

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS - CAV**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**BETEL CAVALCANTE LOPES**

**USO DE BIOCARVÃO EM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE MUDAS**

**LAGES**

**2024**

**BETEL CAVALCANTE LOPES**

**USO DE BIOCARVÃO EM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE MUDAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora em Ciência do Solo.

Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Mari Lucia Campos  
Coorientadores: Dr<sup>a</sup>. Martha Andreia Brand  
Dr. Marcio Carlos Navroski  
Dr. Osmar Klauberg-Filho

**LAGES**

**2024**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da  
Biblioteca Universitária Udesc,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Cavalcante Lopes, Betel  
USO DE BIOCARVÃO EM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE  
MUDAS / Betel Cavalcante Lopes. -- 2024.  
86 p.

Orientadora: Mari Lucia Campos  
Coorientador: Martha Andreia Brand  
Tese (doutorado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina,  
Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação  
em Ciência do Solo, Lages, 2024.

1. Bracatinga. 2. biochar. 3. ecotoxicologia. 4. morfologia. I.  
Lucia Campos, Mari. II. Andreia Brand, Martha. III. Universidade  
do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias,  
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. IV. Título.

## BETEL CAVALCANTE LOPES

### USO DE BIOCARVÃO EM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE MUDAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora em Ciência do Solo.

Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Mari Lucia Campos  
Coorientadores: Dr<sup>a</sup>. Martha Andreia Brand  
Dr. Marcio Carlos Navroski  
Dr. Osmar Klauberg-Filho

Orientadora:

---

Dr<sup>a</sup>. Mari Lucia Campos  
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membros:

---

Dr<sup>a</sup>. Luciana Magda de Oliveira  
Universidade do Estado de Santa Catarina

---

Dr. Osmar Klauberg-Filho  
Universidade do Estado de Santa Catarina

---

Dr. Marcio Carlos Navroski  
Universidade do Estado de Santa Catarina

---

Dr<sup>a</sup>. Maria Helena Fermino  
Secretaria da Agricultura, Pecuária e Irrigação/RS

---

Dr. Luís Carlos Iuñes de Oliveira Filho  
Universidade Federal de Santa Catarina

Lages, 30 de julho de 2024

Aos meus avós *Gerson Soreano Lopes* e *Conceição da Silva Lopes* (*In memoriam*)  
Por me ensinarem a nunca desistir  
DEDICO

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a *Deus*, o qual me concedeu o Dom da vida, saúde, força e sabedoria ao longo desta jornada. Sem Sua presença constante em minha vida, este trabalho não teria sido possível. Sou grata pela fé e pela coragem que Ele me deu para enfrentar os desafios e alcançar este objetivo.

Agradeço aos meus pais, *Maria Antonia Cavalcante Lopes e Francisco de Pádua da Silva Lopes*, por seu amor incondicional, apoio e incentivo ao longo de toda a minha jornada na busca de realizar os meus sonhos. Vocês são a base de tudo o que conquistei, sem vocês nada disso seria possível. EU amo vocês incondicionalmente.

À minha irmã *Priscila Cavalcante Lopes-Hilland*, sua presença ao meu lado foi de extrema importância durante todo este processo. Obrigada por ser uma fonte constante de apoio, por acreditar em mim e por estar sempre disposta a ouvir meus desabafos e celebrar minhas conquistas. Sua dedicação e carinho foram essenciais para que eu pudesse perseverar e alcançar este objetivo. Te amo minha *pri pri*.

Ao meu amor, meu esposo *Adam de Lavareda Mendes Viana* e a nossa filha de quatro patas *Mia*. Sua paciência, compreensão e apoio incondicional foram fundamentais para que eu pudesse concluir este projeto. Obrigada por estar sempre ao meu lado, por acreditar em mim e por me incentivar a seguir em frente, mesmo nos momentos mais difíceis. A sua presença e da *Mia*, além do amor transmitido por vocês, foram essenciais para que eu pudesse realizar este sonho. Te amo meu amor e amo a família que construímos juntos.

Aos meus tios, tias, primos, primas, sogro *Cosme*, sogra *Regina (in memoriam)*, cunhados *André e Stuart*, por todo amor, carinho e apoio. Amo vocês.

A minha grande amiga e parceira de vida *Aline Lima de Sena*, sua amizade me deu suporte para superar os momentos mais difíceis desses últimos quatro anos. Obrigada por todos os momentos de alegria e tristeza que compartilhamos, os quais nos fizeram amadurecer e nos unir ainda mais para atravessarmos essa jornada insana chamado doutorado. Te amo minha irmã de outra mãe.

A minha orientadora *Mari Lucia Campos*, a qual foi mais que minha orientadora, foi e é uma grande amiga. Meu grande exemplo de pesquisadora, expressei minha mais profunda gratidão. Sua paciência, orientação e incentivo em cada etapa deste trabalho foram indispensáveis. Seu vasto conhecimento, dedicação e disponibilidade foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa. Obrigada por acreditar no meu potencial e por me guiar com sabedoria e compreensão. Amo você mulher maravilha.

Aos meus co-orientadores *Martha Andreia Brand, Marcio Carlos Navroski e Osmar Klauberg-Filho* agradeço pela paciência, orientação e incentivo em cada etapa deste trabalho. Sua expertise e dedicação foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os amigos (as) que fiz no LLAA, em especial *Danielly, Caroline, Natacha, Beatriz, Renata e Elias*, os quais pude contar, não só para ajudar na execução do projeto, mas também com a sua amizade sincera. Vocês tornaram os meus dias mais alegres e unidos fomos mais longe do que poderíamos imaginar.

Aos amigos (as) que fiz no LABECOSOLO, em especial *Rafaela, Daniela, Aline Rosini, Douglas, Thiago, Nathalia e Luís*. Obrigada por todos os ensinamentos e paciência durante o meu processo de aprendizagem. Obrigada por cada conselho e colaboração em meu projeto e pelas boas risadas compartilhadas.

Aos amigos (as) do Viveiro Florestal, em especial a minha amiga *Alexandra e Mariane*. Muito obrigada por todo auxílio e risadas compartilhadas durante a execução do meu projeto. Obrigada por me tornarem parte da família filhos do Navroski.

Aos amigos (as) que Lages me concedeu nos últimos seis anos, em especial *Larissa, Cris, Fran, Tia Day, André, Kelly, meninas do Jiu-Jitsu, Felipe, Carol Barroco, Lucas, Nathalia, Léo, Mary e Alice*. Vocês têm todo o meu amor e gratidão por cada momento compartilhado, cada ombro amigo, cada incentivo que eu jamais esquecerei, amo vocês.

Aos meus amigos de Belém *Juliana, Jorge, Dora, Lucas, Carla, Antonio*, especialmente os de infância *Kaike, Andrey, Arthur, Borges, Mayk, Jairo, Melinda, Loureny e Patrícia*, por todo apoio que me concederam, momentos de alegria, carinho e amor concedido durante todos esses anos de amizade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e a Universidade do Estado de Santa Catarina pelo ensino de qualidade e toda a estrutura fornecida para a execução deste projeto e a CAPES e ao PAP/FAPESC pelo auxílio financeiro.

Por fim, gostaria de agradecer a mim mesma. Agradeço pela determinação, resiliência e perseverança que demonstrei ao longo desta jornada. Enfrentei desafios, superei obstáculos e cresci de maneiras que jamais imaginei. Este trabalho é o resultado de muitos anos de esforço e dedicação, e me orgulho do que conquistei.

Meu mais sincero agradecimento a todos que aceitaram embarcar nesta jornada comigo e acreditaram em mim e no meu potencial. Sozinha, eu poderia ter ido longe, mas com vocês, alcancei o inimaginável e cheguei a lugares que nem em meus melhores sonhos poderia imaginar. Vocês me ajudaram a tornar este sonho possível.

Muito obrigada!

