



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOSSISTEMAS

IGOR POLLA MARCELINO

**BIOCARVÃO, DIGESTATO E *AZOSPIRILLUM BRASILENSE*: EFEITOS NOS ATRIBUTOS  
QUÍMICOS DO SOLO E NO CRESCIMENTO DE PLANTAS DE MILHO**

FLORIANÓPOLIS

2020



Igor Polla Marcelino

Biocarvão, Digestato e *Azospirillum brasilense*: Efeito nos Atributos Químicos do Solo e no  
Crescimento de Plantas de Milho

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas da Universidade  
Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Agroecossistemas

Orientador: Prof. Dr. Arcângelo Loss

Coorientador: Prof. Dr. Marcio Antonio Nogueira Andrade

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Marcelino, Igor Polla

Biocarvão, Digestato e Azospirillum brasilense: Efeito nos Atributos Químicos do Solo e no Crescimento de Plantas de Milho / Igor Polla Marcelino ; orientador, Arcângelo Loss, coorientador, Marcio Antonio Nogueira Andrade, 2020. 101 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós Graduação em Agroecossistemas, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Agroecossistemas. 2. Biochar. 3. Azospirillum brasilense. 4. Pirólise. 5. Milho Crioulo. I. Loss, Arcângelo . II. Antonio Nogueira Andrade, Marcio. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Agroecossistemas. IV. Título.

Igor Polla Marcelino

Biocarvão, Digestato e *Azospirillum brasilense*: Efeito nos Atributos Químicos do Solo e no Crescimento de Plantas de Milho

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Cledimar Rogério Lourenzi  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Cláudio Roberto Fonsêca Sousa Soares  
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Agroecossistemas.

---

Prof. Dr. Arcângelo Loss  
Coordenador do Programa

---

Prof. Dr. Arcângelo Loss  
Orientador(a)

Florianópolis, 2020.

Este trabalho é dedicado à minha família e aos meus amigos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente à minha família pelo suporte incondicional em todos os momentos e pelo amor sempre presente.

Aos meus amigos pela amizade, pelos momentos de diversão, aprendizado e pela ajuda nos momentos difíceis.

Ao meu orientador Dr. Arcângelo Loss pela orientação, disponibilidade e apoio durante o mestrado e por ter aceitado o desafio de realizar o trabalho na área dos biocarvões.

Ao meu coorientador Dr. Márcio Antônio Nogueira Andrade pela ajuda na orientação, pelos anos de trabalho, pelo incentivo na realização do mestrado e pelo suporte durante a realização do mestrado.

À Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, pelos anos de ensino, pesquisa e extensão de qualidade que desenvolve e pelo ambiente de aprendizado, com grande diversidade de ideias. Agradeço ao Núcleo de Ensino, Pesquisa e Extensão em Agroecologia (NEPEA – UFSC) pelo suporte e ajuda tanto academicamente, como nas análises, estrutura dos laboratórios, mas também, não menos importante, no apoio pessoal e companheirismo durante o mestrado. Aos bolsistas e voluntários do laboratório pela ajuda na montagem do experimento, processamento e análise de dados.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ, pela bolsa de mestrado.

Agradeço ao projeto P14 Biogás Itapiranga – Eletrosul/UFSC, pelo apoio financeiro no projeto de mestrado.

Agradeço ao Professor Dr. Marcelo Godinho, o seu laboratório, bolsistas e à Universidade de Caxias do Sul (UCS), pela disponibilização completa do reator de pirólise para produção do biocarvão de digestato, pelo total suporte técnico e pelas análises realizadas.

Ao Centro de Ciências Biológicas, MIP da UFSC, pela disponibilização do espaço na Casa de Vegetação para realização do experimento.

À EMBRAPA pelo auxílio em análises e no uso das estruturas dos laboratórios.

À empresa Total Biotecnologia pela disponibilização do inoculante.

A todos os atores que contribuíram direta ou indiretamente para a pesquisa, a todas as pessoas que desenvolvem pesquisa no Brasil e acreditam no trabalho que é desenvolvido aqui e, apesar das dificuldades, desenvolvem a ciência nacional.

## RESUMO

Com extensa criação de animais para alimentação humana e o aumento do uso de biodigestores para produção de biogás há a consequente geração de biomassa residual provenientes dessas atividades e, com isso, vem a necessidade de se estudar formas eficientes e seguras de tratamento e possíveis aplicações desses resíduos na agricultura. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do uso de biocarvão oriundo da pirólise de diferentes fontes orgânicas e do digestato (efluente residual de biodigestores) nos atributos químicos do solo e no crescimento de plantas de milho crioulo, além da sinergia desses substratos com a bactéria promotora do crescimento vegetal *Azospirillum brasilense*. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em vasos de 8 litros, com solo de baixa fertilidade natural, em delineamento blocos casualizados, em esquema fatorial 7 x 2, contendo 4 repetições. Os tratamentos foram: biocarvão de cama de aviário (BC), biocarvão de digestato de suínos (BD), digestato líquido de suínos (DS); mistura de BC com DS (BCDS), mistura de BD com DS (BDDS), adubação mineral (NPK) e testemunha sem adubação (Test). Todos esses tratamentos foram combinados com dois tratamentos de inoculação das sementes de milho, com e sem o inoculante de *Azospirillum brasilense*. As dosagens de aplicação em BC e BD foram respectivamente, 11,22 g (3,72 t ha<sup>-1</sup>) e 8,68 g (2,87 t ha<sup>-1</sup>) em cada vaso. Para as misturas BCDS e BDDS, com e sem inoculante, foram usadas as respectivas quantidades de biocarvão e digestato de suíno em estado líquido em cada vaso: 5,61 g e 20,94 ml para BCDS e 4,34 g e 20,94 ml para BDDS. Para DS foi aplicado uma quantidade de 41,88 ml por vaso (equivalente à 13 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>). Foi semeado milho da variedade crioula Amarelinho, conduzindo o experimento por 123 dias. Posteriormente foram avaliados no solo: pH em água, pH SMP, H + Al, Al, Ca, Mg, Na, K e P, C, N, S, Cu, Zn, H+Al, CTC<sub>efetiva</sub>, CTC<sub>pH 7,0</sub>, Saturação por Al (m%), Saturação por Bases (V%). Em relação à planta avaliaram-se o comprimento do colmo, diâmetro do colmo, massa seca de parte aérea e raiz, C, N, S acumulados na parte aérea e raiz, índice SPAD nas folhas. De maneira geral, o uso dos BD e BC aumentaram a CTC (~13%), a saturação por bases (~13%), o pH do solo (~6%) e a disponibilidade de P (entre 20 e 50 vezes), e reduziu a saturação por alumínio (~48%). Essas condições beneficiaram o crescimento e a absorção de nutrientes pelo milho. O Cu e Zn acumulados no solo com a aplicação dos biocarvões ficaram abaixo dos limites da legislação. Resultados similares foram encontrados nos tratamentos com as misturas, porém em magnitude menor que os tratamentos só com biocarvão. Houve aumento considerável da massa seca de raízes e parte aérea do milho em relação à testemunha (entre 334 e 652%) e em



patamares semelhantes ou superiores ao NPK, nos tratamentos com biocarvões (BC e BD), e nas misturas com digestato (BDDS e, em especial, BCDS). Também se verificaram aumentos do diâmetro (entre 54 e 94%) e comprimento de colmo (entre 15 e 88%), assim como N acumulado na raiz (entre 264 e 559%), parte aérea (entre 64 e 333%) e total da planta (entre 93 e 361%). Em relação a sinergia do biocarvão com a *Azospirillum brasilense*, os principais efeitos foram: no solo, o P disponível nos tratamentos inoculados, 34 e 13 % maior em BC e BD, e 39% menor em BDDS; os teores de Cu foram 16% maior para BD e 11% menor para BDDS; os teores de Zn foram 19% maior em BD e 16% menor para BDDS; o N foi 53% maior para BDDS e 13% para DS; os teores de S foram 11% menor nos tratamentos inoculados. No milho, os tratamentos inoculados apresentaram desempenho superior para: massa seca das raízes (BDDS=39%, NPK=39%, BC=36%, BCDS=24%), massa seca da parte aérea (BDDS=44% e BD=31%), massa seca total (BDDS=40%, BD=22%, NPK=11% e BCDS=7%), N acumulado na raiz (NPK=116%, BDDS=69%, BD=43%, BCDS=35%), N acumulado na parte aérea (BDDS=104%, Test=77%, NPK=72%, BD=43%, DS=33%; BC=33% menor), N acumulado total (BDDS=93%, NPK=80%, Test=72%, BD=42%, DS=32%, BCDS=18%; BC=33% menor), S acumulado na raiz (NPK=104%, DS=52% e BDDS=39%), S acumulado na parte aérea (BD=80%, BDDS=53%, BC=28%). No geral, os biocarvões e as misturas com o inoculante favoreceram o crescimento de plantas de milho crioulo, com melhoraria dos atributos químicos do solo e sinergia positiva com o inoculante de *Azospirillum brasilense* nas condições explicitadas.

**Palavras-chave:** Biochar de digestato, Biochar de cama de aviário, Digestato, Bactérias promotoras do crescimento de plantas, Milho Crioulo, Pirólise, Dejetos Animais.

## ABSTRACT

With the extensive breeding of animals for human consumption and the increasing use of biodigesters for the production of biogas, there is a consequent generation of residual biomass from these activities and then comes the need to study efficient and safe forms of treatment and possible applications of these waste in agriculture. This research aimed to evaluate the influence of the use of biochar from pyrolysis of different organic sources and of the digestate (residual effluent from biodigesters) on the chemical attributes of the soil and on the growth of maize landrace plants, in addition to the synergy of these substrates with plant growth promoting bacteria *Azospirillum brasilense*. The experiment was carried out in a greenhouse, in 8-liter pots, with low natural fertility soil, outlined in randomized blocks in a 7 x 2 factorial scheme in a 7 x 2 factorial scheme, of 4 repetitions each. The treatments were: poultry litter biochar (BC), swine manure digestate biochar (BD), liquid swine manure digestate (DS); mixture of BC with DS (BCDS), mixture of BD with DS (BDDS), mineral fertilization (NPK) and control without fertilization (Test). All treatments were combined with two maize seed inoculation treatments, with and without the *Azospirillum brasilense* inoculant. The application dosages in BC and BD were, respectively, 11.22 g (3.72 t ha<sup>-1</sup>) and 8.68 g (2.87 t ha<sup>-1</sup>) in each pot. For mixtures BCDS and BDDS, with and without inoculant, the respective amounts of biochar and liquid swine digestate were used in each pot: 5.61 g and 20.94 ml for BCDS and 4.34 g and 20.94 ml for BDDS. For DS 41.88 ml per pot (equivalent to 13 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) was applied. Maize landrace variety Amarelinho was sown, carrying out the experiment for 123 days. Subsequently it was evaluated in soil: pH in water, pH SMP, H + Al, Al, Ca, Mg, Na, K and P, C, N, S, Cu, Zn, H + Al, CTC<sub>effective</sub>, CTC<sub>pH 7.0</sub>, Al saturation (m%), base saturation (V%). In plants, the stem length, stem diameter, dry mass of shoot and root, C, N, S accumulated in the shoot and root, SPAD index on leaves were evaluated. Overall, the use of BD and BC increased CTC (~ 13%), base saturation (~ 13%), soil pH (~ 6%) and P availability (between 20 and 50 times), and reduced Al saturation (~ 48%). These conditions benefited the maize growth and absorption of nutrients. The Cu and Zn accumulated in the soil with the application of biochars were below the limits of the legislation. Similar results were found in the treatments with the mixtures, but to a lesser extent than the treatments with biochar only. There was a considerable increase in the dry mass of roots and aerial part of maize compared to the control (between 334 and 652%) and at levels similar to or higher than the NPK, in the treatments with biochars (BC and BD), and in mixtures with digestate (BDDS and in particular BCDS). There were also increases in stem diameter

(between 54 and 94%) and stem length (between 15 and 88%), as well as accumulated N at the root (between 264 and 559%), aerial part (between 64 and 333%) and plant total (between 93 and 361%). Regarding the synergy of biochar with *Azospirillum brasilense*, the main effects were: in soil, the P available in the inoculated treatments 34 and 13% higher in BC and BD and 39% lower in BDDS; Cu concentration were 16% higher in BD and 11% lower in BDDS; Zn concentration were 19% higher in BD and 16% lower in BDDS; the N was 53% higher in BDDS and 13% in DS; the levels of S were 11% lower in the inoculated treatments. In plant, the inoculated treatments showed superior performance for: dry root mass (BDDS = 39%, NPK = 39%, BC = 36%, BCDS = 24%), dry shoot weight (BDDS = 44% and BD = 31%), total dry mass (BDDS = 40%, BD = 22%, NPK = 11% and BCDS = 7%), N accumulated in the root (NPK = 116%, BDDS = 69%, BD = 43%, BCDS = 35%), N accumulated in the aerial part (BDDS = 104%, Test = 77%, NPK = 72%, BD = 43%, DS = 33%; BC=33% smaller), total accumulated N (BDDS = 93%, NPK = 80% , Test = 72%, BD = 42%, DS = 32%, BCDS = 18%; BC=33% smaller), S accumulated in the root (NPK = 104%, DS = 52% and BDDS = 39%), S accumulated in the aerial part (BD = 80%, BDDS = 53%, BC = 28%). Overall biochars and mixtures with the inoculant favored the growth of maize landrace plants, with improved soil chemical attributes and positive synergy with the inoculant of *Azospirillum brasilense* under the explained conditions.

**Keywords:** Digestate biochar. Poultry litter biochar. Digestate. Plant growth promoting bacteria. Maize Landrace. Pyrolysis. Animal manure.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Porosidade de biocarvão proveniente de dejetos de aves. ....	27
Figura 2 – Principais alterações decorrentes do envelhecimento do biocarvão quando aplicado no solo. ....	28
Figura 3 – Custo e potencial de estoque de carbono de diferentes métodos. ....	33
Figura 4 - Prensa parafuso separadora de fase líquida-sólida de digestato. ....	43
Figura 5 - Reator de pirólise piloto de parafuso semi-contínuo utilizado na Universidade de Caxias do Sul para obtenção do biocarvão. ....	43
Figura 6 - Esquema do reator de pirólise piloto de parafuso semi-contínuo. ....	44
Figura 7 – Imagem de digestato de suínos seco por microscopia eletrônica aumentada 50 (a), 250 (b), 500 (c) e 2000(d) vezes. ....	48
Figura 8 – Imagem do biocarvão de digestato por microscopia eletrônica em diferentes aproximações: 50 (a), 250 (b), 500 (c), 2000 (d) e 5000 (e) vezes. ....	49
Figura 9 - Valores médios das análises de solo com indicação das diferenças estatísticas das amostragens para os parâmetros: fósforo disponível, potássio, nitrogênio, carbono, sódio e relação C:N após a retirada das plantas de milho aos 123 dias. ....	54
Figura 10 – Valores médios de cobre e zinco do solo após a retirada das plantas de milho aos 123 dias. ....	58
Figura 11 – Valores médios de massa seca de raiz, da parte aérea e total (raiz + parte aérea) das plantas após a retirada das plantas de milho aos 123 dias. ....	60
Figura 12 – Valores médios do diâmetro do colmo, comprimento do colmo e índice SPAD das plantas após a retirada das plantas de milho aos 123 dias. ....	64
Figura 13 – Valores médios de Nitrogênio acumulado na raiz, na parte aérea e total (raiz + parte aérea) das plantas de milho aos 123 dias. ....	66
Figura 14 – Valores médios de Carbono acumulado na raiz, na parte aérea e total (raiz+parte aérea) das plantas de milho aos 123 dias. ....	69
Figura 15 – Valores médios de enxofre acumulado na raiz, na parte aérea e o total (raiz+parte aérea) das plantas de milho aos 123 dias. ....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Efeito do biocarvão na capacidade de retenção de água no solo (RAS) e na densidade do solo (Ds) sob diferentes classes texturais e condições experimentais.....	32
Tabela 2 – Quantidades de N, P e K aplicados por tratamento.....	41
Tabela 3 – Caracterização química e física do solo.....	42
Tabela 4 - Caracterização físico-química do biocarvão de cama de aviário, da cama de aviário, do biocarvão de digestato e do digestato líquido.....	45
Tabela 5 – Distribuição percentual da granulometria dos biocarvões.....	46
Tabela 6 - Atributos avaliados no solo após a retirada das plantas de milho aos 123 dias em função dos diferentes tratamentos testados.....	50
Tabela 7 - Valores médios de pH do solo após a retirada das plantas de milho aos 123 dias.....	52
Tabela 8 - Magnitude dos resultados dos atributos do solo em porcentagem em relação às testemunhas controle.....	73
Tabela 9 -Magnitude dos resultados dos atributos da planta em porcentagem em relação às testemunhas controle.....	74
Tabela 10 - Análise de variância para os parâmetros avaliados no solo e na planta ao final do experimento conduzido com plantas de milho com biocarvão, digestato e NPK, com e sem inoculação de <i>Azospirillum brasilense</i> .....	100

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Acum.	Acumulado
Al	Alumínio
As	Arsênio
ARGs	Genes de resistência a antibióticos
ASE	Área superficial específica
BC	Tratamento com biocarvão de cama de aviário
BD	Tratamento com biocarvão de digestato de suíno
BCDS	Tratamento com 50% de biocarvão de cama de aviário + 50% de digestato líquido de suíno
BDDS	Tratamento com 50% de biocarvão de digestato de suíno + 50% de digestato líquido de suíno
BPCV	Bactérias promotoras do crescimento vegetal
C	Carbono
Ca	Cálcio
CC	Comprimento de colmo
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CQFS	Manual de Calagem e Adubação
CTC	Capacidade de troca catiônica
CSTR	Reator tipo mistura completa
Cu	Cobre
DAS	Dias após a semeadura
DC	Diâmetro de colmo
ds	Digestato líquido de suíno
DS	Tratamento com digestato líquido de suíno
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i> (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura)
FBN	Fixação biológica de nitrogênio
Fe	Ferro
H	Hidrogênio

ICP-MS	<i>Inductively coupled plasma mass spectrometry</i> (espectrômetro de massa com fonte de plasma indutivamente acoplado)
IMA	Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
K	Potássio
MEVEC	Microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo
MGEs	Elementos genéticos móveis
Mg	Magnésio
MS	Massa seca
N	Nitrogênio
Na	Sódio
Ni	Níquel
NPK	Tratamento com doses recomendadas de N, P, K e calagem
P	Fósforo
S	Enxofre
Sat.	Saturação
SPAD	<i>Soil-Plant Analysis Development</i> (Análise do Desenvolvimento Solo-Planta)
syngas	gás de síntese
Test	Testemunha controle
Zn	Zinco

### **Subscrito**

c	Carga
org	Orgânico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1	HIPÓTESE .....	20
1.2	OBJETIVOS.....	20
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>20</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>21</b>
2.1	MILHO .....	21
2.2	RESÍDUOS, DIGESTATO E BIOCARVÃO: PERSPECTIVAS E DESAFIOS.....	22
<b>2.2.1</b>	<b>Características do Biocarvão e Seus Efeitos nos Atributos Edáficos</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Características do Biocarvão e Seus Efeitos na Comunidade Microbiana do Solo e no Desenvolvimento de Plantas de Milho</b> .....	<b>34</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>40</b>
3.1	TRATAMENTOS, DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO.....	40
3.2	AMOSTRAGEM E CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	42
3.3	OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BIOCARVÃO.....	43
3.4	<i>AZOSPIRILLUM BRASILENSE</i> E VARIEDADE DE MILHO USADA.....	46
3.5	ANÁLISES QUÍMICAS DO SOLO E PLANTA.....	46
3.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS .....	47
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>48</b>
4.1	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DO DIGESTATO E BIOCARVÃO DE DIGESTATO .....	48
4.2	ATRIBUTOS QUÍMICOS AVALIADOS NO SOLO .....	49
4.3	ATRIBUTOS AVALIADOS NA PLANTA AOS 123 DAS.....	59
<b>4.3.1</b>	<b>Biomassa, diâmetro e comprimento do colmo e índice SPAD</b> .....	<b>59</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Nitrogênio, Carbono e Enxofre Acumulados na Massa Seca das Plantas de Milho</b> .....	<b>65</b>
4.4	TABELAS COMPARATIVAS DOS PRINCIPAIS RESULTADOS EM RELAÇÃO À TESTEMUNHA.....	72
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>75</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>77</b>



<b>ANEXO A.....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>94</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>100</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente enfrentam-se globalmente questões importantes relacionadas ao desenvolvimento sustentável, tais como a perda de fertilidade do solo, a segurança alimentar da população, e a intensificação das mudanças climáticas pela emissão de dióxido de carbono e demais gases de efeito estufa. Soluções a essas questões advêm de novas tecnologias, associadas frequentemente aos desafios de implementá-las de forma sustentável.

Com a criação de animais concentradas em algumas regiões do país, por consequência, os resíduos acabam também sendo concentrados nestes locais. E uma vez que a legislação limita a produção de acordo com a área disponível para disposição dos resíduos, ao atingir a saturação do solo pelos nutrientes, ocorre a poluição do solo e dos corpos hídricos. Processos de tratamento que consigam concentrar os nutrientes desses resíduos e dar segurança sanitária, trazem a vantagem de aumentar a distância de transporte, que é um fator custoso e limitante. As atividades agropecuárias são dependentes dos recursos ambientais, portanto o equilíbrio ambiental é essencial para a sobrevivência e crescimento do próprio setor agropecuário (SCHNEIDER *et al.*, 2012)

A necessidade de tratamento dos resíduos de biomassa da agricultura e agroindústria tem como um dos caminhos o aproveitamento da biomassa residual na agricultura, de forma a diminuir a poluição ambiental, por consequência melhorar a saúde pública e ainda reduzindo a dependência de fertilizantes químicos, altamente dependente de importações, dando um passo para tornar o crescimento do sistema agrícola mais sustentável (SCHNEIDER *et al.*, 2012).

Dessa forma, este trabalho insere-se também no contexto do crescente desenvolvimento das tecnologias de energias renováveis derivadas do processamento anaeróbio de biomassa de origem animal em biodigestores, produtoras do biogás, o qual apresenta destacável potencial energético, além do aproveitamento de resíduos agropecuários na agricultura de forma mais sustentável e segura. Junto às tecnologias que acompanham esse desenvolvimento, surge a necessidade de que todo o processo seja sustentável, desde o substrato afluente como a destinação final dos seus efluentes. Apesar deste crescimento e do apelo pela sustentabilidade associado à tecnologia do biogás, ainda não foram plenamente resolvidas as questões ambientais relativas ao aproveitamento do digestato (efluente dos biodigestores com alta carga de nutrientes) no uso agrícola (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019), questão também a ser resolvida com dejetos da avicultura, como a cama de aviário, de modo a garantir o uso sanitariamente seguro desses dejetos na agricultura, necessitando, desta forma, o seu adequado tratamento e destinação.

Um dos tratamentos viáveis para esses resíduos animais é a conversão dos mesmos em biocarvão. Este é originado da pirólise de biomassa (preferencialmente residual) com quantidade de oxigênio controlada (IBI, 2015). Com essa transformação tem-se a redução do volume e da biodisponibilidade de contaminantes ambientais e das perdas por lixiviação de nutrientes no solo. Além disso, quando o biocarvão é aplicado ao solo tem-se observado melhorias nos atributos edáficos, com aumento da produtividade das culturas em solos altamente intemperizados ou degradados (IPPOLITO; LAIRD; BUSSCHER, 2012). Junto desses benefícios, o biocarvão pode fornecer nutrientes para as plantas, diminuindo a demanda por fertilizantes químicos solúveis e também ser um veículo para favorecer o crescimento de microrganismos promotores do crescimento vegetal, como as bactérias do gênero *Azospirillum*.

As bactérias promotoras do crescimento de plantas, a exemplo do *Azospirillum*, são conhecidas por suas capacidades promotoras de crescimento e aumento do desempenho agrônomo em culturas vegetais, principalmente no que tange ao aporte de nitrogênio para a planta, tornando-as um meio para reduzir a aplicação de fertilizantes nitrogenados sem afetar o rendimento das culturas, sendo assim, avaliadas como um componente integrado para estratégias eficazes de manejo na agricultura (EL ZEMRANY *et al.*, 2006; HUNGRIA *et al.*, 2010; MARKS *et al.*, 2013).

Mediante as vantagens apresentadas por ambos os componentes, desvela-se a aplicação concomitante de biocarvão e *Azospirillum brasilense* como portadora de relevante potencial para a obtenção de resultados promissores no crescimento de culturas rotineiramente cultivadas em solos pobres, como o milho, o qual é um dos cereais mais plantados no Brasil e no mundo, e que tem sua produção profundamente influenciada por fatores como a baixa fertilidade dos solos brasileiros (HUNGRIA *et al.*, 2010). A combinação de biocarvão e *Azospirillum brasilense* pode aumentar a atividade microbiana e o estado nutricional de plantas, apresentando assim importante potencial agrícola (SARANYA; KUMUTHA; KRISHNAN, 2011).

Salienta-se que essa cultura, principalmente a variedade crioula, é a base de sustentação para considerável parcela das pequenas propriedades agrícolas e tem destaque em sistemas conservacionistas de rotação/sucessão de culturas. Porém, os fertilizantes têm importante peso nos custos de produção, sendo necessários investimentos em tecnologias para redução desses custos, mas, sem interferir na produtividade, perfazendo a perspectiva promissora do estudo sobre efeitos da associação de biocarvão e *Azospirillum* na cultura de milho.

## 1.1 HIPÓTESE

O biocarvão e a mistura do biocarvão com o digestato líquido melhoram os atributos químicos do solo e favorecem o crescimento de plantas de milho.

Há sinergia entre o *Azospirillum brasilense*, os biocarvões e o digestato testados, nos aspectos químicos do solo e no crescimento das plantas de milho crioulo.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o uso de biocarvões provindos de cama de aviário e de digestato de biomassa residual de criações suínicas, do digestato líquido, a mistura de cada biocarvão com o digestato líquido e a sinergia desses com a *Azospirillum brasilense* nos atributos químicos do solo de baixa fertilidade natural e no crescimento de plantas de milho crioulo.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- i. Analisar as possíveis modificações nos atributos químicos do solo após o cultivo de milho crioulo com o uso de biocarvões, digestato líquido e *Azospirillum brasilense*;
- ii. Avaliar o crescimento das plantas de milho crioulo ao final do experimento com biocarvões, digestato líquido e *Azospirillum brasilense*;
- iii. Quantificar o acúmulo de macronutrientes no tecido vegetal das plantas de milho crioulo ao final do experimento nos tratamentos com os biocarvões, digestato líquido, mistura de biocarvão e digestato líquido e na presença e ausência de *Azospirillum brasilense*.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MILHO

O milho é considerado um dos mais importantes grãos produzidos no mundo. Segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, a produção mundial na safra 2019/2020 está estimada em 1.113,55 milhões de toneladas, com os Estados Unidos sendo o maior produtor e o Brasil, o terceiro maior produtor, quarto maior consumidor e segundo maior exportador (USDA, 2020). A produção nacional em 2019/2020 é estimada em 100,559 milhões de toneladas, sendo Santa Catarina responsável por 2,779 milhões de toneladas, detendo a marca de Estado mais produtivo do país, com 8,273 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2020).

Segundo o IBGE (2017), 77% dos estabelecimentos agropecuários no Brasil são classificados como agricultura familiar, que ocupam 23% da área de todos os estabelecimentos agropecuários e equivale a 23% da produção agropecuária brasileira. Muitas famílias produtoras de milho ainda conservam variedades crioulas em produções de baixo ou nenhum aporte de insumos (OGLIARI & ALVES, 2007). A cultura do milho crioulo possibilita uma grande troca de informações promovendo a interação social, possibilita aos pequenos agricultores a produção da sua própria semente, sendo uma alternativa para contenção de custos, de modo que em cultivos que utilizam baixo nível tecnológico, o milho crioulo pode obter melhores resultados que híbridos, entre outras razões, pelo fato de as sementes já estarem adaptadas ao local (MENEGUETTI; GIRARDI; REGINATTO, 2002; BELLÓ; CERICATO, 2015).

Outras vantagens do uso de milho crioulo por produtores que utilizam baixo nível tecnológico é uma maior resiliência dessas variedades à intempéries climáticas e a manutenção de uma maior diversidade genética de espécies, sendo fonte para futuros melhoramentos (CECCARELLI *et al.*, 1994). Além de também ter maior resistência a doenças, pragas e desequilíbrios climáticos, podendo as sementes serem armazenadas para as safras seguintes, o que diminui o custo de produção e contribui para a sustentabilidade da produção (PIPOLO *et al.*, 2010).

## 2.2 RESÍDUOS, DIGESTATO E BIOCARVÃO: PERSPECTIVAS E DESAFIOS

O Brasil se destaca mundialmente como um dos maiores produtores agrícolas e de proteína animal do mundo, sendo o 2º maior produtor mundial de bovinos, o 3º maior produtor mundial avícola e o 4º maior produtor mundial de suínos, respondendo por 17%, 16% e 4% da produção mundial, respectivamente, e um dos líderes em exportação, sendo o maior exportador de bovinos e aves e o 4º maior exportador de suínos (EMBRAPA, 2019). Como consequência, há uma grande geração de resíduos dessas produções, como dejetos de bovinos e suínos, e cama de aviário, que têm grande potencial poluidor pela alta carga de nutrientes em locais de intensa produção, levando ao acúmulo desses no solo, saturando a capacidade agronômica e ultrapassando os limites críticos ambientais, gerando impactos no meio ambiente (AITA *et al.*, 2014).

No entanto, esses resíduos têm grande potencial para tornarem-se matéria-prima para outros processos, devido à alta carga energética e pela já citada carga de nutrientes, principalmente para utilização na agricultura. É válido observar que o transporte desses dejetos ricos em nutrientes para locais com maior demanda fomenta a sustentabilidade do sistema. Sendo assim, é desejado que a concentração de nutrientes nos dejetos seja convertida em um “produto” que diminua os custos e riscos sanitários do transporte, facilitando a exportação dessa matéria-prima.

Uma solução parcial é a digestão anaeróbia de dejetos animais em reatores, chamados de biodigestores, a qual oferece benefícios como: o melhoramento da qualidade do adubo resultante dos dejetos, uma vez que são mais estáveis e há análise periódica do digestato, que é o efluente residual dos biodigestores, a fim de acompanhar os processos de qualidade dos biodigestores, a redução de odores e patógenos e a produção de biogás (HOLM-NIELSEN; AL SEADI; OLESKOWICZ-POPIEL, 2009).

Esse digestato apresenta 13,1 g L<sup>-1</sup> sólidos totais, 1644 mg L<sup>-1</sup> de N, 435 mg L<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 866 mg L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O (NICOLOSO *et al.*, 2019). O Brasil, como exposto, é possuidor de farta disponibilidade de biomassa, resultando em grande potencial para geração de biogás, classificada como fonte de energia renovável e atualmente em expansão nacionalmente. Porém, essa capacidade é subaproveitada, correspondendo atualmente à apenas 0,05% da matriz energética brasileira, sendo seu potencial capaz de suprir 24% (115 GWh) da demanda de energia elétrica e 44% da demanda por diesel por meio da geração de biogás a partir de resíduos urbanos, da pecuária e da agroindústria (EPE, 2017).

