.

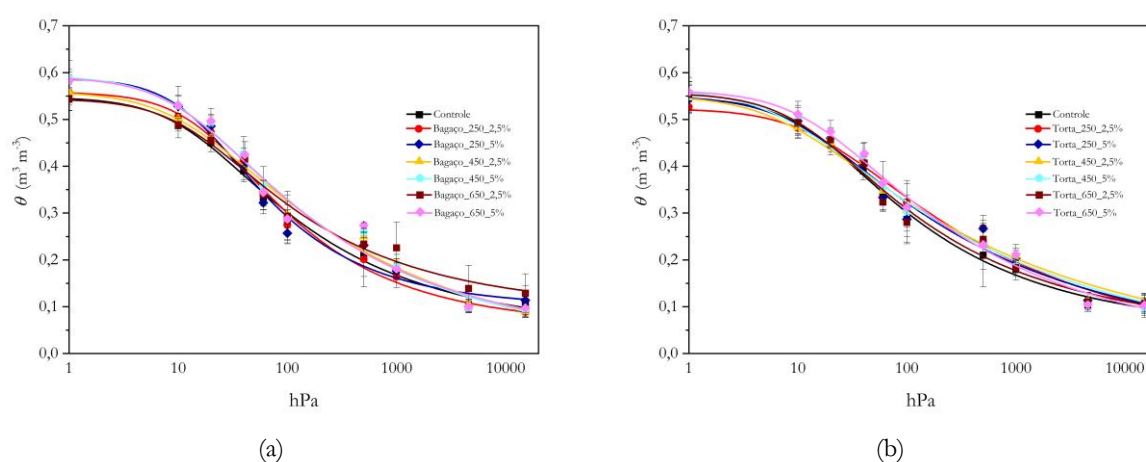


Figura 8. Curvas de retenção obtidas a partir de solos condicionados com biochar de bagaço de cana-de-açúcar (a) e torta de filtro (b) em diferentes temperaturas de pirólise e doses aplicada e do solo puro, sem adição de biochar.

Os tratamentos compostos por BC_BC pirolisados na temperatura de 250 °C tanto nas doses de 2,5 e 5%, decrescem rapidamente o conteúdo de água no solo quando aplicado tensão acima de 5 kPa. Com o aumento das tensões aplicadas, o conteúdo de água no tratamento BC_BC, 250°C na dosagem de 2,5% decresceu mais rapidamente até o ponto de murcha permanente (PMP), apresentando um dos mais baixos valores de umidade na tensão equivalente a 1500 kPa, sendo 14% menor que o tratamento de solo puro. Já o tratamento BC_BC, 250°C na dosagem de 5%, o conteúdo de água no solo reduz mais lentamente a partir dos 40 kPa, retendo mais água nas tensões superiores e apresentando um dos mais altos valores de PMP dentre os tratamentos.

O comportamento observado para BC_BC, 250°C na dosagem de 5%, é devido a alta porosidade drenável desse tratamento, sendo 26 % superior ao tratamento sem biochar e portanto, baixo valor de água disponível às plantas (AD), ficando está retida em poros muito pequenos e de difícil acesso às plantas (Tabela 12). Esse comportamento é explicado pela maior macroporosidade encontrada para este tratamento (Figura 10), responsável pela maior drenagem de água.

Quando comparados os comportamentos das curvas com biochar e com o controle (Figura 8), de maneira geral, observa-se que o biochar produzido a partir do bagaço de cana promove maior umidade na saturação e tendem a decrescer mais rapidamente a retenção com o aumento da tensão, voltando a reter mais água nas tensões próximas ao PMP.

De modo geral os solos condicionados com torta de filtro apresentaram umidade na saturação menor que os solos condicionados com biochar de bagaço de cana, sendo o tratamento BC_TF, 250°C na dosagem de 2,5 % o que apresentou menor valor na saturação.

Comparado a curva do solo puro com o solo condicionado com biochar de torta de filtro (Figura 9), observa-se que a partir da tensão de 4 kPa, os solos condicionados promoveram maior retenção de água, já o controle teve uma redução mais acentuada, demonstrando, portanto, a capacidade do biochar de torta de filtro em promover uma maior retenção de água em relação ao tratamento controle nas tensões intermediárias da curva. Os tratamentos passam a igualar o comportamento da curva em altas tensões, apresentando umidade no PMP muito próximos.

O solo condicionado com BC_TF, 650 °C na dosagem de 5 % reteve mais água dentre os tratamentos até o ponto de 15 kPa. Já o BC_TF, 450°C na dosagem de 2,5%, teve uma das mais baixas retenções de água em menores tensões devido ao rápido declínio da umidade até tensões próximas a 10 kPa, invertendo seu comportamento em tensões superiores 30 kPa, se mantendo como o tratamento que mais retém umidade até o PMP.

As curvas de frequência de raio de poros por intervalo de logaritmo do raio para os tratamentos de solos condicionados com biochar de bagaço de cana podem ser conferidas pela Figura 9. Os poros de máxima frequência por intervalo de $\log r_s$ variaram entre 32,07 μm no BC_BC, 450 °C na dosagem de 2,5% e 43,05 μm para o BC_BC, 250 °C na dosagem de 5%, já para o solo puro o poro de máxima frequência foi de 37,43 μm (Tabela 12).

Nas curvas correspondentes aos tratamentos com biochar de torta de filtro a variação entre os solos foi menor, sendo os poros mais frequentes variando entre 23,69 μm no BC_TF, 250 °C na dosagem de 2,5% e 44,15 μm no BC_TF, 450 °C na dosagem de 5 (Tabela 12).