“Seja como os pássaros que, ao pousarem um instante sobre ramos muito leves, sentem-nos ceder, mas cantam! Eles sabem que possuem asas”

(Victor Hugo)

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial do uso do biocarvão como componente de substrato para a produção de mudas florestais. O biocarvão foi obtido da cinza da combustão de biomassa florestal em caldeira industrial. Foi realizada caracterização química do biocarvão. Para a realização da avaliação das características físicas e químicas do substrato e qualidade das mudas de bracatinga foram realizados seis tratamentos: 0, 7,5, 10, 15, 20 e 100% de biocarvão misturados no substrato composto por vermiculita, casca de pinus decomposta e casca de arroz carbonizada. Realizou-se ainda o teste de germinação para as sementes de alface e bracatinga. Também foram avaliados parâmetros radiculares tais como volume, comprimento radicular, área superficial e biomassa seca das raízes de alface e bracatinga. Para a avaliação da qualidade das mudas de bracatinga foram realizadas análises morfológicas e fisiológicas. Foram realizados nove tratamentos para a avaliação ecotoxicológica, os quais foram estabelecidos, com adição de 0, 5, 7,5, 10, 15, 20, 50 e 100% de biocarvão ao substrato composto por vermiculita, casca de pinus decomposta e casca de arroz carbonizada. Um substrato sem adição de biocarvão foi o utilizado para o controle e validação dos procedimentos experimentais dos organismos do solo, o Solo Artificial Tropical (SAT). Foi analisado o efeito das doses crescentes de biocarvão sobre a reprodução dos colêmbolos da espécie *Folsomia candida*, enquitreídeos da espécie *Enchytraeus crypticus*, na germinação de esporos dos fungos micorrízicos arbusculares *Gigaspora albida* e *Rhizophagus clarus*. Doses a partir de 15% de biocarvão prejudicaram a qualidade física e química do substrato e conseqüentemente o crescimento das raízes de alface e bracatinga. Além disto, doses a partir de 10% de biocarvão causaram efeito negativo na reprodução dos *E. crypticus* e *F. candida* e na germinação dos esporos de *G. albida* e *R. clarus*. Portanto, o conjunto de informações sobre as características físicas, químicas, ecotoxicológicas e a qualidade das mudas de bracatinga resultou na definição da dose mais segura de biochar para a composição de substratos na produção de mudas, que foi entre 5% e 7% de biochar.

**Palavras-chave:** Bracatinga, Biocarvão, Ecotoxicologia, Morfologia.

## ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the potential use of biochar as a substrate component for the production of forest seedlings. The biochar was obtained from the ash of forest biomass combustion in an industrial boiler. A chemical characterization of the biochar was performed. To assess the physical and chemical characteristics of the substrate and the quality of bracinga seedlings, six treatments were carried out: 0, 7.5, 10, 15, 20, and 100% biochar mixed into a substrate composed of vermiculite, decomposed pine bark, and carbonized rice husk. A germination test was also conducted for lettuce and bracinga seeds. Root parameters such as volume, root length, surface area, and dry biomass of the roots of lettuce and bracinga were evaluated. For the assessment of bracinga seedling quality, morphological and physiological analyses were performed. Nine treatments were conducted for ecotoxicological evaluation, which included the addition of 0, 5, 7.5, 10, 15, 20, 50, and 100% biochar to the substrate composed of vermiculite, decomposed pine bark, and carbonized rice husk. A substrate without the addition of biochar was used as the control to validate the experimental procedures for soil organisms, the Tropical Artificial Soil (TAS). The effect of increasing doses of biochar on the reproduction of the springtail species *Folsomia candida*, the enchytraeid species *Enchytraeus crypticus*, and the germination of spores from arbuscular mycorrhizal fungi *Gigaspora albida* and *Rhizophagus clarus* was analyzed. Doses starting at 15% biochar impaired the physical and chemical quality of the substrate and consequently the growth of lettuce and bracinga roots. Furthermore, doses starting at 10% biochar had a negative effect on the reproduction of *E. crypticus* and *F. candida*, as well as on the germination of spores of *G. albida* and *R. clarus*. Therefore, the set of information on the physical, chemical, ecotoxicological characteristics, and the quality of bracinga seedlings resulted in the definition of the safest dose of biochar for use in substrate composition for seedling production, which was between 5% and 7% biochar

**Keywords:** Bracinga, Biochar, Ecotoxicology, Morphology.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização química do biocarvão de biomassa de <i>Pinus</i> (99,5%) e <i>Eucalyptus</i> (0,5%) coletada na saída do decantador do sistema de combustão de biomassa em uma usina termelétrica. .....	35
Tabela 2 - Descrição dos materiais utilizados para a composição dos substratos.....	36
Tabela 3 - Propriedades físicas do substrato com doses crescentes de biocarvão.....	39
Tabela 4 - Propriedades químicas dos substratos com doses crescentes de biocarvão.....	43
Tabela 5 - Emergência e Índice de velocidade de emergência de sementes de alface crespa itapuã super ( <i>Lactuca sativa</i> ), semeadas em substratos com doses crescentes de biocarvão.....	44
Tabela 6 - Parâmetros para análise de raiz de alface.....	45
Tabela 7 - Percentual de emergência, mudas sobreviventes, sementes mortas e mudas mortas, índice de velocidade de emergência de sementes de bracatinga semeadas em substratos com doses crescentes de biocarvão.....	54
Tabela 8 - Propriedades físicas do substrato com doses crescentes de biocarvão.....	55
Tabela 9 - Propriedades químicas de substratos com doses crescentes de biocarvão .....	56
Tabela 10 - Avaliação fisiológica de mudas de bracatinga. ....	74
Tabela 11 - Descrição dos materiais utilizados para a composição dos substratos.....	74
Tabela 12 - Valores estimados de reprodução.....	81

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Componentes principais das propriedades físicas do substrato com doses crescentes de biocarvão.....	42
Figura 2 - Imagens das raízes de alface obtidas do processo de <i>scanner</i> que foram processadas através do programa computacional WinRhizo.....	46
Figura 3 - Avaliação morfológica da bracatinga para as variáveis diâmetro do coleto (a) e altura (b). .....	57
Figura 4 - Avaliação da biomassa seca da parte aérea (a), biomassa seca de raízes (b) e biomassa seca total (c).....	58
Figura 5 - Avaliação do volume de raízes (RootVolume) de bracatinga por meio de escaneamento e processamento no software WinRhizo.....	59
Figura 6 - Raízes de Bracatinga digitalizadas e processadas com o programa computacional WinRhizo.....	60
Figura 7 - Avaliação da área superficial da raiz (a) e do comprimento das raízes de bracatinga (b).....	59
Figura 8 - Indicadores de qualidade de mudas. Quociente de robustez e relação altura/biomassa seca da parte aérea (a). Índice de Qualidade Dickson (b).....	62
Figura 9 - Análise de componentes principais das variáveis.....	64
Figura 10 - Esquemas das unidades experimentais.....	64
Figura 11 - Efeito das doses de biocarvão na reprodução de <i>Enchytraeus crypticus</i> (a) e <i>Folsomia candida</i> (b). Média dos indivíduos vivos. * dose de efeito negativo.....	78
Figura 12 - Porcentagem de germinação de esporos de <i>G.albida</i> (a) e <i>R. clarus</i> (b) em substratos para produção de mudas com doses crescentes de biocarvão. *dose de efeito negativo.....	80

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Fotossíntese
AD	Água disponível
AFD	Água facilmente disponível
AR	Água remanescente
AS	Espaço de aeração
AT	Água tamponante
Aw	Água disponível
Bw	Água tamponante
CD	Diâmetro do coleto
CE	Condutividade elétrica
CENO	Concentração de efeito observado
CEO	Concentração de efeito observado
Ci	Concentração intercelular de CO <sub>2</sub>
Ci/Ca	Razão entre as concentrações intercelular e atmosférica de CO <sub>2</sub>
Cm	Umidade total
CRA	Capacidade de retenção de água
CV	Coefficiente de variação
DAP	Diâmetro na altura do peito
DC	Diâmetro do coleto
Dd	Densidade seca
DIC	Delineamento inteiramente casualizado
DQI	Índice de qualidade de Dickson
DS	Densidade seca
Ds	Plântulas mortas
DSeed	Sementes mortas
DU	Densidade úmida
Dw	Densidade úmida
E%	Emergência
E	Transpiração
EA	Espaço de aeração
Eaw%	Água facilmente disponível
EC	Condutividade elétrica
ERT	Teste de reprodução de enquitreídeos