Na adoção de uma tecnologia de geração de energia renovável, como o biogás a partir do processamento anaeróbio de biomassa, principalmente residual, é recomendável que todo o processo seja sustentável, sendo fundamental a esse sistema a destinação correta dos seus efluentes, salientando que, atualmente, inexistem soluções ambientais plenas para o adequado aproveitamento de efluentes de biodigestores (digestato) para o uso agrícola (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

Do efluente do biodigestor constata-se a presença de alta carga de nutrientes, como N, P, K, com concentrações médias de  $1.644 \text{ mg L}^{-1} \text{ N}$ ,  $435 \text{ mg L}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$  e  $866 \text{ mg L}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$  (OLIVI *et al.*, 2015), a qual é frequentemente utilizada diretamente no solo como fertilizante na agricultura (CHAMBERS; TAYLOR, 2013). Para os solos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, as doses de correção variam de 40 a  $160 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  e de 30 a  $120 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$  de acordo com a classe de disponibilidade (muito baixo, baixo ou médio) destes nutrientes no solo (DE BONA, 2016). Devido à essa alta quantidade de nutrientes e a falta de sanitização adequada do material, a sua aplicação no solo acaba causando problemas ambientais, como a eutrofização dos cursos de águas superficiais, contaminação das águas subterrâneas, dispersão de patógenos e de genes resistentes a antibióticos, além da contribuição nas emissões de gases de efeito estufa através da maior liberação de dióxido de carbono e óxido nitroso dos solos (ITO; GUIMARÃES; AMARAL, 2016). Outra questão é a poluição olfativa, e neste sentido, os resíduos orgânicos têm grande impacto por seus odores fortes e desagradáveis, seja no local de processamento, ou no transporte e aplicação do material no campo (SILVA; MARQUES, 2004). Sua aplicação no solo como biofertilizante pode ainda ser limitante devido à presença de metais pesados, principalmente cobre e zinco, em sua composição (HUNG *et al.*, 2017).

Solução alternativa e sustentável, entre outras, é o encaminhamento de biomassas residuais, como cama de aviário, digestato líquido, resíduos orgânicos, podas de árvores, ao processo de pirólise, que consiste na decomposição termoquímica da biomassa a temperaturas comumente menores que  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ , na ausência total ou parcial de oxigênio livre (IBI, 2015). Os produtos resultantes da pirólise de biomassa são: o bio-óleo, parte líquida passível de utilização em processos industriais; o gás de síntese (syngas), composto por  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$  e o biocarvão (*biochar*), que é um sólido rico em carbono e nutrientes, sendo esse passível de aplicação no solo. O biocarvão pode ser produzido a partir de qualquer biomassa, preferencialmente residual, e que ganhou notável interesse por ser um dos principais componentes da “Terra Preta de Índio”, um solo antropogênico de excelentes características

agronômicas e ambientais em regiões amazônicas, especialmente quando comparado aos solos amazônicos adjacentes (JOSEPH; LEHMANN, 2009).

Além de fornecer um material com quantidade de nutrientes mais concentrada, a pirólise de dejetos e digestatos traz uma série de benefícios ambientais e de manejo, como a destruição de patógenos, a redução de odores, a redução do volume e, conseqüente, melhora no manuseio, estocagem e transporte (PHAM *et al.*, 2013). Ressalta-se que a produção de biocarvão a partir dos resíduos de animais, assim como os florestais e o lodo municipal de esgoto, podem servir como estratégia para gestão destes resíduos, com parte destinado à aplicação no solo, e parte adicionada a um sistema de digestão anaeróbica, aumentando a produção de biogás. Essa estratégia permite a integração de produção de energia mais limpa e redução de emissões de gases de efeito estufa associadas a a uma melhora da qualidade do solo (WANG *et al.*, 2018). E diferentemente do carvão vegetal, que é um material combustível e que tem como objetivo a queima, o biocarvão é produzido com o propósito de servir para fins agrícolas, sendo mais poroso e com maior poder de adsorção (SOHI *et al.*, 2010). O biocarvão também difere das cinzas, pois estas não têm estruturas porosas, e no estudo de Rodriguez (2012) verificou-se que plantas de milho cultivadas em solo com adição de cinzas e em solo com adição de biocarvão, apresentaram diferenças de até 200% em rendimento no solo com o uso de biocarvão sobre o solo com uso de cinzas.

O biocarvão ainda tem potencial de ser usado em tratamento de águas ao apresentar vantagens em comparação com outros métodos de baixo custo existentes (filtro de areia, ebulição, desinfecção solar, cloração), tais como: remover contaminantes químicos, biológicos e físicos, mantendo as propriedades da água, adsorvente de baixo custo e renovável, material de fácil acesso e prontamente disponível, apropriado a comunidades pobres (GWENZI *et al.*, 2017). O biocarvão ainda pode ser usado como material protetor de sementes em locais de reflorestamento, conhecido como “seedballs”, ao funcionar como capa protetora da semente contra animais e insetos, permitindo a germinação da semente, devido a sua porosidade, nas estações chuvosas (GRAVES, 2013).

Relativo aos custos para a produção do biocarvão, como sua produção no país é incipiente e os processos de pirólise para esse fim não são amplamente aplicados no mercado, a análise do custo para produção de biocarvão, considerando toda a cadeia de custos, está em estágio de desenvolvimento. Os custos relacionados à pirólise do material e à construção do equipamento ainda são objeto de estudo. Sarabando (2015) sugeriu em seu trabalho o valor de R\$ 900,00 t<sup>-1</sup> de biocarvão de cama de aviário, porém os custos podem diminuir de acordo com a escala, processos e tipos de material pirolisado.



### 2.2.1 Características do Biocarvão e Seus Efeitos nos Atributos Edáficos

Para a produção de biocarvão, Ronsse (2013) indica que o processo de pirólise que apresenta melhores resultados é a pirólise lenta, na qual a biomassa é aquecida por um longo período, com aquecimento gradativo, entre 1 a 30 °C min<sup>-1</sup>, resultando em uma proporção de 25% a 35% de biocarvão, em comparação aos demais processos de pirólise (BROWNSORT, 2009). A pirólise lenta também resulta em um biocarvão com maior capacidade de troca catiônica (CTC), devido à incompleta degradação do material, preservando a estrutura dos carboidratos e grupos fenólicos (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>O), carboxílicos ((RC(=O)OH)), hidroxílicos (OH<sup>-</sup>), carbonílicos (-C=O) e quinonas (C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>) (UCHIMIYA *et al.*, 2010).

Em adendo, segundo Cantrell *et al.* (2012), a pirólise de materiais ricos em nutrientes favorece a concentração desses no biocarvão, podendo beneficiar o crescimento vegetal pelo aumento na disponibilidade de nutrientes presentes no solo ou pelo fornecimento dos nutrientes concentrados, tais como N, P e K (TRAZZI, 2014), e também adicionalmente favorecer a atividade microbiológica, a exemplo das bactérias promotoras do crescimento vegetal (JOSEPH; LEHMANN, 2009).

Avaliando as características físico-químicas de biocarvão de cinco diferentes fontes animais (sólidos separados de dejetos de suínos, dejetos de bovinos confinados; dejetos de vaca leiteira; cama de frango e cama de peru) pirolisadas em temperaturas entre 350 e 700 °C, Cantrell *et al.* (2012) constataram que o biocarvão proveniente de dejetos de suínos apresentou os maiores níveis de N, P, S. Já em relação à CTC, o biocarvão de cama de aviário destacou-se entre os demais, apresentando o maior valor. Singh; Singh e Cowie, (2010), similarmente a Cantrell *et al.* (2012), notaram que as características do biocarvão dependem do seu material de origem e do processo de pirólise utilizado. Materiais de origem animal, como dejetos, tendem a ter um maior pH em comparação àqueles advindos de material vegetal, assim como maior quantidade de nutrientes, tais como N, P, K, S, Ca, Mg, devido à sua constituição química inicial, e uma maior CTC.

Entretanto, dependendo da composição da matéria prima do substrato, o biocarvão de origem animal além de conter elevada quantidade de nutrientes que são benéficos para as plantas, pode também apresentar alta quantidade de Al, Na, Cu e Zn devido a sua alimentação, podendo ser prejudicial ao uso agrícola com culturas de interesse econômico (SINGH; SINGH; COWIE, 2010). Muhammad; Brookes; Wu (2016) observaram que a adição de 3% (peso peso<sup>-1</sup>) de biocarvão de dejetos de suínos aos solos Neossolo Quartzarênico e Plintossolo Argilúvico

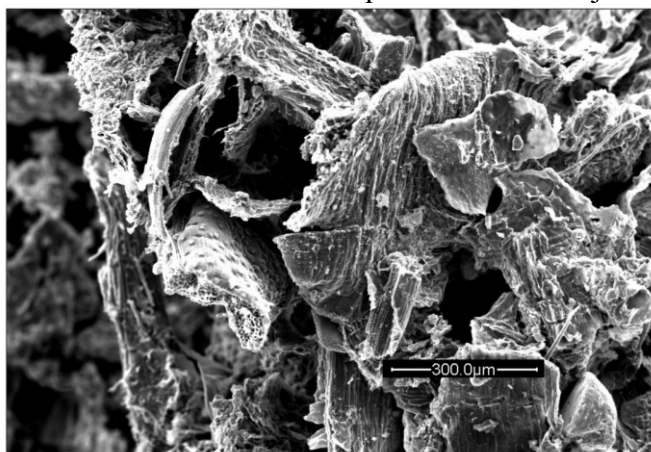
aumentaram as concentrações disponíveis de Mg, Ca, Fe, Cu, Zn, As e Mo em comparação ao solo-controle, sendo preciso observar a quantidade destes elementos nos biocarvões e se eles estão disponíveis para as plantas de modo a evitar prejuízos ambientais e agrícolas.

Já há alguns trabalhos que avaliaram o desenvolvimento da cultura do milho com o uso do biocarvão. Em experimento conduzido em vasos com a cultura do milho, Butnan et al. (2015) utilizaram dois tipos de biocarvão de madeira de eucalipto pirolisado a baixa (350 °C) e a alta (800 °C) temperaturas, aplicando quatro taxas (0%, 1%, 2% e 4% de peso.peso<sup>-1</sup>) em dois tipos de solos de baixa fertilidade (Argissolo de textura franco-arenosa e Latossolo de textura franco argilo siltosa), para verificar o efeito temporal do biocarvão. O biocarvão oriundo de baixa temperatura apresentou teor de cinzas (2,4%) menor que o de alta temperatura (3,9%), sendo que o alto teor de K nas cinzas prejudicou o crescimento das plantas, produzindo efeito antagônico com outros cátions (Ca e Mg). Além disso, os autores sugeriram a hipótese de que os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) do biocarvão de alta temperatura tenham causado efeitos prejudiciais no crescimento das plantas. Os autores também demonstraram que os efeitos do biocarvão persistiam por pelo menos 82 dias e que a sua aplicação reduziu efetivamente os efeitos negativos da toxicidade de Al no Argissolo, e ainda que o biocarvão de baixa temperatura é mais eficaz na melhoria da fertilidade, sendo sua melhor taxa de aplicação entre 1% a 2% de peso.peso<sup>-1</sup>, com a maior taxa requerida para a classe dos Latossolos.

Em outro estudo, Uzoma et al. (2011) investigaram o efeito do biocarvão de dejetos de bovinos pirolisados a 500 °C no rendimento da cultura de milho. Esse biocarvão foi misturado com um solo arenoso na taxa equivalente a 0, 10, 15 e 20 t ha<sup>-1</sup>, sendo observado melhoras do rendimento de milho e a absorção de nutrientes da ordem de 150% e 98% em comparação com o controle, relativas às proporções de mistura de 15 e 20 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Houve também maior eficiência no uso da água, que aumentou em 6%, 139% e 91% em comparação com o controle, com as respectivas taxas de mistura: 10, 15 e 20 t ha<sup>-1</sup>. Também foi observado o aumento da condutividade hidráulica do solo arenoso, e as análises do solo após a colheita do milho indicaram aumento significativo no pH, C total, N total, P, cátions trocáveis e CTC, mostrando que a aplicação de biocarvão de origem bovina ao solo arenoso não apenas beneficia o crescimento da cultura de milho, mas também altera positivamente as propriedades físico-químicas do solo. Em adendo, Agegnehu et al. (2016) verificaram que houve incremento nos teores de clorofila foliar e absorção de N e P em plantas de milho devido à aplicação de biocarvão de madeira, e Pandit et al. (2018) observaram que a quantidade de biocarvão aplicado é variável determinante para o aumento da produção de biomassa das plantas de milhos, e não necessariamente a dosagem de calagem realizada.

Já no estudo focado na utilização do biocarvão proveniente de cama de aviário, Chan *et al.* (2008) avaliaram o rendimento de plantas de rabanete cultivadas em vasos com amostras de solo de baixa fertilidade natural (Argissolo). Quatro doses de biocarvão (0, 10, 25 e 50 t ha<sup>-1</sup>) foram investigadas, com os resultados mostrando aumentos no rendimento de matéria seca do rabanete. Na menor dose (10 t ha<sup>-1</sup>) houve um aumento no rendimento de 42% e na maior dose (50 t ha<sup>-1</sup>), verificaram-se aumentos de 96% se comparado ao tratamento controle. Os aumentos de produtividade foram atribuídos, em grande parte, à capacidade desses biocarvões de aumentar a disponibilidade de N. Somado a isso, o biocarvão também aumenta a CTC do solo e melhora na parte física do solo, sendo isso diretamente associado a sua elevada porosidade. Na Figura 1 observa-se a porosidade do biocarvão proveniente de dejetos de aves, resultado de uma pirólise lenta.

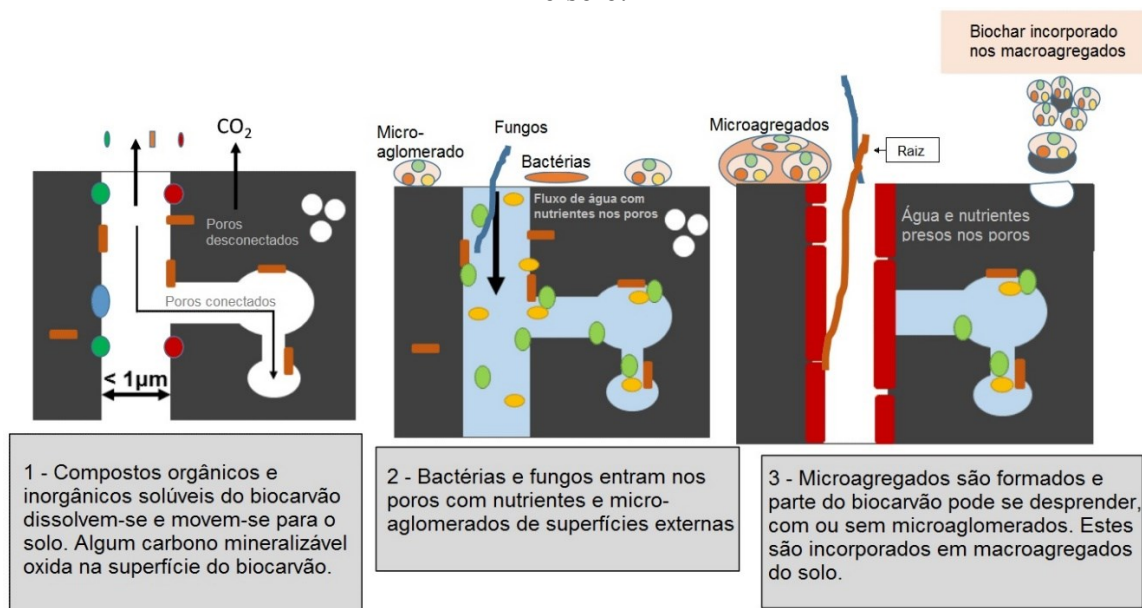
Figura 1 - Porosidade de biocarvão proveniente de dejetos de aves.



Fonte: Joseph e Lehmann (2009).

A porosidade do biocarvão é que determina sua área superficial. A distribuição de poros é muito variável e engloba, de acordo com o seu diâmetro interno, nanoporos (<0,9 nm), microporos (<12 nm) e macroporos (>50 nm) (LEHMANN e JOSEPH. 2009). A natureza altamente porosa e elevada área superficial interna do biocarvão, juntamente com sua capacidade de adsorver a matéria orgânica solúvel e outros nutrientes inorgânicos, também é responsável por proporcionar um habitat favorável para os microrganismos (LEHMANN *et al.*, 2011), quando adicionado ao solo, conforme evidencia-se na Figura 2.

Figura 2 – Principais alterações decorrentes do envelhecimento do biocarvão quando aplicado no solo.



Fonte: Adaptado de: <https://biochar.international/guides/properties-fresh-aged-biochar/> (acessado em 25/07/2019 15:30).

Na Figura 2 evidenciam-se algumas relações físicas, químicas e biológicas no biocarvão com o seu envelhecimento no solo, especialmente com relação à porosidade. A incorporação do biocarvão nos macroagregados aumenta a coesão interna dos agregados resultante das ligações entre as partículas minerais e o carbono recalcitrante do biocarvão. E isso reflete em melhorias na estabilidade dos agregados de solos manejados com o uso de biocarvão (SUN; LU, 2014).

Sendo assim, uma maior produção de biomassa das plantas pode ser decorrente de melhorias na parte física, química e biológica do solo, com resultados que mostram que o uso do biocarvão favorece a maior capacidade de retenção de água (GLASER; LEHMANN; ZECH, 2002) e aumento do pH do solo (LEHMANN *et al.*, 2003a), bem como melhora sua fertilidade por meio do fornecimento de nutrientes direta e indiretamente para as plantas (CHAN *et al.*, 2008), favorecendo as interações do solo com a microbiota (RUIVO *et al.*, 2009). Alguns estudos sugerem que a aplicação de biocarvão como condicionador de solo potencializa o aumento da produtividade das culturas em solos tropicais intemperizados (GLASER; LEHMANN; ZECH, 2002; PETTER; MADARI, 2012; STEINER *et al.*, 2007).

Solos com baixa CTC apresentam resposta positiva ao rendimento da cultura mediante à aplicação de diferentes tipos de biocarvão (NOVOTNY *et al.*, 2015). Além disso, meta-análises sobre o impacto do biocarvão na produção agrícola mostraram aumento de aproximadamente 10% no rendimento de diferentes culturas com diferentes tipos de biocarvão (BIEDERMAN;

STANLEY HARPOLE, 2013; JEFFERY *et al.*, 2011; LIU *et al.*, 2013). Mukherjee *et al.* (2014) observaram que biocarvões de *Quercus lobata*, *Pinus taeda* e *Tripsacum floridanum* envelhecidos apresentaram maior CTC que biocarvões novos, sugerindo que o envelhecimento desses biocarvões aumentam esta capacidade. Em trabalho realizado com diferentes classes de solos e com adição de biocarvão, Peng *et al.* (2011) verificaram um aumento na CTC de 4% a 17% em relação aos solos sem o uso do biocarvão. Portanto, diferente de dejetos de suínos ou digestato, seguindo as recomendações, o biocarvão pode ser usado diretamente no solo como condicionador de forma mais segura, além de ter potencial de sequestro de carbono (LAIRD, 2008; MANYÀ, 2012).

Ratifica-se assim que a aplicação de biocarvão no solo aumenta o pH, a CTC (GLASER; LEHMANN; ZECH, 2002, LEHMANN *et al.*, 2003b), a capacidade de adsorção (SOHI *et al.*, 2010), a disponibilidade de nutrientes para as plantas (JEFFERY *et al.*, 2011; VERHEIJEN *et al.*, 2010), melhora a saturação por bases (GLASER; LEHMANN; ZECH, 2002; SCHULZ; GLASER, 2012) e a disponibilidade de P (YAMATO *et al.*, 2006). Essa disponibilidade de P também pode ser aumentada em solos ácidos ou neutros para as plantas no curto, médio e longo prazo, com a aplicação de biocarvão, quando oriundos de pirólises abaixo de 600 °C e aplicações acima de 10 t.ha<sup>-1</sup>, podendo atuar como um fertilizante (GLASER E LEHR, 2019).

Avaliando a disponibilidade de P e N no solo com a aplicação de diferentes tipos de biocarvão, Gao, DeLuca e Cleveland (2019) verificaram, por meio de metanálise, que as aplicações de biocarvão aumentaram significativamente o P disponível no solo em até 45%. Por outro lado, houve redução das concentrações de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> em 12% e N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> em 11%. Todavia, majoritariamente, o biocarvão em combinação com fertilizante orgânico aumentou significativamente o N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> do solo em comparação aos tratamentos controle, sendo que os biocarvões fabricados a baixas temperaturas, ou aplicados a altas doses, a partir de esterco ou outros materiais com baixa relação C:N, foram geralmente mais eficazes na melhoria do P disponível no solo.

No tocante ao Al, Qian, Chen e Hu (2013), avaliaram a ação de biocarvão de dejetos bovinos em relação à sua fitotoxicidade em plantas de trigo e observaram a influência do efeito corretivo do pH do biocarvão para amenizar a toxicidade do Al nessas plantas. Segundo os autores, as espécies de Al foram convertidas nos monômeros Al(OH)<sup>2+</sup> e Al(OH)<sub>2</sub><sup>+</sup>, os quais foram fortemente adsorvidos pelo biocarvão. Além disso, o Al<sup>3+</sup> (altamente tóxico) evoluiu para espécies menos tóxicas, como o Al(OH)<sub>3</sub> e Al(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup>, com os grupos carboxilas da superfície

do biocarvão sendo complexados com  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$  ou  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ , e não pela atração eletrostática de  $\text{Al}^{3+}$  com locais carregados negativamente.

Em relação às propriedades físicas do solo, há melhorias na estabilidade dos agregados do solo com a adição de biocarvão (LIU *et al.*, 2016b; VERHEIJEN *et al.*, 2010), diminuição na densidade do solo, maior taxa de infiltração de água e aumento da porosidade (ASLAM; KHALID; AON, 2014), proporcionando maior aeração do solo, maior espaço para a entrada e retenção de água e de raízes, assim como de microrganismos, conforme evidencia-se na Figura 2. Lei e Zhang (2013) encontraram maior retenção de água em biocarvões oriundos de biomassa vegetal em comparação a biocarvão de dejetos animais. Essas diferenças geralmente estão relacionadas às propriedades dos poros dos materiais testados, incluindo área superficial específica, volume de poros, tamanho de poro (Figura 1) e diâmetro médio dos poros (LOWELL *et al.*, 2004).

No que se refere a ação de patógenos, o estudo realizado por Zhou *et al.* (2019) avaliaram a redução da disseminação de genes de resistência a antibióticos (ARGs) e elementos genéticos móveis (MGEs) de biocarvão produzidos a partir de dejetos suínos compostados em comparação com de compostagem quando aplicados em potes em casa de vegetação. O resultado mostrou que os solos tratados com biocarvão apresentaram presença significativamente menor de ARGs e MGEs em comparação aos solos com composto proveniente de compostagem, mostrando que a disseminação de ARGs de resíduos animais para o meio ambiente pode ser efetivamente mitigada pela conversão de dejetos de suínos em biocarvão. O total de ARGs nos solos tratados com biocarvão foi inclusive semelhante a dos solos controle durante o cultivo.

O biocarvão é destacadamente eficiente em relação à adsorção de contaminantes, podendo remover antibióticos da água e de águas residuárias com uma eficiência de 90% a 100% (AHMED *et al.*, 2015). Os autores observaram que o biocarvão pode ser um bom adsorvente de alguns antibióticos, como o sulfametoxazol, especialmente quando produzidos a maiores temperaturas, obtendo taxas de remoção melhores que o carvão ativado em alguns casos, com um custo de produção menor.

Como mencionado anteriormente, o biocarvão pode evitar a lixiviação de nutrientes, sendo uma opção promissora na redução do risco de dispersão e mobilidade de contaminantes no solo. O risco de lixiviação de Cu, Ni e Zn foi menor em solos tratados com biocarvão obtido a partir do lodo de esgoto do que usando diretamente o mesmo lodo bruto do sistema de tratamento de esgoto (MÉNDEZ *et al.*, 2012). O Cu(II) pode ser mobilizado pelas frações

orgânicas dos biocarvões, assim como pela matéria orgânica natural, por meio das carboxilas em solo alcalino (UCHIMIYA *et al.*, 2010).

Em relação aos efeitos que o biocarvão promove no solo, notam-se que esses podem variar também de acordo com as características químicas e físicas que o solo apresenta. A aplicação de biocarvão no solo pode aumentar a capacidade de retenção de água em solos arenosos, e para solos argilosos, este efeito seria menos evidente, conforme pode-se observar na Tabela 1, que expõem uma síntese dos principais resultados de alguns estudos que testaram o efeito do biocarvão na capacidade de retenção de água de solos com diferentes texturas, indicando o potencial do biocarvão na melhoria da capacidade de retenção de água no solo (NOVOTNY *et al.* 2015). Além disso, destacam-se as características do tipo de biocarvão, a proveniência do material e a vasta taxa de aplicação. Tryon (1948) também observou o aumento no teor de água em solos arenosos quando adicionou-se biocarvão, enquanto que em solo argiloso não foi verificado aumento da capacidade de retenção de água. O solo argiloso já apresenta alta retenção de água, e devido a hidrofobicidade do biocarvão, este poderia influenciar negativamente na umidade real do solo.

Butnan *et al.* (2015) indicaram que a calagem foi o aspecto que mais se beneficiou da aplicação do biocarvão de eucalipto para solos argilosos e, principalmente, solos arenosos, devido à sua baixa capacidade de tamponamento e pelo fato do biocarvão de eucaliptos ter consideráveis quantidades de Ca e K em sua composição.

Em relação ao sequestro de carbono (C) no solo, SCHOUTEN *et al.* (2012) analisaram as emissões de C no solo na forma de C-CO<sub>2</sub> via respiração dos microrganismos após a incorporação de diferentes materiais em um solo arenoso em condições de laboratório. A adição de esterco bovino causou as maiores emissões de CO<sub>2</sub> (32%), seguido de digestato (18%) e do biocarvão, com as menores emissões (7%). As emissões de CO<sub>2</sub> do solo com biocarvão se estabilizaram após 40 dias da incubação, enquanto o solo incubado com digestato e esterco continuaram liberando CO<sub>2</sub>.

Portanto, o uso do biocarvão favorece o sequestro de C nos solos, aumentando o conteúdo de matéria orgânica, sendo fonte de energia e nutrientes para a biota do solo. Na avaliação do potencial sequestro de carbono pelo biocarvão, vários efeitos indiretos de sua aplicação também devem ser levados em conta, tais como o balanço do uso de fertilizantes, as emissões de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>, e o aumento da produtividade (LIBRA *et al.*, 2011).

Tabela 1 – Efeito do biocarvão na capacidade de retenção de água no solo (RAS) e na densidade do solo (Ds) sob diferentes classes texturais e condições experimentais.

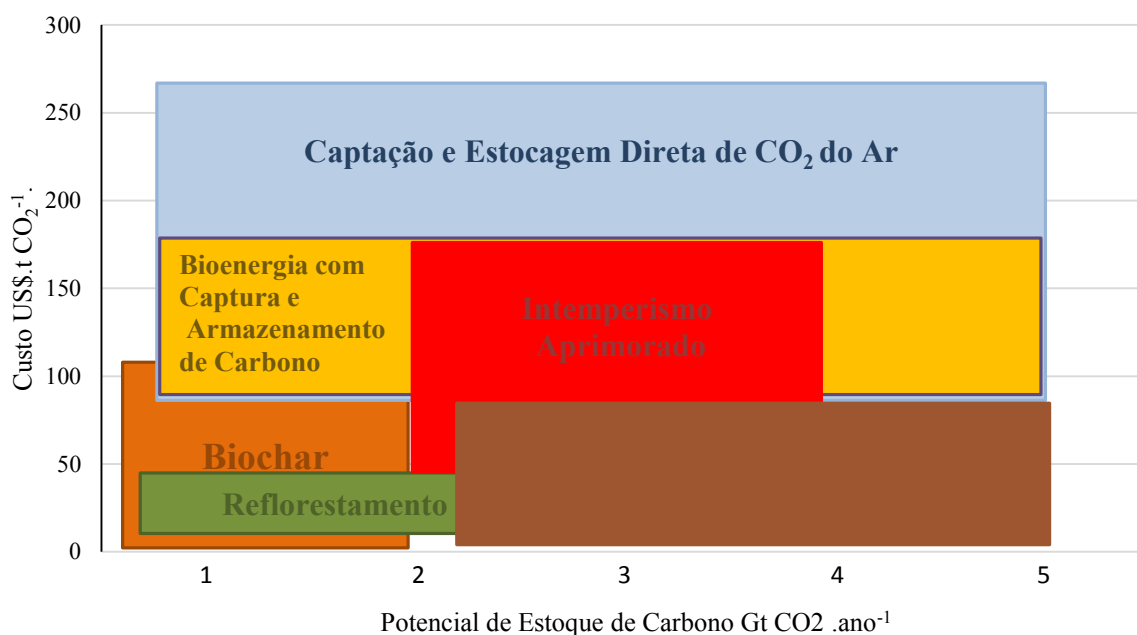
Referência	Material de produção do biocarvão	ASE	Taxa <sup>(1)</sup>	Textura	Local	Ds	RAS
		m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup>	% (peso.peso <sup>-1</sup> )				
Abel <i>et al.</i> (2013)	Milho, silagem de milho, madeira de faia	nd	1; 2,5; 5	argiloarenosa	C/L	-	+
Asai <i>et al.</i> (2009)	Madeira	nd	0,3; 0,6; 1,2	argiloarenosa	L	-	+
Basso <i>et al.</i> (2013)	Carvalho vermelho	nd	3; 6	francoarenosa	L	-	+
Brewer <i>et al.</i> (2012)	Palha de milho	4,5-8,5	0,5	areia franca	L	nd	0
Brockhoff <i>et al.</i> (2010)	<i>Panicum virgatum</i>	21,6	5; 10; 15; 20; 25	areia	L	nd	+
Chen <i>et al.</i> (2010)	Bagaço de cana e efluente agrícola	nd	3; 1	muito argilosa	C	nd	+
Dempster <i>et al.</i> (2012)	Eucalyptus	273	1,8	areia	L	nd	+
Devereux <i>et al.</i> (2012)	Madeira	nd	1,5; 2,5; 5	areia franca	L	-	+
Fellet <i>et al.</i> (2011)	Resíduos de poda	141	1; 5; 10	argilosa	L	nd	+
Ibrahim <i>et al.</i> (2013)	Madeira	nd	0,5; 1; 1,5; 2	francoarenosa	L	nd	+
Jones <i>et al.</i> (2010)	Resíduos verdes	nd	2,4; 4,6	areia	L	-	+
Karhu <i>et al.</i> (2011)	Madeira de lei	3,6	0,3	francossiltosa	C	nd	0
Laird <i>et al.</i> (2010)	Madeira	130-153	0,5; 1; 2	francoargilosa	L	-	+
Lei e Zhang (2013)	Dejetos bovinos e maravalha	14-124	5	franca	L	-	+
Liu <i>et al.</i> (2012)	Resíduos comerciais	nd	0,3; 0,6; 1,2 <sup>(2)</sup>	areia franca	C	nd	+
Pereira <i>et al.</i> (2012)	Madeira	nd	6; 12; 24	areia	L	-	+
Tammeorg <i>et al.</i> (2014)	Madeira	nd	0,4; 0,8	argiloarenosa	C	0	0
Tryon (1948)	Madeira de carvalho e pinhal	nd	15; 30; 45 <sup>(3)</sup>	francoargilosa/ francoarenosa	L	nd	-/+
Ulyett <i>et al.</i> (2014)	Madeira	nd	3	francoarenosa	L	nd	+
Uzoma <i>et al.</i> (2011)	Dejetos bovinos	nd	0,4; 0,7; 0,9	areia	C	nd	+
Ventura <i>et al.</i> (2012)	Madeira	nd	1,2; 2,4	francoargilosa	C	-	0
Zheng <i>et al.</i> (2013)	Gramíneas	2,84	1; 2; 5	francossiltosa	L	nd	+

Fonte: Adaptado de Novotny *et al.* (2015). ASE: área superficial específica do biocarvão; L: laboratório; C: condições de campo; - e +: efeito negativo e positivo do biocarvão, respectivamente; 0: sem efeito; nd: não determinado. (1) Todos os estudos incluíram um tratamento controle, solo sem biocarvão. (2) Taxa de aplicação de biocarvão transformada em massa seca (p.p<sup>-1</sup>) considerando uma densidade do solo de 1,3 kg.dm<sup>-3</sup> para solos argilosos e siltosos; e 1,6 kg.dm<sup>-3</sup> para solos arenosos em profundidade de 10 cm (quando não especificado). (3) Porcentagens de taxa em uma base de volume (v.v<sup>-1</sup>).

Em relatório do IPCC sobre mudanças climáticas feito por Hoegh-Guldberg *et al.* (2018), diferentes métodos para estoque de carbono e o custo médio de cada tecnologia são comparados, expondo o biocarvão como uma alternativa com custo viável para o estoque de carbono, conforme evidencia-se na Figura 3.