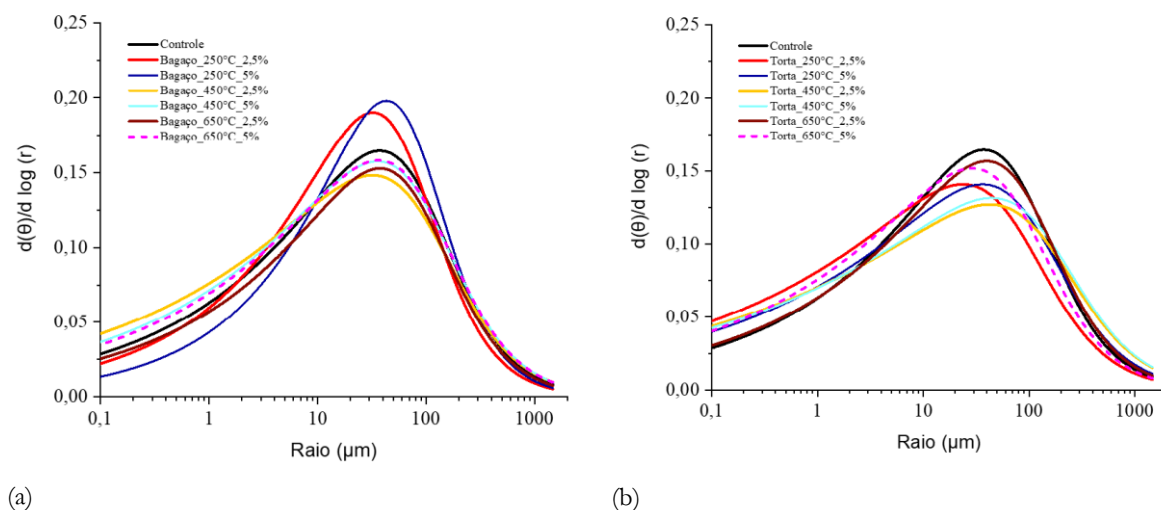


Figura 9. Curvas de frequência de raio de poros por intervalo de logaritmo do raio para os solos condicionados com biochar de bagaço de cana-de-açúcar (a) e torta de filtro (b) em diferentes temperaturas de pirólise e doses, em função do solo controle.

Nas curvas de frequência acumuladas correspondentes aos solos com biochar de bagaço de cana, apenas BC_BC, 250 °C na dosagem de 5% apresentou frequência de poros equivalentes à macroporos ($> 40 \mu\text{m}$) e para as curvas do biochar de torta de filtro, os tratamentos de BC_TF, 450° nas dosagens de 2,5 e 5% foram os que também apresentaram frequências equivalentes à macroporos.

Os demais tratamentos, assim como o solo sem adição de biochar apresentaram frequências equivalentes aos mesoporos (40 μm – 15 μm). A distribuição percentual da porosidade do solo em função das classes de tamanhos obtida pela curva de retenção mostra que, de modo geral para o biochar de torta de filtro são encontrados microporos em maior proporção (Figura 10).

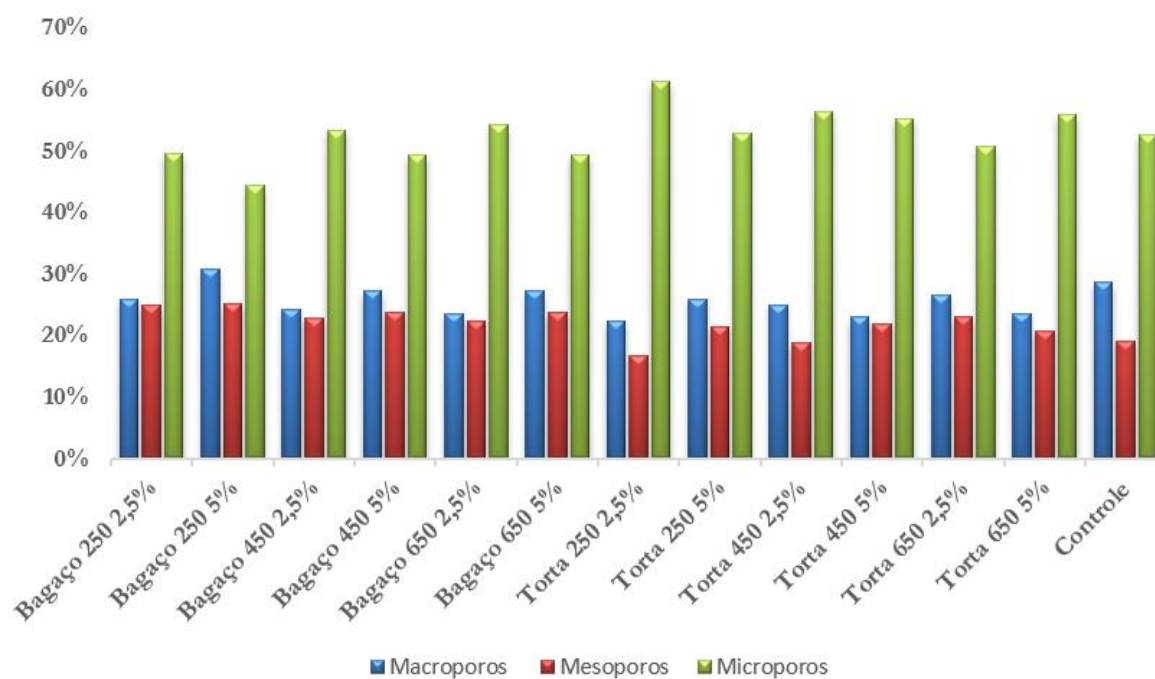


Figura 10. Distribuição percentual da porosidade dos solos em função das classes de tamanho.

Dentre as combinações, o tratamento BC_TF, 250°C na dosagem 2,5%, foi o que apresentou maior valor percentual de microporos dentre todos os tratamentos, com valores aproximadamente 15% superiores ao solo não condicionado por biochar, seguidos dos tratamentos BC_TF, 450°C nas dosagens de 2,5 e 5% e BC_TF 650°C na dosagem 5%. Sendo estes, portanto, os tratamentos que tiveram menores percentuais de macroporosidade e o BC_BC, 250°C na dosagem de 5% foi o tratamento com maior percentual de macroporos. Já os percentuais de mesoporos foram maiores nos solos condicionados com biochar independente da matéria-prima, temperatura e doses aplicadas quando comparadas ao controle, exceto para o BC_TF, 250°C na dosagem 2,5%.

Assim como nessa pesquisa, Tanure et al. (2019) estudaram os efeitos da aplicação de biochar nos atributos físicos de um latossolo de textura arenosa e constataram que de maneira geral, nos solos o biochar promove aumento na relação microporos/macroporos.

Na Tabela 12, podem ser conferidos os valores relativos às umidades na capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), água disponível (AD) e porosidade drenável para os tratamentos de solos condicionado com biochar de bagaço de cana e torta de filtro, e para o solo puro. Para essas variáveis não foi encontrada diferença estatística pela análise de variância ao nível de 5%.