ESI	Índice de velocidade de emergência
EU	Unidade experimental
FMAAs	Fungos micorrizos arbusculares
MS	Mudas sobreviventes
G <sub>s</sub>	Condutância estomática
H	Altura
IDQ	índice de qualidade de Dickson
IN	Instrução normativa
IRGA	Analizador de gás infravermelho
ISO	International organization for standardization
H/CD	Relação altura/diâmetro
MAPA	Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento
MSPA	Massa seca parte aérea
MSR	Massa seca radicular
MST	Matéria seca total
Nº	Número
NPK	Nitrogênio, fósforo e potássio
PAHs	Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos
PC1	Componente principal 1
PC2	Componente principal 2
PCA	Componentes principais
pH	Potencial hidrogeniônico
PT	Porosidade total
RDB	Massa seca da raiz
RMSPAR	relação dos pesos da matéria seca da parte aérea/raiz
R <sub>w</sub>	Água remanescente
SAT	Solo artificial tropical
SDB	Biomassa seca da parte aérea
TD	Biomassa seca total
TP	Porosidade total
UA	Umidade total
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Whc	Capacidade de retenção de água

## LISTA DE SÍMBOLOS

CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de cálcio
C	Carbono
cm	Centímetro
cm <sup>2</sup>	Centímetro quadrado
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
g	Gramas
°C	Graus Celsius
g L <sup>-1</sup>	Gramas por litro
h	Horas
L	Litros
µm	Micrômetro
µmol mol <sup>-1</sup>	Micromole por mole
mg g <sup>-1</sup>	Miligrama por grama
mL	Mililitro
mm	Milímetros
mS cm <sup>-1</sup>	MilliSiemens por centímetro
%	Porcentagem
kg m <sup>-3</sup>	Quilogramas por metro
ton	Tonelada
v/v	Volume

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - CONTEXTUALIZAÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1 INTRODUÇÃO GERAL .....	17
1.2 OBJETIVOS .....	18
<b>1.2.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>18</b>
<b>1.2.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>18</b>
1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
<b>1.4.1 Substrato para produção de mudas .....</b>	<b>19</b>
<b>1.3.2 Mudanças de qualidade .....</b>	<b>20</b>
<b>1.3.3 Biochar .....</b>	<b>21</b>
<b>1.3.4 Ecotoxicologia .....</b>	<b>22</b>
<b>1.3.5 Bracatinga .....</b>	<b>24</b>
1.4 REFERÊNCIAS .....	25
<b>CAPÍTULO 2 - UTILIZAÇÃO DE BIOCÁRVÃO DE BIOMASSA FLORESTAL COMO CONDICIONANTE DE SUBSTRATO .....</b>	<b>32</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	34
2.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	35
<b>2.2.1 Localização da área .....</b>	<b>35</b>
<b>2.2.2 Obtenção e características químicas do biochar .....</b>	<b>35</b>
<b>2.2.3 Preparo do substrato com doses crescentes de biocárvão .....</b>	<b>36</b>
<b>2.2.6 Avaliação do desenvolvimento das raízes de alface no substrato com doses crescentes de biocárvão .....</b>	<b>38</b>
<b>2.2.7 Análise estatística .....</b>	<b>38</b>
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	38
<b>2.3.1 Características físicas do substrato com doses crescentes de biocárvão .....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.2 Propriedades químicas do substrato .....</b>	<b>43</b>
<b>2.3.3 Teste de emergência com alface .....</b>	<b>44</b>
<b>2.3.4 Análise do sistema radicular .....</b>	<b>45</b>
2.4 CONCLUSÃO .....	46
2.5 REFERÊNCIAS .....	47
<b>CAPÍTULO 3 – USO DE BIOCÁRVÃO DE PINUS E EUCALIPTO NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE BRACATINGA (<i>Mimosa scabrella</i> BENTH).....</b>	<b>49</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	51
3.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	52
<b>3.2.1 Análise de emergência e morfológica de bracatinga .....</b>	<b>52</b>

3.2.2	Análise de trocas gasosas.....	54
3.2.3	Análise estatística .....	54
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	54
3.3.1	Avaliação da emergência e sobrevivência das mudas de bracatinga.....	54
3.3.2	Avaliação das variáveis morfológicas das mudas de bracatinga .....	56
3.3.3	Análises fisiológica.....	63
3.3.4	Influência das propriedades físicas e químicas na morfologia e fisiologia na produção de mudas bracatinga.....	64
3.4	CONCLUSÃO .....	66
3.5	REFERÊNCIAS.....	67
<b>CAPÍTULO 4 – RISCO ECOLÓGICO DE BIOCARVÃO DE BIOMASSA FLORESTAL NA COMPOSIÇÃO DE SUBSTRATOS PARA PRODUÇÃO DE MUDAS.....</b>		<b>70</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	72
4.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	73
4.2.1	Substância teste – Biocarvão de biomassa florestal .....	73
4.2.2	Substrato teste .....	73
4.2.3	Organismos testes.....	74
4.2.4	Procedimento Experimental .....	75
4.2.4.1.3	Ensaio de inibição da germinação de esporos de FMA .....	76
4.2.6	Análise estatística .....	77
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	78
4.3.1	Validação dos testes.....	78
4.3.2	Ensaio de toxicidade crônica (Reprodução) .....	78
4.3.3	Efeito sobre a germinação dos esporos dos FMAs .....	80
4.4	CONCLUSÃO .....	82
4.5	REFERÊNCIAS.....	82
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>		<b>85</b>

## CAPÍTULO 1 - CONTEXTUALIZAÇÃO

### 1.1 INTRODUÇÃO GERAL

O avanço da tecnologia da produção de mudas proporcionou a substituição gradativa da terra de subsolo por outros materiais, principalmente renováveis, como cascas de árvores, grãos e compostos orgânicos. A utilização desses materiais renováveis é de fundamental importância, especialmente considerando o aumento da produção de mudas em todo o território nacional, que deve seguir os padrões de sustentabilidade. Nesse contexto, torna-se essencial ampliar os estudos sobre substratos, explorando novas possibilidades de formulação, como a utilização de resíduos agroindustriais, florestais e urbanos (Kratz *et al.*, 2014).

Entre as alternativas emergentes nesse campo, os biocarvões (biochar), subprodutos da pirólise de biomassas de diversos materiais vegetais e animais, ricos em carbono, destacam-se. Amplamente estudados por seus benefícios potenciais na agricultura e silvicultura, os biocarvões são vistos como uma tecnologia promissora no Brasil, com pesquisadores liderando o debate sobre sua formalização como ferramenta de política ambiental para melhorar a fertilidade do solo e a gestão de resíduos agrícolas (Rittl e Kuyper, 2015).

No processo de produção de mudas, os biocarvões têm ganhado visibilidade por aprimorar as propriedades do substrato e elevar a qualidade das plantas, já que, quando adicionados aos substratos tradicionais, aceleram o crescimento e o desenvolvimento, melhorando as características físico-químicas do meio e reduzindo a necessidade de fertilizantes para algumas espécies (Wrobel-Tobiszewska *et al.*, 2016; Simiele *et al.*, 2022).

Entretanto, os efeitos dos biocarvões podem variar dependendo do seu material de origem e da resposta particular das espécies vegetais. Em certos casos o biochar não melhorou o crescimento das mudas quando utilizado isoladamente ou combinado com fertilizantes (CITAÇÃO??). Além disso, biocarvões derivados de diferentes resíduos mostram efeitos variáveis na germinação de sementes, possivelmente devido à presença de elementos tóxicos (Sarauer e Coleman, 2018; Das *et al.*, 2020).