Figura 3 – Custo e potencial de estoque de carbono de diferentes métodos.



Fonte: adaptado de Hoegh-Guldberg *et al.* (2018)

Há diferentes formas que têm relevante potencial de estoque de carbono (Figura 3 – Custo e potencial de estoque de carbono de diferentes métodos., E dentre as analisadas, o biocarvão é uma tecnologia que pode ter custo mais baixo com interessante estoque de carbono, próximo inclusive de formas como o florestamento e reflorestamento, ressaltando que é uma abordagem que pode ser aplicada sem alterar o uso da terra drasticamente, sendo socialmente mais aceitável, assim como as tecnologias de sequestro de carbono no solo citadas (Coninck *et al.*, 2018).

Metanálises sobre os efeitos de secas, dióxido de carbono e temperatura elevados, concluem que um aumento da temperatura local a 2 ° C ou acima, a produção agregada de trigo, milho e arroz deve diminuir em áreas temperadas e tropicais (Challinor *et al.*, 2014). Essas perdas de produção podem ser reduzidas se medidas de adaptação forem tomadas (Challinor *et al.*, 2014), como o desenvolvimento de variedades mais adaptadas às mudanças nas condições climáticas. No que concerne ao impacto nos processos biológicos no solo devido à adição de biocarvão, referencia-se que as relações entre atividade microbiana, processos biológicos e mudanças nas propriedades químicas e físicas do solo que contribuem para tal, carecem de estudos para a total compreensão (ABUJABHAH *et al.*, 2016). Porém, verifica-se que o biocarvão está associado a um melhor desenvolvimento de microrganismos do solo, assim como de raízes (ATKINSON; FITZGERALD; HIPPS, 2010), pois sua aplicação aumenta a retenção de umidade em solos mais arenosos, como exposto anteriormente, e em solos mais

argilosos, a infiltração de água e drenagem. Ainda, por poder alterar positivamente as características físicas do solo, potencializando as interações químicas influentes na atividade microbiana, e por ser resistente à degradação microbiana, mantendo suas condições por longo tempo, torna-o interessante no que tange seu uso pra fomentar a atividade microbiana do solo (SOHI *et al.*, 2010).

De forma a explicitar sua mencionada longevidade, aponta-se que a estabilidade do carbono pode ser indiretamente avaliada pela relação molar de hidrogênio para carbono orgânico ( $H/C_{org}$ ), bem como a relação de oxigênio para carbono orgânico ( $O/C_{org}$ ). Valores mais baixos dessas razões estão correlacionadas com maior estabilidade de carbono. Os valores de  $H/C_{org}$  variam de forma dependente da biomassa e do processo utilizado, adotando-se que valores acima de 0,70 indicam menor quantidade de material efetivamente pirolisado (EBC, 2015). Um valor  $O/C_{org}$  inferior a 0,20 deve garantir uma meia-vida mínima de 1.000 anos para o biocarvão. Esta propriedade fornece indicações de estabilidade a longo prazo e persistência do biocarvão no solo, contribuindo para o sequestro de carbono (KAUFFMAN *et al.*, 2014; SPOKAS, 2010).

### **2.2.2 Características do Biocarvão e Seus Efeitos na Comunidade Microbiana do Solo e no Desenvolvimento de Plantas de Milho**

Alguns autores destacam que em solos com adição de biocarvões mais hidrofóbicos há possibilidade de maior adensamento, atividade e diversidade de microrganismos devido ao caráter hidrofóbico e alta área superficial do biocarvão. Assim, pode ocorrer maior afinidade de microrganismos com o biocarvão, uma vez que a adesão deles a sólidos aumenta quanto maior a hidrofobicidade das superfícies (CASTELLANOS; ASCENCIO; BASHAN, 1997; HUYSMAN; VERSTRAETE; HYDROPHOBICITY, 1993; MILLS, 2001; STENSTRÖM, 1989). A capacidade do biocarvão de fornecer um ambiente de proteção aos microrganismos (PIETIKÄINEN; KIIKKILÄ; FRITZE, 2000), assim como a sua capacidade de armazenamento de carbono lábil e nutrientes, associada à sua porosidade interna, podem ser algumas das razões para os efeitos positivos do biocarvão na biomassa microbiana do solo.

As propriedades químicas e microbiológicas da aplicação de diferentes doses de biocarvão produzido a partir de excrementos de aves em solos foram avaliadas por Dominchin *et al.* (2019). Os autores selecionaram três locais com diferentes intensidades de uso: solo florestal sem interferência antrópica (SF), solo agrícola sob manejo sustentável (MS) e solo agrícola sob lavoura intensiva (LI). O biocarvão foi aplicado no solo em quatro doses: sem

biocarvão (controle 0%) e com biocarvão nas doses de 1% (peso biochar peso solo<sup>-1</sup>), 3% e 10%. A aplicação de biocarvão aumentou o pH, a condutividade elétrica (CE), o carbono orgânico total (COT) e a relação C:N. Altas concentrações de biocarvão causaram um aumento na atividade hidrolisante do diacetato de fluoresceína (FDA) em solos agrícolas, sugerindo um aumento na atividade microbiana total. No entanto, a aplicação do biocarvão produziu uma redução na atividade da desidrogenase, principalmente no solo com MS e no solo com LI. Foi observado um aumento de actinobactérias e fungos micorrízicos em solos tratados com altas doses dos substratos. A aplicação de biocarvão aumentou a abundância de bactérias gram-negativas em comparação com o tratamento controle (sem biocarvão). Aumentos significativos nos ácidos graxos fosfolipídicos totais foram detectados após a aplicação do biocarvão em SF e LI, indicando um aumento na biomassa microbiana total.

Quanto a doenças em plantas, Melo Carvalho *et al.* (2013) identificaram uma redução da infestação da brusone do arroz com a utilização de biocarvão de madeira. Efeitos positivos do biocarvão foram notados na diminuição de infecções fúngicas foliares de tomate, pimenta e morango, indicando mais um benefício, ao dar maior poder de resposta vegetal às doenças (ELAD *et al.*, 2010, 2011; HAREL *et al.*, 2012).

Outro aspecto relevante do biocarvão é a sua sinergia com outros elementos. Hale; Luth e Crowley, (2015) destacam que um dos maiores desafios tecnológicos e de desenvolvimento industrial é assegurar as taxas de sobrevivência das bactérias promotoras do crescimento vegetal (BPCV). Nessa linha, tem-se no biocarvão um material que pode ser carregador de inóculos de BPCV, justamente por sua estrutura porosa, a qual proporciona espaços para a colonização e proteção contra predadores (IJIMA *et al.*, 2015), conforme pode-se evidenciar na Figura 2.

Na produção agrícola, onde há grande demanda por nitrogênio para uso como fertilizante, este oriundo da utilização de combustíveis fósseis, em grande parte de fonte não renovável, quando usado de forma indiscriminada gera contaminação de lençóis freáticos, eutrofização de corpos d'água e emissão de gases que agravam os efeitos das mudanças climáticas (CARVALHO, 2006). Abre-se então oportunidade para o uso das BPCV, as quais podem reduzir o uso de fertilizantes e aumentar o rendimento das culturas, ao estimularem o desenvolvimento das plantas por meio de mecanismos diretos e/ou indiretos, de forma associativa nas superfícies radiculares e nos tecidos internos de diferentes espécies vegetais (HUNGRIA *et al.*, 2010), auxiliando no suprimento da demanda vegetal por nutrientes (P, K) e atuando no aumento da resistência e tolerância das plantas contra estresses bióticos e abióticos. Barassi *et al.* (2008) relatam a melhoria em parâmetros fotossintéticos das folhas,

incluindo o teor de clorofila, maior produção de biomassa, maior altura de plantas, maior produção de raízes e plantas mais verdes e sem estresse hídrico na presença das BPCV.

Salienta-se que entre várias BPCV, as do gênero *Azospirillum*, descoberta pela pesquisadora da Embrapa, Dra. Johanna Döbereiner (1924-2000), destaque-se mundialmente, com maior atenção para *Azospirillum brasilense* que favorece o crescimento do milho e diminui o uso de fertilizantes nitrogenados, sem que ocorram diminuição na produtividade (HUNGRIA *et al.*, 2010; FERREIRA *et al.*, 2013).

*Azospirillum brasilense*, bactéria gram-negativa de fixação livre de nitrogênio, endofítica facultativa, colonizando tanto a superfície como o interior das raízes (VIEIRA, 2017). Elas são resilientes quanto ao metabolismo de C e N, podendo obter nitrogênio nas formas de amônia, nitrato, nitrito, aminoácidos e nitrogênio molecular. Em condições desfavoráveis, como seca e a limitação de nutrientes, a *Azospirillum* pode sofrer mudança morfológica, que é acompanhada pelo desenvolvimento de um revestimento externo de polissacarídeos e pelo acúmulo de abundantes grânulos de poli- $\beta$ -hidroxibutirato, podendo servir como fonte de energia e carbono em condições de estresse (STEENHOUDT; VANDERLEYDEN, 2000).

*Azospirillum brasilense* produz ainda fitormônios que induzem o crescimento radicular, melhora a absorção de água e nutrientes pelas plantas e realizam um controle de fitopatógenos (BASHAN; DE-BASHAN, 2010; DOORNBOS; VAN LOON; BAKKER, 2012). Há incerteza se os efeitos na planta ocorrem pelos efeitos dos fitormônios (auxinas, giberelinas, citocininas, ácido abscísico e etileno) no crescimento radicular e na maior absorção de nitrogênio do solo e/ou da fixação de nitrogênio da atmosfera (DIDONET *et al.*, 2000; VIEIRA, 2017). Entretanto, há literatura indicando que os fitormônios produzidos pela *Azospirillum* são os principais mecanismos para induzir o crescimento de plantas (STEENHOUDT; VANDERLEYDEN, 2000).

Não se tem relatada na literatura patogenicidade em humanos da *Azospirillum brasilense*, sendo, portanto, consideradas seguras na utilização como biofertilizantes a nível comercial para diferentes culturas, especialmente cereais e gramíneas de importância econômica (MEHNAZ, 2015). Castellanos *et al.* (1997) sugerem que a *Azospirillum brasilense* tem características predominantemente hidrofóbicas e de maior carga em superfícies sólidas do que em meios líquidos. Nesta linha, o biocarvão, com características hidrofóbicas, tende a potencializar o efeito dessas BPCV.

Em relação ao nitrogênio, a fixação biológica de nitrogênio (FBN) pode suplementar ou, até mesmo, substituir a utilização de fertilizantes de base nitrogenada (REIS *et al.*, 2000). A FBN consiste na transformação do  $N_2$  na forma inorgânica combinada  $NH_3$ , e a partir daí, em

formas reativas orgânicas e inorgânicas. A reação de redução do  $N_2$  a  $NH_3$  é realizada por microrganismos que contêm a enzima nitrogenase e são conhecidos como fixadores de  $N_2$  ou diazotróficos (BERGAMASCHI, 2006). Após a redução do  $N_2$  ou da obtenção de amônia a partir do meio, o microrganismo assimila essa amônia por meio da produção de glutamina e glutamato, compostos que irão atuar como doadores de nitrogênio nas reações do metabolismo celular (ARCONDÉGUY; JACK; MERRICK, 2001). A *Azospirillum brasilense* também ajuda na fixação de N, contribuindo para o fornecimento deste nutriente para plantas de milho.

A FBN é considerada uma importante oportunidade para mitigar a deficiência de nitrogênio nos sistemas de cultivo em todo o mundo, porém, ela diminui significativamente se a concentração disponível de nitrato no solo for alta e as concentrações de cálcio, fósforo e micronutrientes forem baixas (GILLER, 2001). Em solos com grande quantidade de biocarvão, como a mencionada “Terra Preta de Índio”, as concentrações de nitrato disponíveis são geralmente baixas e as concentrações disponíveis de cálcio, fósforo e micronutrientes são altas, o que é ideal para a máxima FBN (LEHMANN *et al.*, 2003a).

Mediante à exposição de possibilidades de melhoramentos de solo, atenta-se ao fato que o Brasil é um dos maiores exportadores agrícolas do mundo, porém, dependente da importação de fertilizantes para sua produção, a qual atingiu recorde em 2019, tanto em quantidade (quase 35 milhões de toneladas), como em valores, com cerca de US\$ 9 bilhões (COMEXSTAT, 2019). A redução da demanda de importação de fertilizantes representaria uma importante economia para o Brasil, sendo a utilização de resíduos agrícolas e orgânicos uma alternativa para suprir parte desta demanda.

No estudo de Glaser *et al.* (2015), com mistura de biocarvão e digestato em um Cambisolo de textura arenosa de clima temperado, foram realizados tratamentos, incluindo: adubo mineral, digestato, digestato inoculado com microrganismos extraídos de solos florestais adjacentes, composto sozinho e em combinação com biocarvão, com aplicação de biocarvão variando de 1 a 40 t ha<sup>-1</sup>. Os resultados mostraram que a adição de 1 t ha<sup>-1</sup> de biocarvão ao fertilizante mineral aumentou a produção de milho em 20%, e a adição de biocarvão ao digestato aumentou a produtividade de milho em 30% quando comparado aos tratamentos correspondentes sem biocarvão. Por sua vez, a adição de 10 t ha<sup>-1</sup> de biocarvão ao composto aumentou a produtividade de milho em 26% em comparação ao composto puro, enquanto a adição de 40 t ha<sup>-1</sup> de biocarvão ao digestato aumentou a produção de milho em 42%. Ao fim, também se observou a redução da produtividade em 50% quando o digestato fermentado foi aplicado junto do biocarvão.

Seguindo a linha relacionada à otimização dos aspectos da produção de milho, explicita-se que trabalhos com *Azospirillum brasilense* têm demonstrado aumento no rendimento de massa seca e no acúmulo de nutrientes por plantas inoculadas (REIS *et al.*, 2008), assim como na produtividade de grãos de milho (HUNGRIA *et al.*, 2010). Hungria *et al.* (2010) avaliaram o uso de *Azospirillum* sobre o desenvolvimento de plantas de milho e encontraram um aumento de 27% na produtividade em relação ao controle sem inoculação, observando também a diminuição de 50% da dose de N quando usada a bactéria. Aumento do acúmulo de N no tecido foliar de plantas de milho também foi encontrado por Picazevicz (2017) em cultivo de milho inoculado com *Azospirillum brasilense*.

Os estudos das sinergias entre esses microrganismos e o biocarvão também vem mostrando aumento do tempo de vida desses dentro do biocarvão, sendo que essas pesquisas são geralmente feitas com culturas de interesse econômico (EGAMBERDIEVA, 2018). O biocarvão de pinus pirolisado a 600 °C foi inoculado com *Pseudomonas putida* e mostrou ser efetivo ao inocular a rizosfera das plantas de milho (SUN; HALE; CROWLEY, 2016). Outro biocarvão de pinus foi inoculado com *Enterobacter cloacae* e aumentou a quantidade de biomassa da parte aérea e raiz de plantas de pepino (HALE; LUTH; CROWLEY, 2015). Biocarvão de madeira dura com *Bradyrhizobium japonicum* aumentou o crescimento de soja e melhorou suas propriedades fisiológicas (GLODOWSKA *et al.*, 2017) e o biocarvão em associação com sementes de milho e *Pseudomonas libanensis* melhorou a germinação, crescimento da parte aérea e raízes, quantidade de clorofila e o P pelas plantas (GLODOWSKA *et al.*, 2016). O biocarvão produzido de palha de arroz para produção de feijão mostrou evidência de colonização e sobrevivência da bactéria inoculada (*Rhizobium sp.*) e aumento da biomassa das raízes, parte aérea e absorção de nutrientes (GHAZI, 2017).

Em linhas de pesquisa de sinergia entre biocarvão e microrganismos aplicados em cultura de milho e com *Azospirillum*, Saranya; Kumutha; Krishnan (2011) analisaram a influência da aplicação de biocarvão de madeira no crescimento das plantas inoculadas com bactérias do gênero *Azospirillum*. Os resultados revelaram que esta combinação aumentou significativamente a atividade microbiana e o estado nutricional da planta e do solo estudado. A população de diazotróficos total, incluindo *Azospirillum brasilense*, na rizosfera do milho aumentou significativamente com a aplicação de biocarvão em todas as fases de crescimento da cultura. Além disso, foi observado um aumento significativo de fungos micorrízicos arbusculares na colonização radicular, resultado também encontrado por Yamato *et al.* (2006), que além disso observaram maior massa seca de raízes e a massa fresca total de milho em solo com aplicação de biocarvão.

A adição de biocarvão parece estar relacionada a maior presença de fungos micorrízicos no solo em uma ampla gama de biocarvão aplicado ao solo (BUDI; SETYANINGSIH, 2013; BLACKWELL *et al.*, 2015). Estes fungos aumentam, por exemplo, a disponibilidade de P do biocarvão para as plantas, transferindo até 6 vezes mais P para as raízes em comparação com tratamentos sem o fungos, nutriente que muitas vezes não está totalmente disponível ou é inacessível às raízes pelo tamanho dos poros, além de fornecer uma estrutura estável para o fungo se estabelecer (HAMMER *et al.*, 2014).

Esse poder de solubilização de nutrientes também tem sido demonstrado nas bactérias do gênero *Azospirillum*, que podem solubilizar o fósforo de fosfato de cálcio (*A. brasilense* e *A. lipoferum*), além da produção de ácido glucônico pelo *Azospirillum brasilense* em testes in vitro (RODRIGUEZ *et al.*, 2004), com potencial de disponibilizar o fósforo que se encontra indisponível do solo.

Como já relatado, pode haver maior absorção de nutrientes pelas plantas quando da presença de *Azospirillum* (ARDAKANI *et al.*, 2011). O biocarvão, por suas características até agora relatadas, pode ser mais um fator potencializador desses benefícios.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 TRATAMENTOS, DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi conduzido em casa de vegetação pertencente ao Departamento de Microbiologia e Parasitologia da UFSC, em vasos de 8 litros, com 8kg de solo cada vaso, com solo de baixa fertilidade natural, em delineamento de blocos casualizados, em esquema fatorial 7 x 2, contendo 4 repetições cada, dispostos em 56 vasos. Os tratamentos avaliados foram: biocarvão de cama de aviário (BC), biocarvão de digestato de suínos (BD), digestato líquido de suínos (DS); mistura de BC com DS (BCDS), mistura de BD com DS (BDDS), calagem e adubação mineral (NPK) e testemunha (Test) sem adubação e sem calagem. Todos os tratamentos também foram inoculados com a bactéria *Azospirillum brasilense* (com e sem inoculação de *A. brasilense*). As quantidades de BC e de BD utilizadas nos tratamentos com e sem inoculante foram estabelecidas levando-se em consideração o teor de P para a cultura do milho para alcançar uma produtividade de 4 t ha<sup>-1</sup>, de acordo com as recomendações do Manual de Calagem e Adubação (CQFSRS/SC, 2016), resultando em uma aplicação de 11,22 g (3,72 t ha<sup>-1</sup>) de BC e 8,68 g (2,87 t ha<sup>-1</sup>) BD em cada vaso com capacidade de 8,0 litros.

Para as misturas de BCDS e BDDS, com e sem inoculante, foram usadas a metade das quantidades de biocarvão e digestato de suíno em estado líquido em cada vaso, sendo: 5,61 g e 20,94 ml para BCDS, e 4,34 g e 20,94 ml para BDDS, respectivamente. Para o digestato líquido foi aplicado uma quantidade de 41,88 ml por vaso (equivalente à 13 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>).

Na Tabela 2 estão quantificados os nutrientes aplicados em cada tratamento de acordo com a recomendação da CQFSRS/SC (2016) para a cultura do milho. As quantidades aplicadas estão baseadas nas análises do solo (Tabela 3) e dos nutrientes dos substratos (Tabela 4), não refletindo necessariamente a disponibilidade destes nutrientes para as plantas.

Para o tratamento NPK a correção do solo foi feita de acordo com os resultados das análises químicas (Tabela 3) e a recomendação à cultura do milho, conforme a CQFSRS/SC, 2016), as quais são: para o pH, 9,51g (3,15 t ha<sup>-1</sup>) de carbonato de cálcio e 1,28 g (345 kg ha<sup>-1</sup>) de óxido de magnésio, para o N, 469,60 mg (156 kg ha<sup>-1</sup>) de ureia; para o P, 1,472 mg de superfosfato triplo (488 kg ha<sup>-1</sup>), e para o K, 312 mg (103 kg ha<sup>-1</sup>) de cloreto de potássio para cada vaso de 8L com 8kg de solo.



Tabela 2 – Quantidades de N, P e K aplicados por tratamento.

<b>Tratamento</b>	<b>Parâmetro Avaliado (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Quantidade Adicionada (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Valor de Referência CQFSRS/SC (2016) (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Balço (kg ha<sup>-1</sup>)</b>
BD	P	87,4	87,4	0
	N	48,7	70,0	-21,3
	K	18,4	50,0	-31,6
BC	P	87,4	87,4	0
	N	59,1	70,0	-10,9
	K	99,9	50,0	+49,9
BCDS	P	45,2	87,4	-42,2
	N	46,2	70,0	-23,8
	K	50,2	50	0
BDDS	P	45,2	87,4	-42,2
	N	41,0	70,0	-29,0
	K	9,4	50,0	-40,6
DS	P	3,1	87,4	-84,3
	N	33,3	70,0	-36,7
	K	0,4	50,0	-49,6

Legenda: BC: biocarvão de cama de aviário, BD: biocarvão de digestato, BCDS: biocarvão de cama de aviário+digestato, BDDS: biocarvão de digestato+digestato, DS: digestato líquido de suínos.

As misturas dos substratos com o solo foram feitas em uma betoneira, dispondo-se a quantidade de 64 kg de solo a cada tratamento e adicionando o substrato de estudo correspondente, obtendo uma mistura homogênea, que ao fim, foi disposta em quantidade de 8 kg em cada vaso. O digestato líquido foi adicionado posteriormente com auxílio de uma piseta.

A semeadura do milho ocorreu no dia 25 de maio de 2019, sendo os vasos dispostos sob casa de vegetação, com luminosidade natural, ventilação de ar cruzada forçada, sem controle de temperatura e umidade. O experimento foi conduzido durante 123 dias após a semeadura (DAS), sendo finalizado em 25 de setembro de 2019. Foram colocadas 4 sementes de milho por vaso, e após a emergência, foi feito um desbaste, deixando-se apenas uma planta por vaso. Foi calculada a quantidade de água a ser adicionada ao solo através da capacidade de campo pelo método do funil, irrigando os vasos de forma a manter o solo úmido em 60% da capacidade de campo com a água da rede da UFSC. No Anexo A estão as imagens das plantas de milho ao final do experimento e as imagens das plantas de milho que emergiram o pendão ao 123 DAS.

Ao final do experimento cortou-se a parte aérea das plantas de milho, dispondo-as em sacos de papel e, subsequentemente, encaminhando-as à estufa de circulação de ar forçado para secagem à temperatura de 55 °C até atingir peso seco constante. As raízes foram separadas do solo manualmente ao retirar todo material dos vasos e dispor sobre bandejas plásticas. As raízes do milho foram lavadas em água corrente e também dispostas em sacos de papel para secagem

em estufa de circulação de ar forçado à temperatura de 55 °C até atingir peso seco constante. Após a secagem, a parte aérea foi triturada em moinho tipo Wiley e as raízes foram trituradas em um moedor de café comercial, depois foram reservadas para realização das análises químicas.

### 3.2 AMOSTRAGEM E CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Foram coletadas amostras da camada superficial (entre 0 a 10 cm) de um Argissolo Vermelho-Amarelo (Santos *et al.*, 2018), localizado na região do Itacorubi, em Florianópolis/SC. Este solo apresenta textura franco-arenosa e baixa fertilidade natural. Após a coleta, as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de malha 2,0 mm. Posteriormente, foi feita a caracterização química e física do solo (Tabela 3), conforme métodos descritos em Tedesco *et al.* (1995).

Tabela 3 – Caracterização química e física do solo.

Parâmetros Avaliados	Solo
pH (H <sub>2</sub> O)	5,20
Índice SMP	5,80
Carbono orgânico total (g kg <sup>-1</sup> )	26,60
N total (g kg <sup>-1</sup> )	2,23
P (mg dm <sup>-3</sup> )	7,0
K (mg dm <sup>-3</sup> )	159,0
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	2,30
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,90
S (g kg <sup>-1</sup> )	0,18
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,60
H + Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	5,70
CTC <sub>efetiva</sub> (cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	4,21
CTC <sub>pH7,0</sub> (cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	9,10
Saturação por bases (V%)	40,0
Saturação por Al (m%)	14,0
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	750
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	70
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	180

Fonte: Autor. Legenda: CTC: capacidade de troca catiônica.

### 3.3 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BIOCARVÃO

Para o experimento foram utilizados biocarvão de cama de aviário e biocarvão de digestato de dejetos suínos provenientes de biodigestores, sendo ambos pirolisados à temperatura de 400 °C, e o digestato de dejetos suínos proveniente de biodigestores em estado líquido. O biocarvão de cama de aviário foi produzido pela empresa SPPT Pesquisas Tecnológicas Ltda, por 15 min à 400°C (GIACHINI *et al.*, 2018). O digestato foi coletado de uma unidade de suinocultura na cidade de Videira/SC, que detém um biodigestor tipo CSTR (reator tipo mistura completa). Para ser pirolisado, o digestato passa por um separador de sólidos, prensa parafuso (Figura 4), e então a parte sólida é encaminhada para reator de pirólise.

Para produção do biocarvão de digestato foi utilizado um reator piloto de parafuso semi-contínuo (Figura 6 e Figura 5) na Universidade de Caxias do Sul (UCS) com um tempo de pirólise de 60 min à 400 °C.

Figura 4 - Prensa parafuso separadora de fase líquida-sólida de digestato.



Fonte: autor

Figura 5 - Reator de pirólise piloto de parafuso semi-contínuo utilizado na Universidade de Caxias do Sul para obtenção do biocarvão.



Fonte: autor

Figura 6 - Esquema do reator de pirólise piloto de parafuso semi-contínuo.

*S.D. Ferreira et al. / Energy Conversion and Management 92 (2015) 223–233*

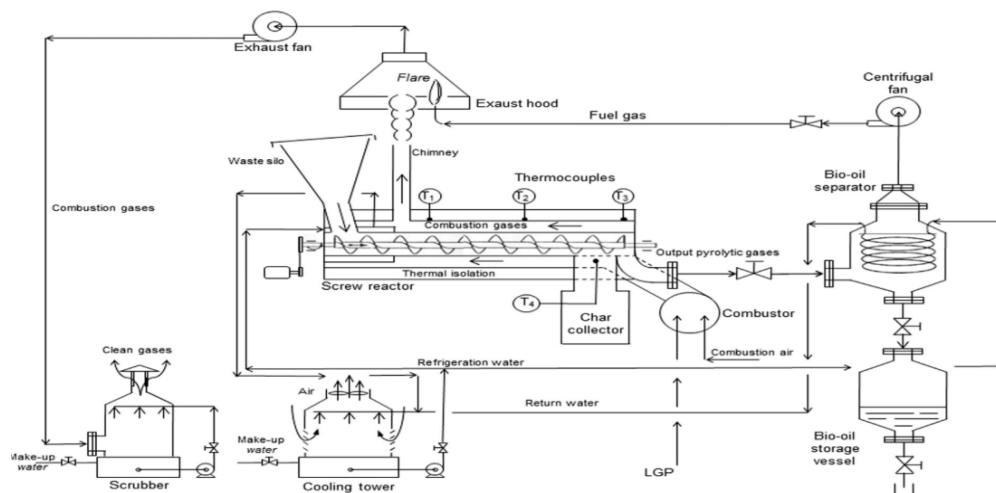


Fig. 1. Complete scheme of the pyrolysis system.

Fonte: Ferreira *et al.*, 2015

A caracterização físico-química dos biocarvões em comparação à sua respectiva matéria-prima encontra-se na Tabela 4. As análises de P, K, Mg, Ca, Al, Cu e Zn do digestato e do biocarvão de digestato foram realizadas segundo a metodologia descrita por Malavolta *et al.* (1997). Já a determinação do pH foi realizada segundo o método apresentado por Tedesco *et al.* (1995) e as quantificações de C, N e S do biocarvão de digestato foram realizadas por Analisador Elementar CHNS-O. A umidade, matéria volátil e teor de cinzas foram quantificadas segundo a norma ASTM E870 (ASTM, 2013). As características químicas e físicas do biocarvão de cama de aviário foram obtidas por meio de absorção espectroscópica, segundo Giachini *et al.* (2018). A área superficial específica e a medição do tamanho dos poros do biocarvão de digestato foram realizados pelo método de BET (BRUNAUER; EMMETT; TELLER, 1938) no Laboratório Central de Microscopia (LCMIC) da Universidade de Caxias do Sul (UCS), RS.

Tabela 4 - Caracterização físico-química do biocarvão de cama de aviário, da cama de aviário, do biocarvão de digestato e do digestato líquido.

<b>Parâmetros Avaliados</b>	<b>Cama de Aviário</b>	<b>Biocarvão de Cama</b>	<b>Digestato Líquido<sup>1</sup></b>	<b>Biocarvão de Digestato</b>
pH (H <sub>2</sub> O)		8,2	6,6	8,5
Umidade (%)	6,2	2,8	96,5	0,4
C total (g kg <sup>-1</sup> )	376,0	429,0	-	563,5
N total (g kg <sup>-1</sup> )	36,8	31,8	3,0 (g L <sup>-1</sup> )*	28,2
P (g kg <sup>-1</sup> )	10,5	29,4	7,0	38,0
K (g kg <sup>-1</sup> )	29,9	26,9	0,8	6,4
Ca (g kg <sup>-1</sup> )	21,1	48,3	13,3	126,7
Mg (g kg <sup>-1</sup> )	3,8	14,6	1,7	12,7
S (g kg <sup>-1</sup> )	6,4	10,0	-	3,8
Na (mg kg <sup>-1</sup> )	4069,0	7300,0	338,0	1522,0
Al (mg dm <sup>-3</sup> )	474,0	15549,0	202,7	4274,0
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	127,0	607,0	157,3	65,4
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	454,0	1070,0	887,6	4809,5
As (mg kg <sup>-1</sup> )	11,1	4,3	-	-
Relação C:N	10,2	13,5	-	20,0
Matéria Volátil (%)	-	-	70,547	10,5
Teor de Cinzas (%)	-	-	13,986	40,1
ASE (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )		5,2	-	54,6
Tamanho Poro (Å)				6,2

Fonte: Biocarvão de cama e cama de aviário: Giachini et al. (2018). Biocarvão de digestato e digestato de suíno: o autor. <sup>1</sup>Elementos analisados em base seca, com exceção de N. \*N Kjeldahl. Legenda: Ångström (Å), 1 Å = 10<sup>-10</sup> m, ASE: área superficial específica.

Foram feitas análises de microscopia eletrônica para o digestato de suínos (Figura 7) e para o biocarvão de digestato (Figura 8). As análises de microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (MEVEC), foram conduzidas no Laboratório Central de Microscopia (LCMIC) da Universidade de Caxias do Sul (UCS), RS. As imagens foram obtidas em um microscópio modelo MIRA 3, da marca TESCAN. Imagens da distribuição de elementos no digestato de suíno e no biocarvão de digestato encontram-se no Anexo B.

A granulometria do biocarvão de digestato de suínos e de cama de aviário, por sua vez, foi feita com amostras de 20 g de biocarvão, passando-os por peneiras de malha de 2,0; 1,0;

0,5; 0,25; 0,106 e 0,053 mm, e a porção retida em cada peneira foi pesada e o percentual de massa calculado ao final (Tabela 5).

Tabela 5 – Distribuição percentual da granulometria dos biocarvões.