Considerando a capacidade de campo (CC) como o conteúdo de água retido na tensão correspondente de 10 kPa para os solos estudados, verifica-se que com exceção dos tratamentos do BC_BC, 250°C na dosagem 2,5%, BC_BC, 250°C na dosagem 5% e BC_TF, 650°C na dosagem 2,5%, todos os demais tratamentos apresentaram maiores valores de umidade na capacidade de campo (CC) quando comparado o solo controle, demonstrando,

portanto, a capacidade do biochar promover uma maior capacidade de retenção de água, principalmente na capacidade de campo.

Tabela 12. Conteúdo de volumétrico de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) correspondentes a capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (CC – PMP).

	CC	PMP	AD	Porosidade drenável	r máx
BC_BC 250°C 2,5%	0,275	0,089	0,186	0,23	32,40
BC_BC 250°C 5%	0,257	0,114	0,143	0,27	43,05
BC_BC 450°C 2,5%	0,297	0,092	0,205	0,20	32,07
BC_BC 450°C 5%	0,289	0,094	0,195	0,24	35,64
BC_BC 650°C 2,5%	0,294	0,139	0,155	0,20	37,50
BC_BC 650°C 5%	0,287	0,097	0,190	0,24	36,43
BC_TF 250°C 2,5%	0,322	0,103	0,220	0,16	23,69
BC_TF 250°C 5%	0,285	0,109	0,175	0,21	36,33
BC_TF 450°C 2,5%	0,305	0,106	0,199	0,18	42,25
BC_TF 450°C 5%	0,302	0,097	0,206	0,20	44,15
BC_TF 650°C 2,5%	0,279	0,106	0,173	0,22	39,71
BC_TF 650°C 5%	0,311	0,103	0,208	0,20	29,09
Solo Puro	0,283	0,103	0,180	0,20	37,43

BC_BC = biochar de bagaço de cana; BC_TF = biochar de torta de filtro; CC - capacidade de campo; PMP - ponto de murcha permanente e AD - água disponível (CC – PMP); r máx (μm).

Dentre todos os tratamentos, a combinação BC_TF, 250°C na dosagem de 2,5% foi o que apresentou maior umidade na CC ($0,322 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), sendo 12% maior que o solo sem adição do biochar, seguido dos tratamentos BC_TF 650°C na dosagem de 5%, BC_TF, 450°C na dosagem 2,5% e BC_TF, 450°C na dosagem 5%, apresentado respectivamente 9%, 7% e 6% mais água retida na capacidade de campo do que o solo puro. Já o BC_BC, 250°C na dosagem de 5% apresentou o menor valor de umidade ($0,257 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) na capacidade de campo dentre os tratamentos, sendo 9% menos umidade que o solo puro.

Quanto a umidade no ponto de murcha permanente (PMP) foi observado que o tratamento BC_BC, 250°C na dosagem de 2,5% apresentou menor umidade ($0,089 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), 14% menor que o solo puro e o BC_BC, 650°C na dosagem de 2,5% foi o que obteve a maior retenção de umidade na tensão de 1500 kPa, um aumento de 26% comparando ao solo sem adição de biochar.

De um modo geral, foram observados na variável água disponível (AD) que nem todos os tratamentos com biochar foram capazes de aumentar os valores em relação ao solo controle. Em muitos tratamentos, os baixos valores de AD podem ser explicados pela elevada perda de umidade quando aplicado as tensões mais baixas, entre 1 kPa até 10 kPa, conforme Tabela 12, como porosidade drenável.

Os tratamentos de biochar de bagaço de cana-de-açúcar (BC_BC) pirolisados nas temperaturas de 250, 450 e 650 °C quando aplicados nas taxas de 5% p/p conferiram aos solos tratados maior volume de água drenada nas tensões entre 1 e 10 kPa, 26 %, 16% e 16% respectivamente maiores que o solo sem adição de biochar, sendo o BC_BC 250° 5% o que apresentou maior valor de porosidade drenável ($0,27 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) (Tabela 11).

Ainda com relação ao conteúdo de água disponível para as plantas (AD), correspondente a umidade entre a CC (10 kPa) e PMP (1500 kPa) (Tabela 12), observou-se que a combinação BC_TF, 250°C na dosagem 2,5%

apresentou maior valor de AD dentre todos os tratamentos ($0,220 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), seguido dos tratamentos BC_TF, 650°C na dosagem 5% ($0,208 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), BC_TF, 450°C na dosagem 5% ($0,206 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), BC_BC, 450°C na dosagem 2,5% ($0,205 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Percentualmente esses tratamentos apresentaram respectivamente 19%, 13 %, 12 % e 12% mais água disponível no solo quando comparado ao tratamento sem adição do biochar. Esses seriam, portanto, os tratamentos com maior potencial para aumentar a capacidade de água disponível em solos arenosos, com destaque ao BC_TF 250°C 2,5%, sendo o que apresentou maior umidade na capacidade de campo ($0,322 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e 19% mais água disponível comparado ao tratamento controle.

O aumento na AD para BC_TF, 250°C na dosagem 2,5%, foi reflexo da maior microporosidade observada entre todos os tratamentos. A melhoria na retenção de água e na água disponível aliado ao aumento na microporosidade do solo é corroborado por Tanure et al. (2019).

A água disponível para as plantas é um parâmetro de grande importância na agricultura, pois determina, em parte, o manejo da irrigação. Em solos com elevada porcentagem de areia, a redução da AD implica em maior necessidade de irrigação para atender a demanda da cultura. Sendo assim, o uso de biochar com a finalidade de aumentar o conteúdo de água disponível, especialmente em solo arenosos, se torna uma importante alternativa de manejo agrícola para uso eficiente e sustentável dos recursos hídricos em lavouras irrigadas.

Os resultados obtidos na análise de componentes principais (PC) para os solos condicionados com biochar de bagaço de cana e o solo controle, mostram que o primeiro componente principal (PC1) apresenta 62,35 % da variância total dos dados, o segundo componente (PC2) é explicado por 18,71 % e o terceiro componente (PC3) 12,17% da variação, sendo os três componentes responsáveis por 93,23% da variância total dos dados (Tabela 13).

As maiores contribuições para o PC1 foram observadas para as variáveis SAC (0,36), PD (0,36), Macroporos (0,33), PT (0,31), sendo essas positivas e as variáveis SWSC (-0,36), Ds (-0,32), CC (-0,31) e microporos (-0,31) com contribuições negativas. No PC2 a AD (0,58) e PMP (-0,52) foram as variáveis com maiores peso e no PC3, o Ksat (0,73), macroporos (0,33), mesoporos (-0,39) e PMP (-0,35) apresentaram maiores contribuições.

