

UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS

DISSERTAÇÃO

BIOCARVÃO DE BIOSSÓLIDO NA COMPOSIÇÃO DE
SUBSTRATOS PARA A PRODUÇÃO DE MUDAS FLORESTAIS

DALILA ARAÚJO LOPES

2019



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS**

**BIOCARVÃO DE BIODISSÓLIDO NA COMPOSIÇÃO DE
SUBSTRATOS PARA A PRODUÇÃO DE MUDAS FLORESTAIS**

DALILA ARAÚJO LOPES

Sob a Orientação da Professora
Eliane Maria Ribeiro da Silva

e Coorientação do Professor
José Carlos Arthur Junior

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências Ambientais e Florestais**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Silvicultura e Manejo Florestal.

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2019

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

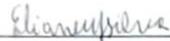
L 864b	<p>Lopes, Dalila Araújo, 1990- Biocarvão de biossólido na composição de substratos para a produção de mudas florestais / Dalila Araújo Lopes. - Seropédica, 2019. 47 f</p> <p>Orientadora: Eliane Maria Ribeiro da Silva. Coorientador: José Carlos Arthur Junior. Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, 2019.</p> <p>1. Resíduos. 2. Pirólise. 3. <i>Senna multijuga</i>. 4. Fungos Micorrízicos Arbusculares. I. da Silva, Eliane Maria Ribeiro, 1956-, orient. II. Arthur Junior, José Carlos, 1980-, coorient. III Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais e Florestais. IV. Título.</p>
--------	---

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS

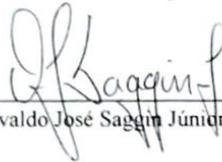
DALILA ARAÚJO LOPES

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências Ambientais e Florestais**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Silvicultura e Manejo Florestal.

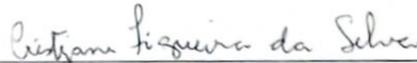
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 22/02/2019.



Eliane Maria Ribeiro da Silva. PhD. Embrapa Agrobiologia
(Orientadora)



Orivaldo José Saggi Júnior. Dr. Embrapa Agrobiologia



Cristiane Figueira da Silva. Dr. UFRRJ

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Judite.
Às minhas irmãs, Fernanda, Jéssica e Anna Paula.
Ao meu sobrinho Davi.
À minha tia Rosa Araújo (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Oxalá, aos Orixás, mestres e guias espirituais, por iluminar e abençoar minha trajetória.

À minha mãe, por todo amor, dedicação e apoio.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, pela experiência e oportunidades ao longo da pós-graduação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

À professora Eliane Maria Ribeiro da Silva, pela orientação, dedicação, carinho, confiança e paciência.

Ao professor José Carlos Arthur Junior, pela co-orientação e auxílio.

Aos membros da banca examinadora, Orivaldo José Saggin Júnior e Cristiane Figueira da Silva, pelas contribuições dadas nesse trabalho.

À Janaina Ribeiro Costa Rouws, pesquisadora da Embrapa Agrobiologia, pela contribuição nas análises estatísticas.

Aos membros do Laboratório de Micorrizas da Embrapa Agrobiologia, em especial ao amigo Itamar Ignácio Garcia, por todo o apoio e auxílio durante as atividades de laboratório.

Ao Laboratório de Gênese e Classificação de Solos e Laboratório de Biologia e Matéria Orgânica do Solo do Instituto de Agronomia da UFRRJ, especialmente ao professor Marcos Gervasio Pereira, Eduardo Neto e Luiz Alberto.

À equipe do Laboratório de Qualidade e Preservação da Madeira e do Laboratório de Estudos da Matéria Orgânica do Solo da Universidade de Brasília (UnB), em especial ao professor Cícero Célio de Figueiredo e Alyson Silva de Araújo.

À Companhia Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE), representada por Alan Henrique de abreu e Elton Abel.

Aos amigos Marcondes Coelho, Eduardo Neto, Laís Cândido, Caroline Almeida e Stephany Guilherme, pela amizade, companheirismo, disposição e auxílio na execução do trabalho.

RESUMO

LOPES, Dalila Araújo. **Biocarvão de biossólido na composição de substratos para a produção de mudas florestais**. 2019. 47 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. 2019.

O uso do biossólido como substrato para produção de mudas florestais reduz a necessidade de corretivos e fertilizantes minerais, sendo uma das melhores alternativas para o seu descarte. O objetivo desse estudo foi determinar o crescimento e a qualidade de mudas de *Senna multijuga* em substratos a partir de biossólido e biocarvão de biossólido. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento experimental de blocos ao acaso em esquema fatorial 2 x 3 x 2 com 2 tratamentos adicionais como controle, cinco repetições com cinco mudas cada, totalizando 350 mudas. Os tratamentos consistem na combinação de dois resíduos sólidos (biossólido e biocarvão de biossólido) em três doses (25, 50 e 75%), homogeneizados em proporção volumétrica (v/v) com solo mineral, com e sem inoculação de fungos micorrízicos arbusculares (FMA). Os controles consistiram em 100% de solo inoculado ou não com FMA. Os substratos foram caracterizados quimicamente. Foram avaliados os parâmetros de crescimento e qualidade das mudas, como altura, diâmetro do coleto, massa de matéria seca da parte aérea, do sistema radicular e total, índice de robustez, índice de qualidade de Dickson e a taxa de colonização micorrízica das raízes. Sem a inoculação com FMA as mudas de *Senna multijuga* cultivadas nos substratos com 50% e 75% de biossólido e com 50% de biocarvão de biossólido apresentaram maior crescimento e qualidade morfológica. A inoculação de FMA induziu um maior crescimento das mudas cultivadas nos substratos com 50% de biocarvão de biossólido e 50% de biossólido. A baixa colonização observada nas raízes das mudas pode estar relacionada aos altos teores de nutrientes nos resíduos. Ao comparar todos os tratamentos com o controle (solo não inoculado e inoculado), os substratos com 50 e 75% de biossólido proporcionaram mudas com maior qualidade, sendo os inoculados com FMA superiores.

Palavras-chave: Resíduos, pirólise, *Senna multijuga*, fungos micorrízicos arbusculares.

ABSTRACT

LOPES, Dalila Araújo. **Biosolid biochar in the composition of substrates for the production of forest seedlings**. 2019. 47 p. Dissertation (Master in Environmental and Forestry Sciences). Institute of Forestry, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. 2019.

The use of biosolid as substrate for the production of forest seedlings reduces the need for corrective and mineral fertilizers, being one of the best alternatives for their disposal. The objective of this study was to determine the growth and quality of *Senna multijuga* seedlings in substrates from biosolid and biosolid biochar. The experiment was conducted in a greenhouse, in a randomized block design in a 2 x 3 x 2 factorial scheme with 2 additional treatments as control, five replications with five seedlings each, totaling 350 seedlings. The treatments consist in the combination of two solid residues (biosolid and biosolid biochar) in three doses (25, 50 and 75%), homogenized in volumetric proportion (v / v) with mineral soil, with and without inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). Controls consist of 100% soil inoculated or not with AMF. The substrates were chemically characterized. Seedling growth and quality parameters were evaluated, such as height, stem diameter, shoot, root and total dry matter mass, robustness index, Dickson quality index and root mycorrhizal colonization rate. Without inoculation with AMF, *Senna multijuga* seedlings grown on substrates with 50% and 75% biosolid and 50% biosolid biochar showed higher growth and morphological quality. The inoculation of AMF induced higher growth of seedlings grown on substrates with 50% biosolid biochar and 50% biosolid. The low colonization observed in the seedling roots may be related to the high nutrient content in the residues. When comparing all treatments with the control (uninoculated and inoculated soil), the substrates with 50 and 75% of biosolid provided higher quality seedlings, being those inoculated with AMF higher.

Key – Words: Residue, pyrolysis, *Senna multijuga*, arbuscular mycorrhizal fungi.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. HIPÓTESES	2
3. OBJETIVOS	2
3.1 Objetivo Geral	2
3.2 Objetivos Específicos	2
4. REVISÃO DE LITERATURA	3
4.1 Obtenção e características de bioossólidos	3
4.1.1 Uso florestal e agrícola dos bioossólidos	4
4.2 Produção e características do biocarvão	4
4.3 Biocarvão de bioossólido	6
4.4 Fungos Micorrízicos Arbusculares	8
4.5 Espécie estudada: <i>Senna multijuga</i>	9
5. MATERIAL E MÉTODOS	10
5.1 Obtenção dos resíduos	10
5.2 Parâmetros químicos avaliados nos substratos compostos com bioossólido e biocarvão de bioossólido	11
5.3 Produção de mudas de <i>Senna multijuga</i> a partir dos substratos contendo bioossólido e biocarvão de bioossólido	12
5.4 Avaliação micorrízica das mudas	14
5.5 Análise estatística dos dados	14
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
6.1 Propriedades do biocarvão de bioossólido	14
6.2 Caracterização dos substratos compostos com bioossólido e biocarvão de bioossólido	14
6.3 Avaliação do crescimento e qualidade das mudas	18
6.4 Avaliação micorrízica das mudas	25
7. CONCLUSÕES	27
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
9. ANEXOS	40

1. INTRODUÇÃO

Estudos e projetos em conservação da natureza buscam, além da proteção dos recursos naturais, reestabelecer as funções socioambientais dos ecossistemas. Restaurando a prestação de serviços ambientais de áreas que se encontram em elevado grau de degradação e que, em algum momento, foram fundamentais aos sistemas nos quais estavam inseridas (PERRING et al., 2015; SUDING et al., 2015). Dessa forma, a procura por projetos voltados à restauração florestal tem crescido resultando no aumento da demanda por serviços e produtos florestais, em especial, pela produção de mudas de espécies florestais nativas, uma vez que o plantio dessas consiste na técnica mais utilizada em projetos com esse fim (ALMEIDA, 2016).

A produção de mudas de qualidade está relacionada, dentre outros fatores, à composição e qualidade do substrato. Processos como a germinação de sementes e formação do sistema radicular e aéreo, estão diretamente relacionados a composição do substrato e às suas características físicas, químicas e biológicas (CALDEIRA et al., 2000). Esse deve ser capaz de fornecer sustentação e condições adequadas para o desenvolvimento da muda, além de boa capacidade de retenção de água, disponibilidade de nutrientes, ser de fácil manuseio e economicamente viável (MELO et al., 2003; WENDLING et al., 2006).

Nesse contexto, é grande a importância de estudos relacionados aos componentes do substrato visando a utilização de materiais alternativos, de preferência resíduos e passivos ambientais, para obtenção de substratos de maior qualidade e com menor custo possível (CALDEIRA et al., 2013). Assim, determinados resíduos orgânicos, como o biossólido, têm ganhado destaque por atender as necessidades nutricionais das plantas (KREFTA et al., 2012; KRATZ & WENDLING, 2013).

Biossólido é o resíduo produzido durante o processo de tratamento das águas residuárias advindo das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), devidamente tratado e estabilizado (WOLLMANN et al., 2017). É um material rico em matéria orgânica e nutrientes, podendo ser aplicado como condicionador de solo e/ou fertilizante e como componente de substratos para produção de mudas florestais (CALDEIRA et al., 2014).

Seu emprego pode ocasionar a redução ou eliminação da necessidade da aplicação de corretivos e fertilizantes minerais, principalmente do nitrogênio, fósforo e zinco (ABREU JUNIOR et al., 2005). Logo, seu uso para fins agrícolas e florestais apresenta-se como uma das alternativas mais convenientes, entre as existentes para a sua disposição final, (BETTIOL & CAMARGO, 2006), e viável para reutilização desse resíduo e, conseqüentemente, uma solução para os problemas com sua disposição.

Apesar do uso agrícola do biossólido ser uma alternativa que apresenta vantagens ambientais, quando comparado a outras práticas de destinação final, como aterro sanitário e incineração, esses resíduos podem conter elementos químicos potencialmente tóxicos, como metais pesados, e patógenos em concentrações nocivas à saúde humana e prejudiciais ao meio ambiente (PAZ-FERREIRO et al., 2018). Sendo assim, necessário o desenvolvimento de tecnologias e alternativas que minimizem esses riscos garantindo uma destinação mais adequada a esse resíduo.

Uma das formas de minimizar os riscos ambientais e à saúde humana causados pelo uso do biossólido, de uma maneira ambientalmente e economicamente aceitável, pode ser obtido por meio da conversão pirolítica desse material, visando a sua transformação em biocarvão ou *biochar* (HOSSAIN et al., 2010). O biocarvão, biomassa carbonizada para uso agrícola (NOVOTNY et al., 2015), é obtido a partir da pirólise de material orgânico na ausência de oxigênio ou com baixas concentrações desse (VERHEIJEN, 2010). O processo de pirólise permite, em função da aplicação de calor: a concentração de carbono; o aumento da porosidade e da área superficial específica; a redução do volume do resíduo; e a eliminação de odor e agentes patogênicos (CABALLERO et al., 1997; DEMIRBAS, 2004; KOOKANA et al., 2011;

LIU et al., 2014). A aplicação de materiais carbonizados ao solo pode ser um importante mecanismo de descarte de resíduos e sequestro de carbono, e pode proporcionar a redução da lixiviação de nutrientes; redução da necessidade de fertilizantes (NOVOTNY et al., 2012); e adsorção de metais pesados em solos contaminados, reduzindo significativamente a absorção desses pelas plantas (IPPOLITO et al., 2012).

Portanto, diante da dificuldade de gestão da grande quantidade de biossólido que é produzida e dos possíveis problemas ambientais que podem ser causados pelo seu acúmulo e descarte, a pirólise desse resíduo e sua conversão em biocarvão pode ser uma excelente alternativa para sua reciclagem, seu gerenciamento, redução de volume, eliminação de patógenos e redução dos impactos ambientais negativos associados a ele. Além disso, os outros produtos também resultantes da pirólise, como o biogás e bio-óleo, podem ser utilizados para a produção de bioenergia (IRFAN et al., 2016; ROY & DIAS, 2017).

As mudas de espécies arbóreas podem ser favorecidas quando inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares (FMA). Os FMA formam simbioses mutualistas com as raízes de plantas e aumentam a superfície de absorção de água e nutrientes (SCHUBLER et al., 2001; ALFAIA & UGUEN, 2013). Pesquisas relacionadas à interação entre biossólido e biocarvão com FMA apresentam grande variação de resultados. De acordo com Koide (2017) pode-se encontrar facilmente efeitos positivos, neutros ou negativos do biocarvão na colonização micorrízica, esses vão depender da taxa de aplicação de biocarvão, das suas qualidades químicas e físicas, do tipo de biocarvão, do tipo de solo, da homogeneidade das misturas biocarvão-solo, tipo de cultura e a duração do experimento. O mesmo ocorre para a interação do biossólido com os FMA. Portanto, buscou-se avaliar os efeitos do biossólido e do biocarvão de biossólido nas interações com FMA.

2. HIPÓTESES

- I. A pirólise melhora a qualidade do biossólido para sua incorporação em substratos de mudas florestais.
- II. Haverá melhor crescimento, em altura e diâmetro, das mudas de *Senna multijuga* com o uso do biocarvão de biossólido como substrato, em relação ao biossólido não pirolisado.
- III. O biossólido e o biocarvão de biossólido influenciam positivamente na micorrização.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Determinar o crescimento e a qualidade de mudas de *Senna multijuga* em substratos a partir de biossólido e biocarvão de biossólido.

3.2 Objetivos Específicos

- I. Determinar a eficiência do biossólido e do biocarvão de biossólido no crescimento e qualidade de mudas de *Senna multijuga*.
- II. Demonstrar se o biossólido e o biocarvão de biossólido podem ser inibitórios a micorrização em mudas de *Senna multijuga*.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Obtenção e características de biossólidos

O lodo de esgoto é um resíduo proveniente das Estações de Tratamento de Esgotos (ETE), e é composto por uma mistura heterogênea de materiais orgânicos e inorgânicos, que geralmente provêm de tratamentos primário (processos exclusivamente de ação física que promovem a sedimentação das partículas em suspensão), secundário (degradação biológica) e terciário (remoção de poluentes específicos através de digestores e estabilização da matéria orgânica) (MANARA et al., 2012).

Os principais fatores que interferem na qualidade do lodo de esgoto são: a origem dos efluentes que chegam ao sistema de tratamento, o processo de tratamento e de estabilização ao qual é submetido (LLORET et al., 2016). Após passar pelo processo de estabilização, o lodo de esgoto passa a ser denominado biossólido e torna-se um produto com características desejáveis para o setor florestal (GOMES et al., 2013). A estabilização está relacionada à biodegradação de parte da matéria orgânica, redução de odores e do nível de microrganismos patogênicos (PADOVANI, 2006). O lodo cru que não tenha recebido tratamento adequado para controle de poluentes e patógenos não é considerado biossólido (POGGIANI et al., 2000).

Em sua composição o biossólido, além de ser rico em matéria orgânica e nutrientes, também pode apresentar, dependendo da sua origem e tipo de tratamento, diversos poluentes como metais pesados, tais como mercúrio, chumbo, zinco, cobre e níquel, substâncias tóxicas, como pesticidas, inseticidas, desinfetantes, produtos farmacêuticos, detergentes, hormônios, e agentes patogênicos, como *coliformes*, *helmintos* e *salmonella*, (BETTIOL & CAMARGO, 2006; LUO et al., 2014; GONZALEZ-GIL et al., 2016). Atributos que devem ser verificados com bastante cuidado pois os efeitos podem ser danosos ao meio ambiente e à saúde humana.

Uma das principais preocupações quanto à utilização do biossólido, é a incorporação e acumulação de metais pesados no solo (SILVA et al., 2002). O acúmulo dos metais pesados nos solos agrícolas é frequentemente causado pelo uso repetido e excessivo de fertilizantes, fungicidas, pesticidas e biossólidos (GIMENO-GARCIA et al., 1996; HALIM et al., 2002). Os metais pesados acumulam-se no solo de várias formas: hidrossolúveis, associados a carbonatos e óxidos, ligados às frações orgânicas e residuais (HE et al., 2005).

A acumulação de metais pesados tóxicos em solos pode conduzir não apenas à diminuição da produtividade das culturas em decorrência de seus efeitos fitotóxicos, uma vez que podem causar a redução do crescimento da planta, diminuindo as taxas fotossintéticas e os teores de clorofila, mas também a efeitos deletérios à saúde humana e animal (FREITAS et al., 2009; SARWAR et al., 2010). Do ponto de vista vegetal, esses são classificados em: metais essenciais: que são aqueles necessários para as plantas, como micronutrientes essenciais para o crescimento adequado das mesmas, como zinco, cobre e ferro (FAGERIA, 2009), mas a níveis excessivos, esses metais são tóxicos às plantas e animais (SETH, 2012); Não essenciais ou sem funções biológicas conhecidas em plantas como arsênio, cromo, prata, cádmio, chumbo e mercúrio (SETH, 2012). Nos vegetais, os principais sintomas observados nas raízes em decorrência da toxidez por metais pesados são: a redução do crescimento radicular e o surgimento de raízes atrofiadas e de coloração marrom escuro (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2001).

Para a aplicação do biossólido em culturas agrícolas e florestais, é imprescindível que ele atenda às exigências definidas pela resolução nº 375/2006 do CONAMA. Além disso, a concentração de patógenos presente no mesmo, serve para classificá-lo e determinar em qual tipo de cultura poderá ser aplicado. O biossólido classe A pode ser utilizado em qualquer cultura e deve apresentar os seguintes parâmetros: densidade de coliformes fecais inferior a 10^3 /grama de sólidos totais; ovos viáveis de helmintos inferior a 0,25 ovo/grama de sólidos totais; ausência de *Salmonella* sp.; Já o biossólido Classe B tem uso restrito em cultivo de café e culturas para

produção de fibras e óleos, e deve apresentar: coliformes fecais inferior a 10^6 /gramas de sólidos totais; quantidade de helmintos inferior a 10 ovos/grama de sólidos totais e ausência de *Salmonella* sp. (MMA, 2006). Para uma disposição final adequada e uso seguro do bio-sólido, devem ser considerados três aspectos básicos: nível de estabilização da matéria orgânica, quantidade de metais pesados e o grau de patogenicidade (CASSINI, 2003).

4.1.1 Uso florestal e agrícola dos bio-sólidos

Dentre as diversas alternativas para disposição final de bio-sólidos, as mais usuais são: disposição em aterro sanitário, incineração e uso agrícola e florestal (aplicação direta no solo ou fertilizante) (BETTIOL & CAMARGO, 2006). Os aterros sanitários são caros e podem causar a poluição dos solos, hídrica e atmosférica (LANZA, 2009) e a incineração tem elevado custo por tonelada tratada, além de problemas secundários de poluição atmosférica (FERREIRA et al., 1999). Além de que essas formas de disposição não permitem a reutilização dos constituintes benéficos dos bio-sólidos. Assim, entre essas alternativas, o seu uso para fins agrícola e florestal pode apresentar-se como uma alternativa propícia, uma vez que o bio-sólido é rico em matéria orgânica e nutrientes, podendo ser utilizado como fertilizante.