Diâmetro das peneiras (mm)	Biocarvão digestato (%)	Biocarvão de cama (%)
2,0	4,00	17,00
1,0	19,70	23,70
0,5	74,50	40,70
0,25	1,20	14,30
0,106	0,50	3,30
0,053	0,10	1,00

Fonte: Autor

### 3.4 *AZOSPIRILLUM BRASILENSE* E VARIEDADE DE MILHO USADA

A BPCV utilizada neste estudo foi da espécie *Azospirillum brasilense*, provinda da empresa Total Biotecnologia<sup>®</sup>, contendo as estirpes Abv5 e Abv6 ( $2 \cdot 10^8$  células viáveis por ml). As sementes de milho utilizadas são da variedade crioula Amarelinho, provenientes do município de São Bonifácio, SC. Esta variedade apresenta ciclo tardio, plantas altas, índice de germinação de 85%, comprimento da semente de 14,1 mm e comprimento de plântulas aos sete dias após germinação variando entre 24 a 27 cm, assim como massa seca de plântulas de 1,80 g plântula<sup>-1</sup> (ROSA, 2019). A emissão do pendão floral ocorre por volta dos 120 DAS.

A inoculação das sementes de milho realizou-se sob abrigo da luz solar, em até duas horas antes da semeadura, permanecendo as sementes protegidas posteriormente da exposição solar e do calor. No total, foram inoculadas 224 sementes com 0,747 ml de solução bacteriana, uma dosagem 100% maior que a aplicação recomendada pelo fabricante, que é 1 ml para 600 sementes. O aumento na dose deu-se de forma a garantir a inoculação, diante da possível perda de material no processo de mistura das sementes com o produto em embalagem plástica.

### 3.5 ANÁLISES QUÍMICAS DO SOLO E PLANTA

A caracterização química do solo pós cultivo foi feita por extrações e análises de pH em água, pH SMP, Al, Ca, Mg, Na, K e P, segundo a metodologia de Tedesco *et al.* (1995). Os valores de H + Al foram calculados segundo a equação de Kaminski *et al.* (2001), e a CTC<sub>efetiva</sub>, CTC<sub>pH 7,0</sub>, Saturação por Al (m%) e Saturação por Bases (V%) foram calculados segundo CQFSRS/SC (2016). As leituras de P, Ca, Mg e Na foram feitas em um espectrômetro de massa

com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-MS). Os teores de C, N e S totais foram quantificados por meio do Analisador Elementar CHNS-O e a obtenção dos teores totais de Cu e Zn foi feita por digestão nítrico-perclórica (TEDESCO *et al.*, 1995) e, posteriormente, quantificado em ICP-MS.

Em relação à planta, foram avaliadas as seguintes características na retirada do experimento aos 123 DAS:

- Comprimento do colmo (altura da planta), da distância do colo da planta até a inserção da folha bandeira (cm);
- Diâmetro do colmo da planta, medido na parte com maior diâmetro (cm), a cerca de 6 cm de altura do solo;
- Massa seca da parte aérea (folhas e colmo) e raiz, em g planta<sup>-1</sup>;
- Os teores de C, N e S totais na parte aérea e raiz foram quantificados por meio do Analisador Elementar CHNS-O.
- Teor relativo de clorofila nas folhas, por meio de clorofilômetro que resulta em um índice, chamado índice SPAD.

### 3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Os dados obtidos do solo e da planta foram analisados quanto à normalidade e homogeneidade por meio dos testes de Lilliefors e Bartlett, respectivamente. Em sequência, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com aplicação do teste F e, os valores médios, quando significativos, comparados entre si pelo teste Scott-Knott a 5%, utilizando-se o software Sisvar 5.6. Foram avaliados os fatores tratamentos e inoculação. Quando a interação entre tratamentos e inoculação foi significativa, procedeu-se o desdobramento da interação. Para os parâmetros de solo e planta que não apresentaram interação significativa, os valores médios foram apresentados separadamente em função do fator tratamento ou da inoculação.

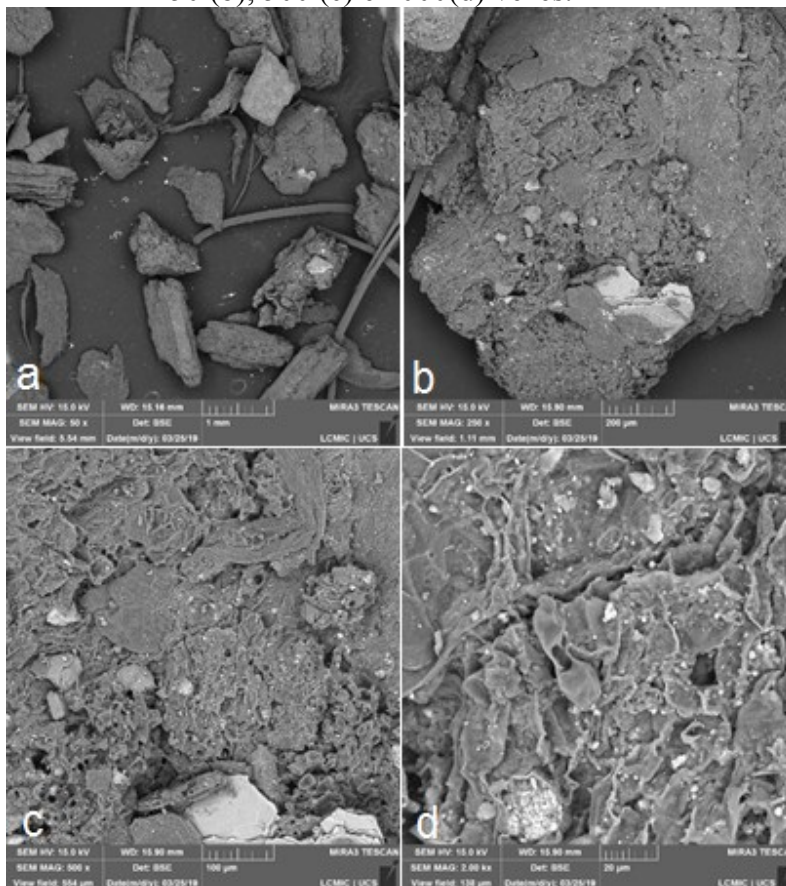
Em relação às porcentagens nos resultados para indicar a magnitude dos resultados foram em relação à testemunha correspondente: tratamentos sem inoculação comparados com testemunha sem inoculação e tratamentos com inoculação com testemunha com inoculação.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DO DIGESTATO E BIOCARVÃO DE DIGESTATO

A imagem por microscopia eletrônica da fase sólida do digestato de suínos foi realizada antes da pirólise, onde é possível observar estruturas sólidas, não muito porosas, com a presença de pelo animal (Figura 7). Na Figura 8 tem-se a imagem por microscopia eletrônica do biocarvão de digestato de dejetos suínos, onde observa-se a presença de estruturas porosas, característica de biocarvões. Estas estruturas porosas podem funcionar como reservatório de nutrientes, protegendo-os da lixiviação, disponibilizando-os às plantas ou microrganismos, além de servirem como espaços para crescimento de raízes, fungos e outros microrganismos (THIES e RILLIG, 2009).

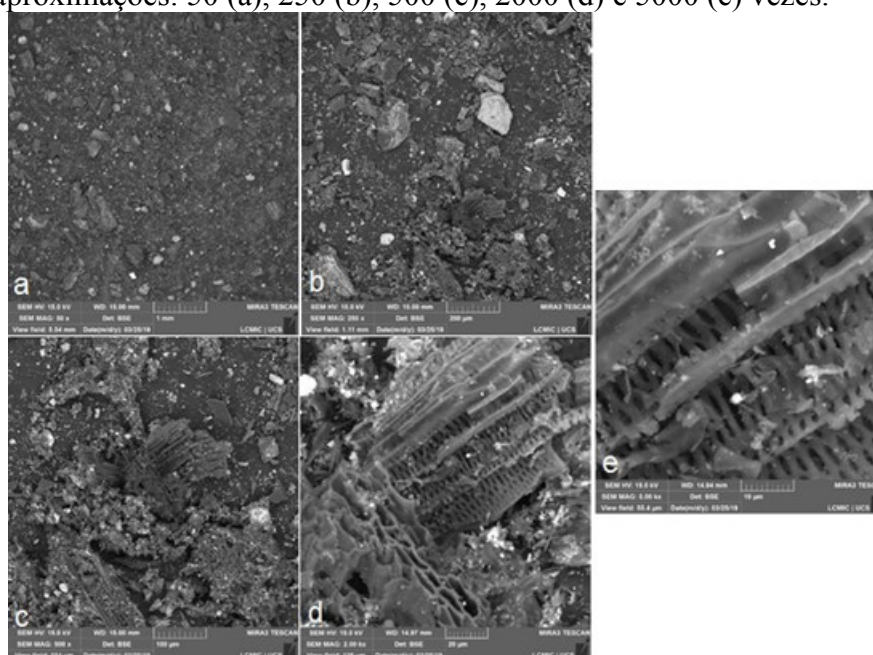
Figura 7 – Imagem de digestato de suínos seco por microscopia eletrônica aumentada 50 (a), 250 (b), 500 (c) e 2000(d) vezes.



Fonte: Autor/UCS



Figura 8 – Imagem do biocarvão de digestato por microscopia eletrônica em diferentes aproximações: 50 (a), 250 (b), 500 (c), 2000 (d) e 5000 (e) vezes.



Fonte: Autor/UCS

No Anexo B observa-se a distribuição de elementos C, O, P, Ca, Si, Mg, S, Al, Na, K, Zn, Cu, Cl e Fe no digestato de suíno e no biocarvão de digestato, em que alguns elementos encontram-se mais distribuídos no substrato e outros mais concentrados. Alguns elementos aparecem mais concentrados ou distribuídos no digestato e no biocarvão. O Alumínio aparece em parte mais concentrado no digestato, já no biocarvão está mais distribuído. O Cu que está mais distribuído no digestato, aparece em pontos mais concentrados no biocarvão. É possível observar também a diminuição do oxigênio no biocarvão, uma vez que os grupos oxigenados vão sendo quebrados à medida que aumenta a temperatura de pirólise. Outros elementos em pontos mais concentrados no biocarvão são P, Ca, Si e Fe e no digestato observa-se o P, Ca, Mg e Si.

## 4.2 ATRIBUTOS QUÍMICOS AVALIADOS NO SOLO

Entre os parâmetros avaliados no solo, observou-se para o fator tratamento efeito significativo ( $p < 0,05$ ) para todos os atributos mensurados. Houve interação significativa para os atributos pH, C, N, C:N, P, K, Na, Cu, Zn (Anexo C).

Na Tabela 6 são apresentadas as médias dos parâmetros avaliados no solo que apresentaram efeito significativo para o fator tratamento.

Tabela 6 - Atributos avaliados no solo após a retirada das plantas de milho aos 123 dias em função dos diferentes tratamentos testados.

Parâmetros	Tratamento						
	BC	BD	DS	NPK	BCDS	BDDS	Test
S (g kg <sup>-1</sup> )	0,54 A	0,46 A	0,41 A	0,31 B	0,44 A	0,46 A	0,45 A
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	2,09 C	2,24 B	1,74 D	4,19 A	1,83 D	1,95 C	1,55 E
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,86 B	0,88 B	0,72 C	1,17 A	0,71 C	0,75 C	0,63 C
CTC <sub>efetiva</sub> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,97 B	4,04 B	3,85 B	5,78 A	3,64 C	3,79 B	3,46 C
Saturação de Al (m%)	14,84 C	10,90 D	23,62 A	0,73 E	19,53 B	18,87 B	24,86 A
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,04 A	3,04 A	3,10 A	1,05 C	3,10 A	3,07 A	2,88 B
CTC <sub>pH7,0</sub> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	6,39 B	6,64 A	6,04 C	6,81 A	6,01 C	6,14 C	5,50 D
Saturação por bases (V%)	52,37 B	53,88 B	48,75 C	84,63 A	50,25 C	48,50 C	47,37 C

Médias seguidas de mesma letra maiúsculas na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott,  $p < 0,01$ . Legenda: BC: biocarvão de cama de aviário, BD: biocarvão de digestato, BCDS: biocarvão de cama de aviário+digestato, BDDS: biocarvão de digestato+digestato, DS: digestato líquido, NPK: tratamento com doses recomendadas de N, P, K e calagem, Test: testemunha controle.

Em relação a saturação por Al, o tratamento NPK apresentou os menores valores, e os tratamentos com DS e testemunha apresentaram os maiores valores. Entre os tratamentos só com biocarvão, BD apresentou saturação por Al 56% menor que a testemunha e BC 40% menor. Os tratamentos com as misturas apresentaram valores de saturação por Al maiores que os tratamentos só com biocarvão, porém foram inferiores aos valores encontrados para DS e a testemunha em cerca de 22% (Tabela 6). Fica evidenciado a importância do biocarvão para diminuir os teores de Al tóxico no solo.

Sugere-se que os biocarvões, devido a sua estrutura altamente aromática e alta densidade de cargas, com destaque para os grupamentos carboxílicos e fenólicos, podem ter diminuído a disponibilidade de Al no solo por meio da complexação do Al com os grupamentos aromáticos (PETTER; MADARI, 2012; TRAZZI *et al.*, 2018). Resultados semelhantes são relatados no estudo de Qian, Chen e Hu (2013), ao verificarem que a adição de biocarvão de dejetos bovinos em solo cultivado com trigo diminui a quantidade de Al tóxico para as plantas.

Para acidez potencial (H + Al), os menores valores foram evidenciados no NPK, 64% menor que Testemunha e os tratamentos com biocarvão, misturas e DS tiveram valores estatisticamente iguais, porém maiores que a testemunha, com valores entre 6% a 8%, aumentando levemente a acidez potencial do solo.

A quantidade de Ca no solo foi maior em todos os tratamentos em relação à Testemunha, sendo verificados aumentos de: NPK (170%), seguida de BD (45%), BC e BDDS (média de 30%), BCDS e DS (média de 15%) (Tabela 6). Estes resultados corroboram com os maiores valores de Ca encontrados no biocarvão de digestato do que no biocarvão de cama de aviário (Tabela 4).

A concentração de S no solo foi menor no tratamento NPK em comparação aos demais tratamentos, que não diferiram estatisticamente entre si (Tabela 6). Quando considerado o fator inoculação, os tratamentos com inoculante apresentaram os menores valores de S, 0,41 com inoculação e 0,46 sem inoculação.

A maior concentração de Mg foi encontrada no tratamento NPK (86% maior que Testemunha), seguido dos tratamentos com biocarvão (BC e BD) quando aplicados sozinhos, com cerca de 38% a mais de Mg que a Testemunha. Os demais tratamentos não apresentaram diferenças entre si (Tabela 6). Para o fator inoculação não foram verificadas diferenças estatísticas. Nota-se que os resultados acompanham a quantidade de Mg aplicado no solo, tendo sido consideravelmente maior no NPK com calagem e maior nos tratamentos só com biocarvões, que apresentam maiores quantidades de Mg em comparação ao DS (Tabela 4) e ao solo (Tabela 3).

Para a  $CTC_{efetiva}$ , o tratamento NPK apresentou valor 67% maior que Test, e os tratamentos com biocarvão e misturas apresentaram média 13% superior à testemunha, exceto para BCDS (Tabela 6). Para o fator inoculação não houve diferenças. Para a CTC a pH7,0; os maiores valores foram observados para os tratamentos com BD e NPK. O BD apresentou valor 21% maior que a Testemunha e não diferiu do tratamento com NPK, seguido de BC que apresentou valor 16% maior que a Testemunha. Os demais tratamentos DS, BCDS e BDDS, apresentaram, em média, 10% a mais de CTC que a testemunha. O fator inoculação não apresentou diferença estatística. Estes resultados indicam que o aumento da CTC, no caso dos biocarvões, é devido à alta ASE dos biocarvões (Tabela 4), assim como a presença de grupos carboxilas e fenólicos na sua superfície, corroborando com resultados encontrados por outros autores, sendo que uma das principais características da aplicação do biocarvão no solo (principalmente solos de baixa fertilidade) para uso agrônômico é o aumento da CTC (GLASER; LEHMANN; ZECH, 2002, LEHMANN *et al.*, 2003b).

Para a saturação por bases (V%), o NPK apresentou valor 76% maior que a Testemunha, seguido dos tratamentos só com biocarvão, que apresentaram valor médio 13% maior que Testemunha. Os demais tratamentos não tiveram diferenças estatísticas entre si (Tabela 6). A

maior saturação por bases nos solos só com biocarvão (BC e BD) deve-se possivelmente à adição de nutrientes através do biocarvão (Ca e Mg) e à maior CTC potencial causada pela adição destes ao solo.

Em relação à saturação por bases (V%), os maiores valores nos tratamentos com biocarvão são dependentes da quantidade de substrato adicionado, sendo os maiores valores encontrados nos tratamentos com mais biocarvão (tratamentos sem mistura com digestato), porém ainda se mantiveram cerca de 37% abaixo do V% atingido no tratamento NPK com calagem. Esse aumento da saturação por bases é devida a adição de nutrientes, tais como o Ca e Mg (Tabela 4) e a redução da saturação por Al (Tabela 6), corroborando com os trabalhos de Glaser *et al.* (2002); Lehmann *et al.* (2003a) e Schulz e Glaser, (2012), que utilizaram o biocarvão em solos para fins de uso agrônômico.

Para o pH, os valores nos tratamentos com inoculação foram maiores no NPK e menores na Testemunha e o DS, e os tratamentos com biocarvão e as misturas apresentaram valores de pH superiores a testemunha e o DS, tendo valores maiores em relação à testemunha respectiva em: BC e BD = 6%, misturas média de 6%. Nos tratamentos sem inoculação, NPK também apresentou o maior valor, seguido de BD>BC=BCDS=BDDS>DS>Testemunha (Tabela 7), tendo maiores valores em relação à testemunha respectiva em: BD=8%, BC=6% e misturas média de 6%.

Tabela 7 - Valores médios de pH do solo após a retirada das plantas de milho aos 123 dias.

Inoculação	Tratamento						
	BC	BD	DS	NPK	BCDS	BDDS	Test
Com	5,32 Ba	5,30 Bb	5,21 Ca	6,52 Aa	5,29 Ba	5,36 Ba	5,17 Ca
Sem	5,32 Ca	5,43 Ba	5,12 Da	6,38 Ab	5,28 Ca	5,32 Ca	5,02 Eb

Médias seguidas de letras iguais maiúsculas na linha para os tratamentos e minúsculas na coluna para inoculação, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott,  $p < 0,05$ . Legenda: BC: biocarvão de cama de aviário, BD: biocarvão de digestato, BCDS: biocarvão de cama de aviário+digestato, BDDS: biocarvão de digestato+digestato, DS: digestato líquido, NPK: tratamento com doses recomendadas de N, P, K e calagem, Test: testemunha controle.

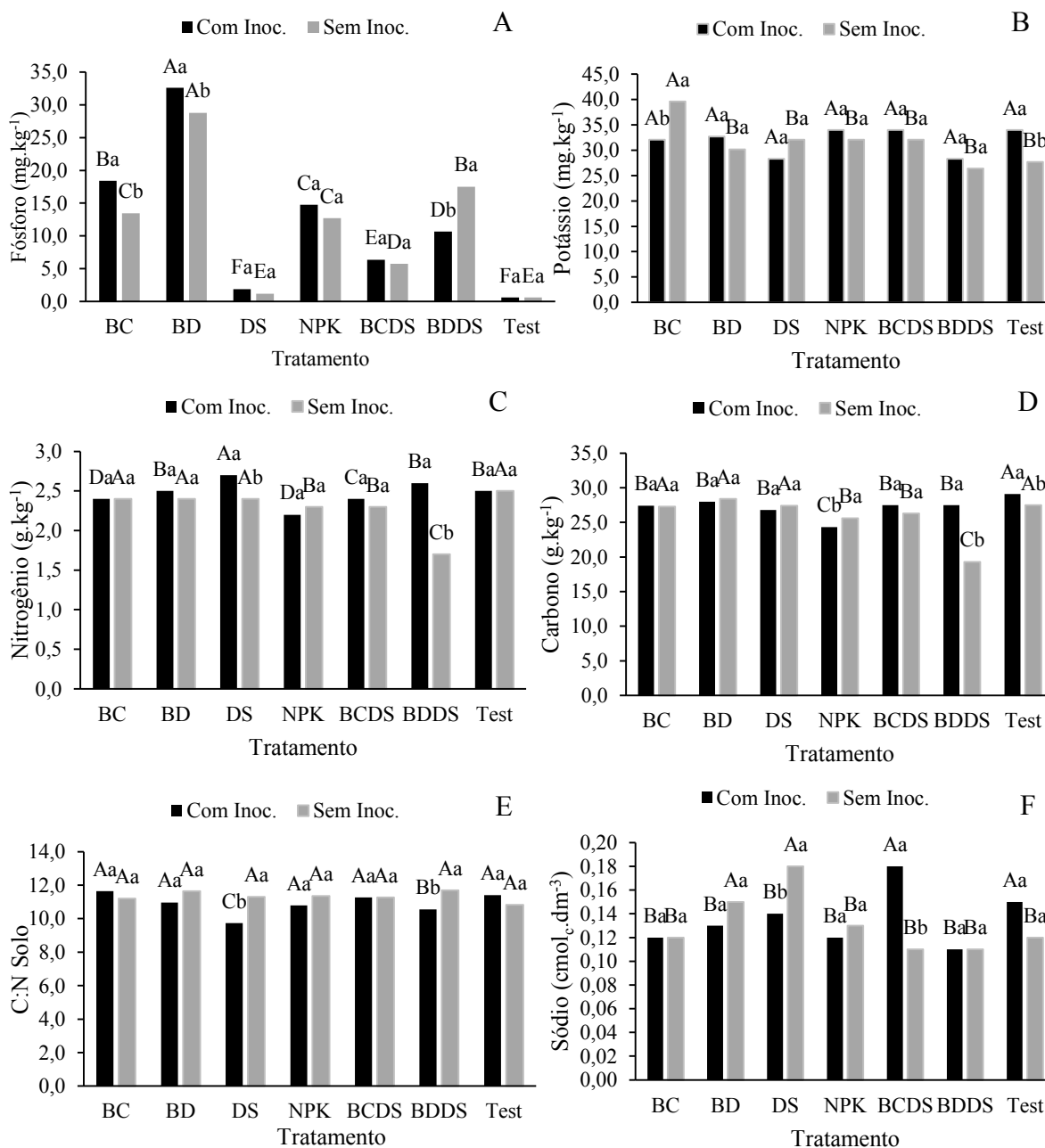
Quando considerado o fator inoculação, houve diferenças apenas para os tratamentos BD, NPK e testemunha. O tratamento BD apresentou um pH maior na ausência da inoculação, sendo o contrário observado para os tratamentos NPK e testemunha, que apresentaram maiores valores de pH quando inoculados (Tabela 7). Os biocarvões aumentaram o pH do solo em relação à testemunha em cerca de 0,14 unidades nos tratamentos com inoculação e 0,35 unidades sem inoculação, provavelmente pelo seu elevado pH (8,2 para o biocarvão de cama e 8,5 para o biocarvão de digestato, Tabela 4), além de possuírem grupos fenólicos e carboxílicos

que podem complexar o  $H^+$  e o alumínio trocável com suas cargas negativas, diminuindo a saturação por alumínio, aumentando a CTC, como ocorreu neste estudo (Tabela 6). Estes resultados indicam que o biocarvão apresentou efeito corretivo da acidez do solo, corroborando com outros trabalhos reportados na literatura (GLASER; LEHMANN; ZECH, 2002), sendo este efeito fortemente correlacionado à alcalinidade dos biocarvões (Yuan & Xu, 2011).

De maneira geral, os melhores resultados apresentados no tratamento NPK devem-se ao fato de ter sido feito a calagem no solo, conforme a necessidade das plantas de milho, segundo o Manual de Calagem e Adubação dos estados do RS e SC (CQFSRS/SC, 2016). Em relação aos tratamentos com biocarvão e a testemunha, evidencia-se o efeito benéfico do uso de BD e BC para melhorar a fertilidade do solo, com aumento da CTC e V%, assim como diminuir a quantidade de Al tóxico para as plantas, aumentando levemente o pH do solo. O pH no tratamento BD e BC com e sem inoculação foi com inoculação 6% nos dois tratamentos e sem inoculação 8%; 6% maior que as testemunhas, respectivamente. A inoculação apresentou aumento de pH no NPK e Test e diminuição em BD, indicando que o biocarvão e o inoculante não influenciam o pH, com exceção do biocarvão de digestato.

Para o sódio (Na), os valores nos tratamentos com inoculação foram maiores no BCDS e testemunha, tendo os outros tratamentos valores cerca de 20% menores que Test. Para os tratamentos sem inoculação, os maiores valores foram encontrados em BD e DS, com 25% e 50%, respectivamente, em relação à testemunha. O fator inoculação foi relevante para um maior valor de Na em BCDS (64%) em relação ao tratamento não inoculado, e um menor valor em DS (22%) em relação ao não inoculado (Figura 9F). Os resultados indicam que nem todo Na adicionado ao solo esteve disponível, uma vez que tanto o biocarvão de cama de aviário como o de digestato contém sódio (Tabela 4Tabela 4). Porém, o biocarvão de cama em uma quantidade maior, o que não refletiu necessariamente nos resultados encontrados no solo. Todos os valores de Na encontrados são baixos, o que não ocasiona em problemas para o cultivo das plantas de interesse econômico.

Figura 9 - Valores médios das análises de solo com indicação das diferenças estatísticas das amostragens para os parâmetros: fósforo disponível, potássio, nitrogênio, carbono, sódio e relação C:N após a retirada das plantas de milho aos 123 dias.



Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas para os tratamentos e minúsculas para inoculação não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott,  $p < 0,05$ . Legenda: BC: biocarvão de cama de aviário, BD: biocarvão de digestato, BCDS: biocarvão de cama de aviário+digestato, BDDS: biocarvão de digestato+digestato, DS: digestato, NPK: tratamento com doses recomendadas de N, P, K e calagem, Test: testemunha controle.

Para o fósforo (P), os tratamentos apresentaram resultados indicando que o P dos biocarvões foram disponibilizados no solo, quando se compara principalmente com a testemunha. Isso pode ser decorrente da forma que o P está presente nos biocarvões, somando-

se ainda com a capacidade dos biocarvões de aumentarem o pH (Tabela 7) e a CTC dos solos (Tabela 6) e, por consequência, favorecerem a disponibilização de nutrientes no solo. Os tratamentos com inoculação apresentaram P superiores à testemunha na seguinte magnitude: BD=5070%, BC=2822%, NPK=2240%, BDDS=1597%, BCDS=913% e DS=198%. Nos tratamentos sem inoculação verificaram-se os seguintes aumentos em relação a testemunha: BD=4468%, BDDS=2678%, BC=2038%, NPK=1921%, BCDS=811% e DS=89%. Destaca-se que BD apresentou maior fósforo disponível que BC em 77% (com inoculação) e 114% (sem inoculação), e estes dois tratamentos também apresentaram quantidade de P disponível no solo superior ao NPK, sendo 25% no BC e 121% BD, ambos com inoculação, e 126% BD e 37% BDDS, ambos sem inoculação. A inoculação em relação aos tratamentos não inoculados favoreceu a disponibilização de P em 34% e 13% a mais em BC e BD, respectivamente, e teve um valor 39% menor em BDDS (Figura 10 A).

Biocarvões de origem animal tendem a ter níveis de P disponíveis maiores quando comparados a outros tipos de biocarvão, como de biomassa de plantas (JOSEPH; LEHMANN, 2009; GAO; DELUCA; CLEVELAND, 2019), porém, em geral, a adição de diferentes tipos de biocarvão aumenta a disponibilidade de P no solo. Entretanto, só em aplicações acima de 10 t.ha<sup>-1</sup> de biocarvão e temperaturas de pirólise inferiores a 600 °C foram encontrados mais P solúvel, como observado na metanálise de Glaser e Lehr (2019), sendo essa taxa consideravelmente acima das taxas de 2,9 e 3,7 t.ha<sup>-1</sup> usadas neste experimento para os biocarvões de BD e BC, respectivamente. Essa disponibilidade de fósforo com adição de biocarvão também foi ratificada na metanálise realizada por Gao, DeLuca e Cleveland (2019), sendo a maior disponibilidade encontrada em experimentos de duração inferior a 6 meses, indicando um efeito neutro em experimentos mais longos. Outro fator passível de explicar o aumento da disponibilização de P na presença do biocarvão seria um aumento da micorrização em solos com pouca disponibilidade de nutrientes e/ou com maiores quantidades de biocarvão adicionados (BUDI; SETYANINGSIH, 2013; BLACKWELL *et al.*, 2015; HAMMER *et al.*, 2014).

O fator inoculação foi relevante para um maior valor de P no solo nos tratamentos que tinham somente biocarvão. Em BDDS, a inoculação parece ter desfavorecido a disponibilidade de P, enquanto nos demais tratamentos não houve diferenças estatísticas. A aplicação só dos biocarvões mostra uma sinergia positiva quando aplicados com milho inoculados com *Azospirillum brasilense* na solubilização de P do solo e/ou do P presente no biocarvão. Bactérias do gênero *Azospirillum* têm demonstrado poder em produção de ácido glucônico podendo

solubilizar o fósforo de fosfato de rocha (RODRIGUEZ *et al.*, 2004), de calcário, mármore e fosfato de cálcio *in vitro* (CHANG; LI, 1998).

Para o potássio (K), nos tratamentos com inoculação não foram evidenciadas diferenças nos valores encontrados, sendo estes próximos de 30 mg kg<sup>-1</sup>. Porém, nos tratamentos sem inoculação, o tratamento BC apresentou o maior valor em relação aos demais tratamentos, sendo 43% maior que a Testemunha e 31% maior que o BD. O fator inoculação na testemunha foi relevante para um valor 23% maior de K no solo, enquanto em BC a relação foi inversa, com valor 19% menor no tratamento com inoculação. Os demais tratamentos não apresentaram efeito em relação a inoculação (Figura 9B).

Os biocarvões (BC e BD) apresentam potencial igual ao tratamento com NPK para fornecer K ao solo, pois os valores de K foram iguais nestes tratamentos com e sem inoculação, exceto para o tratamento BC sem inoculação, que foi superior ao NPK. Como o biocarvão de cama de aviário tem mais K que o biocarvão de digestato (Tabela 4), e o cálculo para aplicação dos nutrientes foi orientado por P, o tratamento BC recebeu maior dose de K do que o recomendado, totalizando 50 kg.ha<sup>-1</sup> a mais, enquanto BCDS recebeu o recomendado (Tabela 2). Ressalta-se que pela análise química, o solo já contém alta quantidade de potássio naturalmente (Tabela 3)).

Em relação aos teores de nitrogênio (N), nos tratamentos com inoculação verificaram-se, o seguinte padrão: DS>BD=BDDS=Testemunha>BCDS>BC=NPK, com DS tendo 8% a mais e BC e BCDS, 4% menos N que Testemunha. Para os tratamentos sem inoculação, verificou-se que BC=BD=DS=Testemunha>NPK=BCDS>BDDS (Figura 9C), com os tratamentos com mistura, BCDS e BDDS, tendo valores menores que a Testemunha em 8 e 32%, respectivamente. Porém, o mesmo comportamento não aconteceu mediante a presença do inoculante, que pode ter favorecido a atividade da nitrato-redutase, aumentando a disponibilidade de N.

O fator inoculação foi relevante para um maior valor de N nos tratamentos DS com 13% a mais e BDDS com 53%, não havendo diferenças estatísticas nos demais tratamentos (Figura 9C), indicando que o inoculante e o digestato apresentam alguma sinergia na disponibilização de N no solo, mas quando misturado com biocarvão, somente o proveniente da pirólise de digestato apresentou algum efeito. A incorporação de biocarvão ao solo pode ter induzido alterações na população microbiana do solo influenciando a nitrificação de N ao invés da imobilização (MARCHETTI *et al.*, 2012).

Para os teores de carbono (C), nos tratamentos com inoculação, a testemunha apresentou os maiores valores e o NPK, os menores. Os demais tratamentos com biocarvão e misturas



apresentaram valores intermediários e sem diferenças estatísticas entre si, com cerca de 13% a mais de C do que o tratamento NPK e 5% menos que Testemunha; já o tratamento NPK teve 16% menos de C que a testemunha. Para os tratamentos sem inoculação, o padrão apresentado para os teores de C foi: BC=BD=DS=Testemunha>BCDS=NPK>BDDS (Figura 9D), com BC, BD e DS, com cerca de 9% a mais de C que NPK. o tratamento BDDS apresentou 25% menos C que NPK e 30% menos que a Testemunha. A inoculação foi fator determinante para uma maior concentração de C no solo para BDDS (42%) e Test (6%), além de efeito inverso para NPK (-5%) (Figura 9D).