Atualmente, no Brasil a segurança e a garantia de um substrato de qualidade são normatizadas pelas Instruções Normativas nº 14 (MAPA, 2004), que define os atributos que o fabricante deve garantir, e as Instruções Normativas nº 17 (MAPA, 2007) e nº 31 (MAPA, 2008), que estabelecem os métodos para avaliação das características físicas e químicas dos substratos.

Estas normativas podem auxiliar os produtores de substratos e mudas a determinar as doses ideais de *biochar* que proporcionam as melhores qualidades físicas e químicas do substrato. No entanto, devido às diferentes fontes de biomassa do biocarvão, variadas granulometrias e diferentes temperaturas utilizadas durante o processo de pirólise, há uma lacuna de incertezas quanto à

segurança ambiental e à viabilidade do uso de biocarvão em larga escala na produção de mudas. Neste contexto, uma análise do risco ecológico, utilizando protocolos ecotoxicológicos pode constituir estratégia essencial a garantia da segurança ambiental.

No entanto são necessários estudos sobre o uso potencial de biocarvão na produção de mudas florestais e uma avaliação dos riscos ambientais de seu uso por meio de protocolos ecotoxicológicos de forma a definir doses em substratos tradicionais, os quais, juntamente com os laudos das características físicas e químicas, permitirão garantir uma produção de mudas de qualidade, seguindo critérios de saúde humana e proteção ambiental.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial do uso do biocarvão de resíduo de termoelétrica como componente de substrato para a produção de mudas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar química e fisicamente o substrato com doses de biocarvão;
- Avaliar o efeito de doses de biocarvão no crescimento da raiz de alface nos substratos;
- Avaliar a qualidade de mudas de bracinga produzidas com substratos com doses de biocarvão;
- Avaliar os efeitos do biocarvão sobre a reprodução de colembolos e enquitreídeos e na germinação de esporos de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) utilizando protocolos ecotoxicológicos, de forma a garantir a utilização segura e sustentável do biocarvão;
- Determinar a melhor dose de biocarvão para a composição de substratos para produção de mudas com base no conjunto de dados das análises físicas, químicas e ecotoxicológicas.

## 1.3 HIPOTHESES

### 1.3.1 Capítulo 02:

A adição de biocarvão no substrato para produção de mudas modifica significativamente as propriedades químicas e físicas do substrato, dependendo da dose aplicada. Além disto, melhora o desenvolvimento radicular de alface, promovendo maior crescimento e vigor das raízes.

### 1.3.2 Capítulo 03:

A incorporação de biocarvão no substrato aumenta a qualidade das mudas de bracinga, expressa por maior biomassa, altura e vigor, variando conforme a dose de biocarvão aplicada no substrato.

### 1.3.3 Capítulo 04:

O uso de biochar na composição em substratos para produção de mudas não causará efeitos ecotoxicológicos adversos na comunidade edáfica e na germinação de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs).

## 1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.4.1 Substrato para produção de mudas

Dentre os fatores que podem influenciar na qualidade das mudas em viveiro está o substrato, que tem por finalidade garantir o desenvolvimento da planta com qualidade, em curto período e baixo custo (Cunha *et al.*, 2006; Caldeira *et al.*, 2008).

A produção de mudas de qualidade depende de vários fatores, sendo a composição dos substratos um fator de grande importância, pois a germinação de sementes, a iniciação radicular e o enraizamento estão diretamente ligados às características químicas, físicas e biológicas do substrato (Caldeira *et al.*, 2000).

O substrato ou o meio de semeadura e crescimento pode ser de qualquer material, ou mistura de materiais, sendo os resíduos orgânicos os mais utilizados, visto que a matéria orgânica é componente fundamental para que os substratos cumpram a sua finalidade básica (Padovani, 2006).

Há disponíveis no mercado diferentes fontes de substratos para produção de mudas, no entanto dependendo da finalidade de uso, pode tornar-se inviável economicamente, como no caso de implantação de reflorestamento para recuperação de áreas degradada (Cunha *et al.*, 2006). Na tentativa de contornar os transtornos causados pela crescente produção de lixo e resíduos industriais, têm-se buscado estratégias de reutilização desses rejeitos como componente de substrato (Trazzi *et al.*, 2012), possibilitando o seu reaproveitamento, e com isso garantir a obtenção de um material alternativo, de baixo custo, de fácil disponibilidade e auxiliar na redução do seu acúmulo no ambiente (Caldeira *et al.*, 2013).

Na escolha de um substrato, devem-se observar, principalmente, suas características físicas e químicas, a espécie a ser plantada, além dos aspectos econômicos, que sejam: baixo custo e grande disponibilidade (Fonseca, 2001). Entre as propriedades físicas mais importantes, encontram-se a densidade do substrato, a porosidade total, o espaço de aeração e a retenção de água. Já as características químicas mais importantes nos substratos são o valor de pH e a condutividade elétrica (Silveira *et al.*, 2002).

O conhecimento do valor da densidade volumétrica tem várias aplicações, como no cultivo em recipientes, servindo como parâmetro para o manejo da irrigação. De acordo com Kämpf (2000), misturas muito leves são próprias para bandejas, enquanto as de alta densidade são mais adequadas para recipientes maiores. Na análise de nutrientes (com referência à massa da amostra), a densidade é indispensável para a interpretação dos laudos e recomendações práticas (Fermino e Kämpf, 2012).

A porosidade, segundo Kämpf (2005), é de fundamental importância para o crescimento das plantas, visto que a alta concentração de raízes formadas nos recipientes exige elevado fornecimento de oxigênio e rápida remoção do gás carbônico formado. Dessa forma, o substrato deve ser suficientemente poroso, a fim de permitir trocas gasosas eficientes, evitando falta de oxigênio para respiração das raízes e para atividade dos microrganismos no meio.

Com relação ao valor de pH, os substratos devem apresentar valores dentro de uma faixa considerada adequada para o cultivo de plantas, pois valores inadequados, além de influenciar a disponibilidade de nutrientes (Carneiro, 1995), estão relacionados a desequilíbrios fisiológicos (Wilson, 1983). Conforme Kämpf (2000), em substratos onde predomina a matéria orgânica a faixa ideal de valor de pH recomendada é de 5,0 a 5,8 e, quando for à base de solo mineral, entre 6,0 e 6,5.

A condutividade elétrica (CE) é a medida da passagem da corrente elétrica entre eletrodos submetidos a uma solução composta por solutos iônicos (cátions e ânions). Portanto, quanto maior a quantidade de fertilizantes aplicados ao solo/substrato, maior será o valor da CE. Tomé Júnior (1997) afirma que o excesso de sais na zona radicular, independentemente dos íons presentes, prejudica a germinação, o desenvolvimento e a produtividade das plantas. Isso ocorre porque maior concentração da solução no solo ou substrato exige da planta maior dispêndio de energia para conseguir absorver água (efeito osmótico), prejudicando seus processos metabólicos essenciais.

Existem diferentes métodos para avaliação das análises químicas e físicas de substratos. Fonteno (1996) nos Estados Unidos e Baumgarten (2002) na Áustria, relataram a ocorrência de dificuldades para interpretar laudos emitidos por diferentes laboratórios, do mesmo país, porque os laboratórios utilizam métodos diferentes ou variações de um mesmo método para análises (Günther, 1984; Waller e Wilson, 1984; Miner, 1994).

No Brasil, os métodos oficiais para a determinação dos parâmetros físicos em substratos para plantas foram publicados na Instrução Normativa n.º 17 (IN nº 17), de 21 de maio de 2007 (BRASIL, 2007), alterada pela Instrução Normativa n.º 31 (IN nº 31), de 23 de outubro de 2008 (BRASIL, 2008). A IN nº 17 traz métodos para análise física e química de substratos para plantas e condicionadores de solos, dentre os quais estão o da preparação inicial do material e os dos atributos: umidade, densidade e capacidade de retenção de água. A IN nº 31 altera a IN nº 17 com relação aos métodos de avaliação de densidade e de capacidade de retenção de água.