No processo de produção de mudas florestais, o uso de bio-sólido tem sido uma alternativa viável como fonte de matéria orgânica e de nutrientes, demonstrando resultados satisfatórios quando utilizado como componente na formulação de substratos (CALDEIRA et al., 2013; TRAZZI, 2014), trazendo benefícios, devido a sua composição. E seu emprego pode ocasionar a redução ou mesmo eliminação da necessidade da aplicação de corretivos e fertilizantes minerais, principalmente do nitrogênio, fósforo e zinco (ABREU JUNIOR et al., 2005).

Além disso, a matéria orgânica presente nesses resíduos aumenta a resistência dos solos à erosão, além de ser excelente fonte de nutrientes, principalmente de nitrogênio e fósforo (AGUILERA et al., 2007), e exerce influência sobre as propriedades dos solos, como a estabilidade de agregados, aumento da capacidade de retenção de água e aumento da capacidade de troca de cátions (NOVOTNY, 2002).

Os resultados encontrados por Santos et al. (2014) corroboram com isso, visto que caracterizaram as propriedades químicas de substratos formulados à base de bio-sólido e concluíram que esse proporcionou aumento da fertilidade dos substratos com aumento de teores dos nutrientes, principalmente nitrogênio, cálcio e fósforo. Diversos outros trabalhos apresentaram resultados satisfatórios para a utilização do bio-sólido como componente de substrato, como em Silva et al. (2012) onde a aplicação de bio-sólido em plantios de *Corymbia citriodora* beneficiou a produção de biomassa foliar, óleo essencial e madeira, além de propiciar melhor balanço nutricional. Cunha et al. (2006) observaram que as mudas desenvolvidas no substrato de bio-sólido foram as que acumularam mais nitrogênio e cálcio. Para Lobo et al. (2013) e Nascimento et al. (2004), a aplicação de bio-sólido promoveu o aumento dos teores de matéria orgânica e nitrogênio total, fósforo, potássio e cálcio no solo. Assim, sua utilização como fertilizante e na incorporação de substrato para plantas tem se destacado devido aos seus benefícios ambientais (FARIA et al., 2013).

4.2 Produção e características do biocarvão

O biocarvão, ou *biochar*, é um produto sólido, rico em carbono, obtido pelo aquecimento de biomassa sob condições controladas de oxigenação, em um processo conhecido como pirólise (SOHI, 2012). A pirólise é um processo termoquímico de decomposição direta dos componentes orgânicos da biomassa, na qual fornece três produtos: carvão vegetal (combustível sólido ou biocarvão), bio-óleo e gases não condensáveis (LEHMANN & STEPHEN, 2009). As características e as proporções dos produtos da pirólise dependem das

condições de operação do processo, como a temperatura, tempo de residência, taxa de aquecimento e as características próprias da biomassa (BRIDGWATER, 2012).

De acordo com Kookana et al. (2011) a matéria-prima e as condições de pirólise são os fatores determinantes que controlam as propriedades físicas e químicas do biocarvão. A matéria-prima determina a composição química final, enquanto a temperatura do processo determina a área da superfície, porosidade, tamanho, volume e distribuição dos poros do biocarvão (RALEBITSO-SENIOR & ORR, 2016). Diversos tipos de materiais orgânicos podem ser utilizados para produzir biocarvão, nesses incluem produtos de culturas, resíduos florestais, adubo animal e resíduo urbano (SOHI et al., 2009).

O processo de pirólise pode ocorrer de duas formas: a pirólise lenta, que consiste em uma sequência de reações com baixas taxas de aquecimento ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$) e longas durações, o que maximiza o rendimento do carvão, diminuindo as quantidades de bio-óleo e bio-gás; e a pirólise rápida, que é realizada com elevadas taxas de aquecimento e curtas durações, produzindo principalmente vapores (LEHMANN & STEPHEN, 2009) e combustíveis líquidos para serem utilizados em substituição aos óleos combustíveis, usados no aquecimento e na geração de energia (WANG et al., 2017).

Na pirólise rápida, caracterizada por altas taxas de aquecimento ($> 550^{\circ}\text{C}$) e tempos curtos de residência, tende a produzir biocarvões que geralmente apresentam elevadas áreas superficiais ($> 400 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) (KEILUWEIT et al., 2010; DOWNIE et al., 2011; SHACKLEY et al., 2011); elevada recalcitrância (SINGH & COWIE, 2008); a capacidade de sorção do carvão tende a aumentar e, conseqüentemente, sua capacidade de remover contaminantes orgânicos do meio ambiente (NOVOTNY et al., 2015); redução da relação hidrogênio/carbono (YUAN et al., 2013), logo, um material com maior resistência à decomposição microbiana (KOOKANA et al., 2011); e formação de uma estrutura policíclica aromática de elevado grau de condensação, o que lhe confere resistência à degradação (NOVOTNY et al., 2009). Como foi observado por Melo et al. (2013), onde as temperaturas mais elevadas de pirólise levaram a formas mais recalcitrantes do biocarvão de palha de cana-de-açúcar.

O aumento da porosidade do material proporciona melhoria nas propriedades químicas, principalmente pela alta superfície específica, resultando em aumento da capacidade de troca de cátions, adsorção de nutrientes e água no solo, o que resulta em menos perdas por lixiviação e na adsorção de metais pesados (ATKINSON et al., 2010; BEESLEY et al., 2011; PETTER et al., 2012; LEHMANN & JOSEPH, 2015). A porosidade do biocarvão mostra a distribuição do tamanho dos poros que é altamente variável, e abrange de nano- ($<0,9 \text{ nm}$), micro- ($<2 \text{ nm}$) a macroporos ($> 50 \text{ nm}$) (DOWNIE et al., 2009). Os macroporos são uma chave para a sua função no solo, no arejamento, e fornecem um nicho de habitat para micróbios, já os poros menores são envolvidos com a adsorção e o transporte de moléculas (ATKINSON et al., 2010).

Por outro lado, a pirólise lenta, caracterizada por baixa temperatura ($< 550^{\circ}\text{C}$), taxas de aquecimento mais lentas e tempos de residência longos, produz maior rendimento em biocarvão, acúmulo de carbono e aumento de grupos funcionais, que fornecem locais para troca de nutrientes (JOSEPH et al., 2010; KEILUWEIT et al., 2010; SHACKLEY et al., 2011; GAI et al., 2014). De acordo com Joo et al. (2010), Wang et al. (2010) e Dong et al. (2011) os grupos carboxila e hidroxila são os principais grupos funcionais para sorção de metais pesados.

Uchimiya et al. (2011a) avaliaram a eficácia de adsorção de metal do biocarvão derivado de casca de algodão preparado a cinco temperaturas (200, 350, 500, 650 e 800°C) e concluíram que as propriedades dos grupos funcionais da superfície do biocarvão (matéria volátil, conteúdos de oxigênio e pH) controlam a capacidade de sequestro de metais pesados do solo. Os biocarvões contendo altas quantidades de grupos funcionais de oxigênio eram geralmente os mais efetivos para a estabilização de metais pesados (UCHIMIYA et al., 2011b). Portanto, o biocarvão pode ajudar a reduzir a mobilidade de metais (CHOPPALA et al., 2012) e pode ser uma boa opção para a estabilização dos mesmos nos solos contaminados e melhorar a qualidade

desses, reduzindo significativamente a absorção de metais pesados pelas plantas (IPPOLITO et al., 2012).

O biocarvão difere-se do carvão vegetal em relação ao seu uso, sendo esse direcionado para a aplicação no solo com o intuito de melhorar suas propriedades físicas, químicas e biológicas (KOOKANA et al., 2011). O interesse quanto ao uso do biocarvão está relacionado ao seu potencial para mitigação das mudanças climáticas, através da estabilização da matéria orgânica na estrutura carbonizada e o consequente sequestro de carbono no solo, assim como na redução da emissão de óxido nitroso e metano (LEHMANN, 2007; ALHO et al., 2012; NOVOTNY et al., 2015); ao potencial para melhoria na fertilidade dos solos e crescimento das plantas, aumento da retenção de água e redução da lixiviação de nutrientes (NOVOTNY et al., 2012; NOVOTNY et al., 2015); a adsorção de metais pesados em solos contaminados, reduzindo significativamente a absorção desses pelas plantas (IPPOLITO et al., 2012); e a atuação como refúgio para microrganismos (BREWER et al., 2014). No entanto, esses benefícios inerentes ao uso do biocarvão são dependentes das suas propriedades físico-químicas, que variam de acordo com a matéria prima utilizada e as condições de pirólise ao qual são submetidos.

Os materiais utilizados como matéria-prima para a produção de biocarvão têm impactos diretos sobre a natureza e qualidade do biocarvão resultante (IBI, 2015). Dessa forma, a *International Biochar Initiative* (IBI), em 2015, forneceu um manual com diretrizes padronizadas de testes e caracterização do biochar. O documento *IBI Biochar Standards* destina-se a estabelecer uma caracterização comum a todos os tipos de biocarvões, e métodos padronizados de teste e medição para propriedades físico-químicas deles. Esse foi desenvolvido como um meio de fornecer informações e certeza sobre os atributos do biochar para uso em aplicações no solo (IBI, 2013). Assim, define três categorias de testes para avaliar as características do biocarvão antes desses serem aplicados aos solos.

- Teste A: mede as propriedades básicas necessárias para avaliar a utilidade de um biocarvão para uso no solo, como tamanho das partículas, umidade, proporções elementares (hidrogênio, carbono e nitrogênio), proporção de cinzas, condutividade elétrica e pH;
- Teste B: Avaliação tóxica: indica limites máximos permitidos de compostos tóxicos para que o material seja considerado aceitável; a toxicidade: pode ser de substâncias tóxicas já presentes nas matérias-primas utilizadas, como os metais, ou que são produzidas pelo processo de conversão termoquímica utilizado para produzir o biocarvão, como os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos; Definem os limites máximos permitidos (MAT) para que o material seja considerado aceitável. A caracterização prévia do biocarvão é de extrema necessidade para determinar se o material tem efeito tóxico (ENDERS et al., 2012; ZHOU, et al., 2013);
- Teste C: Análise avançada: inclui o conteúdo de material volátil e a área de superfície do biocarvão e identificam os nutrientes contidos no biocarvão.

Os testes A e B são obrigatórios para todos os biocarvões, enquanto o teste C é opcional.

4.3 Biocarvão de biossólido

O gerenciamento do biossólido é uma atividade de grande complexidade. Entre as alternativas para seu descarte, as mais comuns são os aterros e a incineração, porém, trata-se de métodos caros e passíveis de contaminação ambiental. A alta quantidade de matéria orgânica presente nos biossólidos contribui para as emissões de metano dos aterros, além da lixiviação de compostos nocivos (PAZ-FERREIRO et al., 2018). Na incineração, dispositivos caros precisam ser implementados nas usinas para evitar a liberação de gases e poluentes sólidos (INGUANZO et al., 2002). Assim, tendo em vista as dificuldades e desvantagens desses

métodos, novas alternativas estão sendo estudadas a fim de otimizar o uso desse resíduo e ao mesmo tempo mitigar seus potenciais impactos ambientais.

O uso do bio-sólido como matéria-prima para biocarvão, é uma alternativa atraente, entretanto potencialmente problemática (KHAN et al., 2013). Atraente por se tratar de um resíduo abundante e que contém grande quantidade de matéria orgânica e nutrientes, porém, pode apresentar alto teor de metal e outros contaminantes e organismos patogênicos que poderiam constituir uma fonte de contaminação do solo, vegetais e animais (WONG, 2001; KHAN et al., 2013). No entanto, a pirólise do bio-sólido pode ser um método potencialmente promissor e útil para sua reciclagem e manejo (MILLER-ROBBIE et al., 2015).

Pirolisar o bio-sólido poderia reduzir muitos, senão a maioria, dos impactos ambientais negativos associados a ele, como: odores, emissão de gases do efeito estufa gerados pela decomposição natural, contaminação de solos, patógenos, lixiviação tóxica; podendo proporcionar benefícios como a eliminação dos patógenos, redução da emissão de gases do efeito estufa, mitigação de odores e redução do volume do resíduo, dos custos de eliminação e de transporte (LEHMANN, 2007; HOSSAIN et al., 2010; PAZ-FERREIRO et al., 2012; DRAPER, 2016). Além disso, essa produção de biocarvão de bio-sólido pode ser realizada em diferentes tipos de fornos, desde os mais simples, como os fornos no chão ou de tambor (LATAWIEC et al., 2019; RODRIGUES, 2017), reduzindo os custos energéticos de produção, aos mais complexos, como as muflas (FIGUEIREDO et al., 2019).

Aplicação do biocarvão de bio-sólido no solo ou em substratos pode ser uma opção viável para gerenciamento desse resíduo, uma vez que pode ser utilizado como fertilizante (YACHIGO & SATO, 2013; HOSSAIN et al., 2015). Como observado por Khan et al. (2013) e HOSSAIN et al. (2015), que ao utilizarem o bio-sólido observaram o aumento da produtividade e diminuição da concentração de metais nos grãos e frutos. E na produção de mudas florestais, como verificado por Araújo (2016), onde, comparando o uso do bio-sólido e do biocarvão de bio-sólido incorporados aos substratos na produção de mudas de *Erythrina velutina*, verificou que, no geral, os melhores resultados para as características morfológicas e índices de qualidade de mudas foram obtidos para o biocarvão de bio-sólido produzido a 300°C na dose de 40%.

Sobre a redução de toxinas, de acordo com Draper (2016) entre os elementos tóxicos persistentes presentes nos bio-sólidos, têm-se os antimicrobianos, como triclosan (TCS) e triclocarban (TCC), comumente encontrados em produtos como creme dental, sabão, sabonete, shampoo e pesticidas, o estrogênio, encontrado em anticoncepcionais femininos, e o nonilfenol (NP), encontrado em detergentes. Ross (2014), verificou que ao realizar uma pirólise de bio-sólido a 500 ° C durante cinco minutos, 90% do TCS e TCC foram removidos. Hoffman (2016) observou que nas experiências de pirólise de bio-sólido a 400 ° C e temperaturas mais altas, mais de 95% de estrogênio foram removidos e o biocarvão teve estrogenicidade significativamente menor que amostras de bio-sólidos com digestão anaeróbica. Desta forma, quando realizado em temperatura e tempo de residência ideais, a conversão do bio-sólido em biocarvão, pode eliminar certos antimicrobianos e sulfatantes (ROSS et al., 2014; DRAPER, 2016).

Além disso, a pirólise, em contraste com a incineração, elimina o fluxo de oxigênio, para decompor termicamente o bio-sólido em suas frações líquida, sólida e gasosa (IBI, 2013), sendo esses o bio-óleo, biocarvão e bio-gás, respectivamente. De acordo com Ahmad et al. (2014) os voláteis e os gases desenvolvidos durante a produção de biocarvão podem ser capturados e condensados em bio-óleo e gás de síntese e utilizados como fonte de bioenergia.

Langner (2015) verificou que o processo de pirólise como alternativa de utilização de bio-sólido apresentou resultados promissores para a utilização do bio-óleo como fonte alternativa para a produção de combustíveis, onde as pirólises realizadas na temperatura de 550 °C mostraram-se mais eficientes, pois aumentaram o rendimento de bio-óleo. Bridle e Pritchard

(2004) analisando a recuperação de energia em biossólido por pirólise, verificaram que toda a energia foi recuperada nos produtos de conversão (carvão, óleo e gás); o óleo foi utilizado como um combustível industrial em caldeiras para a elevação de vapor e se fosse queimado em um motor diesel para produzir eletricidade, o processo geraria 925 kWh / t de lodo processado.

4.4 Fungos Micorrízicos Arbusculares

Micorrizas arbusculares são simbioses mutualistas estabelecidas entre raízes de plantas e fungos de solo do filo Glomeromycota (SCHUBLER et al., 2001). Os Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA) compreendem a forma mais abundante de associação micorrízica, formando associações mutualistas com mais de 80% das plantas vasculares (BRUNDRETT, 2002). Esses fungos são simbiotróficos obrigatórios, uma vez que apenas completam seu ciclo de vida se estiverem associados a uma raiz metabolicamente ativa (SIQUEIRA et al., 1985; SMITH & READ, 1997).

Essa associação é considerada como mutualista nutricional, na qual ambos os simbiontes são beneficiados, a planta fornece ao fungo compostos com carbono, fixado via processos fotossintéticos, enquanto o fungo concede a planta nutrientes e água, através do aumento da sua área de absorção (MOREIRA & SIQUEIRA, 2006; BERBARA et al., 2006).

Nesse tipo de simbiose, inicialmente, ocorre uma troca de sinais através da liberação de exsudatos radiculares capazes de estimular a ramificação das hifas e a germinação dos esporos (BUEE et al., 2000; KIRIACHEK et al., 2009). O fungo produz hifas intra e extra-radiculares, que irão penetrar nas células do córtex e formar estruturas fúngicas específicas como os arbúsculos, vesículas e esporos (SIQUEIRA et al., 1991).

Os arbúsculos são ramificações intensas de hifas e se formam dentro das células do córtex da raiz, envolvidos pelo plasmalema do hospedeiro (BERBARA et al., 2006). São os principais sítios de troca de nutrientes e carboidratos na simbiose, pois é o local em que há maior superfície de contato entre os simbiontes (BONFANE-FASOLO, 1984; HARRISON, 1999; SAGGIN JUNIOR & SILVA, 2005). As vesículas são estruturas globosas inter ou intracelulares, de paredes finas, ricas em lipídeos, enquanto os esporos são estruturas de paredes espessas e apresentam mais de uma camada, e ambos funcionam como estruturas de reservas para o fungo (BRUNDRETT 2002; MOREIRA, 2006).

A micorriza sofre influência de diversos fatores, tais como pH, aeração e umidade do solo, luminosidade, temperatura, dependência micorrízica da espécie hospedeira e a disponibilidade de nutrientes no solo, principalmente o fósforo (COLOZZI-FILHO & SIQUEIRA, 1986; SIQUEIRA et al. 2007). Bem como do manejo do solo, pois a alteração ou remoção da camada superficial do solo e perda de matéria orgânica, podem promover a eliminação parcial ou total dos propágulos dos fungos micorrízicos (SILVA, 2006).

O fósforo trata-se do nutriente onde mais se observa os benefícios dos FMA na absorção, devido a sua baixa disponibilidade na maioria dos solos (STURMER & SIQUEIRA, 2006). De acordo com Colozzi Filho & Siqueira (1986) há uma relação inversa entre a disponibilidade de P e a dependência micorrízica. Em solos deficientes de P, o fungo drena fotossintatos da planta sem conseguir corresponder com benefício nutricional, caracterizando uma associação que apresenta características parasíticas com relação à nutrição de fósforo. Quando a disponibilidade de P no solo é aumentada, o dreno de fotossintatos que o fungo provoca é compensado pela economia de energia que a planta tem em crescimento radicular, caracterizando uma simbiose mutualista; e em níveis elevados de P, a colonização é inibida por mecanismos de auto regulação da simbiose (SAGGIN JUNIOR & SILVA, 2005).

As espécies vegetais podem ser classificadas de acordo com sua dependência micorrízica em facultativas, obrigatórias ou não-micorrízicas (SMITH & READ, 2008). As espécies facultativas se beneficiam apenas em situações nas quais o solo apresenta baixa fertilidade; em solos com alta fertilidade a simbiose é inibida por meio de mecanismos genéticos

e controlados pela planta, e dessa forma, as plantas não necessitam de FMA (LAMBALIS et al., 2003; BERBARA et al., 2006). As obrigatórias se associam independente das condições de fertilidade do solo, e as não micorrízicas, não necessitam da simbiose para a sobrevivência (SMITH & READ, 2008).

Os FMA melhoram a capacidade das plantas de se estabelecerem em solos de baixa fertilidade, tornando-as mais tolerantes ao estresse hídrico e ataques de pragas e patógenos do sistema radicular (ROJAS & SIQUEIRA, 2000; MOREIRA & SIQUEIRA, 2006), e causam aumento da área de absorção radicular das plantas colonizadas, assim maior absorção de água e nutrientes (ZANGARO et al., 2005; ALFAIA & UGUEN, 2013). Além disso, esses produzem, em suas hifas, a glomalina, uma glicoproteína que contribui para a formação e estabilização de agregados do solo (RILLIG & MUMMEY, 2006).

Em alguns estudos relacionados à produção de mudas, como em Dias et al. (2012), Santos et al. (2016), Tavares et al. (2016), Silva et al. (2017), Brito et al. (2017) e Rodrigues et al. (2018), os autores concluíram que a inoculação com FMAs proporcionou maior crescimento das mesmas.