Tabela 13. Autovalores e autovetores extraídos dos componentes principais obtidos pelos tratamentos de solo condicionados com biochar de bagaço de cana e solo controle.

Variáveis	PC1	PC2	PC3
Autovalores	7,48	2,24	1,46
Variância explicada (%)	62,35	18,71	12,17
Variância acumulada (%)	62,35	81,06	93,23
Autovetores			
Ds	-0,32	-0,23	0,04
CC	-0,31	0,28	-0,03
PMP	-0,07	-0,52	-0,35
AD	-0,14	0,58	0,26
PD	0,36	0,08	-0,03
PT	0,31	0,26	0,00
K_{sat}	0,01	-0,25	0,73
SAC	0,36	-0,03	0,04
SWSC	-0,36	0,03	-0,04
Macroporos	0,33	-0,09	0,33
Mesoporos	0,29	0,26	-0,39
Microporos	-0,31	0,24	0,01

Ds-densidade do solo; CC – capacidade de campo; PMP – ponto de murcha permanente. AD – água disponível para as plantas; PD – porosidade drenável; PT – porosidade total; K_{sat} – condutividade hidráulica do solo saturado; SAC – capacidade de aeração do solo; SWSC – capacidade de armazenamento de água no solo.

O gráfico Biplot mostra a correlação das variáveis em função dos componentes principais para os diferentes tratamentos de solos condicionados com biochar de bagaço de cana e o solo controle (Figura 11). Para esses tratamentos foi observado alta correlação entre as variáveis Mesoporos e PT, também para SAC e Macroporos e CC e Microporos.

Levando-se em consideração os quadrantes e a influência de cada uma das variáveis nos tratamentos, observa-se que o biochar de bagaço de cana na temperatura de pirólise de 250°C na dosagem de 5% formou um grupo com K_{sat} , Macroporos e SAC; os tratamentos nas temperaturas de 250°C na dosagem de 2,5%, 450°C e 650°C nas dosagens de 5% formaram grupo com Mesoporos, PT, PD; biochar na temperatura de 450°C na dosagem de 2,5% formou um grupo com as variáveis AD, CC, Microporos, SWSC; e o Controle junto com o biochar a 650°C na dosagem de 5% formou grupo com as variáveis Ds e PMP. Assim, através dos Biplot e as cargas fatoriais das variáveis pode-se considerar que para o biochar de bagaço de cana, altas dosagens tendem a favorecer a maior aeração do solo e temperatura intermediárias como 450°C tendem a favorecer uma maior disponibilidade de água no solo. E de modo geral o condicionamento do solo arenoso com biochar de bagaço de cana é benéfico e a escolha da melhor combinação entre temperatura de pirólise e dose vai depender do objetivo da correção.

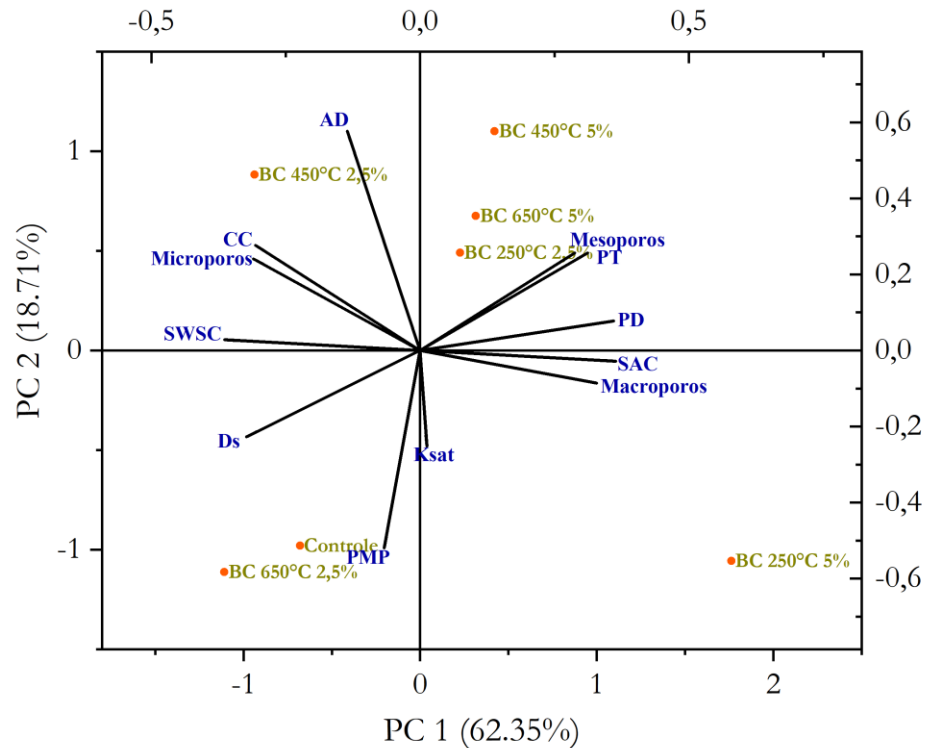


Figura 11. Biplot com os PC1 e PC2 nos solos condicionados com biochar de bagaço de cana e solo controle para as variáveis Ds-densidade do solo; CC – capacidade de campo; PMP – ponto de murcha permanente. AD – água disponível para as plantas; PD – porosidade drenável; PT – porosidade total; Ksat – condutividade hidráulica do solo saturado; SAC – capacidade de aeração do solo; SWSC – capacidade de armazenamento de água no solo; macro, meso e microporos.

Na análise de componentes principais para os solos condicionados com biochar de torta de filtro e o solo controle, mostraram que 73,09 % da variação dos dados é explicada pelo primeiro componente principal (PC1), 12,44% pelo segundo componente principal (PC2) e 8,46 % pelo PC3, totalizando 93,99 % da variância total dos dados (Tabela 14).

O PC1 teve como variáveis de maior peso, SWSC (-0,33), microporos (-0,32), capacidade de campo (-0,32), AD (-0,32) com associações negativas. Ainda na PC1, as variáveis PD (0,33), SAC (0,33) e PT(0,30) tiveram os maiores pesos associações positivas. Na PC2, Ksat (-0,52), macroporos (-0,39) e Ds (-0,33) tiveram grandes associações negativas e mesoporos (0,48) e PT (0,32) com maiores pesos positivos. No PC3 o PMP foi a variável de maior peso (0,82), seguido do Ksat (-0,47).

Tabela 14. Autovalores e autovetores extraídos dos componentes principais obtidos pelos tratamentos de solo condicionados com biochar de torta de filtro e solo controle.