#### **1.4.2 Mudanças de qualidade**

A aplicação adequada de práticas de viveiro para produzir mudas de qualidade é uma componente chave de programas de restauração bem-sucedidos usando mudas de raiz nua (Duryea, 1984; Mexal *et al.*, 1991) e cultivadas em recipientes (Toumey, 1916; Tinus *et al.*, 1979; Landis, 2010).

Os parâmetros para avaliação de qualidade de mudas têm como finalidades principais o aumento da sobrevivência das mudas após o plantio, diminuição de tratos culturais de manutenção do povoamento e conseqüentemente redução de replantios. Isso poderá ser obtido por meio de maior crescimento inicial das mudas em campo, caso atenda aos padrões de qualidade (Carneiro, 1995).

De acordo com Grossnickle e MacDonald (2018), atributos morfológicos e fisiológicos são usados para medir o desenvolvimento da cultura no viveiro. Atributos morfológicos comumente medidos incluem altura, diâmetro e raiz, os quais são um conjunto de atributos cujo objetivo é garantir o controle de qualidade e aumentar a confiança do consumidor. Os atributos fisiológicos comumente medidos durante o desenvolvimento da cultura incluem o estado dos nutrientes e o estado da água da planta. Estes atributos fornecem informações para acompanhar o desempenho das culturas, apoiando assim os ajustes culturais ao plano de culturas.

Para a obtenção dessas informações, sobre o desempenho das mudas nesta fase inicial, são realizadas avaliações quantitativas e qualitativas. As análises quantitativas são mensuradas com as variáveis biométricas diâmetro do coleto (DC), altura (H), pesos da matéria seca da parte aérea (MSPA), da matéria seca radicular (MSR), da matéria seca total (MST), relação altura/diâmetro (H/DC), relação dos pesos da matéria seca da parte aérea/raiz (RMSPAR) e índice de qualidade de Dickson (IQD), (Dickson, 1960; Pezzutti *et al.*, 2011).

O índice de qualidade de Dickson pode ser considerado promissor por considerar as associações entre caracteres dendrométricos e alométricos em sua fórmula matemática, pois utiliza diversos parâmetros morfológicos importantes (Eloy *et al.*, 2013).

### 1.4.3 Biochar

O biochar está normalmente relacionado aos solos de origem antropogênica, devido ao processo de formação ser semelhante, por meio da decomposição térmica do material vegetal. No entanto, solos antropogênicos são formados ao longo de milênios, e por isso, existe uma reposição contínua da matéria orgânica no solo (Trazzi *et al.*, 2018).

Geralmente, pesquisadores fazem a associação do biochar com a “Terra Preta de Índio”, que é um solo altamente fértil, devido principalmente à alta capacidade de troca de cátions, aos altos teores de matéria orgânica e nutrientes como nitrogênio, fósforo, cálcio e potássio. A “Terra Preta de Índio” ocorre em pequenas porções na Região Amazônica e foi formada através da decomposição de restos de plantas e animais, em locais onde índios nômades habitavam (Glaser *et al.*, 2001; Novotny *et al.*, 2009).

A possibilidade de se obter um produto com propriedades similares à Terra Preta de Índio despertou o interesse de pesquisadores do mundo inteiro, que viram no biochar um material com características adequadas para esta finalidade (International Biochar Initiative, 2012).

De acordo com a European Biochar Certification (2023), o biochar é um material poroso, carbonáceo produzido pela pirólise da biomassa que é um processo pelo qual as substâncias orgânicas são decompostas a temperaturas que variam de 350°C a 1000°C em um processo com baixo teor de oxigênio. Os biochars são, portanto, chars de pirólise específicos, identificados pelas suas características adicionais de produção, qualidade e utilização ambientalmente sustentáveis.

Essa transformação térmica permite ao produto final apresentar características adsorventes (Sohi *et al.*, 2014; Yavari *et al.*, 2015), fertilizantes (Hossain *et al.*, 2011; Shulz *et al.*, 2013), condicionadoras de solo (Hossain *et al.*, 2009; Obia *et al.*, 2016), sequestro de carbono, a retenção de água e a filtração de água no solo (Lehmann e Joseph, 2009) por ser um produto que promove a melhoria das propriedades físicas, químicas ou atividade biológica podendo recuperar solos degradados ou desequilibrados nutricionalmente (MAPA, 2004). Além disso, pode contribuir para mitigação das mudanças climáticas por meio da fixação de C, devido a sua elevada resistência a degradação, conferida pela presença de cadeias aromáticas condensadas (Novotny *et al.*, 2015).

Em relação às condições de pirólise, a temperatura é o principal fator de influência na qualidade e no rendimento do produto final. Biochars produzidos em temperaturas mais baixas são adequados para uso como fertilizante, uma vez que são materiais menos recalcitrantes e capazes de serem mineralizados mais rápido pela microbiota do solo, disponibilizando nutrientes em menos tempo para as culturas. Já biochars produzidos a temperaturas mais altas, por serem materiais mais recalcitrantes, têm seu uso adequado para o sequestro de carbono no solo (Agrafioti *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2015).

A qualidade do biochar é dependente do tipo e fonte da matéria-prima utilizada para a sua produção e das condições utilizadas no tratamento térmico (Mendez *et al.*, 2013). O biochar pode ser obtido a partir de uma ampla variedade de fontes, incluindo materiais lenhosos, resíduos agrícolas, esterco e outros produtos residuais (Zwieten *et al.*, 2010).

#### **1.4.4 Ecotoxicologia**

A ecotoxicologia tem como objetivo a proteção dos ecossistemas frente aos impactos provocados por substâncias tóxicas. Uma vez que os estudos ecotoxicológicos avaliam as condições ambientais e monitoram suas tendências ao longo do tempo, predizem os efeitos dos agentes tóxicos e orientam a seleção de práticas de remediação (ISO, 2001).

Com isto, a ecotoxicologia é utilizada na observação do risco ambiental oferecido por diferentes agentes poluentes, como pesticidas (Yang *et al.*, 2016; Kobashi *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2019), fármacos (Godoy *et al.*, 2015; Ganchev *et al.*, 2016), metais pesados (Gutiérrez-Ginés *et al.*, 2015; Buch *et al.*, 2017; Conti, 2017), poluentes domésticos, como o lodo (Domene *et al.*, 2011), entre outros.

No solo, a ecotoxicologia é também um método eficiente para estimar o perigo potencial de substâncias tóxicas (Terekhova, 2011). Esse perigo potencial pode ser mensurado através de ensaios científicos, como ensaios de reprodução, e através da avaliação das concentrações de efeito, ou das concentrações letais, utilizando diversos organismos, dentre os quais estão os colêmbolos (Zortéa *et al.*, 2018) e os enquitreídeos (Roembke *et al.*, 2017).

Os colêmbolos são invertebrados que vivem no solo e estão intimamente relacionados com a qualidade do solo (Hopkin, 1997). Nas condições de campo, sua abundância e estrutura da comunidade são usadas como indicadores de perturbação do solo (Twardowski *et al.*, 2016; Gruss *et al.*, 2019; Gruss *et al.*, 2022). Além disso, as características funcionais dos colêmbolos (por exemplo, tamanho do corpo ou pigmentação) são usadas na avaliação da qualidade do solo (Parisi *et al.*, 2005; Yin *et al.*, 2020). Em pesquisas ecotoxicológicas, principalmente duas espécies, *Folsomia candida* e o *F. fimetaria* são usadas nos testes (Krogh, 2009). O *Folsomia candida* têm sido o grupo mais utilizado, por causa de sua fácil adaptação em laboratório e tempo de geração relativamente curto em salas com temperatura controlada (Fountain e Hopkin, 2005).