O estabelecimento de espécies florestais micorrizadas pode ser uma alternativa viável para o aproveitamento de áreas degradadas (SILVA; ANTONIOLLI & ANDREAZZA, 2003). Carneiro et al. (1996), ao trabalhar com solo degradado, verificaram que a inoculação com FMA favoreceu o crescimento de *Senna multijuga* e exibiram elevada colonização micorrízica. Flores-Aylas et al. (2003) produzindo mudas de espécies arbóreas verificaram efeito benéficos da inoculação em solos com baixa quantidade de fósforo, mostrando eficiência do microbionte em captar nutrientes importantes para o desenvolvimento do vegetal.

Porém, sabe-se que a resposta micorrízica depende diretamente da relação fungo-planta- condições ambientais (SAGGIN JÚNIOR et al., 1994; BERBARA et al., 2006).

4.5 Espécie estudada: *Senna multijuga*

A espécie arbórea *Senna multijuga* (L. C. Rich.) H. S. Irwin & Barneby, pertencente à família Leguminosae Caesalpinioideae, é uma espécie pioneira, caducifólia, heliófila, com indivíduos que podem atingir até 20 m de altura e 60 cm de diâmetro na idade adulta (CARVALHO, 2004). Ocorre principalmente em regiões de Mata Atlântica, sendo conhecida popularmente como pau-cigarra, cássia verrugosa ou aleluia (LORENZI, 1992).

As sementes de *Senna multijuga* possuem dormência tegumentar e de acordo com Piveta et al. (2010), a escarificação com ácido sulfúrico a 90%, por 10 a 20 minutos, constituiu-se no método mais eficiente para a superação da dormência. Para a produção de mudas, recomenda-se a semeadura indireta e após três a cinco semanas do início da germinação, efetuar a repicagem das plântulas para sacos de polietileno ou tubetes de tamanho médio (CARVALHO, 2004).

Ecologicamente exerce importante papel, pois devido à adaptação desta espécie a diversos tipos de solos, são próprias para utilização em programas de revegetação em áreas degradadas e matas ciliares, e trata-se de uma espécie ornamental, de rápido crescimento, amplamente empregada na arborização urbana (LORENZI, 1992), além de apresentar potencial para utilização em recuperação de áreas mineradas (CARVALHO 1994).

Apesar de sua importância, pesquisas envolvendo a relação da *Senna multijuga* com os fungos micorrízicos arbusculares, são escassas e antigas, sendo alguns desses: Rojas & Siqueira (2000), que ao avaliarem os efeitos da inoculação de FMAs, durante a fase de formação e no transplantio das mudas, verificaram que a *Senna multijuga* apresentou elevada colonização micorrízica para os dois momentos. Lara (2014), ao avaliar a sobrevivência e crescimento de plântulas de espécies nativas de Mata Atlântica, inoculadas com FMA, em substratos oriundos da mineração de ferro, verificou que a *Senna multijuga* foi a espécie que apresentou maior sobrevivência e as maiores médias de crescimento.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Obtenção dos resíduos

5.1.1 Biossólido

O biossólido, proveniente da Estação de Tratamento de Esgotos da Ilha do Governador (ETE-Ilha), localizada a 22°47'43"S e 43°11'14"W, é derivado do tratamento de resíduos domiciliares e comerciais e disponibilizado pela Companhia Estadual de Águas e Esgoto do Rio de Janeiro (CEDAE).

O resíduo chega à ETE-Ilha como esgoto, passa pelo processo de decantação primária, onde ocorre a sedimentação dos sólidos em suspensão, e pelo tratamento secundário, através da degradação biológica, transformando-se em lodo de esgoto. Posteriormente, é submetido ao processo de estabilização anaeróbica, solarização e compostagem, para estabilização e higienização, transformando-se então em biossólido.

O biossólido foi coletado e transportado, por meio de caminhão com carroceria totalmente vedada e com capacidade de 10 m³ /viagem, para o viveiro florestal “Luiz Fernando Oliveira Capellão”, localizado no Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, onde foi peneirado, acondicionado em saco plástico limpo e etiquetado.

5.1.2 Biocarvão de biossólido

Amostras de biossólido foram inicialmente secas em estufa a 103 ± 2 °C até massa constante. Em seguida, o material seco foi colocado em um recipiente de metal e pirolisado em forno do tipo mufla (Linn Elektro Therm) a temperatura final de 350 °C, a uma taxa média de aumento de temperatura de 11°C min⁻¹ e tempo de residência de quatro horas. O forno contém um mecanismo que evita o fluxo de oxigênio e conta com um sistema de saída de gases e bio-óleo. O controle de temperatura durante a pirólise foi realizado com o uso de um termopar tipo K de penetração, modelo MTK-15, acoplado a um termômetro digital KT160A. Essa etapa do experimento foi realizada no Laboratório de Qualidade e Preservação da Madeira, localizado na Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília (UnB).

5.1.2.1 Propriedades do biocarvão de biossólido

a) Rendimento em biocarvão

Como produtos da pirólise, foi obtido o biocarvão de biossólido, o líquido pirolenhoso e os gases não condensáveis. O rendimento em biocarvão (RBC), foi determinado através da Equação 1.

$$RBC(\%) = \frac{M_f}{M_i} 100 \quad (1)$$

Em que:

RBC = Rendimento em biocarvão (%)

M_f = massa sólida final obtida após a pirólise (g)

M_i = massa sólida inicial (g)

b) Análise imediata

A determinação dos teores de materiais voláteis (T_v), de cinzas (T_c) e de carbono fixo (T_{CF}) foi obtida de acordo com a norma ASTM D 1762 – 64 adaptada por Oliveira (1982).

Amostras contendo 5,0 g de biocarvão, foram armazenadas em cadinhos de porcelana tampados, e posteriormente colocadas em uma mufla regulada a ± 950 °C, onde permaneceram sobre a porta da mufla aberta por 2 minutos; em seguida, na borda da mufla por 3 min e no interior da mufla com a porta fechada por 6 min. Posteriormente, as amostras foram mantidas em dessecador por aproximadamente 1 h, pesadas e calculado o T_V de acordo com a equação 2:

$$T_V(\%) = \frac{(M_i - M_f)}{M_i} 100 \quad (2)$$

Em que:

T_V = Teor de materiais voláteis (%)

M_i = massa inicial (g)

M_f = massa final (g)

Para a determinação do teor de cinzas (T_C), as mesmas amostras armazenadas dentro dos mesmos cadinhos destampados, após a análise de voláteis, foram colocadas no interior da mufla a 750 °C, com a porta fechada, por 6 h. Posteriormente, as amostras foram mantidas no dessecador por 1 h. O T_C foi determinado segundo a equação 3:

$$T_C(\%) = \frac{M_i - M_f}{M_f} 100 \quad (3)$$

Em que:

T_C = teor de cinzas (%)

M_i = massa inicial (g)

M_f = massa final (g)

O teor de carbono fixo (T_{CF}) foi determinado de acordo com equação 4:

$$T_{CF}(\%) = 100 - (T_V + T_C) \quad (4)$$

5.2 Parâmetros químicos avaliados nos substratos compostos com biossólido e biocarvão de biossólido

5.2.1 Determinação do teor de metais pesados

Os teores totais dos metais pesados foram obtidos através da metodologia *United State Environment Protection Agency 3050B/ SW-846* e comparados com os padrões estabelecidos pela Resolução nº 375/2006 do Conselho Nacional do Meio do Meio Ambiente e pelo *Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil* (International Biochar Initiative, 2015).

5.2.2 Potencial Hidrogeniônico (pH)

A determinação do pH foi de acordo com Rajkovich et al. (2011), na proporção de 1,0 g de resíduo em 20 ml de água deionizada (1:20) e agitação por 90 min. Os valores foram obtidos utilizando-se um peagâmetro.

5.2.3 Análises químicas

Os teores de cátions trocáveis (Al^{+3} , Ca^{+2} e Mg^{+2}); soma de bases (SB), acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$), capacidade de troca catiônica, porcentagem de saturação em bases (V%), fósforo disponível e nitrogênio total, foram obtidos a partir dos métodos analíticos descritos pelo *Manual de métodos de análise de solo* (Teixeira et al., 2017). Os teores de carbono orgânico e total foram obtidos de acordo com Carmo & Silva (2012).

5.3 Produção de mudas de *Senna multijuga* a partir dos substratos contendo bio sólido e biocarvão de bio sólido

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Solos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), localizada no município de Seropédica, Rio de Janeiro, 22°45'32.8"S 43°41'51.2"W. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região pertence à classe Aw, sendo tropical caracterizado por inverno seco e verão chuvoso.

O delineamento experimental é de blocos ao acaso em esquema fatorial 2 x 3 x 2 com 2 tratamentos adicionais como controle, cinco repetições com cinco mudas cada, totalizando 350 mudas. Os tratamentos consistem na combinação de dois resíduos sólidos (bio sólido e biocarvão de bio sólido) em três doses (25, 50 e 75%), homogêneos em proporção volumétrica (v/v) com solo mineral, com e sem inoculação de fungos micorrízicos arbusculares (FMA). Os tratamentos adicionais de controle consistem em 100% de solo inoculado ou não com FMA (Tabela 1).

Tabela 1. Tratamentos avaliados para formulação de substratos à base de diferentes proporções de bio sólido e biocarvão de bio sólido, com ou sem inoculação com fungos micorrízicos arbusculares, para a produção de mudas de *Senna multijuga*.

Composição dos substratos - Tratamentos			
Tipo de Resíduo	Resíduo (%)	Subsolo (%)	Inoculação de FMA
Bio sólido	25	75	Não inoculado
	50	50	Não inoculado
	75	25	Não inoculado
Biocarvão de bio sólido	25	75	Não inoculado
	50	50	Não inoculado
	75	25	Não inoculado
Adicional 1	-	100	Não inoculado
Bio sólido	25	75	Inoculado
	50	50	Inoculado
	75	25	Inoculado
Biocarvão de bio sólido	25	75	Inoculado
	50	50	Inoculado
	75	25	Inoculado
Adicional 2	-	100	Inoculado

Para a composição do substrato, foram coletadas amostras de solo classificado como Latossolo Vermelho Amarelo Eutrófico, de textura argilosa. As amostras foram previamente peneiradas, homogêneas e submetidas a duas autoclavagens a 120°C por uma hora, com intervalo de 12 horas entre elas. Após a esterilização as amostras de solo foram deixadas em repouso durante quinze dias.

As sementes de *Senna multijuga* foram fornecidas pelo Centro Nacional de Pesquisa de Agrobiologia (Laboratório de Leguminosas - Embrapa Agrobiologia). Antes da semeadura, as

sementes foram submetidas ao processo de quebra de dormência, com ácido sulfúrico a 90%, durante 20 minutos. Posteriormente foram lavadas em água corrente e secas em papel de filtro.

Após a homogeneização dos componentes de cada tratamento, os tubetes de polipropileno, com capacidade volumétrica 280 cm³, foram preenchidos manualmente e dispostos em bandejas de plástico. A semeadura foi realizada de forma direta, colocando-se três sementes em cada tubete. Aos 15 dias após a semeadura realizou-se o desbaste, deixando apenas uma plântula por tubete.

A inoculação de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) foi realizada no momento da semeadura, adicionando no centro de cada recipiente 3g de solo-inóculo (mistura de solo e raízes de capim braquiária colonizadas). A dose de 3g continha 60 esporos de FMA sendo 15 esporos de cada um dos seguintes fungos: *Acaulospora scrobiculata* (A38; IES 33), *Claroideoglossum etunicatum* (A44; Inóculo 51), *Dentiscutata heterogama* (A2; CNPAB 002) e *Rhizoglossum clarum* (A5; CNPAB 005). O inoculante foi fornecido pelo Centro de Recursos Biológicos Johanna Döbereiner da Embrapa Agrobiologia. Em todos os tubetes foi adicionado 2 ml de filtrado isento de propágulos de FMA, obtido através do solo-inóculo utilizado (73,06 g) e água destilada (1L), e posteriormente filtrado em papel-filtro.

5.3.1 Avaliações do crescimento e qualidade das mudas

Aos 35, 63, 94 e 121 dias após a semeadura foram avaliados a altura total das mudas, com uso de régua graduada (cm) e o diâmetro do coleto (DC), com uso de paquímetro digital (mm). Aos 121 dias as mudas foram cortadas ao nível do substrato, separando a parte aérea do sistema radicular. O sistema radicular foi lavado em água corrente para retirada de todo o substrato, com auxílio de uma peneira para evitar a perda de raízes. Ambos os materiais foram acondicionados em saco de papel, devidamente identificados e colocados em estufa de circulação forçada de ar, à temperatura de 65°C por 72 horas ou até peso constante. Após este período, o material vegetal foi pesado em balança analítica de precisão, obtendo-se a massa de matéria seca da parte aérea (MSPA), do sistema radicular (MSR) e total (MST), para todas as mudas. Para determinação da área foliar (AF) foi utilizando o medidor LICOR-3600.

Com base nos parâmetros morfológicos avaliados, foi calculado o índice de robustez (IR) e de qualidade de Dickson (IQD), por meio das seguintes equações 7 e 8:

$$IR = \left(\frac{H}{DC} \right) \quad (7)$$

$$IQD = \left(\frac{\frac{MST}{H}}{\frac{DC}{H} + \frac{MSPA}{MSR}} \right) \quad (8)$$

Em que:

IR = Índice de Robustez

H = altura (cm)

DC = diâmetro de coleto (mm)

IQD = Índice de Qualidade de Dickson

MST = massa de matéria seca total

MSPA = massa de matéria seca da parte aérea

MSR = massa de matéria seca do sistema radicular

Para cada repetição dos tratamentos foi realizada análise do teor nutricional nas folhas de *Senna multijuga*. Essas foram moídas, homogeneizadas, retirando-se 0,2 g para análise, e submetidas à digestão sulfúrica para a extração de cálcio (pelo método de absorção atômica), potássio (fotometria de chama), magnésio (absorção atômica) e fósforo (colorimetria) (TEDESCO et al.,1995).

5.4 Avaliação micorrízica das mudas

Para os processos de clareamento e coloração, pelos métodos de Koske & Gemma (1989) e Grace & Stribley (1991), foram retiradas amostras de 0,7 g de raízes finas e frescas, armazenadas em tubo falcon contendo solução de álcool etílico 50% (v/v) até o início do processo. A avaliação da taxa de colonização micorrízica das raízes foi realizada de acordo com o método da interseção em placa quadriculada, adaptado por Giovannetti & Mosse (1980). Foram avaliadas quanto a presença ou ausência de estruturas de FMA e classificadas em muito alta (> 80%), alta (60 – 79%), média (40 – 59%), baixa (20 – 39%), muito baixa (1 – 19%), Au = ausente (ZANGARO et al., 2002).

5.5 Análise estatística dos dados

Para a análise química dos substratos, os dados foram transformados (Log_x), para obtenção da normalidade e, posteriormente, submetidos à análise de variância e a comparação das médias por meio do teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância.

Quanto à análise dos parâmetros de crescimento das mudas, os dados também foram submetidos à análise de variância e a comparação das médias por meio do teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância. Utilizou-se o programa estatístico SISVAR versão 5.6 e o R versão 3.5.1.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Propriedades do biocarvão de biossólido

O biocarvão de biossólido apresentou os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, de 31,0%, 64,0% e 5,0%, respectivamente, e um rendimento de 85,0% (Tabela 2). Valores próximos aos obtidos por Antunes et al (2017) ao avaliar o biocarvão de biossólido a 300°C.

Tabela 2. Propriedades do biocarvão de biossólido utilizado na produção de mudas de *Senna multijuga*.

Voláteis (%)	31,0
Cinzas (%)	64,0
Carbono fixo (%)	5,0
Rendimento (%)	85,0

De acordo com Steiner et al. (2016) um biocarvão rico em cinzas pode ser utilizado para melhoria da fertilidade de solos, uma vez que fornece nutrientes vegetais. Mas, apresentará um menor teor de carbono fixo e conteúdo relativamente alto de material volátil, o que reduziria sua resistência à degradação biótica e, portanto, reduziria o seu potencial de sequestro de carbono (Brewer et al., 2011).

6.2 Caracterização dos substratos compostos com biossólido e biocarvão de biossólido

Os teores totais de metais pesados contidos nos substratos são apresentados na Tabela 3. A concentração de bário variou entre 18,05 a 142,63 mg. kg⁻¹, o cádmio de 1,79 a 2,61 mg.

kg⁻¹, o cobre de 1,16 a 149,00 mg. kg⁻¹, o cromo de 28,96 a 31,85 mg. kg⁻¹, o chumbo de 11,93 a 50,76 mg. kg⁻¹, o níquel de 3,50 a 14,41 mg. kg⁻¹ e o zinco de 20,78 a 476,88 mg. kg⁻¹.

Tabela 3. Concentração total de metais pesados (mg. kg⁻¹) presentes nos substratos utilizados na produção de mudas de *Senna multijuga*.

Composição dos substratos	Metais pesados						
	Ba	Cd	Cu	Cr	Pb	Ni	Zn
	mg. kg ⁻¹						
B25	46,25 c	1,83 d	30,05 c	29,00 a	20,15 c	6,34 c	121,50 c
B50	90,13 b	2,16 b	68,63 b	30,83 a	34,01 b	9,74 b	269,88 b
B75	141,75 a	2,43 a	149,00 a	30,04 a	50,76 a	14,26 a	474,25 a
BB25	53,90 c	2,04 c	36,51 c	29,05 a	23,40 c	6,53 c	140,00 c
BB50	89,50 b	2,24 b	70,38 b	31,85 a	34,54 b	9,93 b	258,13 b
BB75	142,63 a	2,61 a	129,38 a	30,90 a	50,65 a	14,41 a	476,88 a
S100	18,05 d	1,79 d	1,16 d	28,96 a	11,93 d	3,50 d	20,78 d
CONAMA ¹	1300	39	1500	1000	300	420	2800
IBI ²	-	39	6000	1200	300	420	7400

B25= 25% de bioossólido; B50= 50% de bioossólido; B75= 75% de bioossólido; BB25= 25% de biocarvão de bioossólido; BB50= 50% de biocarvão de bioossólido; BB75= 75% de biocarvão de bioossólido; S100= 100% de solo; ¹Concentração máxima de substâncias inorgânicas permitida pela Resolução CONAMA nº 375/2006 para bioossólido ou produto derivado; ²IBI: International Biochar Initiative; BB: biocarvão de bioossólido; Ba: bário; Cd: cádmio; Cu: cobre; Cr: cromo; Pb: chumbo; Ni: níquel; Zn: zinco. Médias seguidas por letras distintas nas colunas diferem entre si pelo método de agrupamento de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

As concentrações dos metais pesados foram proporcionais ao aumento da dose dos resíduos, exceto para o Cr (Tabela 3). O teor de metais pesados no bioossólido é considerada um fator limitante na sua utilização para fins ambientais e agrícolas. Em geral, nossos resultados para metais pesados nos substratos a partir de bioossólido e biocarvão de bioossólido estão abaixo dos valores encontrados por outros autores (YANG et al., 2018; FIGUEIREDO et al., 2019). Esse resultado pode estar relacionado ao fato do bioossólido ser predominantemente de origem doméstica, sem processamento de efluentes industriais. Além disso, as concentrações de metais pesados foram inferiores ao máximo estabelecido pela legislação brasileira (BRASIL, 2006) e pela regulamentação da Iniciativa Internacional Biochar (IBI, 2015). Assim, os substratos considerados nesse estudo estão aptos para serem utilizados para a produção de mudas, apresentando-se como uma alternativa viável e segura para a reciclagem do bioossólido.

Com base na caracterização química dos substratos, na comparação entre os substratos, aqueles compostos por biocarvão apresentaram maiores valores de pH, em todas as doses avaliadas (Figura 1a). Já os compostos com bioossólido apresentaram maiores teores de nutrientes (Ca⁺², Mg⁺²), SB, acidez potencial (H + Al) e T. Para o P disponível, foram observadas diferenças nas doses de 25 e 50%, com maiores médias nos substratos com biocarvão (Figura 1g). Os teores de CO e Ctotal foram maiores para o bioossólido nas doses de 50 e 75% (Figuras 1i e 1j).