Variáveis	PC1	PC2	PC3
Autovalores	8,77	1,49	1,01
Variância explicada (%)	73,09	12,44	8,46
Variância acumulada (%)	73,09	85,53	93,99
Autovetores			
Ds	-0,29	-0,33	-0,01
CC	-0,32	0,18	-0,01
PMP	0,15	-0,18	0,82
AD	-0,32	0,20	-0,19
PD	0,33	0,14	-0,14
PT	0,30	0,32	0,05
K_{sat}	0,12	-0,52	-0,47
SAC	0,33	-0,02	-0,08
SWSC	-0,33	0,02	0,08
Macroporos	0,29	-0,39	0,05
Mesoporos	0,27	0,48	-0,12
Microporos	-0,32	0,11	0,10

Ds-densidade do solo; CC – capacidade de campo; PMP – ponto de murcha permanente. AD – água disponível para as plantas; PD – porosidade drenável; PT – porosidade total; K_{sat} – condutividade hidráulica do solo saturado; SAC – capacidade de aeração do solo; SWSC – capacidade de armazenamento de água no solo.

O gráfico Biplot conferido pela Figura 12 mostra as correlações entre as variáveis nos solos condicionais com biochar de torta de filtro e solo controle. Para esse conjunto de dados, fortes correlações são observadas para AD, CC, Microporos e SWSC.

Essas variáveis estão mais associadas ao tratamento nas temperaturas de 450°C e 250°C na dose de 2,5%, portanto maior tendência para retenção de água no solo. No outro extremo, biochars nas temperaturas de 650°C, na dosagem de 2,5% e 250°C na dosagem de 5% estão mais relacionados a aeração do solo, devido a maior relação com as variáveis PT, PD, SAC.

Com tendência de comportamento intermediário estão os biochars nas temperaturas de 450°C e 650°C nas dosagens de 5%.

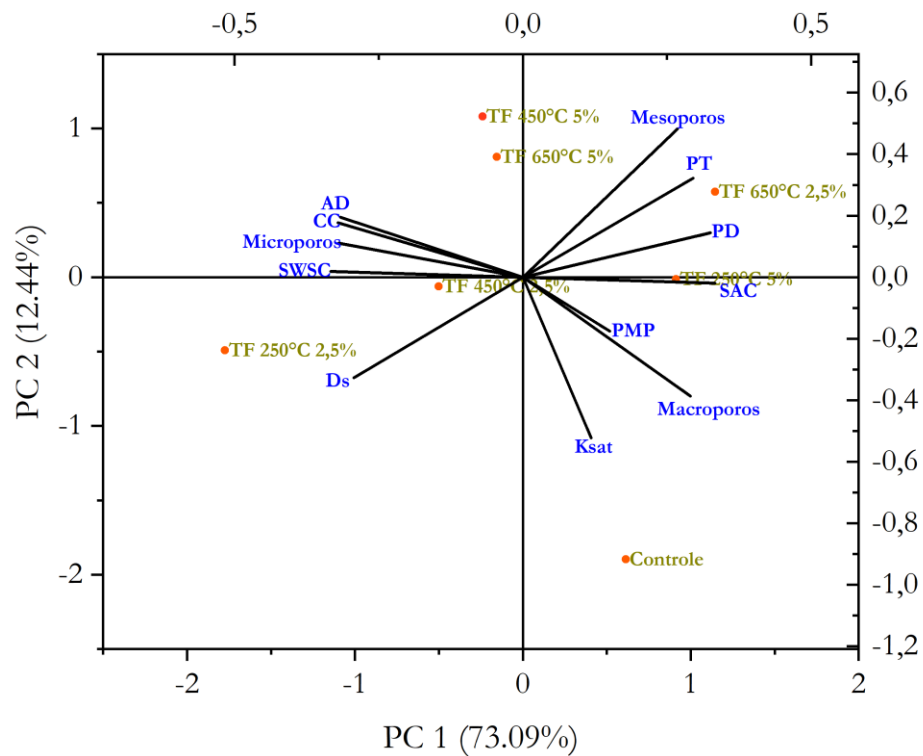


Figura 12. Biplot com os PC1 e PC2 nos solos condicionados com biochar de torta de filtro e solo controle para as variáveis Ds-densidade do solo; CC – capacidade de campo; PMP – ponto de murcha permanente. AD – água disponível para as plantas; PD – porosidade drenável; PT – porosidade total; Ksat – condutividade hidráulica do solo saturado; SAC – capacidade de aeração do solo; SWSC – capacidade de armazenamento de água no solo; macro, meso e microporos.

Os resultados obtidos para a análise de componentes principais para todos os tratamentos de biochar e solo controle mostram que 70,2% da variabilidade total dos dados é explicado no primeiro componente (PC1), 14,09 % para segundo componente (PC 2) e o terceiro componente principal (PC3) corresponde a 9,6 % da variação dos dados, totalizando 93,89 % da variação total dos dados (Tabela 15).

No PC1 as variáveis que apresentaram maiores associações positivas foram PD (0,34), SAC (0,34) e Macroporos (0,32) e negativas SWSC (-0,34), Microporos (-0,32) e CC (-0,32). No PC2 a AD foi a variável de maior contribuição positiva (0,54) e PMP com maior contribuição negativa (-0,71). Já na PC3 o Ksat foi a que apresentou maior peso (0,90).

Tabela 15. Autovalores e autovetores extraídos dos componentes principais obtidos pelos tratamentos de solo condicionados com biochar de bagaço de cana, torta de filtro e solo controle.

Variáveis	PC1	PC2	PC3
<u>Autovalores</u>	8,42	1,69	1,15
Variância explicada (%)	70,2	14,09	9,6
Variância acumulada (%)	70,2	84,29	93,89
<u>Autovetores</u>			
Ds	-0,31	-0,22	-0,01
CC	-0,32	0,18	-0,01
PMP	-0,01	-0,71	-0,16
AD	-0,24	0,54	0,08
PD	0,34	0,10	0,01
PT	0,31	0,24	0,04
K_{sat}	0,00	-0,14	0,90
SAC	0,34	0,00	0,01
SWSC	-0,34	0,00	-0,01
Macroporos	0,32	-0,01	0,27
Mesoporos	0,31	0,15	-0,28
Microporos	-0,32	0,13	0,05

Ds-densidade do solo; CC – capacidade de campo; PMP – ponto de murcha permanente. AD – água disponível para as plantas; PD – porosidade drenável; PT – porosidade total; K_{sat} – condutividade hidráulica do solo saturado; SAC – capacidade de aeração do solo; SWSC – capacidade de armazenamento de água no solo.