Os enquitreídeos (classe Oligochaeta, família Enchytraeidae) são anelídeos do solo ecologicamente relevantes, que desempenham um papel importante na decomposição da matéria orgânica e na bioturbação do solo (Didden, 1993). Os enquitreídeos vivem em contato próximo com a fração aquosa do solo e suas vias de exposição são dérmica, intestinal e respiratória (Lock; Janssen, 2003; Römbke, 2003).

As diretrizes do teste de reprodução de enquitreídeos (ERT), ISO 16387 (ISO, 2004) e OECD 220 (OCDE, 2004), foram estabelecidas para o gênero *Enchytraeus*. Essas diretrizes recomendam o uso de *Enchytraeus albidus* (Henle, 1873), espécie que foi testada internacionalmente (Römbke e Moser, 2002). Como espécie de teste, as diretrizes também sugerem o uso de espécies alternativas de enquitreídeos (ISO, 2004; OECD, 2004). Entre estes, *Enchytraeus crypticus* (Westheide e Graefe, 1992) ganhou atenção crescente em estudos ecotoxicológicos do solo devido às vantagens práticas (Van Gestel *et al.*, 2011).

Devido ao seu papel ecológico, ampla distribuição geográfica e sensibilidade aos poluentes do solo (Dagher *et al.*, 2020, Folli-Pereira *et al.*, 2012), os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) são considerados bons indicadores biológicos e podem ser impactados por fatores ambientais, desde a germinação de esporos até a colonização simbiótica de plantas hospedeiras (Andrighetti *et al.*, 2014, Ockleford *et al.*, 2017). Os fungos micorrízicos arbusculares, são considerados organismos chave nos sistemas solo-planta, pois sua associação com as raízes de cerca de 80% das espécies de plantas vasculares, representa uma ligação direta entre estas e o solo (ISO, 2009).

Bioensaios baseados em fungos são uma ferramenta versátil para monitoramento ambiental, permitindo a detecção de diversos poluentes no solo, sedimentos e água (Soares *et al.*, 2022). Além

disto, exibem uma taxa de crescimento relativamente rápida e uma ampla gama de colonização de substrato; e, finalmente, são fáceis de manipular (Parry, 1998).

Na Europa, existe uma metodologia padronizada, o Protocolo ISO 10832:2009, o qual foi desenvolvido para avaliar o efeito de metais pesados na fase pré-simbiótica do fungo *Funneliformis mosseae* e recentemente, essa metodologia foi adaptada para avaliar o efeito de agrotóxicos na germinação de esporos dos FMAs *Gigaspora albida* e *Rhizophagus clarus* (fase pré-simbiótica do ciclo de vida) (Mallmann, 2016; Mallmann *et al.*, 2018).

Além dos organismos alvos do solo, os testes ecotoxicológicos também são baseados em plantas e assumem um papel evidente, considerando que muitos contaminantes entram no ecossistema através dos organismos vegetais (ou seja, organismos autotróficos) que são o primeiro e obrigatório passo das principais cadeias tróficas. Assim, as plantas podem acumular tóxicos, e os herbívoros serão contaminados com o potencial de contaminação da cadeia alimentar por processos de bioacumulação e biomagnificação (Ceschin e Scalici, 2020).

Diversas espécies têm sido utilizadas para avaliação ecotoxicológica de ambientes aquáticos (Ceschin e Scalici, 2020; Cui e An, 2020) e terrestres, como a alface (*Lactuca sativa*), a qual tem sido amplamente utilizada por apresentar germinação rápida e homogênea (Fernandes e Penha, 2016).

A ISO 11269 (2012) é a norma internacional que descreve o método para avaliar a qualidade de um solo desconhecido e a função do habitat do solo, determinando a emergência e o crescimento inicial de plantas em solos contaminados, a qual faz parte da série ISO 11269 sobre a determinação dos efeitos de poluentes na flora do solo. Esta normativa envolve a semeadura em amostras de solo contaminadas e não contaminadas e a avaliação da emergência e do crescimento inicial das plântulas após um período de incubação. Isto permite comparar os efeitos de solos contaminados com solos de referência não contaminados.

#### **1.4.5 Bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.)**

*Mimosa scabrella* Benth, conhecida popularmente como bracatinga, é uma espécie arbórea da família Leguminosae, subfamília Mimosoideae. Apresenta ampla distribuição geográfica, ocorrendo especialmente no sul do Brasil, mas também em partes dos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo (Dutra e Morim, 2017).

É uma árvore perenifólia, com 4 a 18 m de altura e 20 a 30 cm de DAP (diâmetro na altura do peito), podendo atingir até 29 m de altura e 50 cm ou mais de DAP, na idade adulta (Carpanezi e Laurent, 1988; Carvalho, 2003).

As sementes se dispersam por autocoria, destacando-se naturalmente dos cráspides e formando um banco de sementes no solo, próximo à matriz. A longevidade da espécie é baixa, encerrando o ciclo em torno dos 25 anos (Siminski e Mazuchowski, 2014).

A espécie apresenta interesse do ponto de vista econômico, para lenha e confecção de móveis e, ecológico, na recuperação de áreas degradadas e em consórcios agroflorestais (Rosa, 2009). De acordo com Gerber et al. (2021), a bracatinga é eficaz para projetos de restauração florestal devido ao seu rápido crescimento, alta taxa de sobrevivência e capacidade de rebrota após eventos climáticos adversos. Além disto, esta espécie é importante para o sequestro de carbono e produção de biomassa, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e fornecimento de lenha (Mello *et al.*, 2012).

Na região noroeste do planalto catarinense, em assentamentos de reforma agrária, quase a metade da renda financeira das famílias assentadas (49,1%, em média) é proveniente do manejo de bracatingais, formações florestais em que a bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.) é a espécie predominante, determinadas a partir de um conjunto de intervenções silviculturais. Os bracatingais ocupam, em média, 24,6% da área dos assentamentos da região e, em função da preponderância do seu manejo como principal fonte de renda e de peculiaridades dos sistemas produtivos locais, este manejo contribui, de forma expressiva, para a manutenção de cobertura florestal nativa em 61% da área dos assentamentos (Steenbock, 2009).

#### 1.4 REFERÊNCIAS

- AGRAFIOTI, E.; BOURAS, G.; KALDERIS, D.; DIAMADOPOULOS, E. Biochar production by sewage sludge pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 101, p. 72-78, 2013.
- ANDRIGHETTI, M. S.; NACHTIGALL, G. R.; QUEIROZ, S. C. N.; FERRACINI, V. L.; AYUB, M. A. Z. Biodegradação de glifosato pela microbiota de solos cultivados com macieira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1643-1653, 2014.
- BAUMGARTEN, A. **Methods of chemical and physical evaluation of substrates for plants**. In: FURLANI, A. M. C. Caracterização, manejo e qualidade de substratos para produção de plantas. Campinas: Instituto Agrônomo, 2002. p. 122. (Documentos IAC, 70).
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. Secretaria de Defesa Agropecuária (SDA). **Instrução Normativa SDA N° 17 de 21 de maio de 2007**. Métodos Analíticos Oficiais para Análise de Substratos e Condicionadores de Solos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 24 de maio 2007.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Instrução Normativa N.º 31, de 23 de outubro de 2008**. Altera os subitens 3.1.2, 4.1 e 4.1.2, do Anexo à Instrução Normativa SDA n.º 17, de 21 de maio de 2007. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 24 out. 2008. Seção 1, p. 20.
- BUCH, A. C.; BROWN, G. G.; CORREIA, M. E. F.; LOURENÇATO, L. F.; SILVA-FILHO, E. V. Ecotoxicology of mercury in tropical forest soils: Impact on earthworms. **Science of the Total Environment**, v. 589, p. 222-231, 2017.
- CALDEIRA, M. V. W.; ROSA, G. N.; FENILLI, T. A. B.; HARBS, R. M. P. Composto orgânico na produção de mudas de aroeira-vermelha. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 9, n. 1, p. 27-33, 2008.
- CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; 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, n. 1-2, p. 19-30, 2000.