Os tratamentos BC, BD e BCDS com e sem inoculação e BDDS com inoculação apresentaram teores de carbono igual ou superior ao tratamento NPK. Isto pode ser devido ao tipo de carbono presente no biocarvão, pois o carbono do biocarvão é mais recalcitrante, podendo então permanecer mais tempo no solo, tendo este carbono um ciclo mais lento de liberação no solo (LEHMANN, 2007). A mistura do biocarvão com digestato pode ter dificultado o acesso de C lábil do digestato aos microrganismos e talvez reduzido a sua perda pela emissão de dióxido de carbono (MARCHETTI *et al.*, 2012, MUKHERJEE *et al.*, 2016).

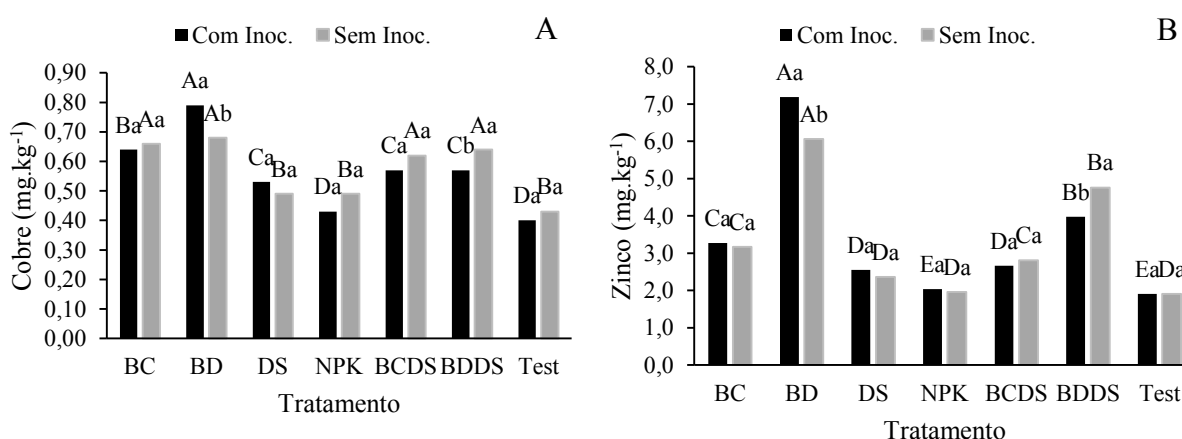
Para os valores da relação C:N, nos tratamentos com inoculação, os valores foram menores no BDDS e DS, 7 e 15%, respectivamente, em relação à testemunha, não havendo diferenças estatísticas para os outros tratamentos que apresentaram os maiores valores. Para os tratamentos sem inoculação não foram encontradas diferença estatísticas entre os mesmos. De maneira geral, os valores de C:N variaram de 10 a 12. O fator inoculação foi determinante para uma menor relação C:N do solo nos tratamentos DS (16%) e BDDS (11%) em relação aos tratamentos não inoculados (Figura 9E).

Os menores valores de C:N acompanham, por lógica, os tratamentos com maiores teores de N (Figura 9C), sendo que maiores valores de C:N podem levar à maior imobilização de nitrogênio. O uso de biocarvão com relação C: N muito baixa favorece normalmente o aparecimento de fungos, enquanto biocarvão com maiores valores de C:N favorecem bactérias gram-negativas (STEINBEISS; GLEIXNER; ANTONIETTI, 2009).

Os teores de Cu no solo, nos tratamentos com inoculação, foram maiores nos tratamentos só com biocarvão, com BD apresentando teor 98% acima da testemunha e BC 60%. Já DS, BCDS e BDDS não diferiram estatisticamente entre si, com teor médio 40% acima de Testemunha. NPK e testemunha apresentaram os menores valores e não diferiram entre si (Figura 11A). Para os tratamentos sem inoculação, os maiores valores de Cu encontrados foram nos tratamentos que receberam algum tipo de biocarvão, independentemente da quantidade

aplicada e mistura com o digestato líquido, com valores médios 51% acima de Testemunha, não havendo diferença estatística entre eles. DS, NPK e testemunha apresentaram os menores valores, porém sem diferenças estatísticas entre si (Figura 10A). Mesmo o biocarvão de cama de aviário tendo concentração maior de Cu que o biocarvão de digestato (Tabela 4), isso não refletiu em maiores valores de Cu no solo.

Figura 10 – Valores médios de cobre e zinco do solo após a retirada das plantas de milho aos 123 dias.



Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas para os tratamentos e minúsculas para inoculação não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott,  $p < 0,05$ . Legenda: BC: biocarvão de cama de aviário, BD: biocarvão de digestato, BCDS: biocarvão de cama de aviário+digestato, BDDS: biocarvão de digestato+digestato, DS: digestato, NPK: tratamento com doses recomendadas de N, P, K e calagem, Test: testemunha controle.

O fator inoculação foi relevante para maior valor de Cu no solo em BD (16%) e para menor valor em BDDS (11%) (Figura 10A), mostrando variação no comportamento na aplicação do biocarvão com e sem o digestato quando o milho foi inoculado. A inoculação na mistura BDDS favoreceu que mais Cu ficasse indisponível, enquanto que sem a presença de digestato a inoculação favoreceu a maior disponibilidade de Cu em BD.

Os teores de Zn foram maiores nos tratamentos com biocarvão de digestato no solo com e sem inoculação, com maiores valores em BD, seguido de BDDS. Nos tratamentos com inoculação, o padrão apresentado (com os valores entre parênteses representando os maiores teores em relação à testemunha) foi BD (276%)>BDDS (108%)>BC (71%)>BCDS=DS (média de 36%)>NPK=Testemunha. Para os tratamentos sem inoculação, observou-se o seguinte padrão: BD(217%)>BDDS(149%)>BC=BCDS(média de 56%)>DS=NPK=Testemunha (Figura 11B). A maior concentração de Zn no biocarvão de digestato (Tabela 4) refletiu em maiores teores de Zn no solo.

O fator inoculação foi relevante para um maior valor de Zn em BD (19%) e um menor valor em BDDS (16%), indicando que a presença do biocarvão de digestato sozinho ou com digestato líquido influencia na interação que ocorre com o inoculante (Figura 10B).

Os valores de cobre e zinco ficaram abaixo dos valores de referência da Resolução CONAMA (2009), que dispõe sobre critérios e valores orientativos da qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas, sendo o limite de Cu no solo de  $60 \text{ mg kg}^{-1}$  e de Zn  $300 \text{ mg kg}^{-1}$ . O valor máximo encontrado no solo deste estudo foi de  $0,79 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cu e  $7,19 \text{ mg kg}^{-1}$  de Zn para BD, portanto mesmo o biocarvão apresentando altas concentrações de Cu e Zn, isto não causou aumento no solo em doses que poderiam ser prejudiciais ao desenvolvimento das plantas de milho, indicando que os biocarvões podem ser usados para melhorar a fertilidade do solo, sem aumentar doses de Cu e Zn. Alguns biocarvões são inclusive usados para fins de mobilização de metais pesados no solo, como o Zn e Cu (MÉNDEZ *et al.*, 2012, UCHIMIYA *et al.*, 2010).

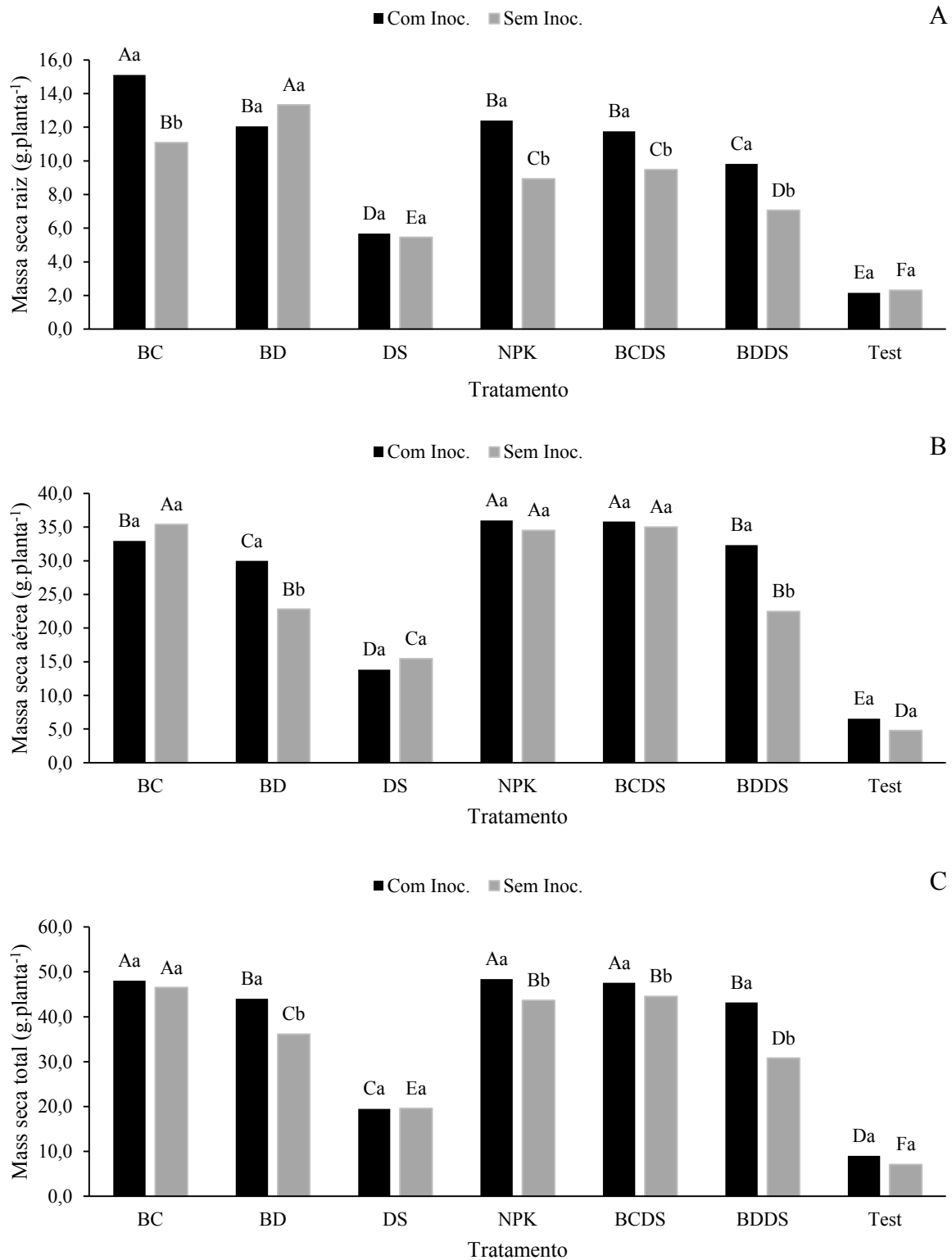
#### 4.3 ATRIBUTOS AVALIADOS NA PLANTA AOS 123 DAS

Verificou-se que para os parâmetros avaliados na planta, todos apresentaram interação significativa ( $p < 0,05$ ) entre os fatores tratamentos (biocarvão, digestato, NPK e testemunha) e inoculação (Anexo C).

##### 4.3.1 Biomassa, diâmetro e comprimento do colmo e índice SPAD

Observando-se a Figura 11A, verifica-se, por exemplo, que a calagem, a princípio, não foi um fator determinante para maior produção de biomassa das raízes, uma vez que os tratamentos só com biocarvão apresentaram desempenho igual ou superior ao tratamento NPK, que recebeu calagem para elevar o pH do solo. Nos tratamentos com biocarvão, a inoculação teve efeito positivo na biomassa de raízes em todos os tratamentos, exceto BD, que não apresentou diferenças estatísticas, corroborando com o estudo de Pandit *et al.* (2018), que aferiram maiores quantidades de massa seca de milho em aplicações de biocarvão, independente da calagem realizada.

Figura 11 – Valores médios de massa seca de raiz, da parte aérea e total (raiz + parte aérea) das plantas após a retirada das plantas de milho aos 123 dias



Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas para os tratamentos e minúsculas para inoculação não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott,  $p < 0,05$ . Legenda: BC: biocarvão de cama de aviário, BD: biocarvão de digestato, BCDS: biocarvão de cama de aviário+digestato, BDDS: biocarvão de digestato+digestato, DS: digestato, NPK: tratamento com doses recomendadas de N, P, K e calagem, Test: testemunha controle.

A presença dos biocarvões foi fator relevante para a obtenção de maiores quantidades de massa seca das raízes em todos os tratamentos analisados. Nos tratamentos com inoculação, o padrão apresentado foi BC>BD=NPK=BCDS>BDDS>DS>Testemunha, apresentando valores maiores em relação à testemunha em 600% em BC, média de 450% em BD e BCDS, 355% em BDDS, 163% em DS, destacando o BC com valor 22% maior que NPK, e os tratamentos BD e BCDS foram estatisticamente iguais ao NPK. Nos tratamentos sem inoculação, os tratamentos só com biocarvão apresentaram maiores valores que os demais tratamentos, inclusive o NPK, sendo o padrão BD>BC>NPK=BCDS> BDDS>DS>Testemunha (Figura 11A), apresentando valores maiores em relação à testemunha em 475% no BD, 378% em BC, média de 297% em BCDS e NPK, 204% em BDDS, 135% em DS, destacando BD com valor 49% e BC 24% maior que NPK. Os resultados indicam que os biocarvões favorecem o crescimento de raízes das plantas do milho, também quando misturados com digestato, sendo o biocarvão de cama de aviário mais sinérgico com a presença do *Azospirillum brasilense* na planta de milho e o biocarvão de digestato mais sensível para crescimento na ausência da bactéria. Entretanto, BDDS não acompanhou o desempenho de BD, tanto no tratamento sem como no com inoculação, ficando com valores de massa seca abaixo dos observados para BCDS e NPK.

Os tratamentos com inoculação apresentaram valores superiores aos não inoculados para BC (36%), NPK (39%), BCDS (24%) e BDDS (39%), não havendo diferença para os outros tratamentos, o que indica que a inoculação foi relevante para uma maior quantidade de massa seca de raiz quando associado a esses tratamentos. As maiores quantidades de massas de raízes nos tratamentos com inoculação indicam que *Azospirillum brasilense* estimula o crescimento radicular através de fitormônios e/ou fixação de N<sub>2</sub> (VIEIRA, 2017). A presença de biocarvão não inibe, estatisticamente, o efeito do crescimento radicular causado pelo inoculante e na maior parte dos casos estudados, apresenta sinergia positiva com esse para uma maior massa seca de raízes. Os resultados deste estudo corroboram os encontrados por Yamato *et al.*, (2006), que evidenciaram aumento na massa seca de raízes de plantas de milho na presença de biocarvão (*Acacia mangium*) em solos ácidos e pouco férteis e Lehmann *et al.* (2011), que identificaram benefícios para o crescimento radicular em diferentes tipos de plantas e tratamentos com aplicação de biocarvão.

Em relação à massa seca da parte aérea, para os tratamentos com inoculação, os valores apresentaram o seguinte padrão: BCDS=NPK>BC=BDDS>BD>DS>Testemunha. Os valores foram maiores em relação à testemunha na seguinte magnitude: BCDS=448% e NPK=450%, BC=404% e BDDS=394%, BD=358%, DS=111%. O BC e a mistura BCDS apresentaram

desempenho igual ao NPK quando sem inoculação, seguidos por BD e BDDS, DS e testemunha. Os valores foram maiores em relação à testemunha na seguinte magnitude: BC=642%; BCDS=634%; NPK=624%, BD=378% e BDDS=371%, DS=224%. A inoculação teve efeito positivo para maior produção de massa seca da parte aérea nos tratamentos BDDS (44%) e BD (31%). (Figura 11B).

O biocarvão de cama de aviário indica ser um fator relevante na produção de massa seca de parte aérea, equiparável ao NPK, apresentando também sinergia com digestato e resultados similares, tanto com ou sem inoculação. Tanto os tratamentos com biocarvão de cama de aviário como com biocarvão de digestato responderam com uma maior produção de biomassa da parte aérea do que a testemunha e DS. Yamato *et al.* (2006) obtiveram um aumento na quantidade de massa área de milho com a aplicação de biocarvão, o que vai de encontro aos resultados encontrados neste estudo.

Em relação à massa seca total das plantas de milho, os tratamentos inoculados de BC, BCDS e NPK apresentaram desempenho estatisticamente iguais, indicando uma forte relação da presença do biocarvão de cama de aviário na produção total de biomassa, equiparável com a recomendação de adubação e calagem. Os tratamentos BD e BDDS vem em sequência, seguidos de DS e por último a testemunha. Os valores foram maiores em relação à testemunha na seguinte magnitude: NPK=439%; BC=435%; BCDS=430%, BD=390%; BDDS=381%, DS=117%. Já nos tratamentos sem inoculação, BC apresentou o melhor desempenho, com a maior quantidade total de massa seca, ficando acima, inclusive, do tratamento com NPK. Em sequência tem-se maiores valores de massa seca total para o NPK e BCDS, que não diferiram entre si, seguidos de BD, BDDS, DS, e por último, a testemunha (Figura 11C). Os valores foram maiores em relação à testemunha na seguinte magnitude: BC=556%, BCDS=528%; NPK=516%, BD=410%, BDDS=334%, DS=176%, destacando BC com 6% acima de NPK. Os resultados deste estudo corroboram com os dados da literatura, que na aplicação de biocarvão com digestato observou-se rendimento da cultura de milho 30% superior aos tratamentos com aplicação somente de digestato ou fertilizante mineral sem biocarvão (GLASER *et al.*, 2015).

A inoculação foi fator positivo determinante em quase todos os tratamentos que utilizaram algum tipo de biocarvão, exceto BC, que não apresentou diferenças estatísticas entre com e sem inoculação. O tratamento NPK também respondeu à inoculação (Figura 11C). Os valores foram maiores nos tratamentos com inoculação em relação aos sem inoculação na seguinte proporção: BDDS=40%, BD=22%, NPK=11% e BCDS=7%. Estes resultados mostram-se promissores na produção de matéria seca, como para saúde do solo e estoque de carbono, uma vez que os tratamentos com biocarvão e misturas usaram quantidades

consideravelmente menores de nutrientes que o tratamento NPK, sendo este o único com calagem.

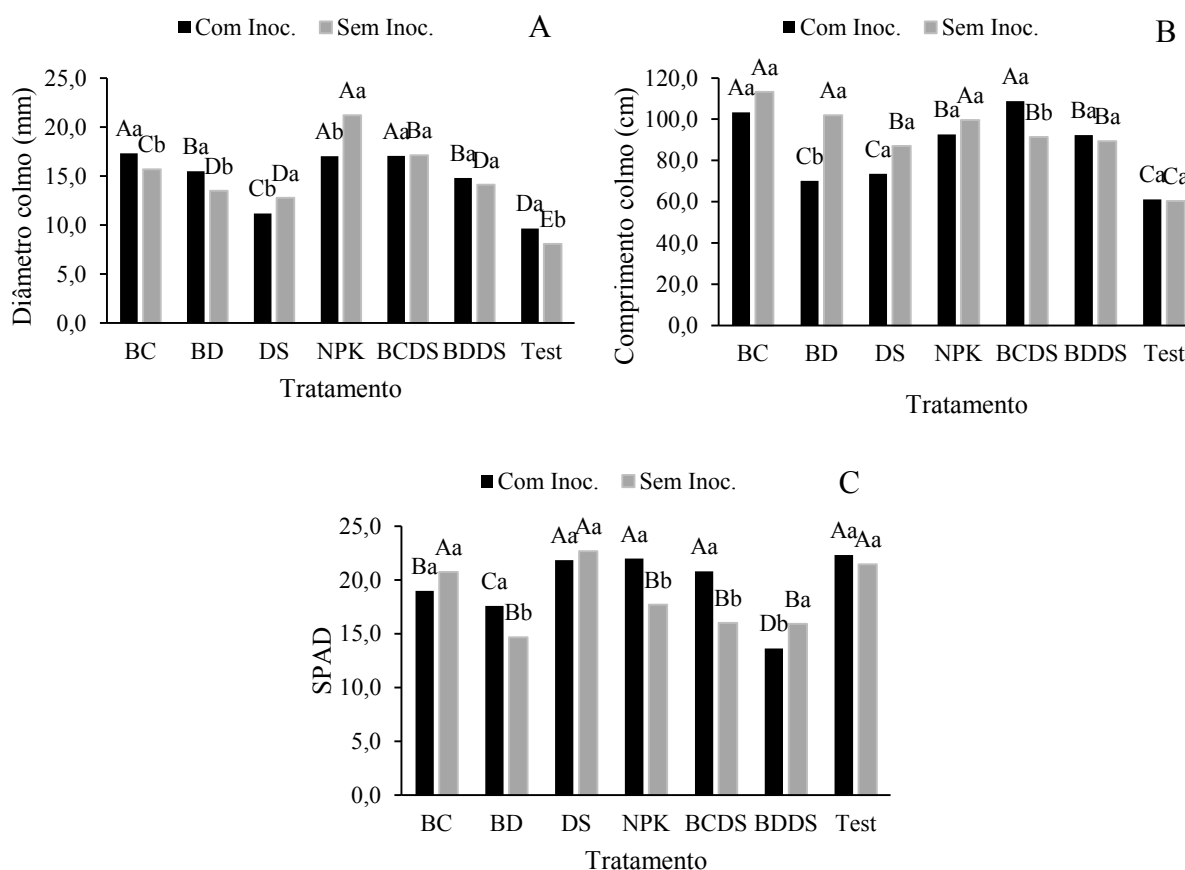
Destaca-se que a testemunha apresentou os menores valores para massa seca de raiz, aérea e total, em comparação a todos os tratamentos e independente da inoculação. Isto indica que o uso de biocarvão sozinho ou combinado com o DS tem potencial para melhorar o desenvolvimento radicular das plantas de milho em condições de baixa fertilidade natural e solo de textura arenosa; assim como diminuir consideravelmente as quantidades de fertilizantes minerais solúveis, pois os tratamentos com biocarvão também apresentaram resultados iguais ou até superiores aos evidenciados pelo NPK.

Em relação ao diâmetro do colmo, os resultados indicam que os tratamentos BC, NPK e BCDS, com inoculação, apresentaram os maiores valores, seguidos de BD e BDDS, e com menores valores, DS e a testemunha. Os valores foram maiores em relação à testemunha nas seguintes magnitudes: BC; BCDS e NPK, em média 78%, BD e BDDS, em média 58%, e DS=16%. Nos tratamentos sem inoculação, observou-se o seguinte padrão: para o diâmetro de colmo: NPK>BCDS>BC>BD=BDDS=DS>Testemunha. Os valores foram maiores em relação à testemunha nas seguintes magnitudes: NPK=163%, BCDS=112%, BC=94%, BD e BDDS média de 71% e DS=58%. Os resultados indicam que a presença do biocarvão de cama de aviário é um fator relevante para o desenvolvimento do diâmetro do colmo do milho, independentemente da quantidade aplicada, especialmente quando inoculado, ao atingir tamanho igual ao NPK, tendo ainda os tratamentos com biocarvão de digestato maiores diâmetros que os observados na testemunha, independente da inoculação (Figura 12A).

O fator inoculação foi determinante para maior diâmetro do colmo nos tratamentos com BD (15%), BC (10%), e testemunha (5%), porém sem efeito em BCDS e BDDS e com redução (menor diâmetro) em DS (13%) e NPK (20%). Os tratamentos BC e BD, em associação com a inoculação do *Azospirillum brasilense* em milho, tendem a produzir colmos com maiores diâmetros do que sem a presença do inoculante, o que pode resultar em maior produtividade de grãos, uma vez que a literatura indica que o diâmetro do colmo funciona como armazenamento de sólidos solúveis que serão utilizados para formação dos grãos (KLUTHCOUSKI *et al.*, 2000) e em caso de necessidade nutricional, a planta utiliza as reservas contidas nesta parte para produção dos grãos. Destaca-se este efeito benéfico na testemunha também, pois os benefícios da inoculação com BPCV são mais facilmente evidenciados em condições de restrição nutricional, principalmente a falta de N com a *Azospirillum brasilense* aumentando a eficiência de absorção de N pelo milho (ZEFFA *et al.*, 2019). Os resultados evidenciados nos tratamentos

DS e NPK, com maiores valores de diâmetro do colmo quando não inoculados, podem ser decorrentes da maior disponibilidade de nutrientes no solo (principalmente N) devido a adubação com DS e NPK, o que desfavorece os benefícios oriundos da inoculação.

Figura 12 – Valores médios do diâmetro do colmo, comprimento do colmo e índice SPAD das plantas após a retirada das plantas de milho aos 123 dias.



Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas para os tratamentos e minúsculas para inoculação não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott,  $p < 0,05$ . Legenda: BC: biocarvão de cama de aviário, BD: biocarvão de digestato, BCDS: biocarvão de cama de aviário+digestato, BDDS: biocarvão de digestato+digestato, DS: digestato, NPK: tratamento com doses recomendadas de N, P, K e calagem, Test: testemunha controle.

Para a variável comprimento do colmo do milho, verificaram-se que os tratamentos com inoculação em BCDS e BC apresentaram os maiores valores, seguidos de BDDS e NPK, e os menores valores foram evidenciados para BD, DS e testemunha. Os valores foram maiores em relação à testemunha nas seguintes magnitudes: BCDS=78%; BC=69%, BDDS e NPK, 51%. Para os tratamentos sem inoculação, BC, BD e NPK apresentaram os maiores valores, seguidos de DS, BCDS e BDDS, e a testemunha, que novamente apresentou os menores valores. Os valores foram maiores em relação à testemunha nas seguintes magnitudes: BC=88%; BD=69%; NPK=65%, BCDS; BDDS e DS, 48% em média. O fator inoculação apresentou diferenças para



os tratamentos BD e BCDS, sendo observados maior valor para o BCDS (19%) e menor para o BD (31%) (Figura 12B).

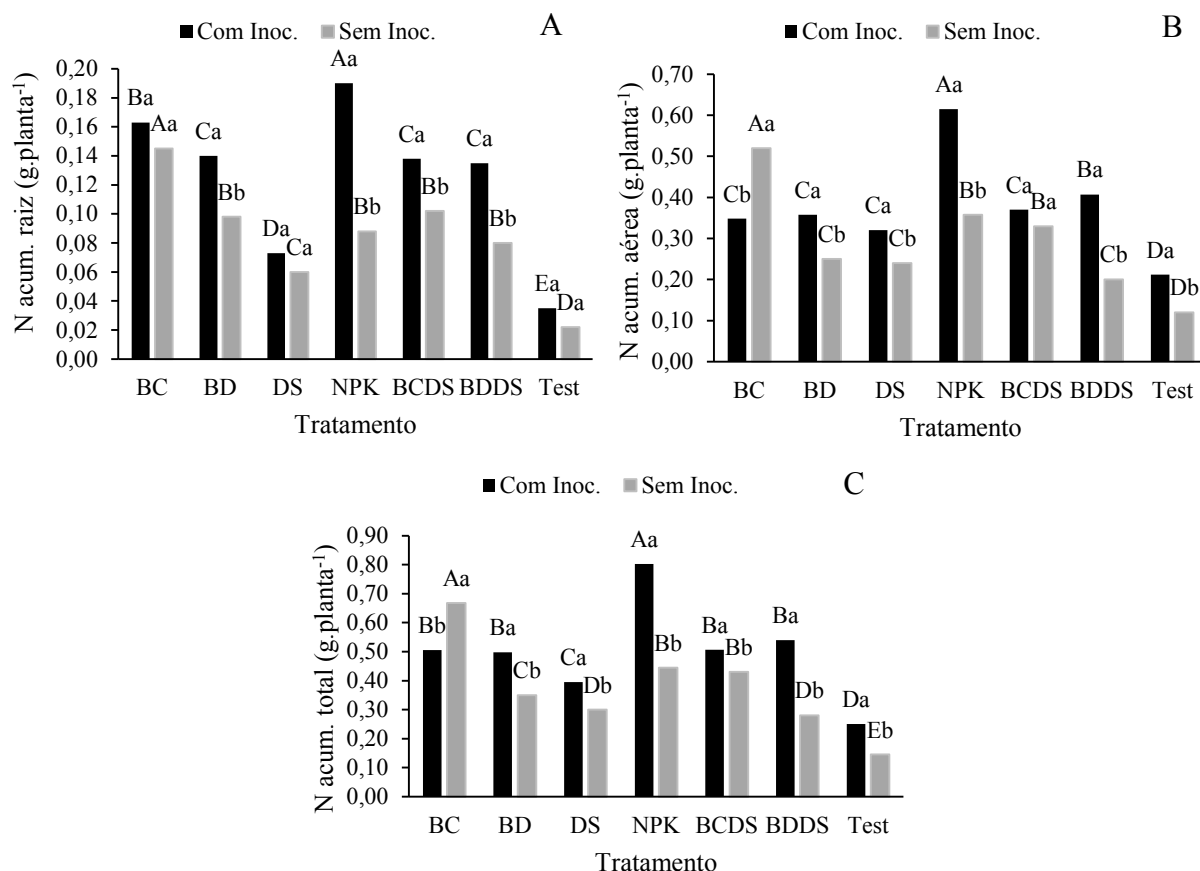
Em relação ao índice SPAD não foram evidenciadas diferença estatística entre os tratamentos com inoculação DS, NPK, BCDS e testemunha, sendo esses tratamentos os que apresentaram os maiores valores, enquanto BC, BD e BDDS apresentaram, sequencialmente, os menores valores, com valores 15%, 21% e 39% menores que Testemunha. Nos tratamentos sem inoculação, BC, DS e testemunha não diferiram entre si e apresentaram os maiores valores em comparação aos demais tratamentos, com BD, NPK, BCDS e BDDS, 32%, 18%, 25% e 26% menores que Testemunha, respectivamente (Figura 12C).

Quando avaliado o fator inoculação, em BD (20%), NPK (24%) e BCDS (30%), o inoculante foi fator relevante para um maior valor de SPAD. Em BDDS (14%), a inoculação foi fator relevante para um valor menor de SPAD. Os demais tratamentos não apresentaram diferenças. O índice SPAD fornece o teor de clorofila nas folhas, e pelos resultados observa-se que Testemunha teve os melhores resultados, o que indica que a planta de milho crioula se desenvolveu ao máximo de sua capacidade de crescimento, porém quando comparado com o valor de massa seca da planta, as plantas dos outros tratamentos tiveram crescimento superior. O índice SPAD não corresponde necessariamente aos tratamentos que tiveram maior crescimento, não podendo ser utilizado isoladamente para avaliar o crescimento das plantas de milho.

#### **4.3.2 Nitrogênio, Carbono e Enxofre Acumulados na Massa Seca das Plantas de Milho**

O N acumulado na raiz, nos tratamentos com inoculação, foi maior no NPK, seguido de BC, com BD, BCDS e BDDS não apresentando diferenças estatísticas entre si, seguido de DS e testemunha, sendo estes os tratamentos com menores valores. Os valores foram maiores em relação à testemunha nas seguintes magnitudes: NPK=443%, BC=366%, BD; BCDS; BDDS, média de 293% e DS=109%. Para os tratamentos sem inoculação, BC apresentou o maior acúmulo, seguido de BD, NPK, BCDS e BDDS, sendo esses estatisticamente iguais, e DS maior que Testemunha (Figura 13A). Os valores foram maiores em relação à testemunha nas seguintes magnitudes: BC=559%, BD; NPK; BCDS; BDDS, em média de 320%, DS=173%.

Figura 13 – Valores médios de Nitrogênio acumulado na raiz, na parte aérea e total (raiz + parte aérea) das plantas de milho aos 123 dias.



Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas para os tratamentos e minúsculas para inoculação não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott,  $p < 0,05$ . Legenda: BC: biocarvão de cama de aviário, BD: biocarvão de digestato, BCDS: biocarvão de cama de aviário+digestato, BDDS: biocarvão de digestato+digestato, DS: digestato, NPK: tratamento com doses recomendadas de N, P, K e calagem, Test: testemunha controle.