Pela Figura 13 pode-se conferir o gráfico Biplot da análise de componentes principais para todos os tratamentos de biochar e do solo controle. Semelhante aos gráficos anteriores é observado correlação alta entre as variáveis ligadas a aeração do solo e também entre as variáveis mais ligadas à retenção de água e localizadas em lados opostos do gráfico, apresentando contribuições positivas e negativas no primeiro componente principal (PC1) respectivamente.

Pelo gráfico observa-se de maneira geral que os tratamentos ligados ao solo condicionado com biochar de torta de filtro tendem a favorecer as variáveis mais ligadas a retenção de água no solo. Nesta condição destaca-se os biochars nas temperaturas de 250°C e 450°C, na dosagem de 2,5% e as temperaturas de 450°C e 650°C nas doses de 5% com maiores relações. Com exceção do biochar de bagaço de cana na temperatura de 450°C na dose de 2,5%, de modo geral os tratamentos com essa matéria-prima estão mais relacionados a propriedades ligadas à aeração e condução de água no solo. Quando analisados todos os tratamentos em conjunto no gráfico Biplot (Figura 13), não é possível atribuir um comportamento específico para as temperaturas e as doses, sendo essas variáveis completamente dependentes da matéria-prima que o biochar foi fabricado.

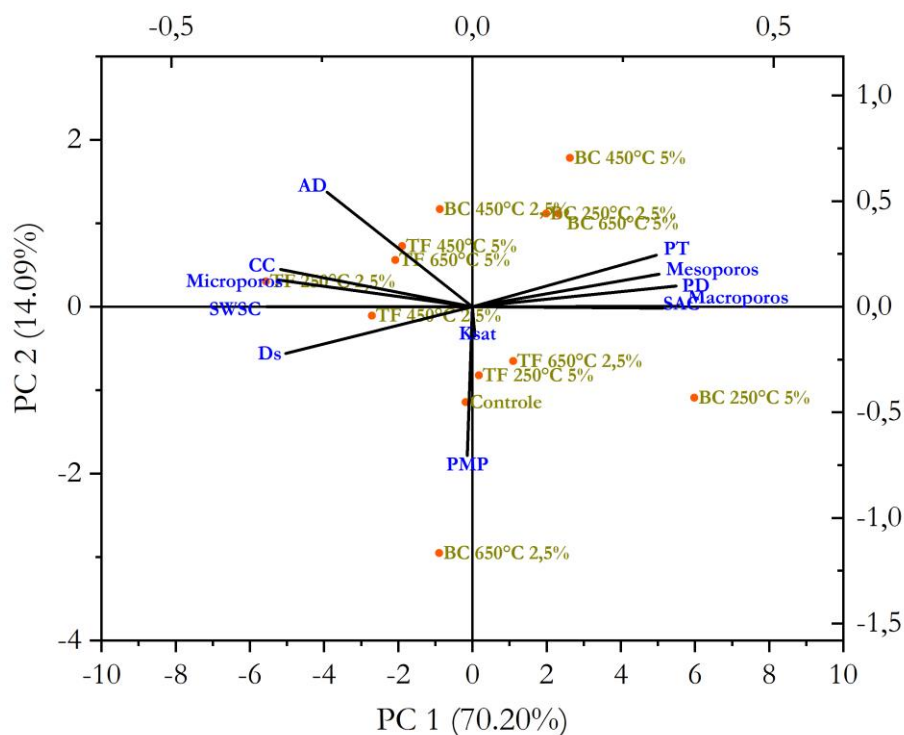


Figura 13. Biplot com os PC1 e PC2 nos solos condicionados com biochar de bagaço de cana, torta de filtro e solo controle para as variáveis Ds-densidade do solo; CC – capacidade de campo; PMP – ponto de murcha permanente. AD – água disponível para as plantas; PD – porosidade drenável; PT – porosidade total; Ksat – condutividade hidráulica do solo saturado; SAC – capacidade de aeração do solo; SWSC – capacidade de armazenamento de água no solo; macro, meso e microporos.

O aumento na retenção de água no solo promovido pelo uso do biochar de resíduos de cana-de-açúcar, corroborando com este estudo, também foi observado por Kameyama et al. (2012), Santos et al. (2022), Eykelbosh et al. (2014). Kameyama et al. (2012) investigaram os efeitos do biochar (BC) derivado do bagaço de cana-de-açúcar produzido em diferentes valores de temperatura nas propriedades de retenção de água de um solo e constataram que a capacidade de água disponível do solo aumentou significativamente em mais de 60% quando corrigido com BC em taxas maiores do que 3% p/p. Da mesma forma, Santos et al. (2022) verificaram que o biochar de bagaço de cana aumentou a água disponível em 40% quando adicionado a um solo arenoso na dosagem de 50 ton ha⁻¹. Já estudando o efeito do biochar de torta de filtro, Eykelbosh et al. (2014) observaram que dosagem de 5 e 10 % (p/p) foi capaz de aumentar a capacidade de retenção de água em solos tropicais altamente intemperizados.

Como mostrado no estudo o biochar apresenta capacidade de aumentar a retenção e a disponibilidade de água para as plantas, no entanto observou-se, que as respostas da adição do biochar ao solo são bastante variados em função da temperatura e taxas de aplicação.

Ressaltando a importância de uma investigação mais aprofundada para tentar compreender melhor o mecanismo envolvido e os efeitos desses tratamentos ao longo do tempo de incubação do biochar nos solos, uma vez que este resíduo orgânico tem um tempo de permanência no solo bastante elevado.

O tempo pode influenciar nas características físico-químicas do biochar, uma vez que com o tempo, o biochar irá sofrer decomposições químicas e microbianas, que lhes conferirão características únicas de interação com as propriedades dos solos (SUN et al., 2014; WANG et al., 2015; PURAKAYASTHA et al., 2019).