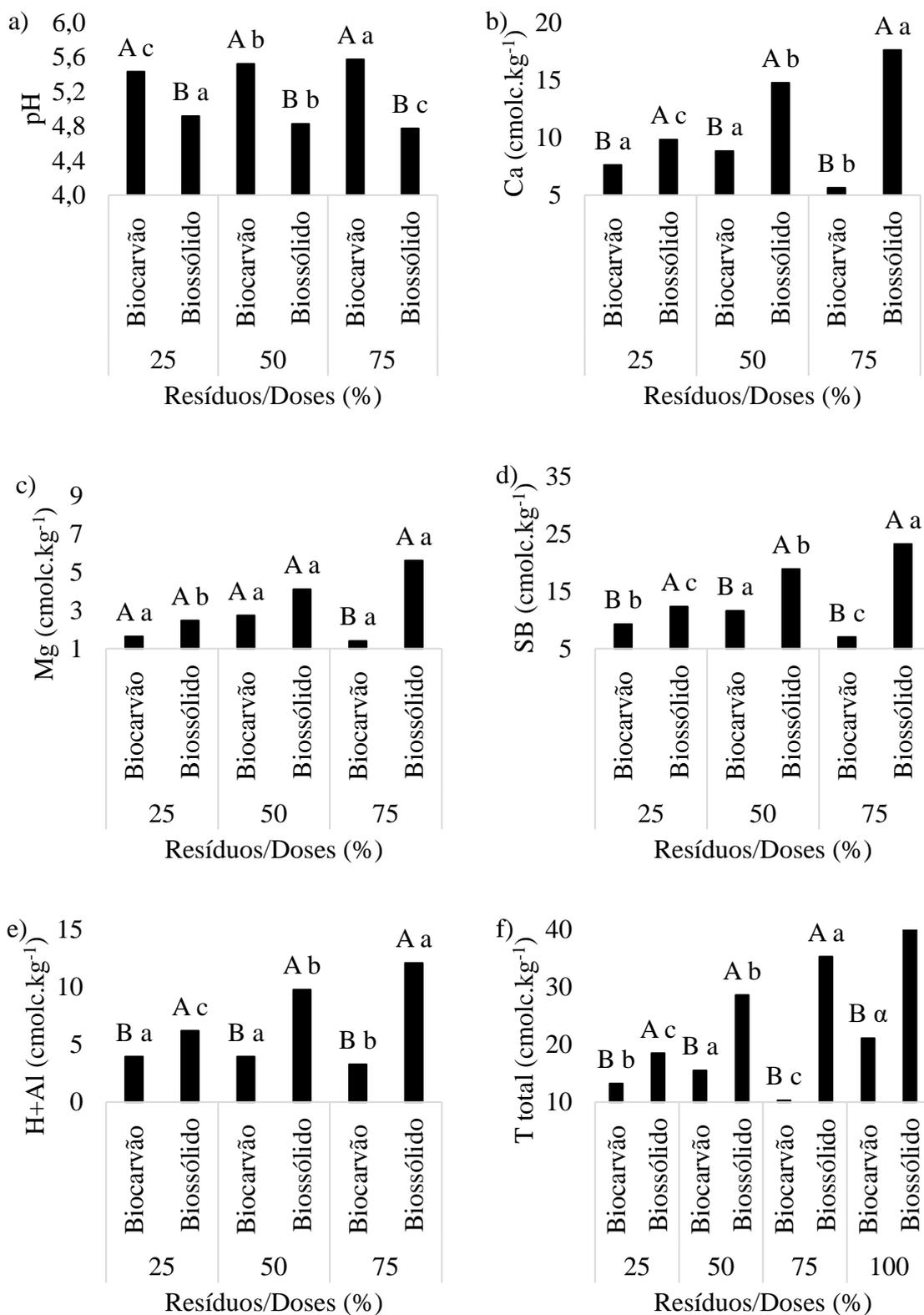


Figura 1. Parâmetros químicos avaliados nos substratos compostos com biossólido e biocarvão de biossólido para a produção de mudas de *Senna multijuga* de acordo com o desdobramento dos fatores tipo de resíduo e dose. (Continua).

As médias seguidas de letras iguais, maiúsculas na mesma dose e resíduo diferente e minúsculas em doses diferentes e no mesmo resíduo, não diferem entre si pelo teste F de análise de variância, com

5% de probabilidade. H+Al= acidez potencial; CTC total= capacidade de troca catiônica total; SB= soma de bases; Ca= cálcio; Mg= magnésio; P= fósforo; V= saturação por bases; CO= carbono orgânico; C total= carbono total.

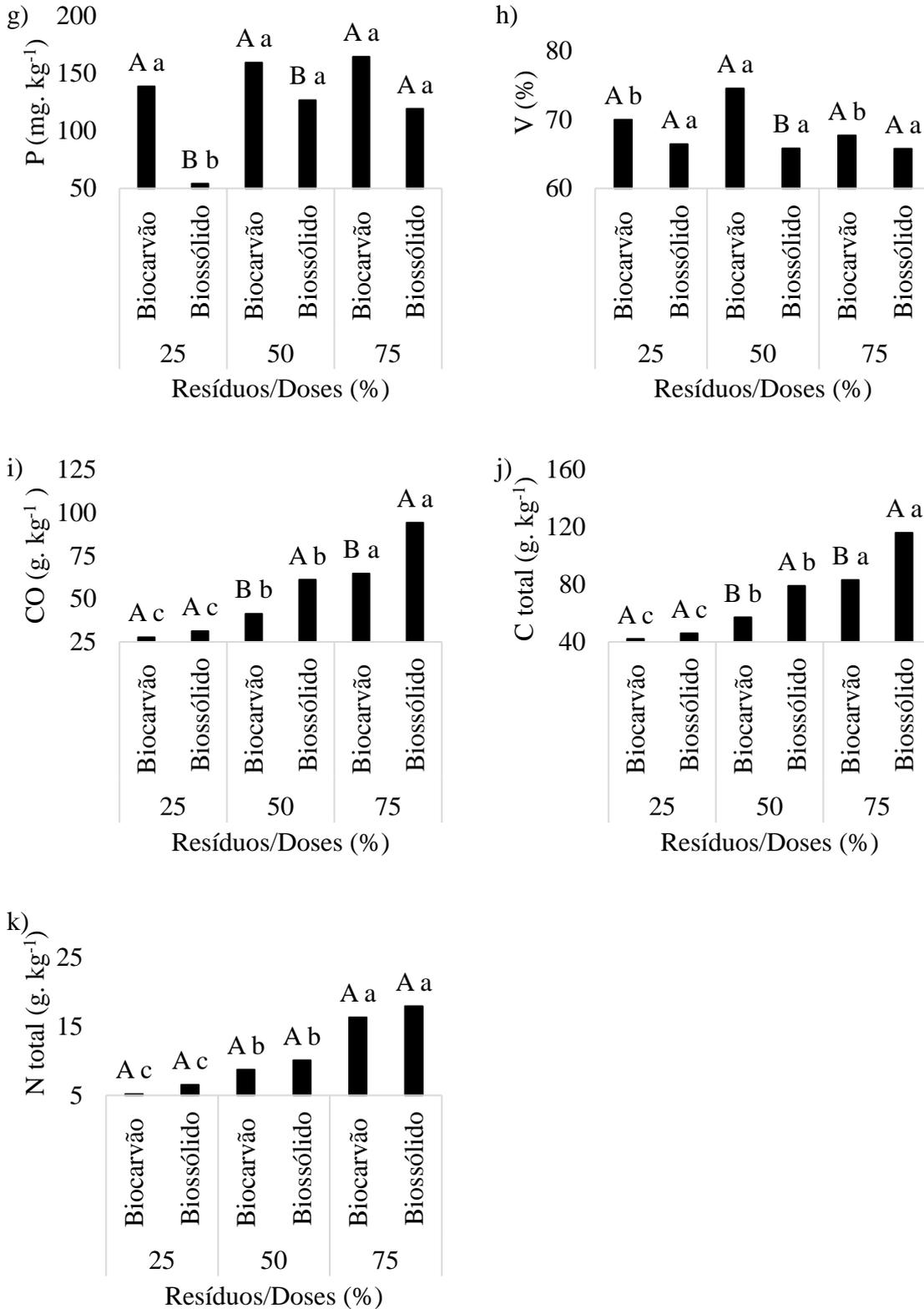


Figura 1. Continuação.

Observa-se que no bio sólido o aumento da dose resulta na maior disponibilidade de nutrientes, o que não é observado nos substratos com biocarvão, onde a dose de 75% apresentou menores valores de SB e V%. Isso pode ter ocorrido devido à presença de cargas negativas na superfície do biocarvão, na qual retêm nutrientes como Ca^{+2} e Mg^{+2} (IBI, 2018). A redução dos valores de pH com o aumento da dose no bio sólido está relacionada ao aumento da concentração de H^+ , padrão contrário ao observado no biocarvão.

Os menores teores de nutrientes observados no biocarvão, em relação ao bio sólido, podem estar atribuídos à volatilização de elementos como C, H, O e N durante a pirólise (DELUCA et al., 2009). Os menores teores de P disponível nos substratos contendo bio sólido, provavelmente estão relacionados com a redução dos valores de pH, que promove a fixação ou retenção de P, ou seja, a transformação de formas solúveis de P para formas de solubilidade reduzida (OLIVEIRA et al., 2009). Yang et al. (2018) ao avaliar diferentes bio sólidos e seus respectivos biocarvões, atribuiu a redução de CTot no biocarvão à liberação de carbono volátil durante a pirólise.

6.3 Avaliação do crescimento e qualidade das mudas

Na comparação das doses para o mesmo resíduo não inoculado, substratos com 25 e 50% de biocarvão proporcionaram as maiores alturas das mudas aos 35, 63 e 94 dias (Figura 2). Aos 121 dias, as mudas produzidas no substrato com biocarvão apresentaram as maiores alturas na dose de 50%. Para o bio sólido, a dose de 25% proporcionou maior altura aos 35 dias. Aos 63 e 94 dias não houve diferenças significativas das alturas em relação as doses. Já aos 121 dias, as doses de 50 e 75% de bio sólido proporcionaram as maiores alturas. Os valores do diâmetro de coleto (DC) das mudas nas doses de 25 e 50% de biocarvão proporcionaram os maiores DC, nas três medições (63, 94 e 121 dias). Para o bio sólido não houve diferença significativa entre as doses, em nenhuma medição.

Na comparação dos resíduos não inoculados, para os valores de altura das mudas, aos 35 dias só ocorreu diferença significativa entre os resíduos na dose de 50%, com o biocarvão proporcionando maior média (Figura 2). Aos 63, 94 e 121 dias, as alturas das mudas produzidas a 75% de bio sólido foram significativamente maiores às produzidas com biocarvão. Para as demais doses não houve diferença significativa entre os resíduos. Os valores do diâmetro de coleto (DC) das mudas produzidas nos substratos contendo 75% de bio sólido foram maiores que aquelas dos substratos com biocarvão em todas as medições (63, 94 e 121 dias) (Figura 2).

Comparando os tratamentos inoculados com fungos micorrízicos arbusculares (FMA), em relação às doses em cada resíduo, a dose de 25% proporcionou maior altura das mudas aos 63 dias, e 50% e 75% aos 121 dias, tanto para o biocarvão quanto para o bio sólido (Figura 2). Em geral, os valores de DC das mudas produzidas nos substratos com biocarvão reduziram com o aumento das doses. Para o bio sólido, observou-se diferença entre as doses apenas aos 94 dias, com menos DC na dose de 50%.

Na comparação entre os diferentes resíduos inoculados em cada dose, observou-se uma superioridade das médias para os substratos com bio sólido, sendo essas estatisticamente maiores para a altura aos 121 dias (doses 25, 50 e 75%) e DC aos 63, 94 e 121 dias (75%). O crescimento superior em altura aos 121 dias após a semeadura para os substratos compostos por bio sólido pode ser atribuído ao fato desse resíduo ser muito rico em matéria orgânica (TORRI & CABRERA, 2017). Os menores valores para a altura e diâmetro de coleto das mudas de *Senna multijuga* produzidas com o biocarvão a 75% (35, 64, 93, 121 dias) são uma resposta à redução dos teores de Ca nessa dose, também constatada na análise de nutrição foliar, onde o aumento da dose de biocarvão resulta em menores teores de Ca nas folhas.

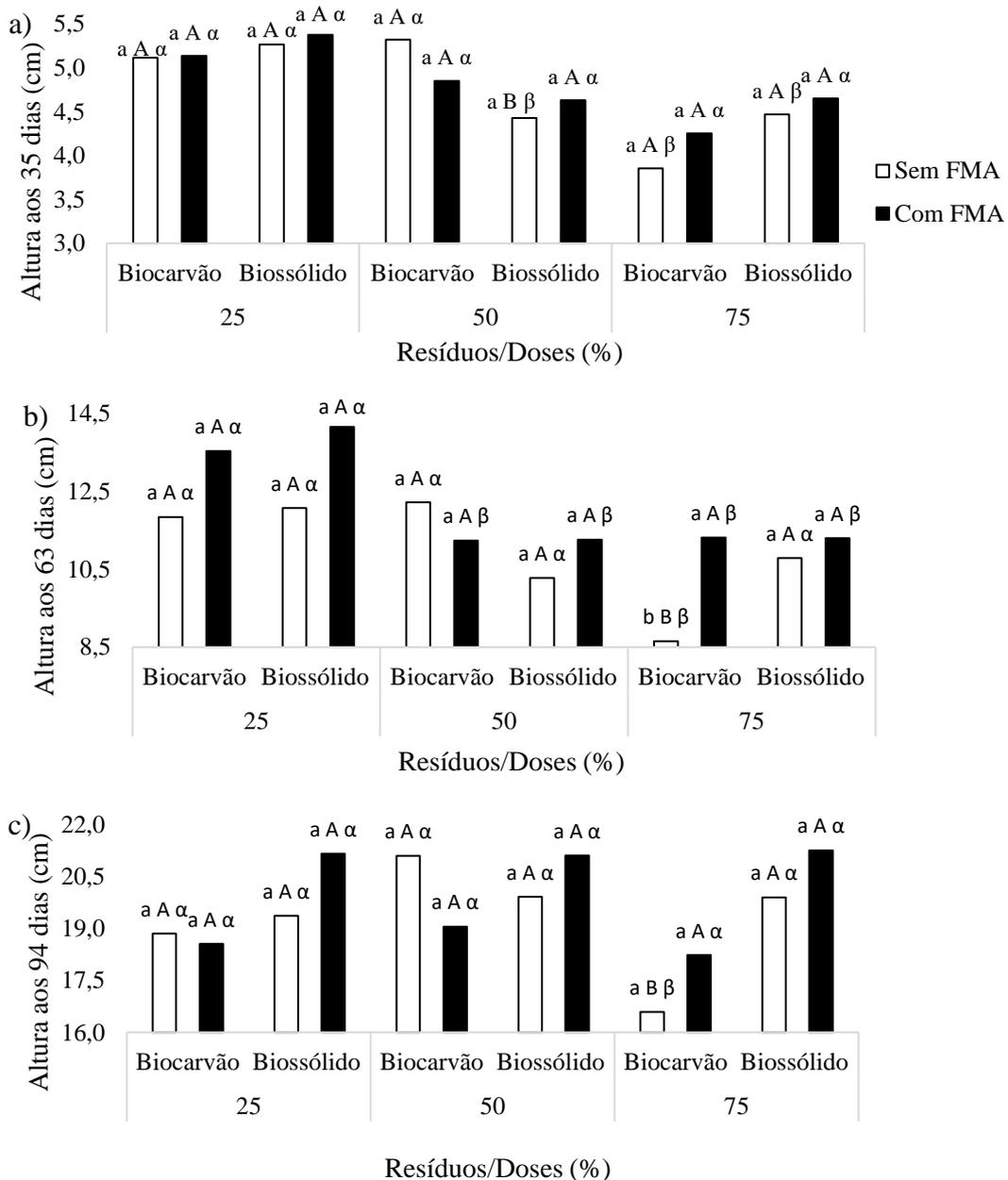


Figura 2. Variáveis de avaliação do crescimento das mudas de *Senna multijuga* em função do desdobramento dos fatores tipo de resíduo usado como substrato, inoculação com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e doses, aos 35, 63, 94 e 121 dias após a semeadura. (Continua).

Médias seguidas por letras iguais, minúsculas na mesma dose e mesmo resíduo, maiúsculas na mesma dose e diferente resíduo, e letras gregas em diferentes doses e o mesmo resíduo, não diferem entre si pelo teste F da análise de variância, a 5% de probabilidade. DC= Diâmetro de Coleta. $\alpha > \beta$.

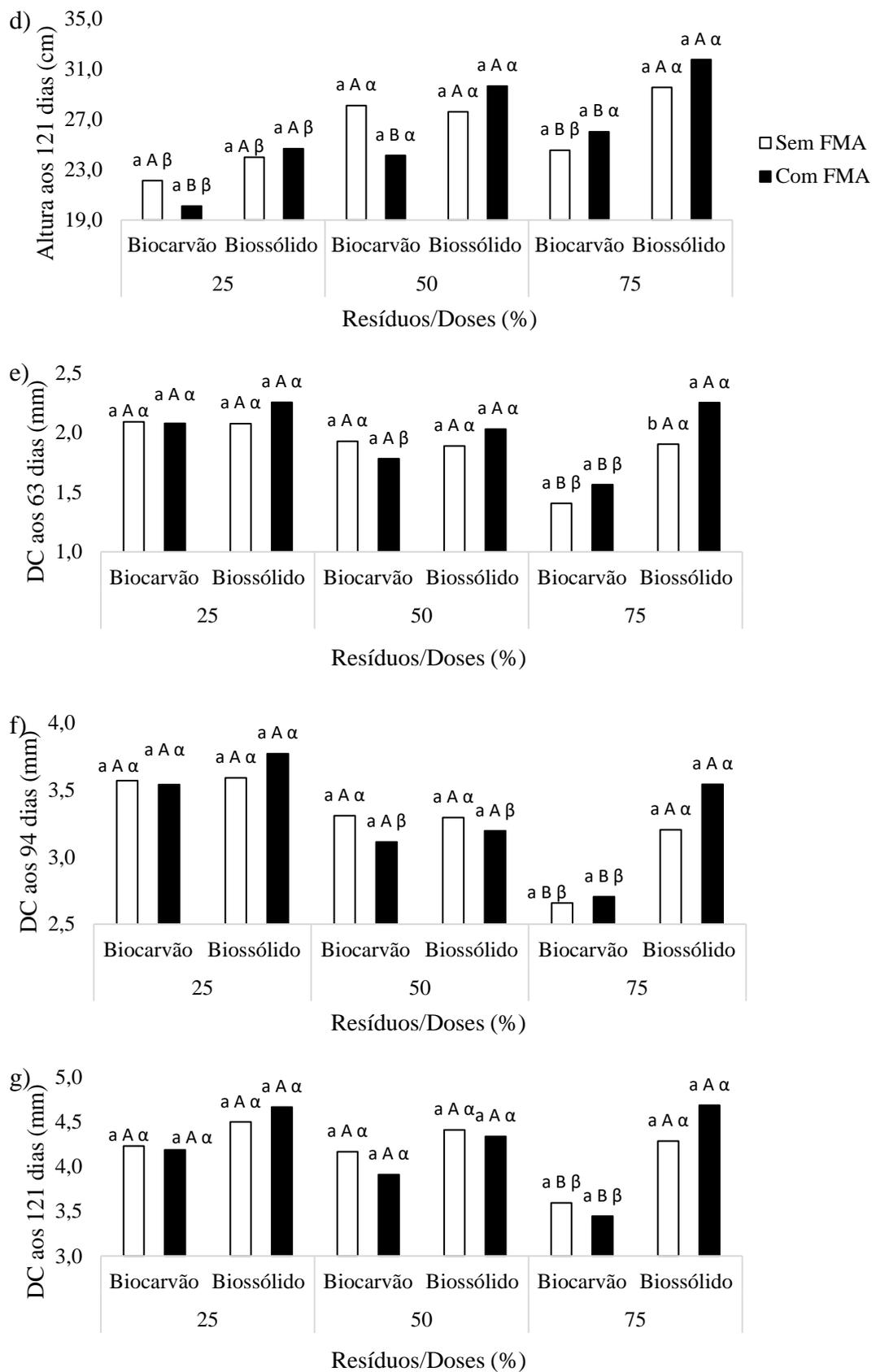


Figura 2. Continuação.

Gonçalves et al. (2000) consideram um intervalo de referência para o DC de 5 a 10 mm, para que a muda seja direcionada ao plantio em campo. Nenhum dos substratos produziram mudas dentro desse intervalo, porém aquelas produzidas com 75% de biossólido inoculado tiveram resultado bem próximo (4,68 mm) do valor mínimo requerido. Antes de serem expedidas para campo as mudas devem ser submetidas ao processo de rustificação, que consiste no preparo da muda para o plantio e tem como objetivo o aumento do diâmetro, porém as mudas utilizadas nesse estudo não passaram por esse processo, o que pode explicar o porquê das mesmas não se encontrarem dentro do limite.

Em relação às massas secas e índices de qualidades das mudas produzidas nos substratos não inoculados e as doses dos resíduos, não houve diferença significativa de massa de matéria seca aérea (MSPA), radicular (MSR) e total (MST) entre as doses tanto do biocarvão quanto do biossólido (Figura 3). Para a área foliar (AF), o biocarvão nas doses de 50 e 75% proporcionaram maiores AF, e para o biossólido não houve diferença entre as doses. Tanto o biocarvão quanto o biossólido proporcionaram maiores índice de robustez (IR) para as doses de 50 e 75%. Não houve diferença significativa de IQD entre as doses de biocarvão. Para o biossólido, as doses de 50 e 75% proporcionaram maiores IQD.