O fator inoculação foi determinante para um maior acúmulo de N na raiz em relação aos não inoculados nos tratamentos BD (43%), NPK (116%), BCDS (35%) e BDDS (69%), não havendo diferença estatística para os demais tratamentos. Este resultado indica sinergia entre a *Azospirillum brasilense* e o biocarvão de digestato, as misturas dos biocarvões com digestato e do NPK para o maior acúmulo de N na raiz dos tratamentos citados. A mistura dos biocarvões com o digestato pode ter favorecido uma maior eficiência na absorção de nitrogênio do solo e/ou favorecido a atividade dos microrganismos, resultando nos valores superiores aos tratamentos correspondentes sem inoculação.

Para o N acumulado na parte aérea, nos tratamentos com inoculação, verificaram-se maiores valores no NPK, seguido de BDDS, e BC, BD, DS, BCDS, sem diferenças entre si, e a testemunha com o menor valor. Os valores foram maiores em relação à testemunha nas seguintes magnitudes: NPK=190%, BDDS=92%, BCDS; BD; BC e DS, média de 65%. Nos

tratamentos sem inoculação, BC apresentou o maior acúmulo de N, seguido de BCDS e NPK (sem diferenças entre si), BD, DS e BDDS (sem diferenças entre si) e por último, a testemunha, com os menores valores (Figura 13B). Os valores foram maiores em relação à testemunha nas seguintes magnitudes: BC=333%, NPK e BCDS, média de 187%, BD; DS, BDDS, média de 92%, destacando BC que teve acúmulo de N 45% maior que NPK.

O maior valor de N acumulado em BDDS com inoculação em relação aos demais tratamentos com biocarvão podem ser decorrentes da sinergia entre a presença do inoculante e os substratos, e/ou a maior escassez de N no tratamento em relação aos outros tratamentos pode ter potencializado a fixação de nitrogênio pela bactéria do inoculante. O BC se destacou na ausência de inoculante, tendo o maior acúmulo entre os tratamentos, e quando misturado com digestato teve acúmulo equivalente ao NPK. Já BD e BDDS sem inoculação não demonstraram diferença com a aplicação de digestato, mesmo com as quantidades diferentes de biocarvão, e apresentaram, em média, o dobro de acúmulo de N na parte aérea que a testemunha.

O fator inoculação foi relevante para maiores acúmulos de N na parte aérea da maioria dos tratamentos, sendo BDDS=104%, Test=77%, NPK=72%, BD=43%, DS=33%, com exceção de BCDS, que não apresentou diferença estatística, e BC que apresentou acúmulo 33% menor no tratamento inoculado. Os resultados indicam influência entre a bactéria e os tratamentos estudados, com exceção do biocarvão de cama de aviário, que parece não sofrer efeito da bactéria, possivelmente devido ao teor de N disponível, não sendo necessária a atividade da BPCV e que inclusive limitou o acúmulo de N na parte aérea.

O acúmulo de N total, nos tratamentos com inoculação, apresentou o seguinte padrão: NPK>BC=BD=BCDS=BDDS>DS>testemunha. Os valores foram maiores em relação à testemunha nas seguintes magnitudes: NPK=221%, BC; BD; BCDS; BDDS, média de 105%, DS=58%. Já para os tratamentos sem inoculação, houve maior acúmulo em BC, apresentando o padrão: BC>NPK=BCDS>BD>BDDS=DS>testemunha (Figura 13C). Os valores foram maiores em relação à testemunha nas seguintes magnitudes: BC=361%, BCDS e NPK, média de 203%, BD=141%, DS e BDDS, média de 100%, destacando BC que teve acúmulo de N 50% maior que NPK.

O fator inoculação foi determinante para o maior acúmulo de N total em quase todos os tratamentos, sendo: BDDS=93%, NPK=80%, Testemunha=72%, BD=42%, DS=32% e BCDS=18%, exceto BC, onde houve acúmulo menor na presença da bactéria em 24% em relação ao não inoculado (Figura 14C). Portanto, o *Azospirillum brasilense* mostrou evidente aumento de N nas plantas possivelmente pelo aumento da nitrato-redutase, porém quando

aplicado com biocarvão de cama de aviário sozinho, o comportamento não respondeu da mesma forma, podendo haver alguma limitação na absorção do N. O maior acúmulo ou não de N nas partes do milho pode também estar ligado à maior ou menor emissão de N para a atmosfera. Com a presença de biocarvão, alguns tratamentos podem desfavorecer a emissão e aumentar a disponibilidade de N disponível para absorção das plantas, seja incorporando nas raízes, sejam na parte aérea do milho. E a inoculação favoreceu esse aumento, apresentando feito positivo na maioria dos tratamentos. O *Azospirillum brasilense* geralmente tem melhores resultados quando há níveis menores de N no solo, porém também traz benefícios quando na presença adequada de N, como no tratamento NPK, podendo aumentar a eficiência de absorção do nitrogênio aplicado (GALINDO *et al.*, 2016). Devido à uma parte de carbono mais lábil dos biocarvões (como acetato) há a promoção de bactérias que diminuem a perda de nitrogênio, fazendo com que o biocarvão funcione como uma "ilha de nitrogênio" transitória no solo, moderando a dinâmica do ciclo de N, reduzindo assim as perdas de N por lixiviação e fluxos de gás (ANDERSON *et al.*, 2011).

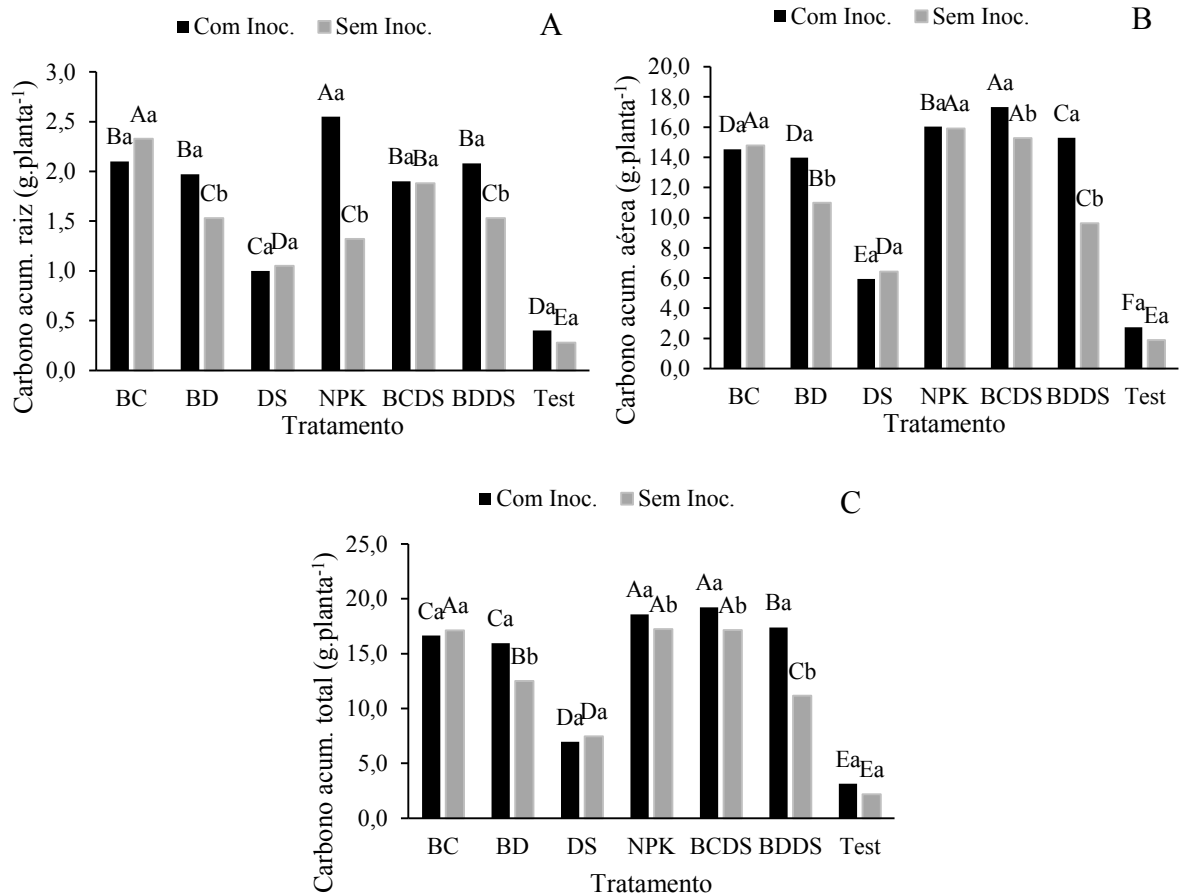
O acúmulo de C na raiz, nos tratamentos com inoculação, apresentou a seguinte sequência: NPK>BC=BD=BCDS=BDDS>DS>testemunha. Os valores foram maiores em relação à testemunha nas seguintes magnitudes: NPK=538%, BC; BD; BCDS; BDDS, média de 403%, DS=150%. Já nos tratamentos sem inoculação, BC apresentou o maior acúmulo de C nas raízes, seguido de BCDS; depois BD, BDDS e NPK, os quais não diferenciaram estatisticamente entre si; DS e testemunha, com os menores valores (Figura 14A). Os valores foram maiores em relação à testemunha nas seguintes magnitudes: BC=732%, BCDS=571%, BD; NPK; BDDS, média de 421%, DS=275%, com BC e BCDS com 77% e 46%, respectivamente, maior que NPK.

Para os tratamentos NPK (93%), BDDS (36%) e BD (29%) a inoculação foi fator relevante para um maior acúmulo de C nas raízes, não havendo diferença estatística para os demais tratamentos (Figura 14A).

Em relação a parte aérea, nos tratamentos inoculados, o maior acúmulo de C foi observado no BCDS, seguido de NPK, BDDS e, posteriormente, nos tratamentos só com biocarvão, que não se diferenciaram, em seguida tem-se o tratamento com DS e a testemunha, que apresentou o menor valor entre todos os tratamentos. Os valores foram maiores em relação à testemunha nas seguintes magnitudes: BCDS=535%, NPK=487%, BDDS=460%, BC e BD com média de 422%, DS=118%. Nos tratamentos sem inoculação, a sequência apresentada foi BC=NPK=BCDS>BD>BDDS>DS>testemunha (Figura 14B). Os valores foram maiores em

relação à testemunha nas seguintes magnitudes: BC; NPK; BCDS, média de 711%, BD=481%, BDDS=410%, DS=240%.

Figura 14 – Valores médios de Carbono acumulado na raiz, na parte aérea e total (raiz+parte aérea) das plantas de milho aos 123 dias.



Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas para os tratamentos e minúsculas para inoculação não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott,  $p < 0,05$ . Legenda: BC: biocarvão de cama de aviário, BD: biocarvão de digestato, BCDS; biocarvão de cama de aviário+digestato, BDDS: biocarvão de digestato+digestato, DS: digestato, NPK: tratamento com doses recomendadas de N, P, K e calagem, Test: testemunha controle.

O fator inoculação foi relevante para um maior acúmulo de C na parte aérea dos tratamentos com mistura BDDS (59%) e BCDS (13%), independentemente do tipo de biocarvão aplicado, e para o BD (27%), não havendo diferença estatística entre os demais tratamentos (Figura 14B).

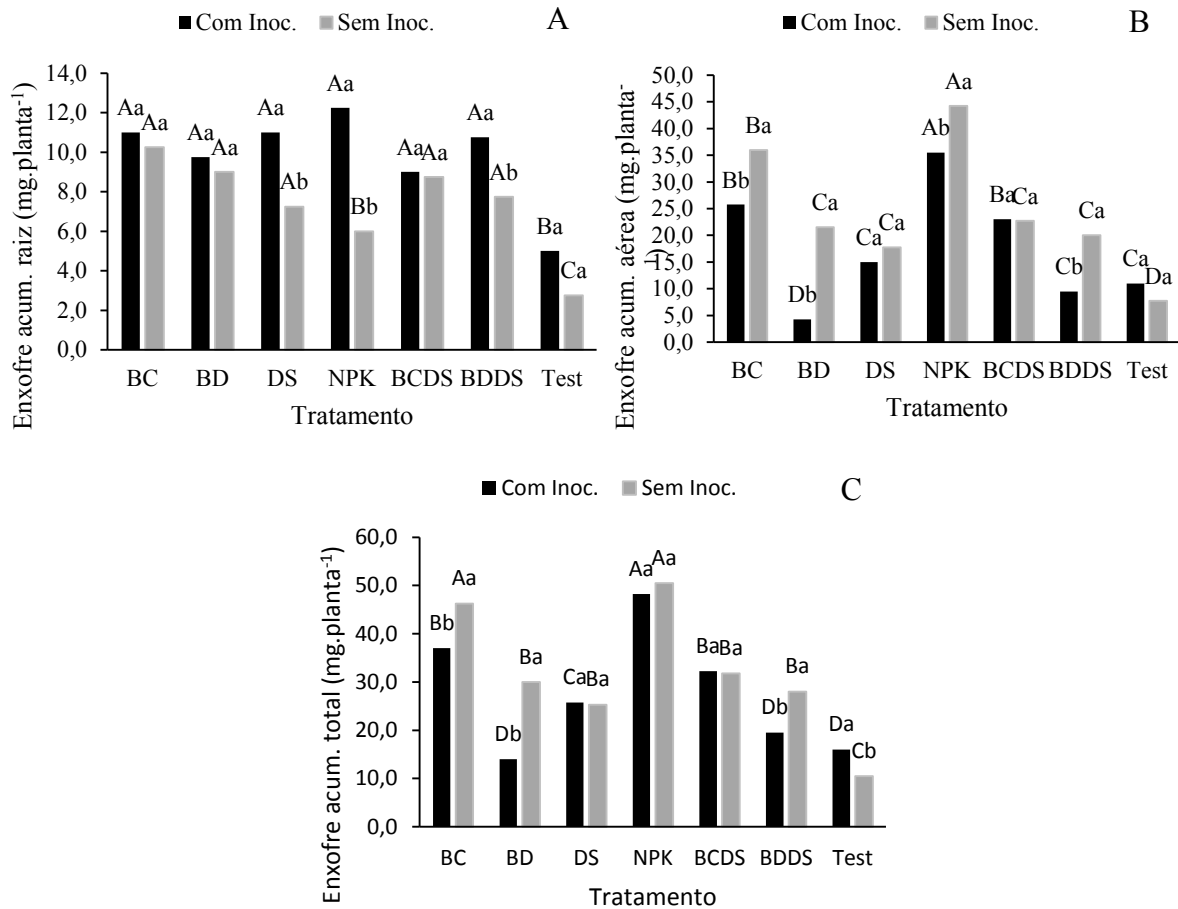
Para o acúmulo total de C, nos tratamentos com inoculação foram evidenciados maiores teores no BCDS e NPK, seguido do BDDS, depois os tratamentos só com biocarvão, os quais não diferiram entre si, DS e testemunha, com os menores valores. Os valores foram maiores em relação à testemunha nas seguintes magnitudes: BCDS e NPK, média de 505%, BDDS=456%,

BC e BD, média de 420%, DS=122%. Já para aos tratamentos sem inoculação, BC, BCDS e NPK apresentaram os maiores valores, sendo estatisticamente iguais entre si. Posteriormente vem o BD, seguido de BDDS, DS, e testemunha, novamente com os menores valores (Figura 14C). Para BC; BCDS; NPK, média de 691%, BD=476%, BDDS=414%, DS=244%. Nos tratamentos inoculados, verificaram maiores aumentos em relação a testemunha na seguinte ordem: BDDS (56%), BD (28%), BCDS (12%) e NPK (8%), sendo a inoculação fator relevante para um maior acúmulo de C na planta de milho. Já para os outros tratamentos não houve diferenças estatísticas. (Figura 14C).

Dentre todos os tratamentos testados, verificou-se que a testemunha e o DS apresentaram os menores valores de acúmulo de N e C, independente da inoculação, quando comparado aos demais tratamentos. Existe uma relação entre a quantidade de N foliar com uma maior quantidade de C nas folhas (FIELD, 1983; VAN KEULEN; GOUDRIAAN; SELIGMAN, 1989), o que pode indicar que os biocarvões auxiliam na absorção do N, levando a um maior acúmulo de C pelo milho (aumento de massa seca), especialmente na mistura de biocarvão e digestato, uma vez que o N do digestato pode estar mais disponível para a planta, e a sua associação com os biocarvões evita lixiviação ou volatilização. O *Azospirillum brasilense* pode promover uma maior absorção de nitrogênio pela planta, e essa maior absorção pode ser acompanhada de um consequente aumento do acúmulo de C pelas plantas de milho, como observados nos tratamentos que tiveram a mistura de algum biocarvão com o digestato líquido, no BD e no NPK.

Em relação ao acúmulo de S na raiz, nos tratamentos com inoculação apenas a testemunha diferiu dos demais, apresentando os menores valores, com os tratamentos tendo, em média, 113% mais S que a testemunha. Para os tratamentos sem inoculação, os maiores valores foram encontrados nos tratamentos que receberam biocarvão, DS e a mistura desses, independentemente da dose aplicada, com média de 213% acima de Testemunha, tendo o NPK valor 118% maior que a Testemunha. A adição de enxofre por meio dos biocarvões, nas quantidades de 10 g kg<sup>-1</sup> no biocarvão de cama de aviário e 3,8 g kg<sup>-1</sup> de biocarvão de digestato (Tabela 4), mostrou ter efeito na absorção pelas raízes, porém, o mesmo comportamento não foi observado quando presente o inoculante, o qual estimulou de alguma forma um maior acúmulo de S nas raízes de NPK (104%), DS (52%) e BDDS (39%), não havendo diferença estatística para os outros tratamentos (Figura 15A).

Figura 15 – Valores médios de enxofre acumulado na raiz, na parte aérea e o total (raiz+parte aérea) das plantas de milho aos 123 dias.



Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas para os tratamentos e minúsculas para inoculação não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott,  $p < 0,05$ . Legenda: BC: biocarvão de cama de aviário, BD: biocarvão de digestato, BCDS: biocarvão de cama de aviário+digestato, BDDS: biocarvão de digestato+digestato, DS: digestato, NPK: tratamento com doses recomendadas de N, P, K e calagem, Test: testemunha controle.

Para o acúmulo de enxofre na parte aérea, nos tratamentos com inoculação verificou-se o seguinte padrão:  $NPK > BC = BCDS > DS = BDDS = testemunha > BD$ . Os valores foram maiores em relação à testemunha nas seguintes magnitudes:  $NPK = 223\%$ , BC e BCDS, média de  $117\%$ , e menor em BD ( $61\%$ ). Já para os tratamentos sem inoculação, o padrão observado foi:  $NPK > BC > BD = DS = BCDS = BDDS > testemunha$  (Figura 15B). Os valores foram maiores em relação à testemunha nas seguintes magnitudes:  $NPK = 471\%$ , BC =  $365\%$ , BD; DS; BCDS; BDDS, média de  $165\%$ . Farias (2018) observou uma maior absorção de S em tratamentos com biocarvão e nos tratamentos com NPK, sendo que no NPK isso é devido a composição dos fertilizantes químicos que compõem os adubos com NPK, e nos biocarvões, devido aos teores de S presente (Tabela 4).

O fator inoculação levou à acúmulo consideravelmente menor de S na parte aérea quando aplicada no BD (80%), BDDS (53%), e também um menor acúmulo no BC (28%) e NPK (20%). Destaca-se a grande diferença de enxofre na parte aérea das plantas com biocarvão de digestato inoculadas em comparação às não inoculadas, apontando para algum efeito limitador para a absorção de S pela parte aérea nestes tratamentos. Comparando os valores de S nas raízes e parte aérea, os tratamentos com inoculação tenderam a acumular mais enxofre nas raízes do que na parte aérea.

Em relação ao acúmulo total de S na planta de milho, nos tratamentos com inoculação evidenciou-se a sequência de maiores valores no NPK>BC=BCDS>DS>BD=BDDS=testemunha. Os valores foram maiores em relação à testemunha nas seguintes magnitudes: NPK=202%, BC e BCDS, média de 116%, DS=61%. Nos tratamentos sem inoculação, os maiores acúmulos foram em BC e NPK, e o menor valor na testemunha, os demais tratamentos não diferiram entre si, e apresentaram valores intermediários (Figura 15C). Os valores foram maiores em relação à testemunha nas seguintes magnitudes: NPK e BC, média de 360%, BD; DS; BCDS; BDDS, média de 174%.

O fator inoculação desfavoreceu o acúmulo de enxofre total nos tratamentos BD (53%), BDDS (30%) e BC (20%). Já na testemunha, a inoculação foi determinante para um maior acúmulo de S (52%), sendo que nos demais tratamentos não houve diferença estatística.

O biocarvão de cama de aviário contém maior concentração de S que o biocarvão de digestato (Tabela 4) e foi aplicado em quantidade maior em BC comparado com BD e em BCDS com BDDS, o que acompanha a maioria dos resultados de absorção de S, uma vez que os tratamentos tiveram valores de S no solo iguais, com exceção de NPK que apresentou o maior acúmulo de S e o menor valor no solo, indicando que o S do solo foi absorvido pela planta.

#### 4.4 TABELAS COMPARATIVAS DOS PRINCIPAIS RESULTADOS EM RELAÇÃO À TESTEMUNHA

As Tabela 8 e Tabela 9 apresentam um comparativo, em termos percentuais, dos principais atributos avaliados no solo (Tabela 8) e na planta (Tabela 9), em relação às testemunhas (controle sem adubação e calagem). Cada valor percentual apresentado foi comparado à sua testemunha correspondente, os tratamentos sem inoculação foram comparados à testemunha sem inoculação e os tratamentos com inoculação com a testemunha com inoculação.



Tabela 8 - Magnitude dos resultados dos atributos do solo em porcentagem em relação às testemunhas controle.

Parâmetros Solo (% em relação a Testemunha Controle)																	
Tratamento	Inoculação	Sat. Al	H+Al	Ca	S	Mg	CTC <sub>ef</sub>	CTC <sub>pH7</sub>	V%	pH	Na	P	N	C	C:N	Cu	Zn
BC	Sem	-40%	+6%	+35%		+37%	+15%	+16%	+11%	+6%	0%	+2038%	-4%	-1%	+4%	+53%	+66%
	Com									+3%	-20%	+2822%	-4%	-6%	+2%	+60%	+71%
BD	Sem	-56%	+6%	+45%		+40%	+17%	+21%	+14%	+8%	+25%	+4468%	-4%	+3%	+8%	+58%	+217%
	Com									+3%	-13%	+5070%	0%	-4%	-4%	+98%	+276%
DS	Sem	-5%	+8%	+12%		+14%	+11%	+10%	+3%	+2%	+50%	+89%	-4%	-0%	+5%	+14%	+24%
	Com									+1%	-7%	+198%	+8%	-8%	-15%	+33%	+34%
NPK	Sem	-97%	-64%	+170%	-31%	+86%	+67%	+24%	+79%	+27%	+8%	+1921%	-8%	-7%	+5%	+14%	+3%
	Com									+26%	-20%	+2240%	-12%	-16%	-5%	+7%	+7%
BCDS	Sem	-21%	+8%	+18%		+13%	+5%	+9%	+6%	+5%	-8%	+811%	-8%	-4%	+4%	+44%	+47%
	Com									+2%	+20%	+913%	-4%	-5%	-1%	+43%	+39%
BDDS	Sem	-24%	+7%	+26%		+19%	+10%	+12%	+2%	+6%	-8%	+2678%	-32%	-30%	+8%	+49%	+149%
	Com									+4%	-27%	+1597%	+4%	-5%	-7%	+43%	+108%

Tratamentos sem inoculação tiveram como parâmetro a testemunha sem inoculação e tratamentos com inoculação a testemunha com inoculação. Legenda: BC: biocarvão de cama de aviário, BD: biocarvão de digestato, BCDS: biocarvão de cama de aviário+digestato, BDDS: biocarvão de digestato+digestato, DS: digestato, NPK: tratamento com doses recomendadas de N, P, K e calagem. Sat. Al: saturação por alumínio; CTC<sub>ef</sub>: Capacidade de Troca Catiônica efetiva. CTC<sub>pH7</sub>: Capacidade de Troca Catiônica potencial. O sinal “+” indica aumento e o sinal “-” indica redução, em relação à testemunha.

Tabela 9 -Magnitude dos resultados dos atributos da planta em porcentagem em relação às testemunhas controle.

Parâmetro Planta (% em relação a Testemunha Controle)													
Tratamento	Inoculação	MS Raiz	MS Aérea	MS Total	DC	CC	SPAD	N acum. Raiz	N acum. Aérea	N Acum. Total	S acum. Raiz	S acum. Aérea	S acum. Total
BC	Sem	+378%	+642%	+556%	+94%	+88%	-3%	+559%	+333%	+361%	+273%	+365%	+340%
	Com	+599%	+404%	+435%	+80%	+69%	-15%	+366%	+64%	+102%	+120%	+134%	+131%
BD	Sem	+475%	+378%	+410%	+67%	+69%	-32%	+345%	+108%	+141%	+227%	+177%	+186%
	Com	+458%	+358%	+390%	+61%	+15%	-21%	+300%	+69%	+99%	+95%	-61%	-13%
DS	Sem	+135%	+224%	+176%	+58%	+44%	+6%	+173%	+100%	+107%	+164%	+129%	+140%
	Com	+163%	+111%	+117%	+16%	+20%	-2%	+109%	+51%	+58%	+120%	+36%	+61%
NPK	Sem	+285%	+624%	+516%	+163%	+65%	-18%	+300%	+198%	+207%	+118%	+471%	+381%
	Com	+474%	+450%	+439%	+77%	+51%	-2%	+443%	+190%	+221%	+145%	+223%	+202%
BCDS	Sem	+309%	+634%	+528%	+112%	+51%	-25%	+364%	+175%	+197%	+218%	+194%	+202%
	Com	+444%	+448%	+430%	+77%	+78%	-7%	+294%	+75%	+103%	+80%	+109%	+102%
BDDS	Sem	+204%	+371%	+334%	+75%	+48%	-26%	+264%	+67%	+93%	+182%	+158%	+167%
	Com	+355%	+394%	+381%	+54%	+51%	-39%	+286%	+92%	+116%	+115%	-14%	+22%

Tratamentos sem inoculação tiveram como parâmetro a testemunha sem inoculação e tratamentos com inoculação a testemunha com inoculação. Legenda: BC: biocarvão de cama de aviário, BD: biocarvão de digestato, BCDS; biocarvão de cama de aviário+digestato, BDDS: biocarvão de digestato+digestato, DS: digestato, NPK:tratamento com doses recomendadas de N, P, K e calagem. MS: Massa Seca. DC: Diâmetro do Colmo. CC: Comprimento do Colmo. SPAD: índice SPAD. acum.: acumulado. O sinal “+” indica aumento e o sinal “-” indica redução, em relação à testemunha

## 5 CONCLUSÕES

O uso de biocarvão de cama de aviário e de biocarvão de digestato de dejetos suínos melhorou os atributos químicos do solo, com destaque para a redução da Saturação de Al trocável, especialmente nos tratamentos só com biocarvão em cerca de 48%, aumentaram a CTC e a saturação por bases (V%) em 13 %, além de aumentar o P no solo entre 20 e 50 vezes a mais que a testemunha, com valores equivalentes e, ou, superiores aos encontrados no tratamento com adubação química e calagem. O uso de biocarvão favoreceu o crescimento de plantas de milho crioulo, tanto sozinhos, como quando misturados ao digestato, obtendo valores de massa seca das raízes e da parte aérea de milho por vezes iguais ou até superiores aos valores do tratamento com fertilizantes químicos e calagem, destacando-se o acúmulo de N em valores elevados na estrutura da planta, indicando um efeito positivo no acúmulo de N na planta quando os biocarvões estudados são adicionados. Desta, ratifica-se a hipótese de que o biocarvão melhora os atributos químicos do solo e favorece o desenvolvimento do milho crioulo.

O *Azospirillum brasilense* apresentou efeitos positivos com os biocarvões quando avaliado o crescimento das plantas de milho crioulo. Quando inoculada a bactéria, observou-se a existência de relação entre o aumento da massa seca das raízes e a presença de biocarvão, bem como o aumento de massa seca da parte aérea e maior acúmulo de N na planta com a presença de biocarvão de digestato. Porém, notou-se limitada absorção de S na parte aérea da planta e redução do acúmulo de N quando presente somente o biocarvão de cama de aviário. No entanto, a aplicação somente de biocarvões nos tratamentos inoculados apresentou aumento da solubilidade do P (média de 25%), mas com efeito limitante quando o biocarvão de digestato é misturado ao digestato. Portanto, a hipótese da existência de sinergia entre biocarvão de *Azospirillum brasilense* é confirmada para essas condições específicas.

A aplicação do biocarvão sozinho ou misturado em solo de textura arenosa e de baixa fertilidade favoreceram a produção de massa seca da parte aérea do milho equivalente e, ou superiores às quantidades encontradas no tratamento com fertilizantes químicos. Portanto, o uso de biocarvões é uma opção aos adubos químicos ou potencializador de biofertilizante para produção de milho crioulo em solos arenosos e de baixa fertilidade natural.

### **Considerações finais**

Com a diminuição do uso de fertilizantes químicos através do suprimento de parte da demanda por BPCV como o *Azospirillum brasilense* e/ou pelo uso de biocarvões

disponibilizadores de nutrientes e redutores de perdas de elementos, pode haver uma economia na produção, além de figurar como estratégia no mercado de carbono como métodos para redução de emissões de gases de efeito estufa, uma vez que os resultados encontrados indicaram crescimento semelhante ao tratamento com fertilizante químicos, como em parâmetro de massa seca.

Para trabalhos futuros, recomenda-se avaliar o comportamento dos biocarvões em campo, assim como se a sinergia com *Azospirillum brasilense* é encontrada em campo. Outra linha de pesquisa é a verificação da disponibilidade de nutrientes de biocarvões, incluindo biocarvões de fonte de biomassa vegetal, bem como avaliar experimentos de longo prazo, a fim de verificar o efeito do envelhecimento do biocarvão no solo.

Sugere-se também a avaliação dos custos envolvidos no processo, com análise de toda a cadeia de produção. Por fim, sugere-se a avaliação do uso de biocarvões inoculados com microrganismos após aplicação ao solo para verificar o potencial de mitigação de gases de efeito estufa pelo uso do biocarvão.

## 6 REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, H.; MEDIASWANTI, K. A.; WU, H. Biochar as a fuel: 2. Significant differences in fuel quality and ash properties of biochars from various biomass components of mallee trees. **Energy & Fuels**, v. 24, n. 3, p. 1972-1979, 2010
- ABEL, S.; ABEL, S.; PETERS, A.; TRINKS, S.; SCHONSKY, H.; FACKLAM, M.; WESSOLEK, G.; Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. **Geoderma**, v. 202, p. 183-191, 2013.
- ABUJABHAH, I. S.; DOYLE, R.; BOUND, S. A.; BOWMAN, J. P. The effect of biochar loading rates on soil fertility, soil biomass, potential nitrification, and soil community metabolic profiles in three different soils. **Journal of Soils and Sediments**, v. 16, n. 9, p. 2211–2222, 2016.
- AGEGNEHU, Getachew *et al.* Benefits of biochar, compost and biochar–compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. **Science of the Total Environment**, v. 543, p. 295-306, 2016.
- AHMED, Mohammad Boshir *et al.* Adsorptive removal of antibiotics from water and wastewater: progress and challenges. **Science of the Total Environment**, v. 532, p. 112-126, 2015.
- AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; PUJOL, S. B.; NICOLOSO, R. da S.; CORRÊA, J. C. Aproveitamento dos dejetos de suínos e bovinos como fertilizantes: impactos ambientais e estratégias de mitigação. Em: PALHARES, J. C. P.; GLEBER, L. (Ed.). **Gestão ambiental na agropecuária**. Brasília, DF: Embrapa, v. 2, p. 199-282, 2014.
- ALEXANDRATOS, N. & BRUINSMA, J. 2012. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. Rome, FAO.
- ANDERSON, Craig R. et al. Biochar induced soil microbial community change: implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus. **Pedobiologia**, v. 54, n. 5-6, p. 309-320, 2011.
- ARCONDÉGUY, Tania; JACK, Rachael; MERRICK, Mike. PII signal transduction proteins, pivotal players in microbial nitrogen control. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, v. 65, n. 1, p. 80-105, 2001.
- ARDAKANI, Mohammad Reza *et al.* Absorption efficiency of N, P, K through triple inoculation of wheat (*Triticum aestivum* L.) by *Azospirillum brasilense*, *Streptomyces* sp., *Glomus intraradices* and manure application. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 17, n. 2, p. 181-192, 2011.
- ASAI, Hidetoshi; ASAI, H., SAMSON, B. K., STEPHAN, H. M., SONGYIKHANGSUTHOR, K., HOMMA, K., KIYONO, Y., ... & HORIE, T.; Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. **Field Crops Research**, v. 111, n. 1-2, p. 81-84, 2009.