- CALDEIRA, M. V. W.; DELARMELINA, W. M.; FARIA, J. C. T.; JUVANHOL, R. S. Alternative substrates in the production of seedlings of *Chamaecrista desvauxii*. **Revista Árvore**, v. 37, n. 1, p. 31-39, 2013.
- CARNEIRO, J. G. A. **Produção e controle de qualidade de mudas florestais**. Curitiba: UFPR/FUPEP, 1995. 451 p.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Colombo: Embrapa Florestas, 2003. 1039 p.
- CARPANEZZI, A. A.; LAURENT, J. M. E. (Ed.). **Manual técnico da bracatinga** (*Mimosa scabrella* Benth.). Colombo: EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Florestas, 1988. 70 p. (EMBRAPA. CNPF. Documentos, 20).
- CESCHIN, S.; BELLINI, A.; SCALICI, M. Aquatic plants and ecotoxicological assessment in freshwater ecosystems: a review. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 28, p. 4975-4988, 2020.
- CONTI, E. Ecotoxicological Evaluation of *Parallelomorpha laevigatus* (Coleoptera, Carabidae) as a Useful Bioindicator of Soil Metal Pollution. **Advanced Techniques in Biology & Medicine**, v. 5, n. 3, 2017.
- CUI, R.; NAM, S.; AN, Y. *Salvinia natans*: A potential test species for ecotoxicity testing. **Environmental Pollution**, v. 267, p. 115650, 2020.
- DAGHER, D. J.; DE LA PROVIDENCIA, I. E.; PITRE, F. E.; ST-ARNAUD, M.; HIJRI, M. Arbuscular mycorrhizal fungal assemblages significantly shifted upon bacterial inoculation in non-contaminated and petroleum-contaminated environments. **Microorganisms**, v. 8, 602, 2020.
- DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **Forest Chronicle**, v. 36, p. 10-13, 1960.
- DIDDEN, W. A. M. Ecology of terrestrial Enchytraeidae. **Pedobiologia**, v. 37, p. 2-29, 1993.
- DOMENE, X.; CHELINHO, S.; CAMPANA, P.; NATAL-DA-LUZ, T.; ALCANIZ, J. M.; ANDRÉS, P.; RÖMBKE, J.; SOUSA, J. P. Influence of soil properties on the performance of *Folsomia candida*: implications for its use in soil ecotoxicology testing. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 30, p. 1497-1505, 2011.
- DURYEA, M. L. **Nursery cultural practices: Impacts on seedling quality**. In: DURYEA, M. L.; LANDIS, T. D. (Ed.). *Forest Nursery Manual: Production of Bareroot Seedlings*. The Hague: Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers, 1984. p. 143-164.
- DUTRA, R. I. J. P.; NASCIMENTO, S. M.; NUMAZAWA, S. Resíduos de indústria madeireira: caracterização, consequências sobre o meio ambiente e opções de uso. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, ed. 5, 2005.
- DUTRA, V. F.; MORIM, M. P. **Lista de Espécies da Flora do Brasil**. Jardim Botânico do Rio Janeiro. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB100978>. Acesso em: 10 dez. 2023.
- EBC. European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. **Carbon Standards International (CSI)**, Frick, Switzerland, versão 10.3E, 5 abr. 2023. Disponível em: <http://european-biochar.org>. Acesso em: 10 dez. 2023.
- ELOY, E.; CARON, B. O.; SCHMIDT, D.; BEHLING, A.; SCHWERS, L.; ELLI, E. F. Avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis* utilizando parâmetros morfológicos. **Floresta**, v. 43, n. 3, p. 373-384, 2013.
- FERMINO, M. H.; KÄMPF, A. N. Densidade de substratos dependendo dos métodos de análise e níveis de umidade. **Horticultura Brasileira**, v. 30, p. 75-79, 2012.

- FONSECA, T. G. **Produção de mudas de hortaliças em substratos de diferentes composições com adição de CO<sub>2</sub> na água de irrigação**. 2001. 72 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2001.
- FONTENO, W. C. **Growing media types and physical/chemical properties**. In: REGD, D. W. (Ed.). *A Growers Guide to Water, Media and Nutrition Greenhouse Crops*. Batavia: Ball, 1996. p. 93-122.
- FOUNTAIN, M. T.; HOPKIN, S. P. *Folsomia candida* (Collembola): a “Standard” soil arthropod. **Annual Review of Entomology**, v. 50, p. 201-22, 2005.
- FOLLI-PEREIRA, M. S.; MEIRA-HADDAD, L. S.; BAZZOLLI, D. M. S.; KASUYA, M. C. M. Micorriza arbuscular e a tolerância das plantas ao estresse. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1663-1679, 2012.
- GLASER, B.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. O fenômeno 'Terra Preta': um modelo de agricultura sustentável nos trópicos úmidos. **Naturwissenschaften**, v. 88, p. 37-41, 2001.
- GANCHEV, D. H.; MARINOV, M. N.; STOYANOV, N. M. Toxicity research of some spirohydantoin derivatives towards *Lumbricus terrestris*. **Journal of Scientific and Applied Research**, v. 10, p. 30-38, 2016.
- GERBER, D.; TOPANOTTI, L.; STOLARSKI, O.; TRENTIN, B.; NICOLETTI, M.; BECHARA, F. *Mimosa scabrella* Benth. plantada para restauração florestal no sul do Brasil. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 10, 2021.
- GODOY, A. A.; KUMMROW, F.; PAMPLIN, P. A. Z. Ecotoxicological evaluation of propranolol hydrochloride and losartan potassium to *Lemna minor* L. (1753) individually and in binary mixtures. **Ecotoxicology**, v. 24, n. 5, p. 1112-1123, 2015.
- GUTIÉRREZ-GINÉS, M. J.; PASTOR, J.; HERNANDEZ, A. J. Heavy Metals in Native Mediterranean Grassland Species Growing at Abandoned Mine Sites: Ecotoxicological Assessment and Phytoremediation of Polluted Soils. **Heavy Metal Contamination of Soils**, v. 44, p. 159-178, 2015.
- GÜNTHER, J. Analytics of substrates and problems by transmitting the results into horticultural practice. **Acta Horticulturae**, v. 150, p. 33-40, 1984.
- GROSSNICKLE, S.; MACDONALD, J. Qualidade de mudas: história, aplicação e atributos da planta. **Forests**, v. 9, p. 283, 2018.
- GRUSS, I.; TWARDOWSKI, J. P.; LATAWIEC, A.; KRÓLCZYK, J.; MEDYŃSKA-JURASZEK, A. The Effect of Biochar Used as Soil Amendment on Morphological Diversity of Collembola. **Sustainability**, v. 11, p. 5126, 2019b.
- GRUSS, I.; TWARDOWSKI, J.; NEBESKÁ, D.; TRÖGL, J.; STEFANOVSKA, T.; PIDLISNYUK, V.; MACHOVÁ, I. Microarthropods and vegetation as biological indicators of soil quality studied in poor sandy sites at former military facilities. **Land Degradation and Development**, v. 33, p. 358-369, 2022.
- HOPKIN, S. P. **Biologia dos Springtails (Insecta: Collembola)**. Oxford: Universidade de Oxford Imprensa, 1997.
- INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE. **Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil**. 2012. Disponível em: [https://biochar-international.org/sites/default/files/Guidelines\\_for\\_Biochar\\_That\\_Is\\_Used\\_in\\_Soil\\_Final](https://biochar-international.org/sites/default/files/Guidelines_for_Biochar_That_Is_Used_in_Soil_Final). Acesso em: 12 jan. 2021.