Na comparação dos resíduos não inoculados, os substratos compostos com 75% de biossólido proporcionaram maiores MSPA que os compostos com biocarvão, nas doses de 25 e 50% não houve diferença significativa entre os resíduos (Figura 3). Para MSR e MST não houve diferença entre os resíduos em nenhuma dose. Para a AF, apenas na dose de 25% houve diferença significativa entre os resíduos, com o biossólido proporcionando maior AF. Na avaliação do IR das mudas não houve diferença significativa entre o biossólido e o biocarvão, em nenhuma dose. Apenas a 75% houve diferença significativa de IQD entre os resíduos, com o substrato com biossólido proporcionando maior índice.

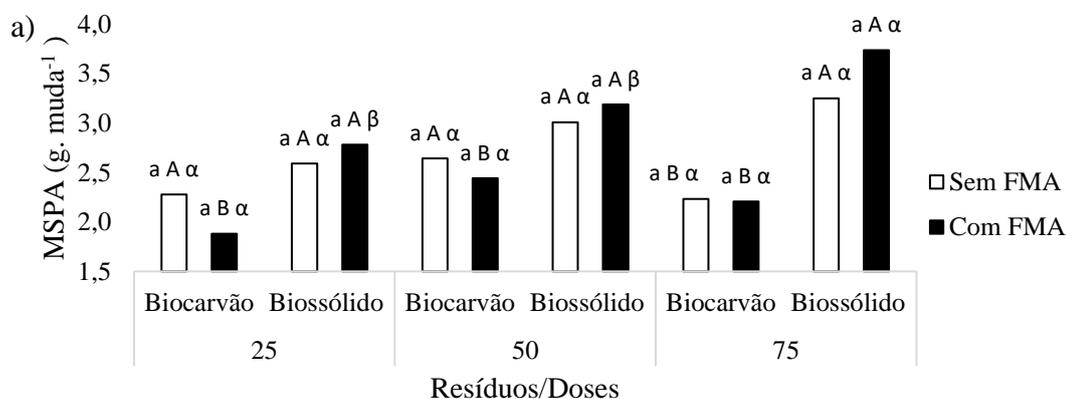


Figura 3. Parâmetros de avaliação de qualidade das mudas de *Senna multijuga* em função do desdobramento dos fatores tipo de resíduo usado como substrato, inoculação com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e doses, aos 121 dias após a semeadura. (Continua).

Médias seguidas por letras iguais, minúsculas na mesma dose e mesmo resíduo, maiúsculas na mesma dose e diferente resíduo, e letras gregas em diferentes doses e o mesmo resíduo, não diferem entre si pelo teste F da análise de variância, a 5% de probabilidade. MSPA = massa de matéria seca da parte aérea; MSR = massa de matéria seca radicular; MST = massa de matéria seca total; AF = área foliar; IR = Índice de Robustez; IQD = Índice de qualidade de Dickson. $\alpha > \beta$.

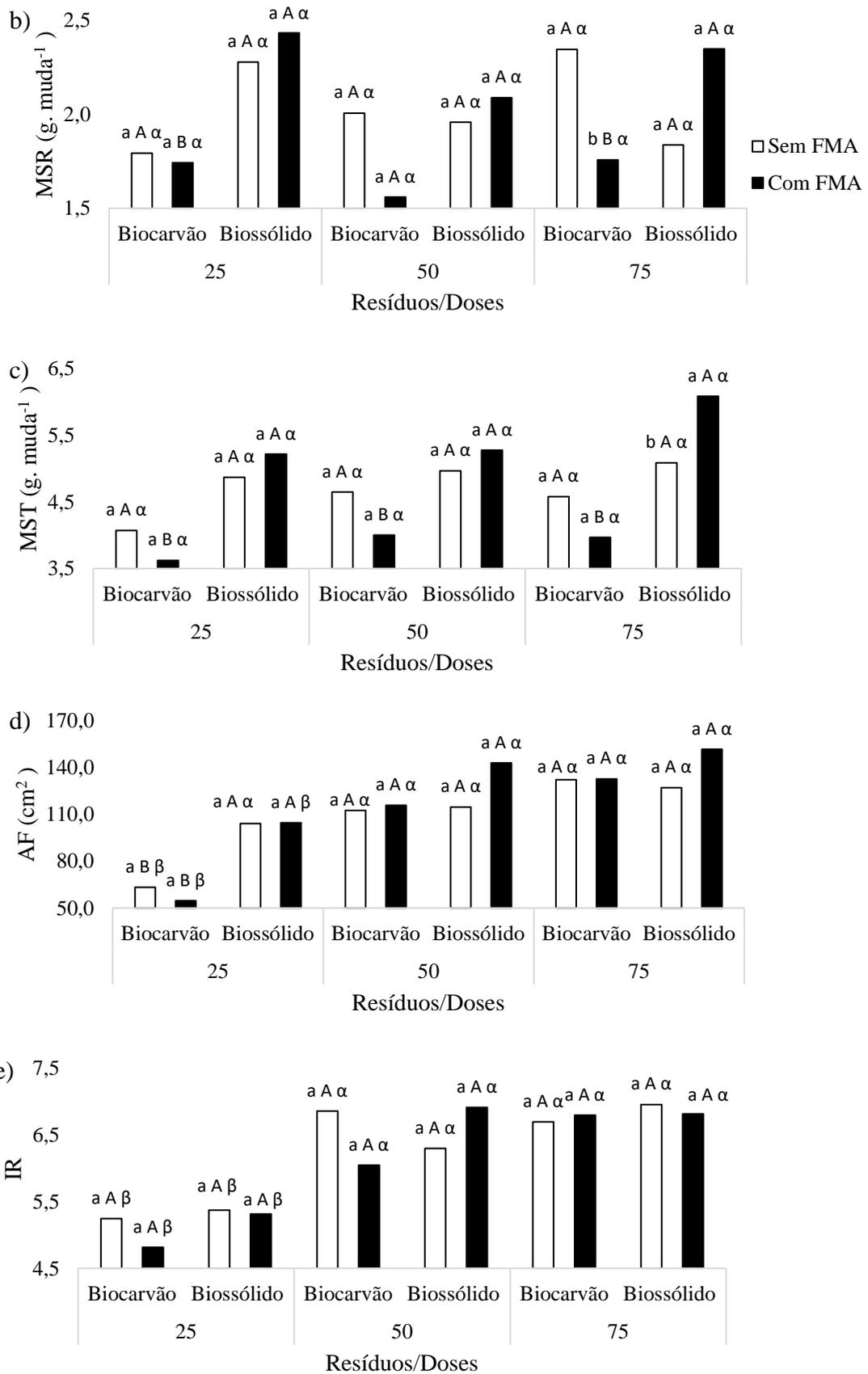


Figura 3. Continuação.

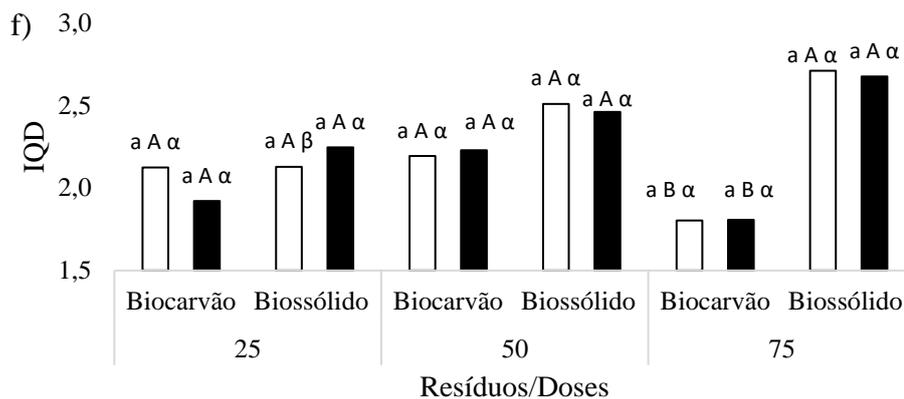


Figura 3. Continuação.

Em relação às massas secas e índices de qualidades das mudas produzidas nos substratos inoculados e as doses dos resíduos, não houve diferença significativa de MSPA, MSR e MST entre as doses do biocarvão (Figura 3). Para o substrato com bioossólido, apenas a MSPA apresentou diferença entre as doses, com maior valor a 75%. Para os parâmetros AF e IR, as doses de 50 e 75% proporcionaram médias superiores para o biocarvão e bioossólido. Em relação ao IQD não houve diferença significativa entre as doses, para ambos os resíduos (Figura 3).

Na comparação entre os diferentes resíduos inoculados em cada dose, observou-se uma superioridade das médias para os substratos com bioossólido, sendo essas estatisticamente MSPA e MST (25, 50% e 75%), MSR (25,75%), IQD (75%) e AF (25%).

As maiores MSPA e IQD das mudas produzidas a 75% de bioossólido em relação àquelas do biocarvão, estão relacionadas com o aumento do teor de nutrientes observado com o aumento da dose desse resíduo. Resultado semelhante foi obtido por Siqueira et al. (2018) que ao avaliarem o uso do bioossólido na produção de mudas de *Lafoensia glyptocarpa*, observaram que os tratamentos compostos acima de 75% de bioossólido apresentaram mudas com maior acúmulo de MSPA. O aumento da AF proporciona maior superfície de absorção da radiação solar (SANQUETTA et al., 2014), sendo essa responsável pelo processo da fotossíntese e crescimento das mudas, uma vez que é a fonte essencial e direta de energia para elas.

Todos os substratos apresentaram mudas com índice de robustez (IR) dentro da faixa estabelecida por Carneiro (1995), de 5,4 a 8,1. O IR reflete a maior resistência e melhor fixação da muda ao solo (ARAÚJO et al., 2014) e verifica a possível ocorrência de um estiolamento quando estas apresentam uma alta relação de altura e diâmetro (CARNEIRO, 1995). Dickson et al (1960) consideram 0,20 como um valor mínimo para o IQD, e quanto maior o seu valor melhor será o padrão de qualidade das mudas. Assim, para todos os substratos, com bioossólido ou biocarvão, as mudas apresentaram médias de IQD acima do valor mínimo estabelecido.

Observou-se que a inoculação com FMA proporcionou significativamente apenas o aumento da altura das mudas aos 63 dias para o substrato com 75% de biocarvão. Nos substratos com bioossólido, observou-se o aumento do diâmetro aos 63 dias (Figura 2b) e ganho de biomassa total na dose de 75% (Figura 3c). Lara (2014), avaliaram o crescimento de mudas de *Senna multijuga* e verificaram que a inoculação com FMA proporcionou maior crescimento em altura e diâmetro do coleto. Lima et al. (2015) constataram que o uso do inóculo contendo *Gigaspora margarita*, *Rhizoglyphus clarum* e *Claroideoglyphus etunicatum* proporcionou incrementos em diâmetro, massa de matéria seca e altura em mudas de cedro – australiano.

De forma geral, ao relacionar todos os tratamentos, inclusive com o controle (solo não inoculado e inoculado), os maiores parâmetros de crescimento e qualidade das mudas foram obtidos nos tratamentos com bio sólido a 50 e 75%, sendo os inoculados superiores (Anexo A).

Em relação ao teor nutricional foliar das mudas de *Senna multijuga*, para o cálcio total (Ca total), potássio (K), magnésio (Mg) e fósforo (P) foram de 19,63 a 31,44 g.kg⁻¹ e 18,74 a 26,12 g.kg⁻¹, de 4,78 a 6,11 g.kg⁻¹ e 5,46 a 6,65 g.kg⁻¹, de 1,80 a 2,55 g.kg⁻¹ e de 2,08 a 2,38 g.kg⁻¹, de 2,04 a 3,03 g.kg⁻¹ e 2,03 a 2,68 g.kg⁻¹, para as mudas produzidas nos substratos contendo biocarvão e bio sólido, respectivamente (Figura 4).

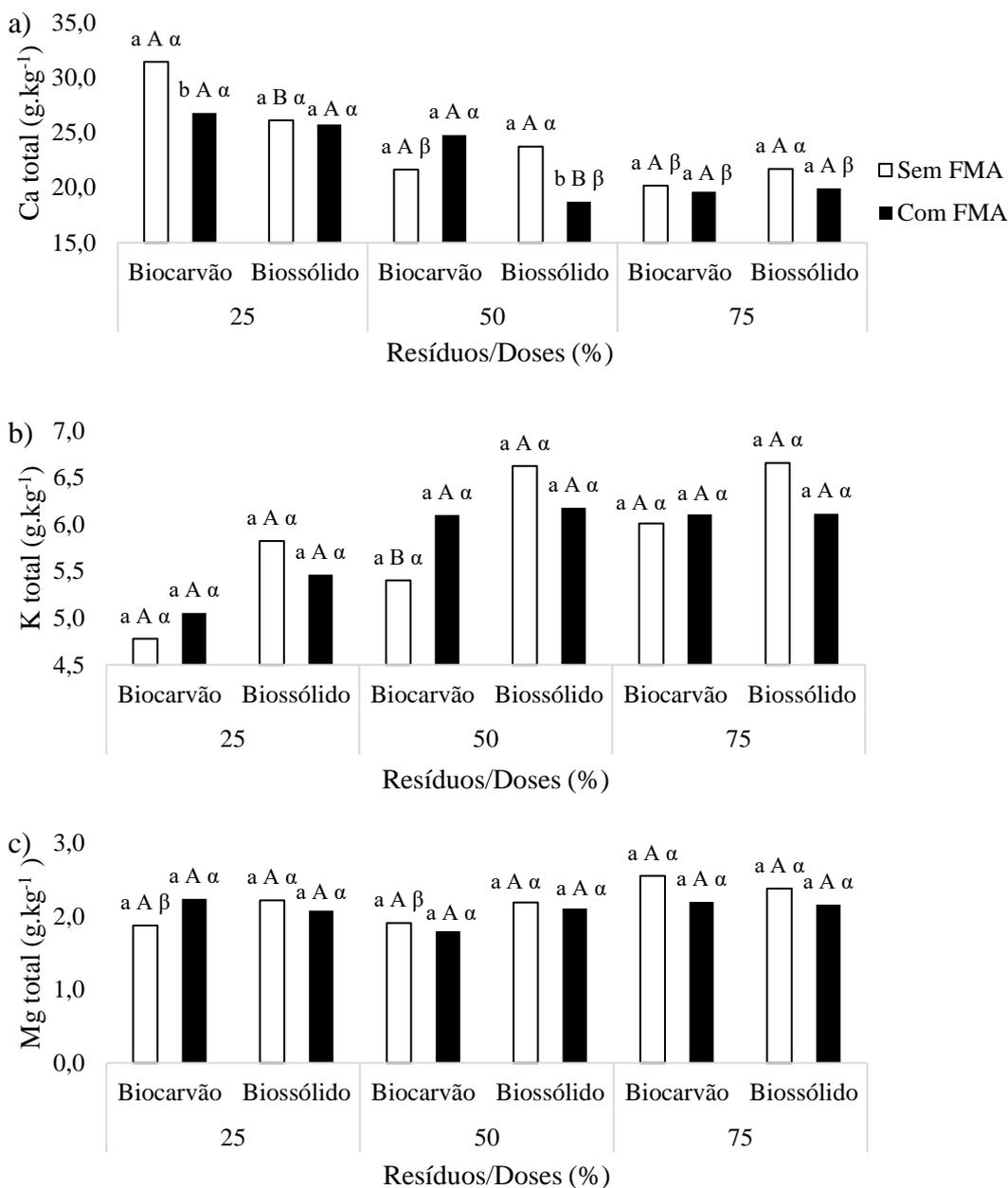


Figura 4. Teor nutricional (g.kg⁻¹) nas folhas de mudas de *Senna multijuga* aos 121 dias após a semeadura em função do desdobramento dos fatores tipo de resíduo usado como substrato, inoculação com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e doses. (Continua).

Médias seguidas por letras iguais, minúsculas na mesma dose e mesmo resíduo, maiúsculas na mesma dose e diferente resíduo, e letras gregas em diferentes doses e o mesmo resíduo, não diferem entre si

pelo teste F da análise de variância, a 5% de probabilidade. Ca total= cálcio total; K total= potássio total; Mg total= magnésio total; P total= fósforo total. $\alpha > \beta$.

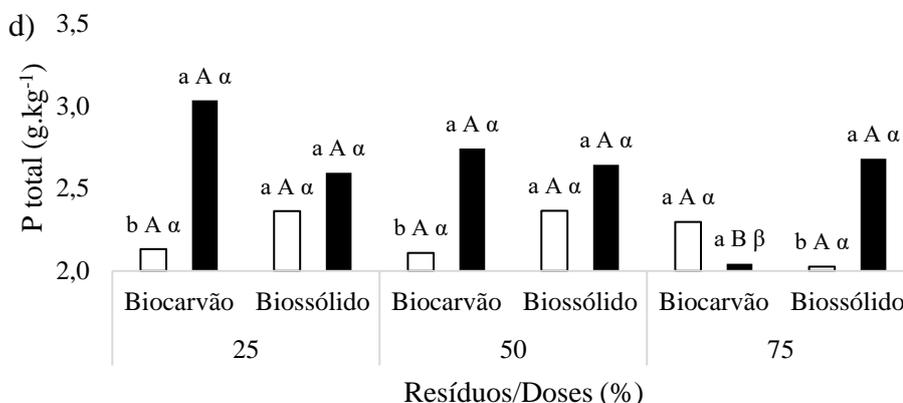


Figura 4. Continuação.

Em relação ao teor nutricional foliar das mudas de *Senna multijuga*, para os substratos não inoculados compostos com biocarvão observou-se diferença entre as doses apenas para o Ca e Mg (Figura 4). Para os compostos com bioossólido, não houve diferença significativa entre os teores de nutrientes avaliados em relação as doses. Nos substratos inoculados, os compostos com biocarvão, observou-se teores de Ca e P inferiores na dose de 75%. No bioossólido foi observada diferença apenas para o Ca, com médias inferiores a 50 e 75% (Figura 4). Na comparação entre os diferentes resíduos inoculados em cada dose, observou-se uma superioridade do teor de P (75%) para os substratos com bioossólido.

Observou-se que a inoculação com FMA proporcionou significativamente o aumento do teor de P foliar para os substratos com 25% e 50% de biocarvão, e 75% de bioossólido.

6.4 Avaliação micorrízica das mudas

De acordo com a classificação de Zangaro et al. (2005), todos os substratos contendo biocarvão inoculado e os substratos contendo 25 e 50% de bioossólido inoculado apresentaram raízes com baixa colonização (20 a 39%), e a 75% de bioossólido muito baixa colonização (1 a 19%) (Figura 5). A porcentagem de colonização apresentada nas raízes das mudas dos compostos com bioossólido sem inoculação, possivelmente ocorreu devido à contaminação dentro da casa de vegetação durante o período do experimento (Figura 5).

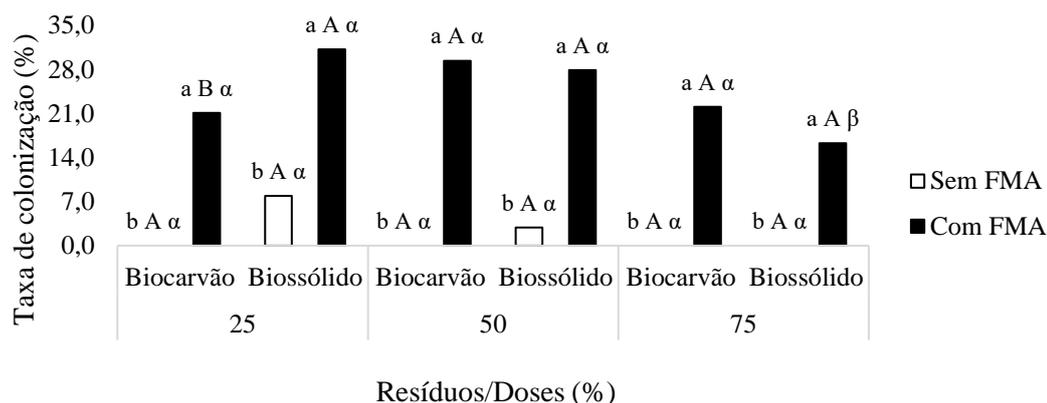


Figura 5. Porcentagem do comprimento de raízes finas (diâmetro menor que 1mm) colonizadas com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) aos 121 dias após o plantio.

Médias seguidas por letras iguais, minúsculas na mesma dose e mesmo resíduo, maiúsculas na mesma dose e diferente resíduo, e letras gregas em diferentes doses e o mesmo resíduo, não diferem entre si pelo teste F da análise de variância, a 5% de probabilidade. $\alpha > \beta$.