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos pela pesquisa pode-se concluir que:

- a) O biochar produzido a partir de diferentes matérias-primas oriundas do processo agroindustrial da cana-de-açúcar em diferentes temperaturas de pirólise apresentaram potencial para modificar atributos relacionados as relações físico-hídricas de um solo de textura média típico de regiões produtoras de cana;
- b) As combinações testadas promoveram, em diferentes graus, uma redução na densidade do solo, aumento na porosidade, redução na condutividade hidráulica do solo saturado, aumento na capacidade de retenção de água e maior água disponível às plantas. A intensidade das alterações promovidas nos atributos do solo pelo biochar variaram em função da matéria-prima, da temperatura de pirólise e da dose aplicada;
- c) A combinação BC_TF, 250°C na dosagem de 2,5% (p/p) apresentou maior valor de água disponível as plantas dentre todos os tratamentos, seguido dos tratamentos BC_TF, 650°C na dosagem 5%, BC_TF, 450°C na dosagem de 5%, BC_BC, 450°C na dosagem de 2,5%, apresentando respectivamente 19%, 13 %, 12 % e 12% mais água disponível no solo quando comparado ao tratamento sem adição do biochar. Esses seriam, portanto, os tratamentos com maior potencial para aumentar a capacidade de água disponível em solos arenosos; e
- d) O biochar por se tratar de um material orgânico carbonizado com alta capacidade de interagir com as partículas dos solos durante muitos anos, devido a sua reduzida mineralização, possuem elevado potencial para sequestro de carbono em solos tropicais, importante condição para atenuar o avanço das mudanças climáticas globais.
- e) A matéria-prima bagaço de cana, produziu biochar com maiores teores de carbono orgânico, sendo, portanto, a combinação BC_BC 450°C na dosagem de 2,5% a que apresenta elevado potencial para uso, em termos de sequestro de carbono no solo, promoção de aeração e alta capacidade de retenção de água.

Essa pesquisa realizada com os resíduos encontrados em abundância nas regiões de produção de cana do estado de São Paulo pode ser considerada como um início de tentativas objetivando encontrar as melhores combinações com potencial de melhorias no ambiente físico do solo, que possam ser utilizados especialmente em lavouras gerando maior aproveitamento dos recursos hídricos aplicados.

Identificada as melhores combinações, as pesquisas futuras devem se basear em entender os efeitos do biochar ao longo de diferentes safras e a persistência desses efeitos no tempo.

REFERÊNCIAS

- ALCARDE, J.C. **Manual de análise de fertilizantes** – Piracicaba: FEALQ, 2009. 259p.
- ALGHAMDI, A. G.; ALKHASHA, A.; IBRAHIM, H. M. Effect of biochar particle size on water retention and availability in a sandy loam soil. *Journal of Saudi Chemical Society*, v. 24, n. 12, p. 1042–1050, 2020.
- BARBOSA, L. C. et al. Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 104383, 2019.
- BLANCO-CANQUI, H. Biochar and Soil Physical Properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 4, p. 687–711, 2017.
- BONINI DA LUZ, F. et al. Linking Soil Water Changes to Soil Physical Quality in Sugarcane Expansion Areas in Brazil. **Water**, v. 12, n. 11, p. 3156, 2020.
- BORDONAL, R. DE O. et al. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 38, n. 2, p. 13, 2018.
- BRASIL. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos** / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. – Brasília : MAPA, 2017. 240 p.
- Brewer, R.. **Fabric and Mineral Analysis of Soils**. John Wiley and Sons, New York. 470p, 1964.
- CELY, P. et al. Agronomic properties of biochars from different manure wastes. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 111, p. 173–182, 2015.
- CHERUBIN, M. R. et al. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v. 267, p. 156–168, 2016.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, v. 9, n. 2, Brasília: Conab, 2022.
- DANSO, E. O. et al. Effect of rice straw biochar and irrigation on growth, dry matter yield and radiation-use efficiency of maize grown on an Acrisol in Ghana. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 206, n. 4, p. 296-307, 2019.
- DAS, O.; SARMAH, A. K. The love–hate relationship of pyrolysis biochar and water: A perspective. **Science of The Total Environment**, v. 512–513, p. 682–685, 2015.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, n. 3, p. 201–214, 2004.
- DOKOOHAKI, H. et al. Assessing the Biochar Effects on Selected Physical Properties of a Sandy Soil: An Analytical Approach. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 48, n. 12, p. 1387–1398, 2017.
- DUARTE, S. D. J.; GLASER, B.; LIMA, R. P.; CERRI, C. P. Chemical, Physical, and Hydraulic Properties as Affected by One Year of Miscanthus Biochar Interaction with Sandy and Loamy Tropical Soils. **Soil Systems**, v. 3, n. 2, p. 24, 2019.
- EYKELBOSH, A. J. et al. Biochar from sugarcane filtercake reduces soil CO₂ emissions relative to raw residue and improves water retention and nutrient availability in a highly-weathered tropical soil. **PLoS One**, v. 9, n. 6, p. e98523, 2014.
- ESMAEELNEJAD, L.; SHORAF, M.; GORJI, M.; HOSSEINI, S.M. Enhancement of physical and hydrological properties of a sandy loam soil via application of different biochar particle sizes during incubation period. **Spanish Journal of Agricultural Research**. v. 14, 2016.