ASLAM, Zeeshan; KHALID, Muhammad; AON, Muhammad. Impact of biochar on soil physical properties. **Scholarly Journal of Agricultural Science**, v. 4, n. 5, p. 280-284, 2014.

ASTM.- American Society for Testing Material, Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels – **ASTM E870 - 82**. ASTM International, West Conshohocken, PA, EUA, 2013

ATKINSON, Christopher J.; FITZGERALD, Jean D.; HIPPS, Neil A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. **Plant and soil**, v. 337, n. 1-2, p. 1-18, 2010.

BARASSI, C. A. *et al.* *Azospirillum* potential to optimize plant growth under adverse conditions. *Azospirillum* ssp.: cell physiology, plant interactions and agronomic research in Argentina. Argentina: Asociación Argentina de Microbiología, p. 49-59, 2008.

BASHAN, Yoav; DE-BASHAN, Luz E. How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth—a critical assessment. In: **Advances in agronomy**. Academic Press, 2010. p. 77-136.

BASSO, A. S.; MIGUEZ, F. E.; LAIRD, D. A.; HORTON, R.; WESTGATE, M; Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils. **Gcb Bioenergy**, v. 5, n. 2, p. 132-143, 2013.

BELLÓ, Joel Agostinho; CERICATO, Alceu. A CULTURA DO MILHO CRIOULO EM RELAÇÃO AO MILHO CONVENCIONAL DESENVOLVIDA DE MANEIRA SUSTENTÁVEL. 2016. 16 f. Monografia (Especialização) - Curso de Estudos Avançados em Produção Vegetal e Agricultura de Precisão, Unoesc, São Miguel do Oeste, 2015. Disponível em: <<http://www.uniedu.sed.sc.gov.br/wp-content/uploads/2016/03/Artigo-Joel-Agostinho-Belló.pdf>>. Acesso em: 16 julho. 2020

BERGAMASCHI, C. **Ocorrência de bactérias diazotróficas associadas às raízes e colmos de cultivares de sorgo**. 2006. 71p Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2006

BIEDERMAN, Lori A.; HARPOLE, W. Stanley. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. **GCB bioenergy**, v. 5, n. 2, p. 202-214, 2013.

BLACKWELL, Paul *et al.* Influences of biochar and biochar-mineral complex on mycorrhizal colonisation and nutrition of wheat and sorghum. **Pedosphere**, v. 25, n. 5, p. 686-695, 2015.

BREWER, C. E.; HU, Y. Y.; SCHMIDT-ROHR, K.; LOYNACHAN, T. E.; LAIRD, D. A.; BROWN, R. C.; Extent of pyrolysis impacts on fast pyrolysis biochar properties. **Journal of environmental quality**, v. 41, n. 4, p. 1115-1122, 2012.

BREWER, Catherine E. *et al.* Criteria to select biochars for field studies based on biochar chemical properties. **Bioenergy Research**, v. 4, n. 4, p. 312-323, 2011.

BROCKHOFF, S. R.; CHRISTIANS, N. E.; KILLORN, R. J.; HORTON, R.; DAVIS, D. D.; Physical and mineral-nutrition properties of sand-based turfgrass root zones amended with biochar. **Agronomy Journal**, v. 102, n. 6, p. 1627-1631, 2010.

BROWNSORT, P. Biomass Pyrolysis Processes: Performance Parameters and their Influence on Biochar System Benefits. Dissertação (Mestrado). **School of GeoSciences**, University of Edinburg, p. 84, 2009.

BRUNAUER, Stephen; EMMETT, Paul Hugh; TELLER, Edward. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American chemical society**, v. 60, n. 2, p. 309-319, 1938.

BUDI, Sri Wilarso; SETYANINGSIH, Luluk. Arbuscular mycorrhizal fungi and biochar improved early growth of neem (*Melia azedarach* Linn.) seedling under greenhouse conditions. **Jurnal Manajemen Hutan Tropika**, v. 19, n. 2, p. 103-110, 2013.

BUTNAN, Somchai *et al.* Biochar characteristics and application rates affecting corn growth and properties of soils contrasting in texture and mineralogy. **Geoderma**, v. 237, p. 105-116, 2015.

CANELLAS, Luciano Pasqualoto *et al.* A combination of humic substances and *Herbaspirillum seropedicae* inoculation enhances the growth of maize (*Zea mays* L.). **Plant and soil**, v. 366, n. 1-2, p. 119-132, 2013.

CANTRELL, Keri B. *et al.* Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. **Bioresource technology**, v. 107, p. 419-428, 2012.

CARVALHO, Fernando P. Agriculture, pesticides, food security and food safety. **Environmental science & policy**, v. 9, n. 7-8, p. 685-692, 2006.

CASTELLANOS, Thelma; ASCENCIO, Felipe; BASHAN, Yoav. Cell-surface hydrophobicity and cell-surface charge of *Azospirillum* spp. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 24, n. 2, p. 159-172, 1997.

CHALLINOR, A. J. *et al.* A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 4, p. 287-291, 2014.

CHAMBERS, Brian J.; TAYLOR, Matthew. The use of digestate as a substitute for manufactured fertilizer. *Bioenergy Production by Anaerobic Digestion*, Korres NE., editors: Routledge, p. 359-74, 2013

CHAN, K. Y. *et al.* Using poultry litter biochars as soil amendments. **Soil Research**, v. 46, n. 5, p. 437-444, 2008.

CHEN, Y.; SHINOGI, Y.; TAIRA, M.; Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality. **Soil Research**, v. 48, n. 7, p. 526-530, 2010.

COMEXSTAT, Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral> Acessado em: 07/07/2020

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento safra brasileira - grãos, Série histórica - Safra 2019/2020, Brasília, julho 2020. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra-serie-historica-das-safra?start=20> Acesso em: 13 julho 2020.

CONAMA. Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Publicado no DOU nº 249, de 30/12/2009, págs. 81-84

CONINCK, H. DE, A. REVI, M. BABIKER, P. BERTOLDI, M. BUCKERIDGE, A. CARTWRIGHT, W. DONG, J. FORD, S. FUSS, J.-C. HOURCADE, D. LEY, R. MECHLER, P. NEWMAN, A. REVOKATOVA, S. SCHULTZ, L. STEG, AND T. SUGIYAMA, 2018: Strengthening and Implementing the Global Response. em: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-4/>, Acessado em: 25/08/2020

CQFS - COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO -RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 11 ed. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul, 2016, 375p.

DAI, Zhongmin *et al.* Potential role of biochars in decreasing soil acidification-A critical review. **Science of the Total Environment**, v. 581, p. 601-611, 2017.

DE BONA, F. D. Grãos. In: MANUAL de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 11. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul, Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, 2016. Cap. 6.1. p. 101-134.

DE LP RUIVO, M. *et al.* Microbial population and biodiversity in Amazonian Dark Earth soils. In: **Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision**. Springer, Dordrecht, 2009. p. 351-362.

DE MELO CARVALHO, Marcia Thais *et al.* Biochar improves fertility of a clay soil in the Brazilian Savannah: short term effects and impact on rice yield. **Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics (JARTS)**, v. 114, n. 2, p. 101-107, 2013.

DE QUADROS, Patricia Dörr *et al.* Desempenho agrônômico a campo de híbridos de milho inoculados com *Azospirillum*. **Revista Ceres**, v. 61, n. 2, p. 209-218, 2014.

DEMPSTER, D. N.; GLEESON, D. B.; SOLAIMAN, Z. I.; JONES, D. L.; MURPHY, D. V.; Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil. **Plant and Soil**, 2012b.

DEMPSTER, D. N.; JONES, D. L.; MURPHY, D. V.; Clay and biochar amendments decreased inorganic but not dissolved organic nitrogen leaching in soil. **Soil Research**, v. 50, n. 3, p. 216-221, 2012a

DEVEREUX, R. C.; STURROCK, C. J.; MOONEY, S. J.; The effects of biochar on soil physical properties and winter wheat growth. **Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh**, v. 103, n. 1, p. 13-18, 2012.

DIDONET, Agostinho Dirceu *et al.* Realocação de nitrogênio e de biomassa para os grãos, em trigo submetido a inoculação de *Azospirillum*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 2, p. 401-411, 2000.



DOMINCHIN, Maria Florencia *et al.* Efecto de la aplicación de biochar avícola sobre las propiedades químicas y microbiológicas de una suelo Haplustol típico con diferentes intensidades de uso; Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo; Ciencia del Suelo; v. 37; n. 2; p. 315-327, 2019

DOORNBOS, Rogier F.; VAN LOON, Leendert Cornelis; BAKKER, Peter AHM. Impact of root exudates and plant defense signaling on bacterial communities in the rhizosphere. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 32, n. 1, p. 227-243, 2012.

EGAMBERDIEVA, D.; RECKLING, M.; WIRTH, S. Biochar-based inoculum of Bradyrhizobium sp. improves plant growth and yield of lupin (*Lupinus albus* L.) under drought stress. *Eur. J. Soil Biol.*, v. 78, p. 38-42, 2017.

EGAMBERDIEVA, Dilfuza *et al.* Potential effects of biochar-based microbial inoculants in agriculture. *Environmental Sustainability*, v. 1, n. 1, p. 19-24, 2018.

EL ZEMRANY, Hamdy *et al.* Field survival of the phyto-stimulator *Azospirillum lipoferum* CRT1 and functional impact on maize crop, biodegradation of crop residues, and soil faunal indicators in a context of decreasing nitrogen fertilisation. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, n. 7, p. 1712-1726, 2006.

ELAD, Yigal *et al.* Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil-applied carbon sequestering agent. **Phytopathology**, v. 100, n. 9, p. 913-921, 2010.

ELAD, Yigal *et al.* The biochar effect: plant resistance to biotic stresses. **Phytopathologia Mediterranea**, v. 50, n. 3, p. 335-349, 2011.

EMBRAPA, Participação da produção brasileira no mundo, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1355242/0/CIAS+-+2019+-+Participa%C3%A7%C3%A3o+da+produ%C3%A7%C3%A3o+brasileira+no+mundo-BRA.png> Acessado em: 07/07/2020

EPE, Empresa de Pesquisa Energética, Impactos da participação do biogás e biometano na matriz energética, São Paulo, 2017. Disponível em: [http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-244/topico-257/EPE\\_IV%20FORUM%20BIOGAS\\_JOSE%20MAURO\\_2017\\_1710.pdf#search=biog%C3%A1s](http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-244/topico-257/EPE_IV%20FORUM%20BIOGAS_JOSE%20MAURO_2017_1710.pdf#search=biog%C3%A1s) Acessado em: 28/07/2019

EUROPEAN BIOCHAR FOUNDATION (EBC). Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland (2012), versão 6.1, 2015.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETTO, D. Produção de milho. **Guaíba: Agropecuária**, 2000. 360 p.

FARIAS, Walda Monteiro. BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO COMO CONDICIONADOR DO SOLO: EFEITOS NAS PROPRIEDADES AGRONÔMICAS, FERTILIDADE DO SOLO E QUALIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA. 2018. 121 f. Tese (Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Agronomia) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

FELLET, G.; MARCHIOL, L.; DELLE VEDOVE, G.; & PERESSOTTI, A.; Application of biochar on mine tailings: effects and perspectives for land reclamation. **Chemosphere**, v. 83, n. 9, p. 1262-1267, 2011.

FERREIRA, A. S. *et al.* Implications of *Azospirillum brasilense* inoculation and nutrient addition on maize in soils of the Brazilian Cerrado under greenhouse and field conditions. **Applied soil ecology**, v. 72, p. 103-108, 2013.

FERREIRA, Suelem Daiane *et al.* Pyrolysis of Medium Density Fiberboard (MDF) wastes in a screw reactor. **Energy Conversion and Management**, v. 92, p. 223-233, 2015.

FIELD, C1. Allocating leaf nitrogen for the maximization of carbon gain: leaf age as a control on the allocation program. **Oecologia**, v. 56, n. 2-3, p. 341-347, 1983.

GALINDO, Fernando Shintate *et al.* Corn yield and foliar diagnosis affected by nitrogen fertilization and inoculation with *Azospirillum brasilense*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, 2016.

GAO, Si; DELUCA, Thomas H.; CLEVELAND, Cory C. Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: A meta-analysis. **Science of The Total Environment**, v. 654, p. 463-472, 2019.

GHAZI, Azza A. Potential for biochar as an alternate carrier to peat moss for the preparation of Rhizobia bio inoculum. *Microbiology Research Journal International*, p. 1-9, 2017.

GIACHINI, Admir J. *et al.* Microbially-enriched poultry litter-derived biochar for the treatment of acid mine drainage. *Archives of microbiology*, v. 200, n. 8, p. 1227-1237, 2018.

GIL, Paula Torrealba de *et al.* Índice SPAD para o diagnóstico do estado de nitrogênio e para o prognóstico da produtividade da batata. **Horticultura Brasileira**, v. 20, n. 4, p. 611-615, 2002.

GILLER, Ken E. *Agroforestry: N<sub>2</sub>-fixing Trees in Integrated Agriculture em: Nitrogen Fixation in Tropical Cropping Systems*. 2. ed. Nova Iorque, EUA: CABI, 2001. 297 p. ISBN 0851994172.

GLASER, Bruno *et al.* Biochar organic fertilizers from natural resources as substitute for mineral fertilizers. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 35, n. 2, p. 667-678, 2015.

GLASER, Bruno; LEHMANN, Johannes; ZECH, Wolfgang. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. **Biology and fertility of soils**, v. 35, n. 4, p. 219-230, 2002.

GLASER, Bruno; LEHR, Verena-Isabell. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. **Scientific reports**, v. 9, 2019. doi: 10.1038/s41598-019-45693-z

GŁODOWSKA, Martyna *et al.* Biochar based inoculants improve soybean growth and nodulation. *Agricultural Sciences*, v. 8, n. 9, p. 1048-1064, 2017.

GŁODOWSKA, Martyna *et al.* Biochar is a growth-promoting alternative to peat moss for the inoculation of corn with a pseudomonad. *Agronomy for sustainable development*, v. 36, n. 1, p. 21, 2016.

GRAVES, D.; Biochar and Soil Mix in Geo-Textile Bags Offers Improved Methods To Collect and Propagate Mycorrhizal Fungal Inocula. n. June, p. 1, 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Don\\_Graves/publication/245536059\\_BIOCHAR\\_AND\\_SOIL\\_MIX\\_IN\\_GEO-TEXTILE\\_BAGS\\_OFFERS\\_IMPROVED\\_METHODS\\_TO\\_COLLECT\\_AND\\_PROPAGATE\\_MYCORRHIZAL\\_FUNGAL\\_INOCULA/links/00b4951d753fbcd913000000/BIOCHAR-AND-SOIL-MIX-IN-GEO-TEXTILE-BAGS-OFFERS-IMPROVED-METHODS-TO-COLLECT-AND-PROPAGATE-MYCORRHIZAL-FUNGAL-INOCULA.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Don_Graves/publication/245536059_BIOCHAR_AND_SOIL_MIX_IN_GEO-TEXTILE_BAGS_OFFERS_IMPROVED_METHODS_TO_COLLECT_AND_PROPAGATE_MYCORRHIZAL_FUNGAL_INOCULA/links/00b4951d753fbcd913000000/BIOCHAR-AND-SOIL-MIX-IN-GEO-TEXTILE-BAGS-OFFERS-IMPROVED-METHODS-TO-COLLECT-AND-PROPAGATE-MYCORRHIZAL-FUNGAL-INOCULA.pdf)

GUARDINI, R. ; COMIN, J. J. ; SCHMITT, D. E. ; Tiecher, T. ; BENDER, M. A. ; SANTOS, D. R. ; MEZZARI, C. P. ; OLIVEIRA, B. S. ; GATIBONI, L. C. ; BRUNETO, G. . Accumulation of phosphorus fractions in typic Hapludalf soil after long-term application of pig slurry and deep pig litter in a no-tillage system. **Nutrient Cycling in Agroecosystems** , v. 93, p. 215-225, 2012.

GWENZI, Willis *et al.* Biochar-based water treatment systems as a potential low-cost and sustainable technology for clean water provision. **Journal of environmental management**, v. 197, p. 732-749, 2017.

HALE, Lauren; LUTH, Madeline; CROWLEY, David. Biochar characteristics relate to its utility as an alternative soil inoculum carrier to peat and vermiculite. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 81, p. 228-235, 2015.

HALE, Lauren; LUTH, Madeline; CROWLEY, David. Biochar characteristics relate to its utility as an alternative soil inoculum carrier to peat and vermiculite. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 81, p. 228-235, 2015.

HAMMER, Edith C. *et al.* A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 77, p. 252-260, 2014.

HAREL, Yael Meller *et al.* Biochar mediates systemic response of strawberry to foliar fungal pathogens. **Plant and Soil**, v. 357, n. 1-2, p. 245-257, 2012.

HASHEM, Abeer *et al.* The interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and endophytic bacteria enhances plant growth of *Acacia gerrardii* under salt stress. *Frontiers in microbiology*, v. 7, p. 1089, 2016.

Hoegh-Guldberg, O., D. Jacob, M. Taylor, M. Bindi, S. Brown, I. Camilloni, A. Diedhiou, R. Djalante, K.L. Ebi, F. Engelbrecht, J. Guiot, Y. Hijioka, S. Mehrotra, A. Payne, S.I. Seneviratne, A. Thomas, R. Warren, and G. Zhou, 2018: Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. Em: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-3/> Acessado em: 07/07/2020

HOLM-NIELSEN, Jens Bo; AL SEADI, Teodorita; OLESKOWICZ-POPIEL, Piotr. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. **Bioresource technology**, v. 100, n. 22, p. 5478-5484, 2009.

HUNG, Chao-Yi *et al.* Characterization of biochar prepared from biogas digestate. *Waste management*, v. 66, p. 53-60, 2017.

HUNGRIA, Mariangela *et al.* Inoculation with selected strains of *Azospirillum brasilense* and *A. lipoferum* improves yields of maize and wheat in Brazil. **Plant and soil**, v. 331, n. 1-2, p. 413-425, 2010.

HUYSMAN, F.; VERSTRAETE, Willy. Effect of cell surface characteristics on the adhesion of bacteria to soil particles. **Biology and fertility of soils**, v. 16, n. 1, p. 21-26, 1993.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário de 2006. Disponível em: [https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/3096/agro\\_2017\\_agricultura\\_familiar.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/3096/agro_2017_agricultura_familiar.pdf). Acesso em: 16 julho. 2020.

IBI - International Biochar Initiative. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. versão 2.1, novembro 2015

IBRAHIM, H. M.; AL-WABEL; M. I.; USMAN; A. R.; AL-OMRAN, A; Effect of Conocarpus biochar application on the hydraulic properties of a sandy loam soil. **Soil Science**, v. 178, n. 4, p. 165-173, 2013.

IJIMA, Morio *et al.* Continuous application of biochar inoculated with root nodule bacteria to subsoil enhances yield of soybean by the nodulation control using crack fertilization technique. **Plant Production Science**, v. 18, n. 2, p. 197-208, 2015.

IMA - Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina. Instrução Normativa para licenciamento ambiental na suinocultura. IMA: Instrução normativa n.11/ 2014. Disponível em: <http://www.ima.sc.gov.br/index.php/downloads/licenciamento-ambiental/instrucoes-normativas-1/in11> Acessado em: 05//07/2020

ITO, M.; GUIMARÃES, D.; AMARAL, G.; Impactos ambientais da suinocultura: desafios e oportunidades. *Agroindústria BNDES Setorial* 44, p. 125-156, 2016. Disponível em: <[https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/9974/2/BS%2044%20Impactos%20ambientais%20da%20suinocultura\\_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/9974/2/BS%2044%20Impactos%20ambientais%20da%20suinocultura_P.pdf)>.

JEFFERY, Simon *et al.* A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 144, n. 1, p. 175-187, 2011.

JONES, B. E.H.; HAYNES, R. J.; PHILLIPS, I. R.; Effect of amendment of bauxite processing sand with organic materials on its chemical, physical and microbial properties. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 11, p. 2281-2288, 2010.

JOSEPH, Stephen; LEHMANN, Johannes. **Biochar for environmental management: science and technology**. London, GB: Earthscan, 2009.

KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; BARTZ, H. R.; GATIBONI, L. C.; BISSANI, C. A. & ESCOSTEGUY, P. A. V. **Proposta de nova equação para determinação do valor de H+Al pelo uso do índice SMP em solos do RS e de SC.** In: Reunião Anual da Rede 335 Bibliografia Oficial de Laboratórios de Análise de Solo e de Tecido Vegetal dos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, 33. Ata... Frederico Westphalen, 2001. p. 21-26.

KAMPHORST, Samuel Henrique *et al.* Desempenho de populações de polinização aberta de milho em processo de melhoramento genético participativo. In: VIII Congresso Brasileiro de Agroecologia, Porto Alegre, 2013. Resumos... Cadernos de Agroecologia, v. 8, n. 2, p.5, Porto Alegre, 2013.

KARHU, K.; MATTILA, T.; BERGSTRÖM, I.; REGINA, K.; Biochar addition to agricultural soil increased CH<sub>4</sub> uptake and water holding capacity—Results from a short-term pilot field study. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 140, n. 1-2, p. 309-313, 2011.

KAUFFMAN, Nathan *et al.* Producing energy while sequestering carbon? The relationship between biochar and agricultural productivity. **Biomass and Bioenergy**, v. 63, p. 167-176, 2014.

KEULEN, H. van; GOUDRIAAN, J.; SELIGMAN, N. G. Modelling the effects of nitrogen on canopy development and crop growth. **Plant canopies: their growth, form and function.** G. Russell, B. Marshall, and P. G. Jarvis (Eds.), p. 83-104, 1989.

KLUTHCOUSKI, João *et al.* Manejo do solo e o rendimento de soja, milho, feijão e arroz em plantio direto. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 1, p. 97-104, 2000.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; DO AMARAL, A. C.. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Embrapa Suínos e Aves-Livro científico (ALICE), concórdia; Sbera; Embrapa Suínos e Aves p. 95, 2019.

LAIRD, D. A.; FLEMING, P.; DAVIS, D. D.; HORTON, R.; WANG, B.; KARLEN, D.; L Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. **Geoderma**, v. 158, n. 3-4, p. 443-449, 2010.

LAIRD, David A. The charcoal vision: a win–win–win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. **Agronomy journal**, v. 100, n. 1, p. 178-181, 2008.

LEHMANN, J. A handful of carbon. **Nature**, v. 447, n. 7141, p. 143-144, 2007.

LEHMANN, Johannes *et al.* Biochar effects on soil biota—a review. **Soil biology and biochemistry**, v. 43, n. 9, p. 1812-1836, 2011.

LEHMANN, Johannes *et al.* Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and soil**, v. 249, n. 2, p. 343-357, 2003b.

LEHMANN, Johannes *et al.* Soil fertility and production potential. In: **Amazonian dark earths.** Springer, Dordrecht, p. 105-124, 2003a.

LEI, Ouyang; ZHANG, Renduo. Effects of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperatures on soil physical and hydraulic properties. **Journal of Soils and Sediments**, v. 13, n. 9, p. 1561-1572, 2013.

LIBRA, J. A.; RO, K. S.; KAMMANN, C.; FUNKE, A.; BERGE, N. D.; NEUBAUER, Y.; TITIRICI, M.; FÜHNER, C.; BENS, O.; KERN, J.; EMMERICH, K. H.; Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. **Biofuels**, v. 2, n. 1, p. 71-106, 2011.

LIU, Chen *et al.* Biochar increased water holding capacity but accelerated organic carbon leaching from a sloping farmland soil in China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 2, p. 995-1006, 2016.

LIU, J.; SCHULZ, H.; BRANDL, S.; MIEHTKE, H.; HUWE, B.; GLASER, B.; Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 175, n. 5, p. 698-707, 2012

LIU, Xiaoyu *et al.* Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions—a meta-analysis of literature data. **Plant and soil**, v. 373, n. 1-2, p. 583-594, 2013.

LOWELL, Seymour *et al.* Characterization of porous solids and powders: surface area, pore size and density. Springer Science & Business Media, 2004.

Malavolta, E. Vitti, G. C.; Oliveira, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2 ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p. il.

MANYÀ, Joan J. Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs. **Environmental science & technology**, v. 46, n. 15, p. 7939-7954, 2012.

MARCHETTI, Rosa *et al.* Biochar from swine manure solids: influence on carbon sequestration and Olsen phosphorus and mineral nitrogen dynamics in soil with and without digestate incorporation. **Italian Journal of Agronomy**, v.7. ed. 26, 2012.

MARKS, Bettina Berquó *et al.* Biotechnological potential of rhizobial metabolites to enhance the performance of *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum brasilense* inoculants with soybean and maize. **AMB Express**, v. 3, n. 1, p. 21, 2013.

MEHNAZ, Samina. *Azospirillum*: a biofertilizer for every crop. In: **Plant microbes symbiosis: Applied facets**. Springer, New Delhi, 2015. p. 297-314.

MÉNDEZ, A. *et al.* Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil. **Chemosphere**, v. 89, n. 11, p. 1354-1359, 2012.

MENEGUETTI, Gilmar Antônio; GIRARDI, Jordano Luís; REGINATTO, João Carlos. Milho Crioulo: Tecnologia Viável e Sustentável. Revista Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável, Porto Alegre, v.3, n.1, p. 12-17, 2002. Disponível em: <<http://www.emater.tche.br/site/multimedia/leitoeitor/10.php#book/10>>. Acesso em: 16 julho 2020.

MILLS, Aaron L. Keeping in touch: microbial life on soil particle surfaces. **Advances in Agronomy**, v. 78, p. 2-45, 2003.

MUHAMMAD, N.; BROOKES, P. C.; WU, J. Addition impact of biochar from different feedstocks on microbial community and available concentrations of elements in a Psammaquent and a Plinthudult. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 16, n. 1, p. 137-153, 2016.

MUKHERJEE, A. *et al.* Physicochemical changes in pyrogenic organic matter (biochar) after 15 months of field aging. **Solid Earth**, v. 5, n. 2, p. 693, 2014.

MUKHERJEE, Santanu *et al.* Microbial respiration of biochar-and digestate-based mixtures. **Biology and Fertility of Soils**, v. 52, n. 2, p. 151-164, 2016.

NOVOTNY, Etelvino Henrique *et al.* Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use-a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 321-344, 2015.

NICOLOSO, R. S.; *et al* USO DO DIGESTATO COMO FERTILIZANTE, *In*: KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; DO AMARAL, A. C.. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Embrapa Suínos e Aves-Livro científico (ALICE), concórdia; Sbera; Embrapa Suínos e Aves, 2019, cap. V, p. 95-128.

OGLIARI, J.B.; ALVES, A.C.; Manejo e uso de variedades de milho com estratégia da Conservação de Anchieta. *In*: Boef WS, Thijsen MH, Ogliari JB, Stapit BR (Eds) **Biodiversidade e agricultores: fortalecendo o manejo comunitário**. L&PM, Porto Alegre, p 226-234, 2007.

OLIVI, M. C.; DIAS, R. S.; NICOLOSO, R. S. Análise técnica-econômica sobre o uso agrônômico do biofertilizante dos dejetos de suínos na microbacia Santa Fé no município de Itapiranga-SC. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRONOMIA, 29., 2015, Foz do Iguaçu. **Desafios e oportunidades profissionais: anais**. Curitiba: CONFEA -PR, 2015. 1 CD-ROM

PANDIT, Naba Raj *et al.* Biochar improves maize growth by alleviation of nutrient stress in a moderately acidic low-input Nepalese soil. **Science of the Total Environment**, v. 625, p. 1380-1389, 2018.

PENG, X. Y. L. L. *et al.* Temperature-and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. **Soil and Tillage Research**, v. 112, n. 2, p. 159-166, 2011.

PEREIRA, R. G.; HEINEMANN, A. B.; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. D. M.; KLIEMANN, H. J.; SANTOS, A. P. D.; Transpiration response of upland rice to water deficit changed by different levels of eucalyptus biochar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 5, p. 716-721, 2012.

PETTER, Fabiano A.; MADARI, Beata E. Biochar: Agronomic and environmental potential in Brazilian savannah soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 7, p. 761-768, 2012.

PHAM, M.; SCHIDEMAN, L.; SHARMA, B. K.; ZHANG, Y.; CHEN, W. T.; Effects of hydrothermal liquefaction on the fate of bioactive contaminants in manure and algal feedstocks. **Bioresource technology**, v. 149, p. 126-135, 2013.

PICAZEVICZ, Angelita AC; KUSDRA, Jorge F.; MORENO, Andréia de L. Maize growth in response to *Azospirillum brasilense*, *Rhizobium tropici*, molybdenum and nitrogen. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 9, p. 623-627, 2017.

PIETIKÄINEN, Janna; KIIKKILÄ, Oili; FRITZE, Hannu. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus. **Oikos**, v. 89, n. 2, p. 231-242, 2000.

PIPOLO, Valéria Carpentieri *et al.* Avaliação de cultivares de milho crioulo em sistema de baixo nível tecnológico. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 2, p. 229-233, 2010.

QIAN, Linbo; CHEN, Baoliang; HU, Dingfei. Effective alleviation of aluminum phytotoxicity by manure-derived biochar. **Environmental science & technology**, v. 47, n. 6, p. 2737-2745, 2013.

REIS JUNIOR, Fábio Bueno dos *et al.* Inoculação de *Azospirillum* amazonense em dois genótipos de milho sob diferentes regimes de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 32, n. 3, p. 1139-1146, 2008.

REIS, Veronica Massena *et al.* Biological dinitrogen fixation in gramineae and palm trees. **Critical Reviews in Plant Science**, v. 19, n. 3, p. 227-247, 2000.

RODRIGUEZ, Hilda *et al.* Gluconic acid production and phosphate solubilization by the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* spp. **Naturwissenschaften**, v. 91, n. 11, p. 552-555, 2004.

RODRIGUEZ, Lylian. Integrated Farming Systems for Food and Energy in a Warming, (Dissertação). Resource-depleting World. Humboldt-Universität zu Berlin, p. 150, 2012

RONSSSE, Frederik *et al.* Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions. **Gcb Bioenergy**, v. 5, n. 2, p. 104-115, 2013.

ROSA, Ediany Francieli Gomes da, **AVALIAÇÃO PARTICIPATIVA E CARACTERIZAÇÃO MORFOFISIOLÓGICA DE SEMENTES CRIOULAS DE MILHO (*Zea mays* L.) PROVEVINENTES DE MUNICÍPIOS DA ENCOSTA DA SERRA GERAL DE SANTA CATARINA**. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas). UFSC. 2019. 77p.

SANTOS, Humberto Gonçalves *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 5 ed., 2018.

SARABANDO, H. F. **ESTUDO SOBRE A SUSTENTABILIDADE DE PRODUTOS DA PIRÓISE DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DE BIOMASSAS AGRÍCOLAS**. 2015. 84 f. Dissertação (Mestrado profissional em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2015.

SARANYA, K. *et al.* Influence of biochar and *Azospirillum* application on the growth of maize. **Madras Agricultural Journal**, v. 98, n. 4/6, p. 158-164, 2011.

SCHNEIDER, Vania Elisabete *et al.* Diagnóstico dos resíduos orgânicos do setor agrossilvopastoril e agroindustriais associadas. Brasília, **Ipea**, 2012. Disponível em: [https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120917\\_relatorio\\_residuos\\_organicos.pdf](https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120917_relatorio_residuos_organicos.pdf). Acessado em 22 de outubro de 2020



SCHOUTEN, Socrates *et al.* Bioenergy from cattle manure? Implications of anaerobic digestion and subsequent pyrolysis for carbon and nitrogen dynamics in soil. **Gcb Bioenergy**, v. 4, n. 6, p. 751-760, 2012.