Em relação a porcentagem do comprimento de raízes finas colonizadas, para as raízes dos substratos com biocarvão não houve diferença estatística entre as doses (Figura 5). Para os substratos com bioossólido, as doses de 25 e 50% proporcionaram maiores porcentagens de colonização. O bioossólido proporcionou maior porcentagem de colonização que o biochar a 25% (31,2%). Nas outras doses, não houve diferença significativa entre os resíduos.

Embora a associação micorrízica seja associada à sua capacidade de proporcionar um aumento da absorção de nutrientes do solo pelas raízes das plantas, principalmente do fósforo, elevados teores desse nutriente podem inibir a colonização. Isso parece ser um fenômeno relacionado à mecanismos auto-regulatórios da simbiose, tornando os FMA desnecessários e incompatíveis com as condições de excesso de nutrientes no solo (JAVOT et al, 2007). A baixa colonização observada nas raízes das mudas pode estar relacionada aos altos teores de P nos resíduos. O alto teor de N também pode afetar diretamente os FMA (LILLESKOV et al., 2018). No bioossólido, o aumento da dose resultou no aumento de P disponível e consequentemente em uma colonização muito baixa a 75%. Por outro lado, as concentrações de P disponível no biocarvão, que foram maiores que no bioossólido, não resultaram em diferença na taxa de colonização. A colonização micorrízica no biocarvão pode estar relacionada ao fato desse atuar como refúgio para as hifas fúngicas devido à sua natureza porosa, da alteração das propriedades físico-química dos solos e da interação planta-fungo (WARNOCK et al., 2007).

7. CONCLUSÕES

Os substratos com biocarvão de biossólido e biossólido apresentam potencial para produção de mudas de *Senna multijuga*, espécie de árvore nativa utilizada para restauração da Floresta Atlântica Brasileira. Todos os substratos utilizados apresentam concentrações de metais pesados inferiores ao máximo estabelecido pela legislação brasileira e da regulamentação da Iniciativa Internacional Biochar, apresentando-se como uma alternativa viável e segura para a reciclagem do biossólido.

O teor de nutrientes no substrato é proporcional ao aumento da dose dos resíduos, no biossólido até a dose 75% e no biocarvão até 50%. Sem a inoculação com FMA as mudas de *Senna multijuga* cultivadas nos substratos com 50% e 75% de biossólido e com 50% de biocarvão de biossólido apresentaram maior crescimento e qualidade morfológica.

A inoculação de FMA induziu um maior crescimento das mudas cultivadas nos substratos com 50% de biocarvão de biossólido e 50% de biossólido. A baixa colonização observada nas raízes das mudas pode estar relacionada aos altos teores de nutrientes nos resíduos.

Ao comparar todos os tratamentos com o controle (solo não inoculado e inoculado), os substratos com 50 e 75% de biossólido proporcionaram mudas com maior qualidade, sendo os inoculados com FMA superiores.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU JUNIOR, C. H.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T.; KIEHL, J. C. Uso agrícola de resíduos orgânicos potencialmente poluentes: propriedades químicas do solo e produção vegetal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 4, p. 391- 470, 2005.
- AGUILERA, S. M.; BORIE, G.; PEIRANO, P.; RODRIGUEZ, M.; GREZ, I.; ZUNINO, H. Chemical characterization of sewage sludges in Chile and their potential utilization as amendment to reclaim soils for forestation purposes. **Journal of Plant Nutrition**, v. 30, p. 1993-2003, 2007.
- AHMAD, M.; RAJAPAKSHA, A. U.; LIM, J. E.; ZHANG, M.; BOLAN, N.; MOHAN, D.; VITHANAGE, M.; LEE, S. S.; OK, Y. S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. **Chemosphere**, v. 99, p. 19-33, 2014.
- ALFAIA, S. S.; UGUEN, K. Fertilidade e manejo do solo. In: MOREIRA, F. M. S.; CARES, J. E.; ZANETTI, R.; STURMER, S. L. **O ecossistema solo: componentes, relações ecológicas e efeitos na produção vegetal**. Lavras: Editora UFLA, 2013. p. 75-90.
- ALHO, C. F. B. V.; CARDOSO, A. S.; ALVES, B. J. R.; NOVOTNY, E. H. Biochar and soil nitrous oxide emissions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 722-725, 2012.
- ALMEIDA, D. S. Modelos de recuperação ambiental. In: **Recuperação ambiental da Mata Atlântica**. 3 ed. Revista e Ampliada, Ilhéus: Editus, 2016, p. 100-137.
- ANTUNES, E.; SCHUMAN, J.; BRODIE, G.; JACOB, M. V.; SCHNEIDER, P. A. Biochar produced from biosolids using a single-mode microwave: Characterization of its potential for phosphorus removal. **J. Envir. Manag.** v. 196, p. 119-126, 2017.
- ARAÚJO, D. D. **Efeito do biochar de lodo de esgoto no crescimento inicial de mudas de *Erythrina velutina* willd.** 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade de Brasília, 79 p.
- ARAÚJO, E. C.; COSTA, R. S.; LOPES, E. C.; DAHER, R. F.; FERNANDES, M. E. B. Qualidade das mudas de espécies arbóreas de mangue cultivadas em viveiro e diferentes substratos. **Acta Ambiental Catarinense**, v. 11, 2014.
- ATKINSON, C. J.; FITZGERALD, J. D.; HIPPS, N. A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. **Plant Soil**, v. 337, p. 1-18, 2010.
- BAIR, D. A.; MUKOME, F. N.; POPOVA, I. E.; OGUNYOKU, T. A.; JEFFERSON, A.; HAFNER, S. C.; JOVEM, T. M. PARIKH, S. J. Sorption of Pharmaceuticals, Heavy Metals, and Herbicides to Biochar in the Presence of Biosolids. **Journal of Environment Quality**, v. 45, n. 6, p. 1998-2006, 2016.
- BEESELEY, L.; MARMIROLI, M. The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar. **Environmental Pollution**, v. 159, p. 474-480, 2011.
- BERBARA, R. L. L.; SOUZA, F. A.; FONSECA, H. M. A. C. Fungos micorrízicos arbusculares: muito além da nutrição. In: FERNANDES, M.S., **Nutrição mineral de plantas**. 9 ed. Minas Gerais: Viçosa, 2006. p. 53-88
- BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Lodo de Esgoto, impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna-SP: EMBRAPA MEIO AMBIENTE, 1ªed. 2006. 346p.
- BONFANTE-FASOLO, P. Anatomy and morphology of VA mycorrhizae. In: POWELL, C.L.; BAGYARAJ, D.J., eds. VA Mycorrhiza. **Boca Raton**, p. 5-33, 1984.

- BREWER, C. E.; CHUANG, V. J.; MASIELLO, C. A.; GONNERMANN, H.; GAO, X.; DUGAN, B.; DRIVER, L. E.; PANZACCHI, P.; ZYGOURAKIS, K.; DAVIES, C. A. New approaches to measuring biochar density and porosity. **Biomass Bioenerg.**, v. 66, p. 176-185, 2014.
- BREWER, C. E.; UNGER, R.; SCHMIDT-ROHR, K.; BROWN, R. C. Criteria to Select Biochars for Field Studies based on Biochar Chemical Properties. **Bioenerg. Res.**, v. 4, p. 312-323, 2011.
- BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and bioenergy**, v. 38, p. 68- 94, 2012.
- BRIDLE, T. R.; PRITCHARD, D. Energy and nutrient recovery from sewage sludge via pyrolysis. **Water Science & Technology**, p. 169-175, 2004.
- BRITO, V. N.; TELLECHEA, F. R.; HEITOR, L. C.; FREITAS, M. S. M.; MARTINS, M. A. Arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate fertilization on the seedling production of Paricá. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 2, p. 485-497, 2017.
- BRUNDRETT, M. C. Coevolution of roots and mycorrhizas of land plants. **New Phytol.**, v. 154, p. 275-304, 2002.
- BUDI, S. W.; SETYANINGSIH, L. Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Biochar Improved Early Growth of Neem (*Melia azedarach* Linn.) Seedling Under Greenhouse Conditions. **JMHT**, v. 19, p. 103-110, 2013.
- BUEE, M.; ROSSIGNOL, M.; JAUNEAU, A.; RANJEVA, R.; BECARD, G. The pre-symbiotic growth of arbuscular mycorrhizal fungi is induced by a branching factor partially purified from plant root exudates. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v. 13, p. 693-698, 2000.
- CABALLERO, J. A.; FRONT, R.; MARCILLA, J. A. C. A. Characterization of sewage sludges by primary and secondary pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 40-41, p. 433-450, 1997.
- CABREIRA, G. V.; LELES, P. S. S.; ALONSO, J. M.; ABREU, A. H. M. LOPES, N. F.; SANTOS, G. Biossólido como componente de substrato para produção de mudas florestais. **FLORESTA**, v. 47, n. 2, p. 165-176, 2017.
- CALDEIRA, M. V. W.; FAVALESSA, M. F.; GONÇALVES, E. O. DELARMELINA, W. M.; SANTOS, F. E. V.; VIEIRA, M. Lodo de esgoto como componente de substrato para produção de mudas de *Acacia mangium* Wild. **Comunicata Scientiae**, v. 5, n. 1, p. 34-43, 2014.
- CALDEIRA, M. V. W.; DELARMELINA, W. M.; FARIA, J. C. T., JUVANHOL, R. S. Substratos alternativos na produção de mudas de *Chamaecrista desvauxii*. **Revista Árvore**, v. 37, n. 1, 2013.
- CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V. S.; BARICHELLO, L. R.; VOGEL, H. L. M.; OLIVEIRA, L. S. Crescimento de mudas de *Eucalyptus saligna* Smith em função de diferentes doses de vermicomposto. **Revista Floresta**, v. 28, p. 19-30, 2000.
- CARMO, D. L.; SILVA, C. A. Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1211-1220, 2012.
- CARNEIRO, M. A. C.; O, J. O. S. A. C.; CURI, L. J. G. N.; VALE, F. R. Fungo micorrízico e superfosfato no crescimento de espécies arbóreas tropicais. **Scientia Forestalis**, n. 50, p. 21-36, 1996.

- CARNEIRO, J. G. A. **Produção e controle de qualidade de mudas florestais**. Curitiba: UFPR/FUPEF, 1995. 451p.
- CARVALHO, P. E. R. Pau-Cigarra: *Senna multijuga*. **Circular técnica, 92**. Colombo: Embrapa Florestas, 2004. 11 p.
- CASSINI, S.T. Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás. Rio de Janeiro: **ABES**, p. 11-52, 2003.
- CHOPPALA, G. K., BOLAN, N. S., MEGHARAJ, M., CHEN, Z., AND NAIDU, R.: The influence of biochar and black carbon on reduction and bioavailability of chromate in soils, **J. Environ. Qual.**, v. 41, p. 1175-1184, 2012.
- COLOZZI-FILHO, A.; SIQUEIRA, J. O. Micorrizas vesículo-arbusculares em mudas de cafeeiro. In: Efeitos de *Gigaspora margarita* e adubação fosfatada no crescimento e nutrição. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 10, p. 199-205, 1986.
- CUNHA, A. M.; CUNHA, G. M.; SARMENTO, R. A.; CUNHA, G. M.; AMARAL, J. F. T. Efeito de diferentes substratos sobre o desenvolvimento de mudas de *Acacia* sp. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 207-214, 2006.
- DELUCA, T. H.; MACKENZIE, M. D.; GUNDALE, M. J. **Biochar effects on soil nutrient transformations**. In: LEHMANN J. JOSEPH S. (eds) Biochar for Environmental Management. Earthscan, p. 251-269, 2009.
- DEMIRBAS, A. Relationships between carbonization temperature and pyrolysis products from biomass. **Energy Exploration & Exploitation**, v. 22, n. 6, p. 411- 420, 2004.
- DIAS, P. C.; PEREIRA, M. S. F.; MEGUMIKASUYA, M. C.; PAIVA, H. N.; OLIVEIRA, L. S.; XAVIER, A. Micorriza arbuscular e rizóbios no enraizamento e nutrição de mudas de angico-vermelho. **Revista Árvore**, v.36, n.6, p.1027-1037, 2012.
- DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **Forestry Chronicle**, v. 36, p. 10-13, 1960.
- DONG, X. L.; MA, L. Q.; LI, Y. C. Characteristics and mechanisms of hexavalent chromium removal by biochar from sugar beet tailing. **Journal of Hazardous Materials**, v. 190, p. 909-915, 2011.
- DOWNIE, A. E.; VAN ZWIETEN, L.; SMERNIK, R. J.; MORRIS, S.; MUNROE, P. R. Terra preta australis: reassessing the carbon storage capacity of temperate soils. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 140, p. 137-147, 2011.
- DOWNIE, A.; CROSKY, A.; MUNROE, P. Physical properties of biochar. Biochar for Environmental Management: **Science and Technology**, p. 13-32, 2009.
- DRAPER, K. Waste water treatment and biochar. **The Biochar Journal**, version of 19th August, 2016.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. revista e ampliada. – Brasília: Embrapa, 2017, 573 p.
- ENDERS, A.; HANLEY, K.; WHITMAN, T.; JOSEPH, S.; LEHMANN, J. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. **Bioresource Technology**, v. 114, p. 644-653, 2012.
- FAGERIA, N. K. **The Use of Nutrients in Crop Plants**. CRC Press, Boca Raton, FL, 2009.

- FARIAS, W. M. **Biochar de lodo de esgoto como condicionador do solo: efeitos nas propriedades agrônômicas, fertilidade do solo e qualidade da matéria orgânica**. Tese (Doutorado em Agronomia). Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2018; 119 p.
- FARIA, J. C. T.; CALDEIRA, M. V. W.; DELARMELINA, W. M.; LACERDA, L. C.; GONÇALVES, E. O. Substratos à base de lodo de esgoto na produção de mudas de *Senna alata*. **Comunicata Scientiae**, v. 4, n. 4, p. 342-351, 2013.
- FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V.; JÜRGENSEN, D. Destino final do lodo. In.: Programa de Pesquisa em Saneamento Básico - PROSAB. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Rio de Janeiro, 1999. p.26-28.
- FIGUEIREDO, C. C.; FARIAS, W. M.; COSER, T. R.; PAULA, A. M.; SILVA, M. R. S.; PAZ-FERREIRO, J. Sewage sludge biochar alters root colonization of mycorrhizal fungi in a soil cultivated with corn. **European Journal of Soil Biology**, v. 93, 103092, 2019.
- FLORES-AYLAS, W. W.; SAGGIN-JUNIOR, O. J.; SIQUEIRA, J. O.; DAVIDE, A. C. Efeito de *Glomus etunicatum* e fósforo no crescimento inicial de espécies arbóreas em semeadura direta. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 38, n. 2, p. 257-266, 2003.
- FONSECA, E. P.; VALÉRI, S. V.; MIGLIORANZAM E.; FONSECA, N. A. N.; COUTO L. Padrão de qualidade de mudas de *Trema micrantha* (L.) Blume, produzidas sob diferentes períodos de sombreamento. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, p. 515-523, 2002.
- FREITAS, E. V. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; BIONDI, C. M.; SILVA, J. P. S.; SOUZA, A. P. Dessorção e lixiviação de chumbo em espodossolo tratado com agentes quelantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, 2009.
- GAI, X.; WANG, H.; LIU, J.; ZHAI, L.; LIU, S.; REN, T.; LIU, H. Effects of feedstock and pyrolysis temperature on biochar adsorption of Ammonium and nitrate. **Plos One**, v. 9, p. 12. 2014.
- GIMENO-GARCIA, E.; ANDREU, V.; BOLUDA, R. Heavy metals incidence in the application of organic fertilizers and pesticides to rice farming soils. **Environmental Pollution**, 92, p. 19-25, 1996.
- GIOVANNETTI, M.; MOSSE, B. An evaluation of techniques to measure vesicular-arbuscular mycorrhizal infection in roots. **The New Phytologist**, v. 84, n. 3, p. 484-500, 1980.
- GOMES, D. R.; CALDEIRA, M. V. W.; DELARMELINA, W. M.; GONÇALVES, E. O.; TRAZZI, P. A. Lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de *Tectona grandis* L. **Cerne**, v. 19, n. 1, p. 123-131, 2013.
- GONÇALVES, J. L. M. et al. **Produção de mudas de espécies nativas: substrato, nutrição, sombreamento e fertilização**. In: GOLÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Orgs.). **Nutrição e fertilização florestal**, 2005. p. 309-350.
- GONÇALVES, J. L. M.; SANTARELI, E. G.; MORAES NETO, S. P.; MANARA, M. P. **Produção de mudas de espécies nativas: substrato, nutrição, sombreamento e fertilização**. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, p.309-350, 2000.
- GONZAGA, M. I. S.; MACKOWIAK, C.; ALMEIDA.; CARVALHO JÚNIOR, J. I. T. Sewage sludge derived biochar and its effect on the growth and morphological traits of *Eucalyptus grandis* w.hill ex maiden seedlings. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 687-695, 2018.

- GONZALEZ-GIL, L.; PAPA, M.; FERETTI, D.; CERETTI, E.; MAZZOLENI, G.; STEIMBERG, N.; CARBALLA, M. Is anaerobic digestion effective for the removal of organic micropollutants and biological activities from sewage sludge? **Water Res.**, v. 102, p. 211-220, 2016.
- GRACE, C.; STRIBLEY, D. P. A safer procedure for routine staining of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. **Mycological Research**, v. 95, n. 10, p. 1160-1162, 1991.
- HALIM, M. ; CONTE, P. ; PICCOLO, A. Potential availability of heavy metals to phytoextraction from contaminated soils induced by exogenous humic substances. **Chemosphere**, v. 52, p. 26-75, 2002.
- HARRISON, M.J. Molecular and cellular aspects of the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Ann. Rev. Plant Physiol.* **Plant Molec. Biol.**, v. 50, p. 361-389, 1999.
- HE, Y. D.; ZHAI, Y. B.; LI, C. T.; YANG, F.; CHEN, L.; FAN, X. P.; PENG, W. F.; FU, Z. M. The fate of Cu, Zn, Pb and Cd during the pyrolysis of sewage sludge at different temperatures. **Environmental Technology**, v. 31, n. 5, p. 567-574, 2010.
- HE, Z. L.; YANG, X. E.; STOFFELLA, P. J. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v.19, p.125-140, 2005.
- HOFFMAN, T. C.; ZITOMER, D. H.; MCNAMARA, P. J. Pyrolysis of wastewater biosolids Significantly Reduces Estrogenicity. **Journal of Hazard**, p. 579-584, 2016.
- HOSSAIN, M. K.; STREZOV, V.; NELSON, P. F. Comparative assessment of the effect of wastewater sludge biochar on growth, yield and metal bioaccumulation of cherry tomato. **Pedosphere**, v. 25, p. 680-685, 2015.
- HOSSAIN, M. K.; STREZOV, V.; CHAN, K. Y.; NELSON, P. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*). **Chemosphere**, v. 78, p. 1167-1171, 2010.
- INGUANZO, M.; DOMINGUEZ, A.; MENENDEZ, J. A.; BLANCO, C. G.; PIS, J. J. On the pyrolysis of sewage sludge: the influence of pyrolysis conditions on solid, liquid and gas fractions. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 63, p. 209-222, 2002.
- INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE. **Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil**. 2013.
- IPPOLITO, J. A.; LAIRD, D. A.; BUSSCHER, W. J. Environmental benefits of biochar. **Journal of Environmental Quality**, v. 41, p. 967-972, 2012.
- IRFAN, M.; CHEN, Q.; YUE, Y.; PANG, R.; LIN, Q.; ZHAO, X.; CHEN, H. Co-production of biochar, bio-oil and syngas from halophyte grass (*Achnatherum splendens* L.) under three different pyrolysis temperatures. **Bioresour. Technol.**, v. 211, p. 457-463, 2016.
- JAVOT, H.; PUMPLIN, N.; HARRISON, M. J. Phosphate in the arbuscular mycorrhizal symbiosis: transport properties and regulatory roles. *Plant, Cell & Environment*, v. 30, p. 310-322, 2007.
- JOO, J. H.; HASSAN, S. H. A.; OH, S. E. Comparative study of biosorption of Zn²⁺ by *Pseudomonas aeruginosa* and *Bacillus cereus*. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 64, p. 734-741, 2010.
- JOSEPH, S. D.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; LIN, Y.; MUNROE, P.; CHIA, C.H.; HOOK, J.; VAN ZWIETEN, L.; KIMBER, S.; COWIE, A.; SINGH, B.P.; LEHMANN, J.; FOIDL, N.;

- SMERNIK, R.J.; AMONETTE, J. E. An investigation into the reactions of biochar in soil. **Australian Journal of Soil Research**, v. 48, p. 501-515, 2010.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 3 ed. Boca Raton: CRC, 2001. 413 p.
- KEILUWEIT, M.; NICO, P. S.; JOHNSON, M. G.; KLEBER, M. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). **Environmental Science & Technology**, v. 44, p. 1247-1253, 2010.
- KHAN, S.; CHAO, C.; WAQAS, M.; ARP, H. P. H.; ZHU, Y. G. Sewage sludge biochar influence upon rice (*oryza sativa*) yield, metal bioaccumulation and greenhouse gas emissions from acidic paddy soil. **Environmental Science & Technology**, v. 47, p. 8624-8632, 2013.
- KIRIACHEK, S. G.; AZEVEDO, L. C. B.; PERES, L. E. P.; LAMBAIS, M. R. Regulação do desenvolvimento de micorrizas arbusculares. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1-16, 2009.
- KOIDE, R. T. **Biochar-Arbuscular Mycorrhiza Interaction in Temperate Soils**. Mycorrhizal Mediation of Soil: Fertility, Structure, and Carbon Storage, p. 461-477, 2017.
- KOOKANA, R.S.; SARMAH, A.K.; ZWIETEN, L.; VAN; KRULL, E.; SINGH, B. Biochar application to soil: agronomic and environmental benefits and unintended consequences. **Advances in Agronomy**, v. 112, p. 103-143, 2011.
- KOSKE, R. E.; GEMMA, J. N. A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. **Mycological Research**, v. 92, n. 4, p. 486-488, 1989.
- KRATZ, D.; WENDLING, I. Produção de mudas de *Eucalyptus dunnii* em substratos renováveis. **Floresta**, v. 43, n. 1, p. 125-136, 2013.
- KREFTA, S. M.; BRUN, E. J.; FACCHI, S. P. Substratos orgânicos para produção de mudas de Juqueri (*Senegalia polyphylla* (DC) Britton & Rose). In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 17, 2012, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UTFPR, 2012.
- LAMBAIS, M. R.; RIOS-RUIZ, W. F.; ANDRADE, R. M. Antioxidant responses in bean (*Phaseolus vulgaris*) roots colonized by arbuscular mycorrhizal fungi. **New Phytol.**, v. 160, p. 421-428, 2003.
- LANGUER, M. P. **Estudo da produção de bio-óleo a partir da pirólise de lodos sanitários**. 2015. Dissertação (mestrado)- Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. 101 p.
- LANZA, V. C. V. **Caderno técnico de reabilitação de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos**. Belo Horizonte. Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2009. 28p.
- LARA, R. O. **Sobrevivência e crescimento de plantas autóctones inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares em substratos da mineração de ferro**. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal) - Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, MG, 2014, 78f.
- LATAWIEC, A. E.; STRASSBURG, B. N.; JUNQUEIRA, A. B.; ARAUJO, E.; MORAES, L. F. D.; PINTO, H. A. N.; CASTRO, A.; RANGEL, M.; MALAGUTI, G. A.; RODRIGUES, A. F.; BARIONI, L. G.; NOVOTNY, E. H.; CORNELISSEN, G. C.; MENDES, M.; BATISTA, N.; GUERRA, J. G.; ZONTA, E.; JAKOVAC, C.; HALE, S. E. Biochar amendment improves degraded pasturelands in Brazil: environmental and cost-benefit analysis. **Scientific Reports**, v. 9, 11993, 2019.