- FLINT, A.L.; FLINT, L.E. Particle Density. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Eds). **Methods of Soil Analysis**. Madison, p. 504-505, 2002.
- GUO, L. et al. Biochar amendment improves shoot biomass of tomato seedlings and sustains water relations and leaf gas exchange rates under different irrigation and nitrogen regimes. **Agricultural Water Management**, v. 245, p. 106580, 2020.
- HARDIE, M. et al. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? **Plant and Soil**, v. 376, n. 1–2, p. 347–361, 2014.
- IRFAN, M. et al. Response of soil microbial biomass and enzymatic activity to biochar amendment in the organic carbon deficient arid soil: a 2-year field study. **Arabian Journal of Geosciences**, v.12, p. 95. 2019.
- JÁČKA, L. et al. Biochar presence in soil significantly decreased saturated hydraulic conductivity due to swelling. **Soil and Tillage Research**, v. 184, p. 181–185, 2018.
- KAMEYAMA, K. et al. Influence of Sugarcane Bagasse-derived Biochar Application on Nitrate Leaching in Calcaric Dark Red Soil. **Journal of Environmental Quality**, v. 41, n. 4, p. 1131–1137, 2012.
- KHALID, S.; SHAHID, M.; MURTAZA, B.; BIBI, I.; NAEEM, M. A.; NIAZI, N. K. A critical review of different factors governing the fate of pesticides in soil under biochar application. **Science of The Total Environment**, p.134645, 2019.
- LIAN, F.; XING, B. Black carbon (biochar) in water/soil environments: molecular structure, sorption, stability, and potential risk. **Environmental Science & Technology**, v. 51, n. 23, p. 13517-13532, 2017.
- MAJUMDER, S.; NEOGI, S.; DUTTA, T.; POWEL, M. A.; BANIK, P. The impact of biochar on soil carbon sequestration: Meta-analytical approach to evaluating environmental and economic advantages. **Journal of Environmental Management**, v. 250, 109466, 2019.
- MAPA. Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Métodos analíticos oficiais para análise de substratos e condicionadores de solos**. Instrução Normativa nº 17 de 21/05/2007 / SDA - Secretaria de Defesa Agropecuária, 2007.
- MCBEATH, A. V.; WURSTER, C. M.; BIRD, M. I. Influence of feedstock properties and pyrolysis conditions on biochar carbon stability as determined by hydrogen pyrolysis. **Biomass and Bioenergy**, v. 73, p. 155–173, 1 fev. 2015.
- MELATI, et al. Sugarcane bagasse: Production, composition, properties, and feedstock potential. In: Sugarcane: Production Systems, Uses and Economic Importance. Nova Science Publishers, p. 1-38, 2017.
- O'CONNOR, D.; PENG, T.; LI, G.; WANG, S.; DUAN, L.; MULDER, J.; CORNELISSEN, G.; CHENG, Z.; YANG, S.; HOU, D. Sulfur-modified rice husk biochar: A green method for the remediation of mercury contaminated soil. **Science of the Total Environment**, v. 621, p. 819-826, 2018.
- OLIVEIRA, D. M. DA S. et al. Soil carbon changes in areas undergoing expansion of sugarcane into pastures in south-central Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 228, p. 38–48, 2016.
- OMONDI, M. O. et al. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. **Geoderma**, v. 274, p. 28–34, 2016.
- PARVAGE, M. M. et al. Phosphorus availability in soils amended with wheat residue char. **Biology and fertility of soils**, v. 49, p. 245-250, 2013.
- PAUSTIAN, K. et al. Climate-smart soils. **Nature**, v. 532, n. 7597, p. 49–57, 2016.
- PESSOA, T. N.; LIBARDI, P. L. Physical-hydric properties of Oxisols as influenced by soil structure and clay mineralogy. **Catena**, v. 211, p. 106009, 2022.

- PURAKAYASTHA, T. J. et al. A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: Pathways to climate change mitigation and global food security. **Chemosphere**, V. 227, P. 345-365, 2019.
- RABELO, et al. Chapter 17- Industrial Waste Recovery, In: Santos, F., Borém, A., Caldas, C. (Eds.), **Sugarcane**. Academic press, San Diego p. 365-381, 2015.
- RAMLOW, M., FOSTER, E. J., DEL GROSSO, S. J., COTRUFO, M. F. Broadcast woody biochar provides limited benefits to deficit irrigation maize in Colorado. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 269, p. 71-81, 2019.
- REYNOLDS, W. D. et al. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, v. 110, n. 1, p. 131–146, 2002.
- RICHARDS, LA. Physical conditions of water in soil. In: C. A. BLACK, D. D. EVANS, J. L. WHITE, L. E. ENSMINGE and F. E. CLARK, ed. **Methods of soil analysis - Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling**. Madison, ASA-SSSA, p.128-152, 1965.
- SAFFARI, N. et al. Influence of corn residue biochar on water retention and penetration resistance in a calcareous sandy loam soil. **Geoderma**, v. 383, p. 114734, 2021.
- SANTOS, J. A. et al. Water retention and availability in tropical soils of different textures amended with biochar. **CATENA**, v. 219, p. 106616, 2022.
- SEMIDA, W. M.; BEHEIRY, H. R.; SÉTAMOU, M.; SIMPSON, C. R.; EL-MAGEED, T. A. A.; RADY, M. M., NELSON, S. D. Biochar implications for sustainable agriculture and environment: A review. **South African Journal of Botany**, v. 127, p. 333-347, 2019.
- SHIN, J.; JANG, E.; PARK, S.; RAVINDRAN, B.; CHANG, S. W. Agro-environmental impacts, carbon sequestration and profit analysis of blended biochar pellet application in the paddy soil-water system. **Journal of Environmental Management**, v. 244, p. 92-98, 2019.
- SUN, Y.; GAO, B.; YAO, Y.; FANG, J.; ZHANG, M.; ZHOU, Y.; CHEN, H.; YANG, L. Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties. **Chemical Engineering Journal**, v. 240, p. 574- 578, 2014.
- TAHERYMOOSAVI, S.; JOSEPH, S.; MUNROE, P. Characterization of organic compounds in a mixed feedstock biochar generated from Australian agricultural residues. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 120, p. 441–449, 1 jul. 2016.
- TANURE, M. M. C. et al. Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil. **Soil and Tillage Research**, v. 192, p. 164–173, 1 set. 2019.
- TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. [s.l.] Brasília, DF: Embrapa, 2017., 2017.
- VAN GENUTCHEN, M. T. H. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, v.41, p. 892-898, 1980.
- WANG, S.; GAO, B.; ZIMMERMAN, A. R.; LI, Y.; MA, L.; HARRIS, W. G.; MIGLIACCIO, K. W. Physicochemical and sorptive properties of biochars derived from woody and herbaceous biomass. **Chemosphere**, v. 134, p. 257-262, 2015.
- WIENHOLD, B. J. et al. Protocol for indicator scoring in the soil management assessment framework (SMAF). **Renewable Agriculture and Food Systems**, v. 24, n. 4, p. 260–266, 2009.
- WIERSMA, W. et al. No effect of pyrolysis temperature and feedstock type on hydraulic properties of biochar and amended sandy soil. **Geoderma**, v. 364, p. 114209, 2020.
- YANG, C. D.; LU, S. G. Effects of five different biochars on aggregation, water retention and mechanical properties of paddy soil: A field experiment of three-season crops. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104798, 2021.

- YUAN, H. et al. Influence of pyrolysis temperature on physical and chemical properties of biochar made from sewage sludge. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 112, p. 284–289, 2015.
- ZHANG, C. et al. Effects of irrigation quantity and biochar on soil physical properties, growth characteristics, yield and quality of greenhouse tomato. **Agricultural Water Management**, v. 241, p. 106263, 2020.
- ZHANG, Y.; WANG, J.; FENG, Y. The effects of biochar addition on soil physicochemical properties: A review. **CATENA**, v. 202, p. 105284, 2021.
- ZORNOZA, R. et al. Stability, nutrient availability and hydrophobicity of biochars derived from manure, crop residues, and municipal solid waste for their use as soil amendments. **Chemosphere**, v. 144, p. 122–130, 2016.