SCHULZ, Hardy; GLASER, Bruno. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 175, n. 3, p. 410-422, 2012.

SILVA, G. P.; MARQUES, S. M. T.; Impacto dos maus odores decorrentes da suinocultura na saúde de moradores rurais no município de Concórdia, Santa Catarina, Brasil. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v. 3, n. 2, p. 135-141, 2004.

SINGH, Balwant; SINGH, Bhupinder Pal; COWIE, Annette L. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. **Soil Research**, v. 48, n. 7, p. 516-525, 2010.

SOHI, S. P. *et al.* A review of biochar and its use and function in soil. In: **Advances in agronomy**. Academic Press, v. 105, p. 47-82, 2010..

SOMASEGARAN, Padmanabhan; HALLIDAY, Jake. Dilution of liquid Rhizobium cultures to increase production capacity of inoculant plants. *Applied and environmental microbiology*, v. 44, n. 2, p. 330-333, 1982.

SPOKAS, Kurt A. Review of the stability of biochar in soils: predictability of O: C molar ratios. **Carbon Management**, v. 1, n. 2, p. 289-303, 2010.

STEENHOUDT, Oda; VANDERLEYDEN, Jos. *Azospirillum*, a free-living nitrogen-fixing bacterium closely associated with grasses: genetic, biochemical and ecological aspects. **FEMS microbiology reviews**, v. 24, n. 4, p. 487-506, 2000.

STEINBEISS, S.; GLEIXNER, G.; ANTONIETTI, M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 6, p. 1301-1310, 2009.

STEINER, Christoph *et al.* Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. **Plant and soil**, v. 291, n. 1-2, p. 275-290, 2007.

STENSTRÖM, Th A. Bacterial hydrophobicity, an overall parameter for the measurement of adhesion potential to soil particles. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 55, n. 1, p. 142-147, 1989.

SUN, Daquan; HALE, Lauren; CROWLEY, David. Nutrient supplementation of pinewood biochar for use as a bacterial inoculum carrier. *Biology and Fertility of Soils*, v. 52, n. 4, p. 515-522, 2016.

SUN, F.; LU, S. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 177, n. 1, p. 26- 33, 2014.

TAMMEORG, Priit *et al.* Biochar application to a fertile sandy clay loam in boreal conditions: effects on soil properties and yield formation of wheat, turnip rape and faba bean. **Plant and soil**, v. 374, n. 1-2, p. 89-107, 2014.

TEDESCO, M.J. *et al.* **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 174p.

THIES, Janice E.; RILLIG, Matthias C. Characteristics of biochar: biological properties. **Biochar for environmental management: Science and technology**, v. 1, p. 85-105, 2009.

TIECHER, T.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, DANILO ; GATIBONI, L. C. ; COMIN, J. J. ; SCHMITT, D. E. ; TIECHER, T. L. ; AMBROSINI, V. G. . Phosphorus accumulation in a southern Brazilian Ultisol amended with pig manures for nine years. **SCIENTIA AGRICOLA** , v. 78, p. 1-8, 2020.

TRAZZI, P. A. **USO DO BIOCÁRVÃO NA PRODUÇÃO DE MUDAS E NO CRESCIMENTO INICIAL DE *Pinus taeda* L.** 2014. 117 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014

TRAZZI, P. A.; HIGA, A. R.; DIEKOW, J.; MANGRICH, A. S.; HIGA, R. C. V. Biocarvão: realidade e potencial de uso no meio florestal. **CIÊNCIA FLORESTAL**, v. 28, p. 875-887, 2018.

TRYON, Earl Haven. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils. **Ecological Monographs**, v. 18, n. 1, p. 81-115, 1948.

UCHIMIYA, Minori *et al.* Contaminant immobilization and nutrient release by biochar soil amendment: Roles of natural organic matter. **Chemosphere**, v. 80, n. 8, p. 935-940, 2010.

ULYETT, J.; SAKRABANI, R.; KIBBLEWHITE, M.; HANN, M. Impact of biochar addition on water retention, nitrification and carbon dioxide evolution from two sandy loam soils. **European Journal of Soil Science**, v. 65, n. 1, p. 96-104, 2014.

USDA - United States Department of Agriculture, FAS. World agricultural production. 2020 Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>, Acessado em 13 jul. 2020

UZOMA, K. C.; INOUE, M.; ANDRY, H.; FUJIMAKI, H.; ZAHOOR, A.; NISHIHARA, E.; Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. **Soil use and management**, v. 27, n. 2, p. 205-212, 2011.

VAN ZWIETEN, Lukas *et al.* Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. **Plant and soil**, v. 327, n. 1-2, p. 235-246, 2010.

VENTURA, Francesca *et al.* The effects of biochar on the physical properties of bare soil. **Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh**, v. 103, n. 1, p. 5-11, 2012.

VERHEIJEN, F. *et al.* Biochar application to soils. A critical scientific review of effects on soil properties, processes, and functions. **EUR**, v. 24099, p. 162, 2010.

VIEIRA, R. F. **CICLO DO NITROGÊNIO EM SISTEMAS AGRÍCOLAS**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 163 p. ISBN 978-85-7035-780-9.

WANG, G.; LI, Q.; DZAKPASU, M.; GAO, X.; YUWEN, C.; & WANG, X. C.; Impacts of different biochar types on hydrogen production promotion during fermentative co-digestion of food wastes and dewatered sewage sludge. **Waste Management**, v. 80, p. 73-80, 2018.

YAMATO, Masahide *et al.* Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia. **Soil science and plant nutrition**, v. 52, n. 4, p. 489-495, 2006.

YUAN, J.-H.; XU, R.-K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 1, p. 110-115, 2011.

ZEFFA, Douglas Mariani *et al.* *Azospirillum brasilense* promotes increases in growth and nitrogen use efficiency of maize genotypes. **PLoS One**, v. 14, n. 4, p. e0215332, 2019.

ZHENG, H.; WANG, Z.; DENG, X.; HERBERT, S.; XING, B.; Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil. *Geoderma*, v. 206, p. 32-39, 2013.

ZHOU, Xue *et al.* Turning pig manure into biochar can effectively mitigate antibiotic resistance genes as organic fertilizer. **Science of The Total Environment**, v. 649, p. 902-908, 2019.

## ANEXO A

Figura A1 - Plantas de milho inoculadas e não inoculadas após 123 dias de cultivo em casa de vegetação, em tratamentos com e sem inoculação.



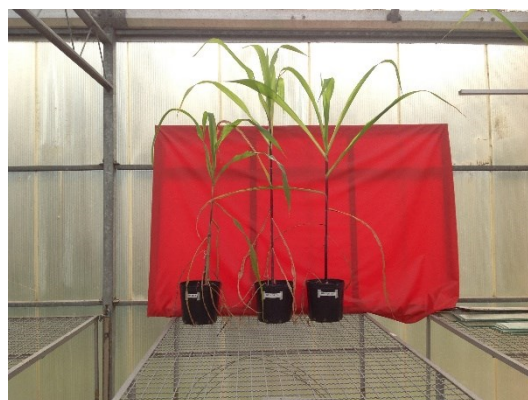
Sequência: Testemunha, NPK, BD e BC.



Sequência: DS, BCDS e BDDS.



Sequência: Testemunha, NPK, BD e BC inoculados.



Sequência: DS, BCDS e BDDS inoculados.

Legenda: As legendas embaixo das fotos representam os vasos dos tratamentos (da esquerda para direita). BC: biocarvão de cama de aviário, BD: biocarvão de digestato, BCDS: biocarvão de cama de aviário+digestato, BDDS: biocarvão de digestato+digestato, DS: digestato, NPK: tratamento com doses recomendadas de N, P, K e calagem, Test: testemunha controle.

A figura A1 mostra algumas das plantas de milho ao final do experimento, com uma planta de cada tratamento, já a figura A2 mostra as plantas de milho com os tratamentos que emergiram o pendão até o 123º após o plantio, sendo elas a 3ª repetição do NPK (NPK3), a 4ª repetição do BC (BC4) e a 4ª repetição do (BD4), o qual é um indicativo da proximidade da planta à sua expressão máxima de desenvolvimento.

A2 – Emergência do pendão aos 123 dias de experimento nos tratamentos NPK, BD e BC.



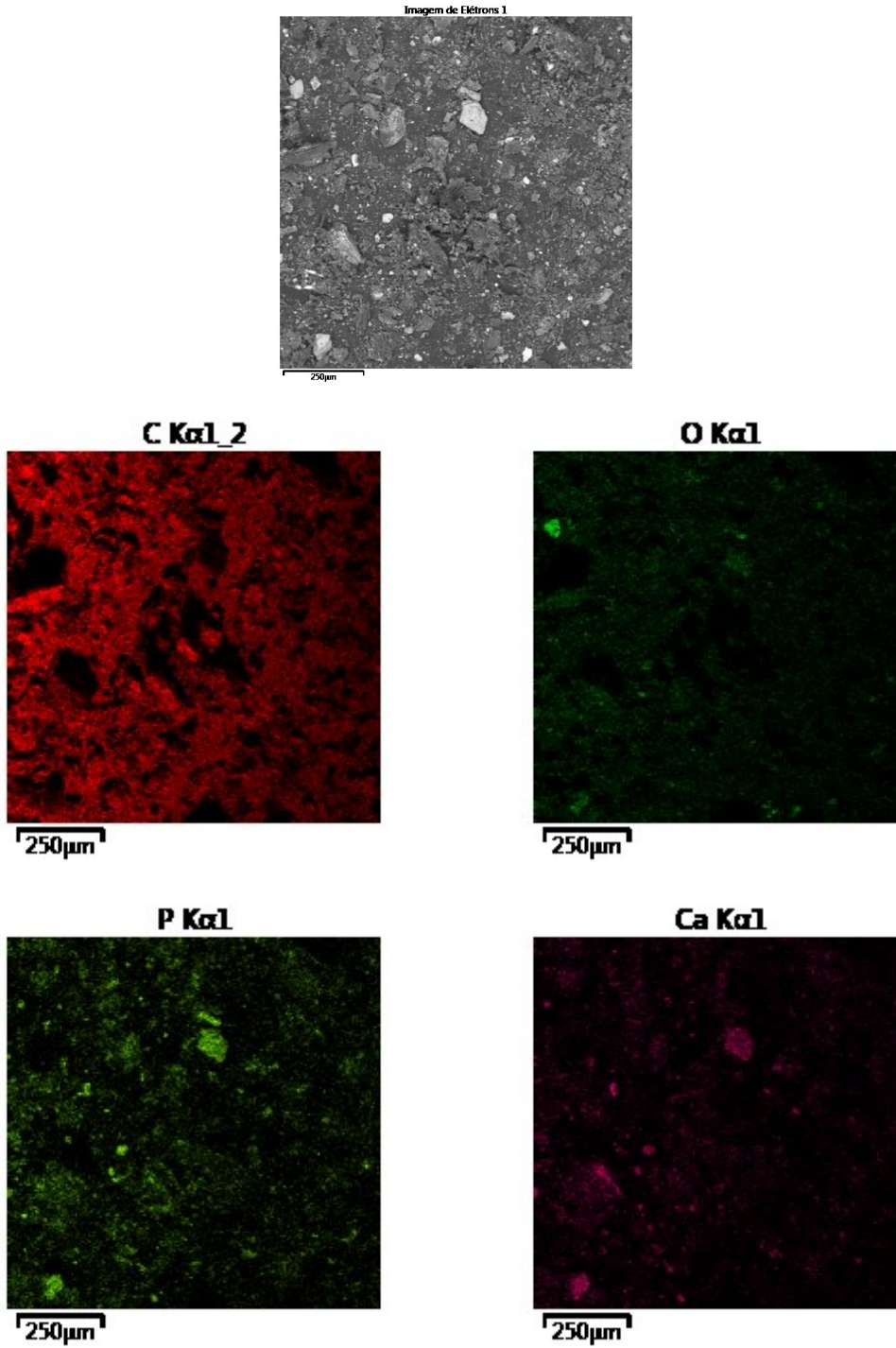
Emergência do pendão em NPK3



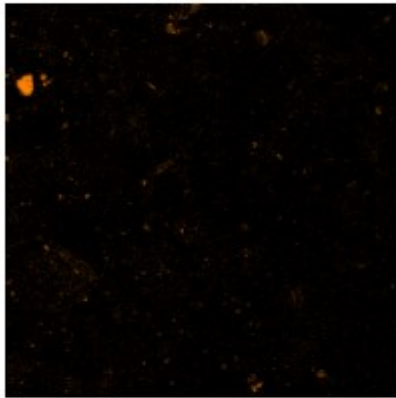
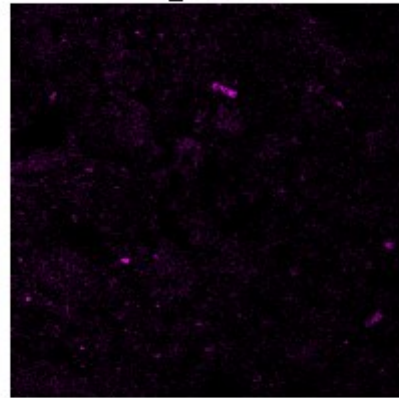
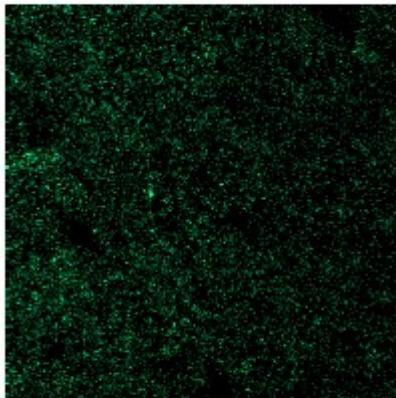
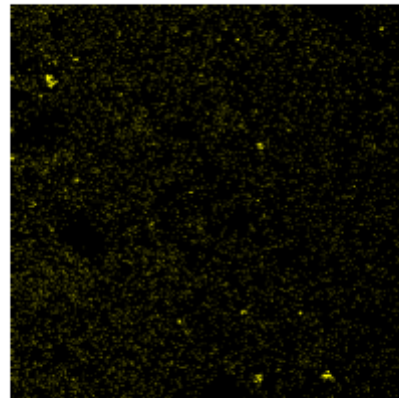
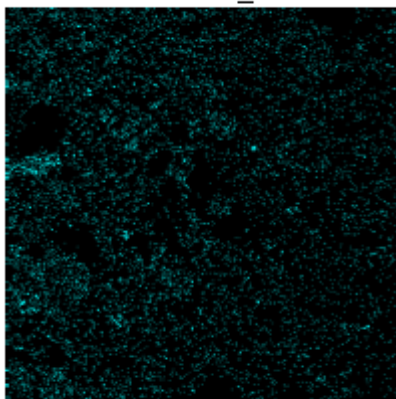
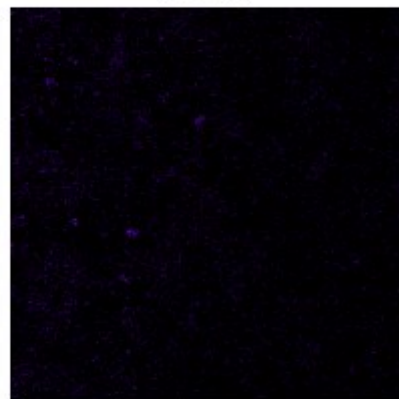
Emergência do pendão em BD4 e BC4

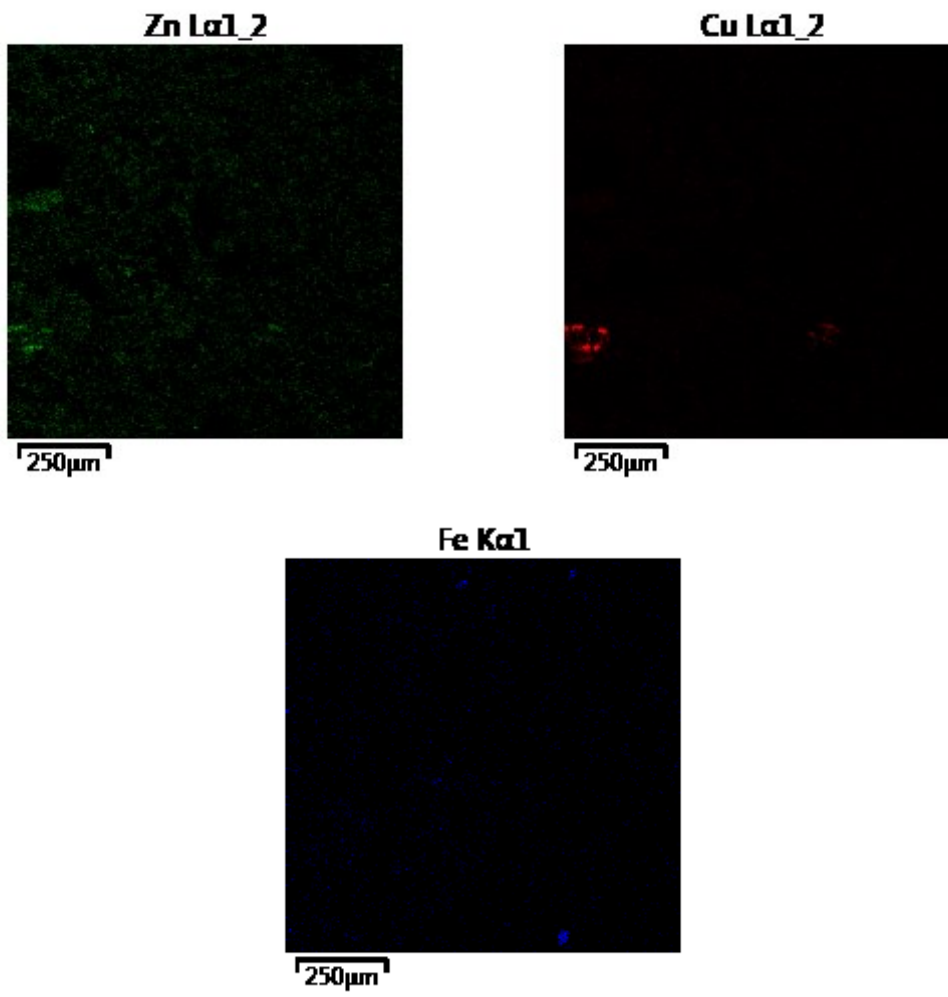
## ANEXO B

Distribuição de elementos em biocarvão de digestato:

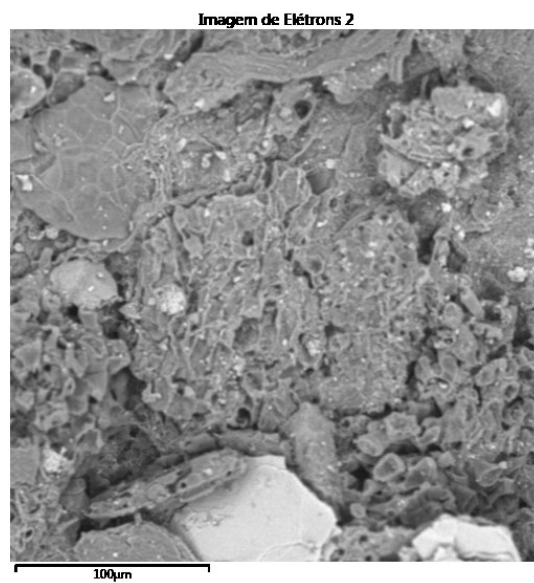




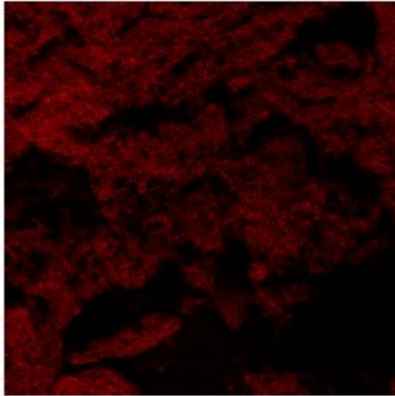
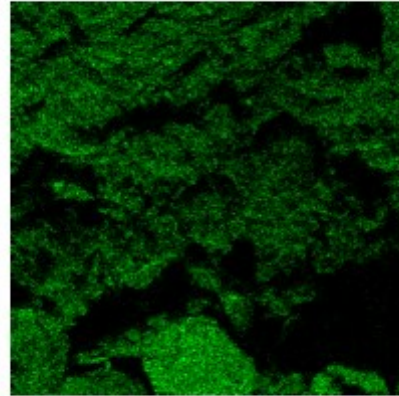
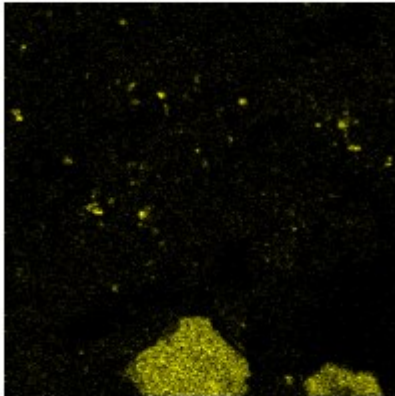
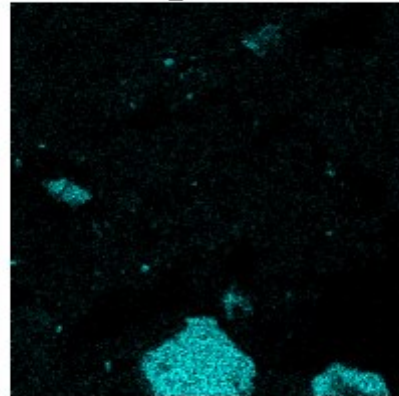
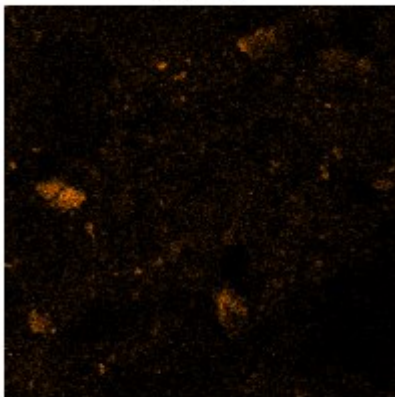
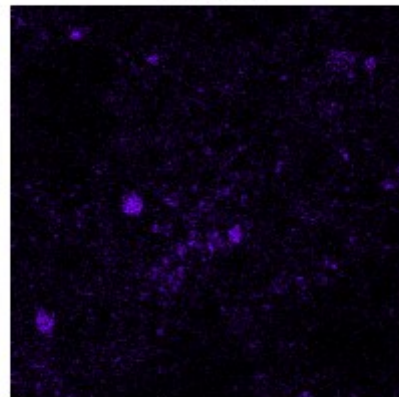
**Si K $\alpha$ 1**250 $\mu$ m**Mg K $\alpha$ 1\_2**250 $\mu$ m**S K $\alpha$ 1**250 $\mu$ m**Al K $\alpha$ 1**250 $\mu$ m**Na K $\alpha$ 1\_2**250 $\mu$ m**K K $\alpha$ 1**250 $\mu$ m

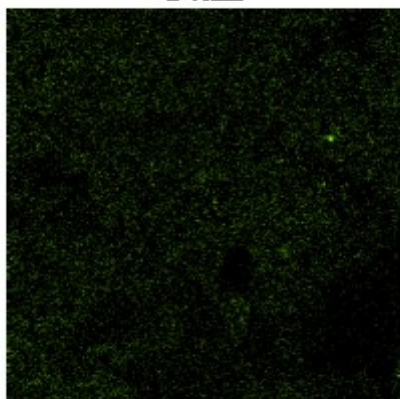
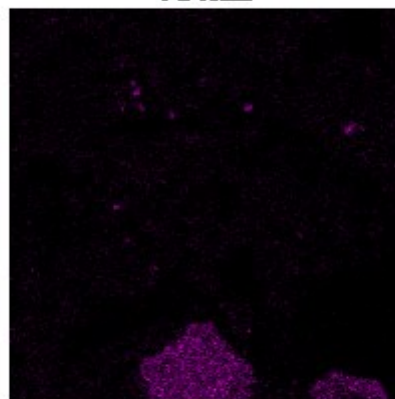
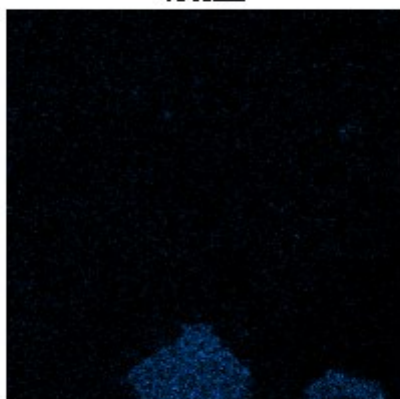
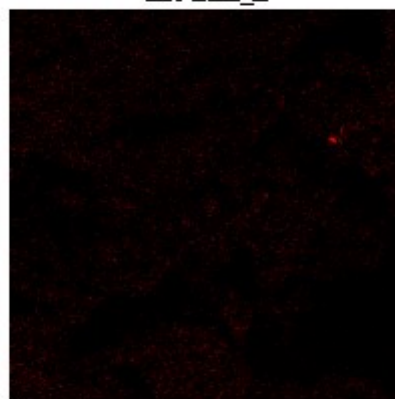


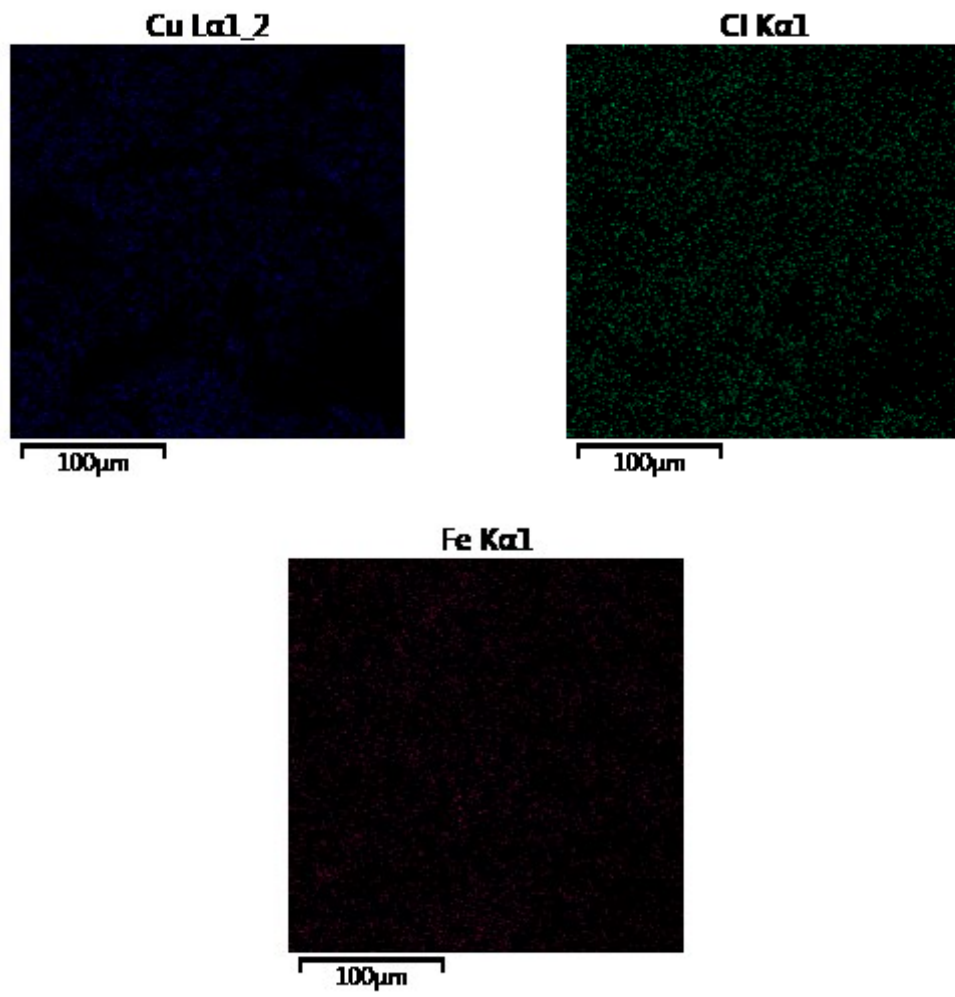
Distribuição de elementos em digestato de suíno:





**C K $\alpha$ 1\_2**100 $\mu$ m**O K $\alpha$ 1**100 $\mu$ m**Si K $\alpha$ 1**100 $\mu$ m**Mg K $\alpha$ 1\_2**100 $\mu$ m**P K $\alpha$ 1**100 $\mu$ m**Ca K $\alpha$ 1**100 $\mu$ m

**S K $\alpha$ 1**100  $\mu$ m**Al K $\alpha$ 1**100  $\mu$ m**K K $\alpha$ 1**100  $\mu$ m**Zn L $\alpha$ 1\_2**100  $\mu$ m



Fonte: autor/UCS

## ANEXO C

Tabela 10 - Análise de variância para os parâmetros avaliados no solo e na planta ao final do experimento conduzido com plantas de milho com biocarvão, digestato e NPK, com e sem inoculação de *Azospirillum brasilense*.

Parâmetros avaliados	Tratamento	Inoculação	Trat. x Inoculação	Coefficiente de Variância
<b>Planta</b>				
DC	125,25**	0,001 <sup>NS</sup>	13,35**	5,90
CC	19,81**	5,00*	4,89**	11,05
SPAD	25,09**	7,36**	6,77**	8,29
MS_raiz	132,04**	38,52**	8,593**	10,75
MS_aerea	307,67**	24,18**	11,98**	7,22
MS_total	771,04**	117,36**	15,63**	4,45
C acumulado raiz	90,387**	32,576**	12,788**	12,39
N acumulado raiz	95,106**	139,483**	13,060**	11,98
S acumulado raiz	14,558**	32,111**	3,512**	18,63
C acumulado aérea	490,038**	75,397**	21,345**	5,88
N acumulado aérea	85,722**	104,029**	36,763**	9,67
S acumulado aérea	79,162**	50,110**	8,315**	16,67
C acumulado total	578,198**	100,835**	23,289**	5,33
N acumulado total	114,442**	152,591**	36,551**	8,72
S acumulado total	100,541**	20,416**	8,904**	11,77
<b>Solo</b>				
pH	358,79**	5,36*	3,81**	1,26
C	31,99**	26,83**	25,96**	3,38
N	19,47**	50,28**	23,08**	4,24
S	5,34**	5,07*	2,11 <sup>NS</sup>	18,92
C:N	2,85 *	10,52**	5,46**	4,36
Al	156,202**	4,334*	0,776 <sup>NS</sup>	11,35
Ca	223,388**	0,380 <sup>NS</sup>	1,495 <sup>NS</sup>	7,59
Mg	32,798**	0,328 <sup>NS</sup>	1,008 <sup>NS</sup>	10,86
P	185,381**	1,688 <sup>NS</sup>	6,176**	18,24
K	3,333**	0,168 <sup>NS</sup>	2,470*	13,05
Na	3,186*	0,483 <sup>NS</sup>	3,880**	18,53
Cu	38,460**	0,855 <sup>NS</sup>	3,410**	8,93
Zn	182,778**	0,748 <sup>NS</sup>	5,164**	10,53
Soma de bases	166,923**	0,215 <sup>NS</sup>	1,075 <sup>NS</sup>	6,73
CTC efetiva	64,100**	0,031 <sup>NS</sup>	1,325 <sup>NS</sup>	6,72
Saturação por Al	177,611**	2,527 <sup>NS</sup>	0,674 <sup>NS</sup>	10,94
CTC pH 7,0	17,891**	0,133 <sup>NS</sup>	1,193 <sup>NS</sup>	4,72

Saturação por bases	357,762 **	0,293 <sup>NS</sup>	1,466 <sup>NS</sup>	3,59
H+Al	255,894**	0,489 <sup>NS</sup>	1,095 <sup>NS</sup>	4,86

<sup>NS</sup> Não significativo. \* e \*\* significativo pelo teste F a 5 e a 1% de probabilidade, respectivamente. DC: diâmetro do colmo, CC: comprimento do colmo, MS: Massa Seca, SPAD: *Soil-Plant Analysis Development*, CTC: Capacidade de Troca Catiônica.