- LEHMANN, J., JOSEPH, S. **Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation**, second edition. Routledge, Abingdon. 2015. 976 p.
- LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for Environmental Management: An Introduction. **Science and Technology**, p. 1-12, 2009.
- LEHMANN, J. Bio-energy in the black. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 5, p. 381-387, 2007.
- LILLESKOV, E. A.; KUYPER, T. W. ; BIDARTONDO, M. I. ; HOBBIIE, E. A. Atmospheric nitrogen deposition impacts on the structure and function of forest mycorrhizal communities: A review. **Environmental Pollution**, v. 246 , p. 148-162, 2018.
- LIMA, K. B.; RITER NETTO, A. F.; MARTINS, M. A.; FREITAS, M. S. M. Crescimento, acúmulo de nutrientes e fenóis totais de mudas de cedro-australiano (*Toona ciliata*) inoculadas com fungos micorrízicos. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 4, p. 853-862, 2015.
- LIU, T.; LIU, B.; ZHANG. W. Nutrients and heavy metals in biochar produced by sewage sludge pyrolysis: Its application in soil amendment. **Polonian Journal of Environmental Studies**, v. 23, n. 1, p. 271-275, 2014.
- LLORET, E.; PASCUAL, J. A.; BRODIE, E. L.; BOUSKILL, N. J.; INSAM, H.; JUÁREZ, M. F. D.; GOBERNA, M. Sewage sludge addition modifies soil microbial communities and plant performance depending on the sludge stabilization process. **Applied Soil Ecology**, v. 101, p. 37-46, 2016.
- LOBO, T. F., GRASSI FILHO, H.; BULL, L. T.; MOREIRA, L. L. Q. Manejo do lodo de esgoto e nitrogênio mineral na fertilidade do solo ao longo do tempo. Semina: **Ciências Agrárias**, v. 34, n. 6, p. 2705-2726, 2013.
- LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova Odessa: Plantarum, 1992. 352p.
- LUO, Y., GUO, W., NGO, H.H., NGHIEM, L.D., HAI, F.I., ZHANG, J., WANG, X.C., 2014. A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. **Sci. Total Environ.**, v. 473, p. 619-641, 2014.
- MELO, L. C. A.; COSCIONE, A. R.; ABREU, C. A.; PUGA, A. P.; CAMARGO, O. A. Influence of pyrolysis temperature on cadmium and zinc sorption capacity of sugar cane straw-derived biochar. **BioResources**, v. 8, p. 4992-5004, 2013.
- MELO, B.; MENDES, A. N. G.; GUIMARÃES, P. T. G. Tipos de fertilizações e diferentes substratos na produção de mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) em tubetes. **Biosci. J.**, v. 19, n. 1, p. 33-42, 2003.
- MICKAN, B. S.; ABBOTT, L. K.; STEFANOVA, K.; SOLAIMAN, Z. M. Interactions between biochar and mycorrhizal fungi in a water-stressed agricultural soil. **Mycorrhiza**, v. 26, p. 565-574, 2016.
- MILLER-ROBBIE, L.; ULRICH, B. A.; RAMEY, D. F.; SPENCER, K. S.; HERZOG, S. P.; CATH, T. Y.; STOKES, J. R.; HIGGINS, C. P. Life cycle energy and greenhouse gas assessment of the co-production of biosolids and biochar for land application. **Journal of Cleaner Production**, v. 91, p. 118–127. 2015.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. RESOLUÇÃO Nº 375, DE 29 DE AGOSTO DE 2006. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. CONSELHO NACIONAL DO MEIO

- AMBIENTE-CONAMA, 2006. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, n. 167, p. 141-146, 2006.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do solo**. 2. ed. Editora UFLA, 2006. 729 p.
- NASCIMENTO, C. W. A.; BARROS, D. A. S.; MELO, E. E. C.; OLIVEIRA, A. B.; Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 8, n. 385-392, 2004.
- NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. F.; CARVALHO, M. T. M.; MADARI, B. E. Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use – a critical review. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 39, p. 321-344, 2015.
- NOVOTNY, E. H.; MADARI, B. E.; MAIA, C. M. B. F.; MANGRICH, A. S. O Potencial do biocarvão (Carbono pirogênico) no sequestro de carbono; na ciclagem de nutrientes; no crescimento das plantas e no estímulo de processos microbiológicos. FERTBIO 2012. **ANAIS...Maceió**, 2012.
- NOVOTNY, E. H. et al. Lessons from the Terra Preta de Índios of the Amazon region for the utilisation of charcoal for soil amendment. **J. Braz. Chem. Soc.** v. 20, n. 6, 2009.
- NOVOTNY, E. H. **Estudos espectroscópicos e cromatográficos de substâncias húmicas de solos sob diferentes sistemas de preparo**. 2002. Tese (Doutorado), Instituto de química de São Carlos, Universidade de São Paulo, 215 p.
- OLIVEIRA, C. A.; ALVES, V. M. C.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; SCOTTI, M. R.; CARNEIRO, N. P.; GUIMARÃES, C. T.; ^BSCHAFFERT, R. E.; SÁ, N. M. H. Phosphate solubilizing microorganisms isolated from rhizosphere of maize cultivated in an oxisol of the Brazilian Cerrado Biome. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, p. 1782-1787, 2009.
- OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. **Carvão vegetal - destilação, carvoejamento, propriedades e controle de qualidade**. Centro Tecnológico de Minas Gerais, p. 173, 1982.
- PADOVANI, V. C. R. **Composto de lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de árvores nativas e exóticas**. 2006. 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- PAZ-FERREIRO, J.; NIETO, A.; MENDEZ, A.; ASKELAND, M. P. J.; GASCÓ, G. Biochar from Biosolids Pyrolysis: A Review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, p. 956, 2018.
- PAZ-FERREIRO, J.; GASCÓ, G.; GUTIÉRREZ, B.; MÉNDEZ, A. Soil biochemical activities and the geometric mean of enzyme activities after application of sewage sludge and sewage sludge biochar to soil. **Biol Fertil Soils**, v. 48, p. 511-517, 2012.
- PERRING, M. P., R. J. STANDISH, J. N. PRICE, M. D. CRAIG, T. E. ERICKSON, K. X. RUTHROF, A. S. WHITELEY, L. E. VALENTINE, AND R. J. HOBBS. 2015. Advances in restoration ecology: rising to the challenges of the coming decades. **Ecosphere**, v. 6, 2015.
- PETTER, F. A.; MADARI, B. E.; SILVA, M. A. S.; CARNEIRO, M. A. C.; CARVALHO, M. T.; MARIMON JR, B. H.; PACHECO, L. P. Soil fertility and upland rice yield after biochar application in the Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 699-706, 2012.
- PIVETA, G.; MENEZES, V. O.; PEDROSO, D. C.; MUNIZ, M. F. B.; BLUME, E.; WIELEWICKI, A. P. Superação de dormência na qualidade de sementes e mudas: influência

na produção de *Senna multijuga* (L. C. Rich.) Irwin & Barneby. **Acta Amazônica**, v. 40, p. 281-288, 2010.

POGGIANI, F.; GUEDES, M. C.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade de biossólidos em plantações florestais: I. Reflexo no ciclo dos nutrientes. In: BETIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000.

RAJKOVICH, S.; ENDERS, A.; HANLEY, K.; HYLAND, C.; ZIMMERMAN, A. R.; LEHMANN, J. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. **Biol Fertil Soils**, v. 48, p. 271-284, 2011.

RALEBITSO-SENIOR, T. K.; ORR, C. H. **Microbial Ecology Analysis of Biochar-Augmented Soils: Setting the Scene**. In: Biochar Application - Essential Soil Microbial Ecology, p. 1-40, 2016.

RILLIG, M.C.; MUMMEY, D. L. Mycorrhizas and soil structure. **New Phytologist**, v. 171, p. 41-53, 2006.

RITCHIE, G. A.; LANDIS, T. D. **The container tree nursery manual**. RNGR. 2008.

RODRIGUES, L. A.; BARROSO, D. G.; FIQUEIREDO, F. A. M. M. A. Fungos micorrízicos arbusculares no crescimento e na nutrição mineral de mudas de *Tectona grandis* L. F. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 25-34, 2018.

ROJAS, E. P.; SIQUEIRA, J. O. Micorriza arbuscular e fertilização do solo no desenvolvimento pós-transplante de mudas de sete espécies florestais. **Pesq. agropec. bras., Brasília**, v. 35, p. 103-114, 2000.

ROSS, J. **Fate of Micropollutants During Pyrolysis of Biosolids**. 2014. Master's Theses. 286 p.

ROY, P.; DIAS, G. M. Prospects of pyrolysis technologies in bioenergy sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, p. 59-69, 2017.

SANGIN JUNIOR, O. J.; SILVA, E. M. R. Micorriza arbuscular - Papel, funcionamento e aplicação da simbiose. In: AQUINO, A. M. de; ASSIS, R. L. de (Ed.). **Processos biológicos no sistema solo-planta: ferramentas para uma agricultura sustentável**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Seropédica: Embrapa Agrobiologia, cap. 5, p. 101-149, 2005.

SAGGIN JÚNIOR, O. J.; SIQUEIRA, J. O.; GUIMARÃES, P. T. G.; OLIVEIRA, E. Interação fungos micorrízicos versus superfosfato e seus efeitos no crescimento e teores de nutrientes do café em solo não fumigado. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 18, p.27-36, 1994.

SANTOS, R. S.; SCORIZA, R. N.; SILVA, E. M. R.; SAGGIN JÚNIOR, O. J. Selection of mycorrhizal fungi for the initial growth of *Albizia polycephala*. **Agrária**, v.11, n. 2, p. 98-103, 2016.

SANTOS, F. E.; VKUNZ, S. H.; CALDEIRA, M. V. W.; AZEVEDO, C. H. S.; RANGEL, O. J. P. Características químicas de substratos formulados com lodo de esgoto para produção de mudas florestais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 971-979, 2014.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P. D.; CADORI, G. C.; COSTA JUNIOR, S.; MACEDO, J. H. P. Conversion efficiency of photosynthetically active radiation intercepted in *Eucalyptus dunii* Maiden seedlings plant mass related to plant density and growth environment. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 104, p. 573-580, 2014.

- SARWAR, N.; SAIFULLAH. MALHI, S. S.; ZIA, M. H.; NAEEM, A.; BIBI, S.; FARID, G. Role of plant nutrients in minimizing cadmium accumulation by plants. **Journal of the Science Food and Agriculture**, v. 90, p. 925-937, 2010.
- SCHUBLER, A.; SCHWARZOTT, D.; WALKER, C. A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and Evolution. **Mycological Research**, v. 105, p. 1413-1421, 2001.
- SETH, C. S.; MISRA, V.; CHAUHAN, L. K. S. Accumulation, detoxification, and genotoxicity of heavy metals in Indian mustard (*Brassica juncea* L.). **International Journal of Phytoremediation**, v. 14, p. 1-13, 2012.
- SHACKLEY, S.; SOHI, S.; IBARROLA, R.; HAMMOND, J.; MASEK, O.; BROWNSORT, P.; HASZELDINE, S. Biochar as a tool for climate change mitigation and soil management. **Encyclopedia of Sustainability Science and Technology**, p. 61, 2011.
- SILVA, E. P.; FERREIRA, P. A. A.; FURTINI-NETO, A. E.; SOARES, C. R. F. S. Micorrizas arbusculares e fósforo no desenvolvimento de mudas de cedro-australiano. **Ciência Florestal**, v. 27, p. 1269-1281, 2017.
- SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; FERRAZ, A. V.; SIXEL, R. M. M.; BRITO, J. O. Balanço nutricional, produção de óleo essencial e madeira de *Corymbia citriodora* Hill & Johnson com aplicação de lodo de esgoto e fertilizante mineral. **Ciência Florestal**. v. 22, n. 4, p. 835-845, 2012.
- SILVA, C. F.; PEREIRA, M. G.; SILVA, E. M. R.; CORREIA, M. E. F.; SANGGIN-JUNIOR, O. J. Fungos micorrízicos arbusculares em áreas no entorno do parque estadual da serra do mar em Ubatuba (SP). **Caatinga**, v. 19, p. 01-10, 2006.
- SILVA, R. F.; ANTONIOLLI, Z. I.; ANDREAZZA, R. Efeito da inoculação com fungos ectomicorrízicos na produção de mudas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maidem em solo arenoso. **Ciência Florestal**, v. 13, n. 1, p. 33-42, 2003.
- SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; SHARMA, R. D. Alternativa agronômica para o biossólido produzido no distrito federal. I – Efeito na produção de milho e na adição de metais pesados em latossolo no cerrado. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 26, p. 487-495, 2002.
- SINGH, B. P.; COWIE, A. L. **A novel approach, using ¹³C natural abundance, for measuring decomposition of biochars in soil**. In: LD Currie, Yates, L.J. (Eds.), Carbon and Nutrient Management in Agriculture, Fertilizer and Lime Research Centre Workshop Proceedings. Massey University, Palmerston North, New Zealand, p. 549, 2008.
- SIQUEIRA, D. P.; CARVALHO, G. C. M. W.; BARROSO, D. G.; MARCIANO, C. R. Lodo de esgoto tratado na composição de substrato para produção de mudas de *Lafoensia glyptocarpa*. **FLORESTA**, v. 48, n. 2, p. 277-284, 2018.
- SIQUEIRA, J. O.; SOARES, C. R. F. S.; SANTOS, J. G. D. dos; CARNEIRO, M. A. C. Micorrizas e degradação do solo: caracterização, efeitos e ação recuperadora. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 5, p. 219-306, 2007.
- SIQUEIRA, J. O.; SAFIR, G. R.; NAIR, M. G. Stimulation of vesicular-arbuscular mycorrhiza formation and growth of white clover by flavonoid compounds. **New Phytol.**, 118:187, 1991.
- SIQUEIRA, J. O.; SYLVIA, D. M.; GIBSON, J.; HUBBELL, D. H. Spores, germination, and germ tubes of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. **Canadian Journal of Microbiology**, p. 965-972, 1985.
- SMITH, S. E.; READ, D. J. **Mycorrhizal Symbiosis**. London- UK: Academic Press, 2008.

- SMITH, S. E.; READ, D. J. **Mycorrhizal symbiosis**. 2.ed. San Diego, California: Academic, 1997. 605p.
- SOHI, S.P. Carbon storage with benefits. **Science**, v. 338, p. 1034-1035, 2012.
- SOHI, S.; CAPEL, E. L.; KRULL, E.; BOL, R. Biochar's roles in soil and climate change: A review of research needs. **CSIRO Land and Water Science Report**, 64 pp. 2009.
- STEINER, C.; GUO, M.; ELE, Z.; UCHIMIYA, S. M. **Considerations in Biochar Characterization**. In: Guo, M. ; He, Z. ; Uchimiya, S. M. ; editors, *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers*, SSSA Spec. Publ. 63. SSSA, Madison, WI. p. 87-100, 2016.
- STURMER, S. L.; SIQUEIRA, J. O. **Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in Brazilian ecosystems**. In: MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O.; BRUSSAARD, L. *Soil biodiversity an Amazonian and other Brazilian ecosystems*. Wallingford: CABI- Publishing, p. 206-236, 2006.
- SUDING, K.; HIGGS, E.; PALMER, M.; CALLICOTT, J. B.; ANDERSON, C. B.; BAKER, M. ; GUTRICH, J. J. ; HONDULA, K. L. ; LAFEVOR, M. C. ; LARSON, B. M. H. ; RANDALL, A. ; RUHL, J. B. ; SCHWARTZ, K. Z. S. (2015). Committing to ecological restoration. **Science**, v. 348, p. 638-640, 2015.
- TAVARES, S. R. L.; FRANCO, A. A.; SILVA, E. M. R. Produção de mudas de *Acacia mangium willd* noduladas e micorrizadas em diferentes substratos. **Holos**, v. 4, 2016.
- TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. Ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1995, 188p.
- TORRI, S.; CABRERA, M. Environmental impact of biosolids land application. In: *Organic Waste: Management Strategies, Environmental Impact and Emerging Regulations*, Editor: M Collins, **Nova Science Publishers**, 2017, 226 p.
- TRAZZI, P. A.; CALDEIRA, M. V. W.; REIS, E. F.; SILVA, A. G. Produção de mudas de *Tectona grandis* em substratos formulados com biossólido. **Cerne**, v. 20, p. 293-302, 2014.
- UCHIMIYA, M.; CHANG, S.; KLASSON, K. T. Screening biochars for heavy metal retention in soil: Role of oxygen functional groups. **Journal of Hazardous Materials**, p. 432-441, 2011b.
- UCHIMIYA, M.; WARTELLE, L. H.; KLASSON, K. T.; FORTIER, C. A.; I. M. Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 59, p. 2501-2510, 2011a.
- U.S. EPA - United State Environment Protection Agency. SW-846. Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical Chemical Methods.
- VERHEIJEN, F.; JEFFERY, S.; BASTOS, A.C.; VAN DER VELDE, M.; DIAFAS, F. **Biochar application to soils: a critical scientific review of effects on soil properties, processes, and functions**. Luxembourg: Office for the Official Publications of the European Communities, 2010. 149 p.
- WANG, Q.; HAN, K.; GAO, J.; LI, H.; LU, C. The pyrolysis of biomass briquettes: Effect of pyrolysis temperature and phosphorus additives on the quality and combustion of biochar briquettes. **Fuel**, v. 199, p. 488-496, 2017.

- WANG, X. S.; CHEN, L. F.; LI, F. Y.; CHEN, K. L.; WAN, W. Y.; TANG, Y.J. Removal of Cr (VI) with wheat-residue derived black carbon: reaction mechanism and adsorption performance. **Journal of Hazardous Materials**, v. 175, p. 816-822, 2010.
- WARNOCK, D. D. ; LEHMANN, J. ; KUYPER, T. W. ; RILLIG, M. C. Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms. **Plant Soil**, v. 300, p. 9-20, 2007.
- WOLLMANN, I. ; GAURO, A.; MÜLLER, T.; MÖLLER, K. Phosphorus bioavailability of sewage sludge-based recycled fertilizers . **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 181, p. 158–166, 2017.
- WONG, J. W. C.; FANG, M.; SU, D. C. Toxicity evaluation of sewage sludge in Hong Kong, **Environment International**, v. 27, p. 373-380, 2001.
- YACHIGO, M.; SATO, S. Leachability and Vegetable Adsorption of Heavy Metals from Sewage Sludge Biochar.in: Hernandez Soriano, M. (Ed.), Soil Process and Current Trends in Quality Assesment. **InTech**, p. 399-416, 2013.
- YANG , Y.; MEEHAN, B.; SHAH, K.; SURAPANENI, A.; HUGHES. J. ; FOUCHE, L.; PAZ-FERREIRO, J. Physicochemical properties of biochars produced from biosolids in Victoria, Australia. **International Journal Environmental Research and Public Health**, v. 15, 1459, 2018.
- ZANGARO, W.; NISHIDATE, F. R.; CAMARGO, F. R. S.; ROMAGNOLI, G. G.; VANDRESEN, J. Relationship among AM fungi symbiosis, root morphology and seedling growth of tropical native woody species in south Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, v. 21, p. 529-540, 2005.
- ZHOU, Y.; GAO, B.; ZIMMERMAN, A. R.; FANG, J.; SUN, Y.; CAO, X. Sorption of heavy metals on chitosan-modified biochars and its biological effects. **Chemical Engineering Journal**, n. 231, p. 512-518, 2013.

ANEXO A – Parâmetros de avaliação de crescimento e qualidade das mudas de *Senna multijuga*

Tratamentos	Parâmetros de crescimento e qualidade das mudas												
	H35	H63	H94	H121	DC63	DC 94	DC121	MSPA	MSR	MST	IR	AF	IQD
B25 sem FMA	5,3 a	12,1 b	19,4 a	24,0 b	2,07 a	3,59 a	4,50 a	2,59 c	2,28 a	4,87 a	5,37 b	103,98 b	2,13 b
B50 sem FMA	4,4 b	10,3 b	19,9 a	27,6 a	1,89 a	3,29 b	4,41 a	3,01 b	1,96 b	4,97 a	6,30 a	114,65 b	2,51 a
B75 sem FMA	4,5 b	10,8 b	19,9 a	29,5 a	1,90 a	3,20 b	4,29 a	3,25 b	1,84 b	5,09 a	6,96 a	127,03 a	2,71 a
BB25 sem FMA	5,1 a	11,8 b	18,9 a	22,1 c	2,09 a	3,57 a	4,23 a	2,28 d	1,79 b	4,07 b	5,24 b	63,34 c	2,12 b
BB50 sem FMA	5,3 a	12,2 b	21,1 a	28,1 a	1,93 a	3,31 b	4,17 a	2,64 c	2,01 b	4,65 a	6,86 a	112,45 b	2,19 b
BB75 sem FMA	3,9 b	8,7 b	16,6 a	24,6 b	1,41 c	2,66 c	3,60 b	2,23 d	2,35 a	4,58 a	6,70 a	132,14 a	1,80 c
B25 com FMA	5,4 a	14,2 a	21,2 a	24,7 b	2,25 a	3,77 a	4,66 a	2,78 c	2,43 a	5,22 a	5,32 b	104,57 b	2,25 b
B50 com FMA	4,6 b	11,3 b	21,1 a	29,6 a	2,03 a	3,20 b	4,34 a	3,19 b	2,09 a	5,28 a	6,91 a	142,76 a	2,46 a
B75 com FMA	4,7 b	11,3 b	21,3 a	31,8 a	2,25 a	3,54 a	4,68 a	3,74 a	2,35 a	6,08 a	6,82 a	151,62 a	2,68 a
BB25 com FMA	5,1 a	13,5 a	18,6 a	20,1 c	2,08 a	3,54 a	4,19 a	1,88 d	1,74 b	3,62 b	4,82 b	54,75 c	1,92 c
BB50 com FMA	4,9 a	11,2 b	19,1 a	24,1 b	1,78 b	3,11 b	3,91 b	2,44 c	1,56 b	4,00 b	6,05 a	115,80 b	2,23 b
BB75 com FMA	4,3 b	11,3 b	18,2 a	26,0 b	1,56 c	2,70 c	3,45 b	2,21 d	1,76 b	3,97 b	6,80 a	132,66 a	1,81 c
Solo100 com FMA	1,5 c	1,7 c	4,0 b	5,2 d	0,36 d	0,73 d	1,07 c	0,18 e	0,40 c	0,58 c	3,68 c	12,35 d	0,57 d
Solo100 sem FMA	1,6 c	0,9 c	1,1 c	0,7 e	0,26 d	0,31 e	0,20 d	0,01 e	0,03 c	0,04 c	0,80 d	0,36 d	0,05 e

Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo método de agrupamento de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

FMA= fungos micorrízicos arbusculares; B25 sem FMA= 25% de bio sólido sem inoculação de FMA; B50 sem FMA= 50% de bio sólido sem inoculação de FMA; B75 sem FMA= 75% de bio sólido sem inoculação de FMA; BB25 sem FMA= 25% de biocarvão de bio sólido sem inoculação de FMA; BB50 sem FMA= 50% de biocarvão de bio sólido sem inoculação de FMA; BB75 sem FMA= 75% de biocarvão de bio sólido sem inoculação de FMA; B25 com FMA= 25% de bio sólido com inoculação de FMA; B50 com FMA= 50% de bio sólido com inoculação de FMA; B75 com FMA= 75% de bio sólido com inoculação de FMA; BB25 com FMA= 25% de biocarvão de bio sólido com inoculação de FMA; BB50 com FMA= 50% de biocarvão de bio sólido com inoculação de FMA; BB75 com FMA = 75% de biocarvão de bio sólido com inoculação de FMA; S100 com FMA = 100% de solo com inoculação de FMA; S100 sem FMA = 100% de solo sem inoculação de FMA. H35= altura total aos 35 dias (cm); H63= altura total aos 63 dias (cm); H94= altura total aos 94 dias (cm); H121= altura total aos 121 dias (cm); DC63= diâmetro de coleto aos 63 dias (mm); DC94= diâmetro de coleto aos 94 dias (mm); DC121= diâmetro de coleto aos 121 dias (mm); MSPA= massa de matéria seca da parte aérea (g.muda⁻¹); MSR= massa de matéria seca radicular; MST= massa de matéria seca total; AF= área foliar (cm²); IR= índice de robustez; IQD= índice de qualidade de Dickson.

ANEXO B – Tabelas de análise de variância das variáveis de crescimento e qualidade das mudas de *Senna multijuga* em função do desdobramento dos fatores tipo de resíduo, doses e inoculação com fungos micorrízicos arbusculares (FMA).

1) Variável analisada: Altura aos 35 dias após a semeadura

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	4	3,1547	0,7887	2,5950	0,0469
TRATAMENTOS	13	102,3912	7,8762	25,9160	0,0000
MICORRIZA	1	0,0820	0,0820	0,2699	0,6056
RESIDUO	1	0,0351	0,0351	0,1156	0,7353
DOSE	2	8,4168	4,2084	13,8476	0,0000
MICORRIZA*RESIDUO	1	0,1244	0,1244	0,4092	0,5252
MICORRIZA*DOSE	2	0,4541	0,2270	0,7471	0,4788
RESIDUO*DOSE	2	2,9892	1,4946	4,9180	0,0111
MICORRIZA*RESIDUO*DOSE	2	0,5113	0,2556	0,8412	0,4370
TESTEMUNHAS	1	0,0040	0,0040	0,0132	0,9091
Fatorial vs Testemunhas	1	89,7743	89,7743	295,3988	0,0000
Erro	52	15,8033	0,3039		
Total corrigido: 69			121,3492		
Média geral: 4,32					
Número de observações: 70					

2) Variável analisada: Altura aos 63 dias após a semeadura

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	4	30,7138	7,6784	3,2160	0,0197
TRATAMENTOS	13	1014,9108	78,0701	32,6940	0,0000
MICORRIZA	1	20,1483	20,1483	8,4375	0,0054
RESIDUO	1	0,4621	0,4621	0,1935	0,6618
DOSE	2	59,8093	29,9047	12,5232	0,0000
MICORRIZA*RESIDUO	1	0,0164	0,0164	0,0069	0,9343
MICORRIZA*DOSE	2	10,2785	5,1392	2,1522	0,1265
RESIDUO*DOSE	2	10,7463	5,3731	2,2501	0,1156
MICORRIZA*RESIDUO*DOSE	2	10,8295	5,4147	2,2675	0,1137
TESTEMUNHAS	1	1,2816	1,2816	0,5367	0,4671
Fatorial vs Testemunhas	1	901,3388	901,3388	377,4550	0,0000
Erro	52	124,1727		2,3879	
Total corrigido: 69			1169,7973		
Média geral: 10,10					
Número de observações: 70					

3) Variável analisada: Altura aos 94 dias após a semeadura
 Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	4	71,6724	17,9181	3,4780	0,0137
TRATAMENTOS	13	2624,6130	201,8933	39,1850	0,0000
MICORRIZA	1	5,5060	5,5060	1,0686	0,3060
RESIDUO	1	44,3918	44,3918	8,6159	0,0050
DOSE	2	17,1586	8,5793	1,6651	0,1991
MICORRIZA*RESIDUO	1	10,5707	10,5707	2,0516	0,1580
MICORRIZA*DOSE	2	9,4379	4,7190	0,9159	0,4065
RESIDUO*DOSE	2	18,7710	9,3855	1,8216	0,1719
MICORRIZA*RESIDUO*DOSE	2	8,0393	4,0197	0,7802	0,4636
TESTEMUNHAS	1	22,2606	22,2606	4,3205	0,0426
Fatorial vs Testemunhas	1	2488,4770	2488,4770	482,9823	0,0000
Erro	52	267,9204		5,1523	
Total corrigido: 69			2964,2057		
CV (%) = 13					
Média geral: 17,16					
Número de observações: 70					

4) Variável analisada: Altura aos 121 dias após a semeadura
 Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	4	86,6673	21,6668	2,4450	0,0579
TRATAMENTOS	13	5257,1191	404,3938	45,6340	0,0000
MICORRIZA	1	0,0675	0,0675	0,0076	0,9308
RESIDUO	1	204,5568	204,5568	23,0834	0,0000
DOSE	2	329,7871	164,8936	18,6075	0,0000
MICORRIZA*RESIDUO	1	37,1589	37,1589	4,1932	0,0457
MICORRIZA*DOSE	2	23,7805	11,8902	1,3418	0,2703
RESIDUO*DOSE	2	22,2122	11,1061	1,2533	0,2940
MICORRIZA*RESIDUO*DOSE	2	17,7602	8,8801	1,0021	0,3741
TESTEMUNHAS	1	51,5290	51,5290	5,8148	0,0195
Fatorial vs Testemunhas	1	4570,2669	4570,2669	515,7350	0,0000
Erro	52	460,8062	8,8617		
Total corrigido: 69			5804,5926		
CV (%) = 13					
Média geral: 22,72					
Número de observações: 70					

5) Variável analisada: Diâmetro de coleta aos 63 dias após a semeadura

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	4	0,7400	0,1850	3,8200	0,0085
TRATAMENTOS	13	26,2110	2,0162	41,6270	0,0000
MICORRIZA	1	0,1838	0,1838	3,7957	0,0568
RESIDUO	1	1,0067	1,0067	20,7845	0,0000
DOSE	2	1,2054	0,6027	12,4437	0,0000
MICORRIZA*RESIDUO	1	0,1877	0,1877	3,8748	0,0544
MICORRIZA*DOSE	2	0,1691	0,0846	1,7458	0,1846
RESIDUO*DOSE	2	0,8306	0,4153	8,5741	0,0006
MICORRIZA*RESIDUO*DOSE	2	0,0076	0,0038	0,0783	0,9248
TESTEMUNHAS	1	0,0264	0,0264	0,5455	0,4635
Fatorial vs Testemunhas	1	22,5936	22,5936	466,4625	0,0000
Erro	52	2,5187	0,0484		
Total corrigido: 69			29,4697		
CV (%) = 13					
Média geral: 1,70					
Número de observações: 70					

6) Variável analisada: Diâmetro de coleta aos 94 dias após a semeadura

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	4	2,0909	0,5227	4,9280	0,0019
TRATAMENTOS	13	72,9834	5,6141	52,9210	0,0000
MICORRIZA	1	0,0243	0,0243	0,2287	0,6345
RESIDUO	1	1,2095	1,2095	11,4013	0,0014
DOSE	2	3,6195	1,8098	17,0596	0,0000
MICORRIZA*RESIDUO	1	0,1485	0,1485	1,3994	0,2422
MICORRIZA*DOSE	2	0,2976	0,1488	1,4025	0,2551
RESIDUO*DOSE	2	1,2653	0,6327	5,9639	0,0047
MICORRIZA*RESIDUO*DOSE	2	0,0241	0,0121	0,1137	0,8927
TESTEMUNHAS	1	0,4477	0,4477	4,2207	0,0450
Fatorial vs Testemunhas	1	65,9469	65,9469	621,6476	0,0000
erro	52	5,5164	0,1061		
Total corrigido 69			80,5906		
CV (%) = 11,25					
Média geral: 2,89					
Número de observações: 70					

7) Variável analisada: Diâmetro de coletor aos 121 dias após a semeadura
Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	4	2,1874	0,5469	3,3110	0,0172
TRATAMENTOS	13	118,8073	9,1390	55,3380	0,0000
MICORRIZA	1	0,0008	0,0008	0,0047	0,9456
RESIDUO	1	4,6511	4,6511	28,1633	0,0000
DOSE	2	1,5338	0,7669	4,6436	0,0139
MICORRIZA*RESIDUO	1	0,3674	0,3674	2,2249	0,1418
MICORRIZA*DOSE	2	0,2304	0,1152	0,6975	0,5024
RESIDUO*DOSE	2	1,2484	0,6242	3,7796	0,0293
MICORRIZA*RESIDUO*DOSE	2	0,1044	0,0522	0,3161	0,7304
TESTEMUNHAS	1	1,9062	1,9062	11,5423	0,0013
Fatorial vs Testemunhas	1	108,7648	108,7648	658,5860	0,0000
erro	52	8,5878	0,1651		
Total corrigido 69			129,5825		
CV (%) = 11					
Média geral: 3,69					
Número de observações: 70					

8) Variável analisada: Massa de matéria seca da parte aérea
Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	4	1,3797	0,3449	2,2420	0,0771
TRATAMENTOS	13	73,2512	5,6347	36,6260	0,0000
MICORRIZA	1	0,0225	0,0225	0,1464	0,7036
RESIDUO	1	9,8900	9,8900	64,2861	0,0000
DOSE	2	2,7777	1,3889	9,0277	0,0004
MICORRIZA*RESIDUO	1	0,9100	0,9100	5,9151	0,0185
MICORRIZA*DOSE	2	0,2968	0,1484	0,9647	0,3878
RESIDUO*DOSE	2	1,5941	0,7971	5,1810	0,0089
MICORRIZA*RESIDUO*DOSE	2	0,0281	0,0141	0,0914	0,9128
TESTEMUNHAS	1	0,0748	0,0748	0,4861	0,4888
Fatorial vs Testemunhas	1	57,6570	57,6570	374,7759	0,0000
erro	52	7,9999	0,1538		
Total corrigido: 69			82,6308		
CV (%) = 17					
Média geral: 2,32					
Número de observações: 70					

9) Variável analisada: Massa de matéria seca radicular

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	4	8,9969	2,2492	12,3970	0,0000
TRATAMENTOS	13	32,5619	2,5048	13,8050	0,0000
MICORRIZA	1	0,0351	0,0351	0,1933	0,6620
RESIDUO	1	1,2646	1,2646	6,9697	0,0109
DOSE	2	0,3586	0,1793	0,9882	0,3791
MICORRIZA*RESIDUO	1	1,4783	1,4783	8,1479	0,0062
MICORRIZA*DOSE	2	0,1123	0,0561	0,3094	0,7352
RESIDUO*DOSE	2	0,7710	0,3855	2,1247	0,1297
MICORRIZA*RESIDUO*DOSE	2	0,5026	0,2513	1,3851	0,2594
TESTEMUNHAS	1	0,3348	0,3348	1,8454	0,1802
Fatorial vs Testemunhas	1	27,7046	27,7046	152,6947	0,0000
Erro	52	9,4348	0,1814		
Total corrigido: 69			50,9936		
CV (%) = 24,25					
Média geral: 2					
Número de observações: 70					

10) Variável analisada: Massa de matéria seca total

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	4	11,2906	2,8226	5,3930	0,0010
TRATAMENTOS	13	192,8625	14,8356	28,3440	0,0000
MICORRIZA	1	0,0014	0,0014	0,0026	0,9592
RESIDUO	1	18,2275	18,2275	34,8247	0,0000
DOSE	2	2,3663	1,1831	2,2605	0,1145
MICORRIZA*RESIDUO	1	4,7081	4,7081	8,9951	0,0041
MICORRIZA*DOSE	2	0,3388	0,1694	0,3237	0,7249
RESIDUO*DOSE	2	0,7315	0,3658	0,6988	0,5018
MICORRIZA*RESIDUO*DOSE	2	0,4670	0,2335	0,4461	0,6425
TESTEMUNHAS	1	0,7261	0,7261	1,3873	0,2442
Fatorial vs Testemunhas	1	165,2958	165,2958	315,8067	0,0000
erro	52	27,2172	0,5234		
Total corrigido: 69			231,3703		
CV (%) = 18					
Média geral: 4,07					
Número de observações: 70					

11) Variável analisada: Área foliar

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	4	8812,7261	2203,1815	3,8580	0,0081
TRATAMENTOS	13	144549,1698	11119,1669	19,4700	0,0000
MICORRIZA	1	982,6449	982,6449	1,7206	0,1954
RESIDUO	1	7423,4039	7423,4039	12,9985	0,0007
DOSE	2	31511,0872	15755,5436	27,5883	0,0000
MICORRIZA*RESIDUO	1	1402,9418	1402,9418	2,4566	0,1231
MICORRIZA*DOSE	2	1122,3679	561,1839	0,9826	0,3812
RESIDUO*DOSE	2	4107,7079	2053,8540	3,5963	0,0344
MICORRIZA*RESIDUO*DOSE	2	193,7157	96,8578	0,1696	0,8445
TESTEMUNHAS	1	359,3763	359,3763	0,6293	0,4312
Fatorial vs Testemunhas	1	97445,9243	97445,9243	170,6300	0,0000
erro	52	29696,9318	571,0948		
Total corrigido: 69			183058,8278		
CV (%) = 25					
Média geral: 97,75					
Número de observações: 70					

12) Variável analisada: Índice de Qualidade de Dickson

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	4	1,8083	0,4521	5,7910	0,0006
TRATAMENTOS	13	37,6330	2,8948	37,0820	0,0000
MICORRIZA	1	0,0072	0,0072	0,0917	0,7632
RESIDUO	1	2,9352	2,9352	37,5990	0,0000
DOSE	2	0,6005	0,3003	3,8462	0,0277
MICORRIZA*RESIDUO	1	0,0161	0,0161	0,2067	0,6513
MICORRIZA*DOSE	2	0,0033	0,0016	0,0209	0,9794
RESIDUO*DOSE	2	1,5207	0,7604	9,7398	0,0003
MICORRIZA*RESIDUO*DOSE	2	0,1236	0,0618	0,7915	0,4585
TESTEMUNHAS	1	0,6838	0,6838	8,7594	0,0046
Fatorial vs Testemunhas	1	31,7426	31,7426	406,6066	0,0000
Erro	52	4,0595	0,0781		
Total corrigido: 69			43,5007		
CV (%) = 14					
Média geral: 1,96					
Número de observações: 70					

13) Variável analisada: Índice de Robustez

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	4	1,8887	0,4722	0,7770	0,5451
TRATAMENTOS	13	187,8568	14,4505	23,7840	0,0000
MICORRIZA	1	0,2173	0,2173	0,3576	0,5524
RESIDUO	1	0,6136	0,6136	1,0099	0,3196
DOSE	2	30,3014	15,1507	24,9364	0,0000
MICORRIZA*RESIDUO	1	1,0137	1,0137	1,6684	0,2022
MICORRIZA*DOSE	2	0,1271	0,0636	0,1046	0,9009
RESIDUO*DOSE	2	0,0935	0,0467	0,0769	0,9261
MICORRIZA*RESIDUO*DOSE	2	1,7913	0,8957	1,4742	0,2384
TESTEMUNHAS	1	20,8348	20,8348	34,2918	0,0000
Fatorial vs Testemunhas	1	132,8641	132,8641	218,6800	0,0000
erro	52	31,5938	0,6076		
Total corrigido: 69			221,3393		
CV (%) = 13,88					
Média geral: 5,62					
Número de observações: 70					