- ISO. International Organization for Standardization. **ISO 15799**: Soil quality: Guidance on the ecotoxicological characterization of soil and soil materials. Geneva, 2001.
- ISO. International Organization for Standardization. **ISO 16387**: Soil quality: Effects of pollutants on Enchytraeidae (Enchytraeus sp.) - Determination of effects on reproduction and survival. Geneva, 2004.
- ISO. International Organization for Standardization. **ISO 10832**: Soil quality - Effects of pollutants on mycorrhizal fungi – Spore germination test. Geneva, 2009.
- ISO. International Organization for Standardization. **ISO 11269-2**: Soil quality - Determination of the effect of pollutants on soil flora, Part 2: Effects of chemicals on the emergence and growth of higher plants. Geneva, 2012.
- HOSSAIN, M. K.; STREZOV, V.; NELSON, P. F. Thermal characterisation of the products of wastewater sludge pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 85, p. 442-446, 2009.
- HOSSAIN, M. K.; STREZOV, V.; CHAN, K. Y.; ZIOLKOWSKI, A.; NELSON, P. F. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. **Journal of Environment Management**, v. 92, p. 223-228, 2011.
- KÄMPF, A. N. Seleção de materiais para uso como substrato. In: KÄMPF, A. N.; FERMINO, M. H. (Ed.). **Substratos para plantas: a base da produção vegetal em recipientes**. Porto Alegre: Gênese, 2000. p. 139-145.
- KÄMPF, A. N. Substrato. In: KÄMPF, A. N. **Produção comercial de plantas ornamentais**. 2. ed. Guaíba: Agrolivros, 2005. p. 45-72.
- KOBASHI, K.; HARADA, T.; ADACHI, Y.; MORI, M.; IHARA, M. Comparative ecotoxicity of imidacloprid and dinotefuran to aquatic insects in rice mesocosms. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 138, p. 122-129, 2017.
- KRATZ, D.; NOGUEIRA, A.; WENDLING, I.; SOUZA, P. Substratos renovados para produção de mudas de *Mimosa scabrella*. **Revista Floresta**, v. 45, p. 393-408, 2014.
- KROGH, P. H. Toxicity testing with the collembolans *Folsomia fimetaria* and *Folsomia candida* and the results of a ringtest. **Environmental Project**, n. 1256, Miljøstyrelsen, p. 66, 2009.
- LANDIS, T. D.; DUMROESE, R. K.; HAASE, D. L. The Container Tree Nursery Manual, Volume 7, Seedling Processing, Storage, and Outplanting; **Agriculture Handbook** 674; U.S. Department of Agriculture, Forest Service: Washington, DC, USA, 2010.
- LOCK, K.; JANSSEN, C. R. Influence of aging on metal availability in soils. **Reviews of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 178, p. 1-21, 2003.
- LEHMANN, L.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: science and technology**. London: Earthscan, 2009. 416 p.
- MALLMANN, G. C. **Efeito de poluentes sobre fungos micorrízicos arbusculares: proposta de adaptação e ampliação de uso do protocolo ISO/TS 10832:2009**. 2016. 115 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2016.
- MALLMANN, G. C. et al. Placing arbuscular mycorrhizal fungi on the risk assessment test battery of plant protection products (PPPs). **Ecotoxicology**, v. 27, p. 809-818, 2018.
- MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Decreto n. 4.954, 14/1/2004**. 10 dez. 2004. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacoes>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

- MEXAL, J. G.; SOUTH, D. B. Bareroot seedling culture. In: DURVEA, M. L.; DOUGHERTY, P. M. (Eds.). **Forest Regeneration Manual**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991. p. 89-115.
- MELLO, A.; NUTTO, L.; WEBER, K.; SANQUETTA, C.; MATOS, J.; BECKER, G. Equações individuais de biomassa e carbono para *Mimosa scabrella* Benth. (Bracatinga) no sul do Brasil. **Silva Fennica**, v. 46, p. 333-343, 2012.
- MENDEZ, A.; TARQUIS, A. M.; SAA-REQUEJO, A.; GUERRERO, F.; GASCÓ, G. Influence of pyrolysis temperature on composted sewage sludge biochar priming effect in a loamy soil. **Chemosphere**, v. 93, p. 668-676, 2013.
- MINER, J. A. **Sustratos: propiedades y caracterización**. Madrid: Mundi-Prensa, 1994. 172 p.
- NOVOTNY, E. H et al. Lições da Terra Preta de Índios da Amazônia para o aproveitamento do carvão vegetal para corretivo de solo. **Revista da Sociedade Brasileira de Química**, v. 20, p. 1003-1010, 2009.
- 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 de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 321-344, 2015.
- OBIA, A.; MULDER, J.; MARTINSEN, V.; CORNELISSEN, G.; BORRESEN, T. In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 33-44, 2016.
- OECD. Organization for Economic Cooperation and Development. **OECD 220: Guidelines for testing of chemicals – Enchytraeid reproduction test**. Paris, France, 2004.
- OCKLEFORD, C. et al. Scientific Opinion addressing the state of the science on risk assessment of plant protection products for in-soil organisms. **EFSA Journal**, v. 15, n. 4690, p. 225, 2017.
- PADOVANI, V. C. R. **Composto de lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de árvores nativas e exóticas**. Campinas, 2006. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006. Disponível em:
- PARISI, V.; MENTA, C.; GARDI, C.; JACOMINI, C.; MOZZANICA, E. Microarthropod communities as a tool to assess soil quality and biodiversity: a new approach in Italy. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 105, p. 323-333, 2005.
- PEZZUTTI, R. V.; CALDATO, S. L. Sobrevivência e crescimento inicial de mudas de *Pinus taeda* L. com diferentes diâmetros do colo. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 2, p. 355-362, 2011
- RITTL, T.; ARTS, B.; KUYPER, T. Biochar: um arranjo de política emergente no Brasil?. **Environmental Science & Policy**, v. 51, p. 45-55, 2015.
- RÖMBKE, J.; SCHMELZ, R. M.; PELOSI, C. Effects of organic pesticides on enchytraeids (Oligochaeta) in agroecosystems: laboratory and higher-tier tests. **Frontiers in Environmental Science**, v. 5, p. 20, 2017.
- RÖMBKE, J.; MOSER, T. Validating the enchytraeid reproduction test: organisation and results of an international ringtest. **Chemosphere**, v. 46, p. 1117-1140, 2002.
- RÖMBKE, J. Ecotoxicological laboratory tests with enchytraeids: a review. **Pedobiologia**, v. 47, p. 607-616, 2003.
- ROSA, F. C. **Superação da dormência de sementes e cultivo in vitro de bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.)**. 2009. 49 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- SARAUER, J.; COLEMAN, M. Biochar como um componente de meio de cultivo para produção em contêineres de Douglas-fir. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 48, p. 581-588, 2018.

- SIMIELE, M.; ZIO, E.; MONTAGNOLI, A.; TERZAGHI, M.; CHIATANTE, D.; SCIPPA, G.; TRUPIANO, D. Biochar e/ou composto para melhorar o desempenho de mudas produzidas em viveiros: uma ferramenta potencial para programas de restauração florestal. **Florestas**, 2022.
- SIMINSKI, A.; MAZUCHOWSKI, J. Z. **Caracterização da espécie**. In: MAZUCHOWSKI, J. Z.; RECH, T. D.; TORESAN, L. (Orgs.). Bracatinga, *Mimosa scabrella* Benth.: cultivo, manejo e usos da espécie. Florianópolis: Epagri, 2014. Cap. 1, p. 19-40.
- SILVEIRA, R. L. V. et al. **Adubação e nutrição de espécies nativas**: viveiro e campo. São Paulo: Universidade São Paulo, 2002. 22 p.
- SOHI, S.; CLEAT, R.; GRAHAM, M.; CROSS, A. Long-term balance in heavy metal adsorption and release in biochar derived from sewage sludge. **Geophysical Research Abstracts**, v. 16, 2014.
- SOARES, D.; PROCÓPIO, D.; ZAMUNER, C.; NÓBREGA, B.; BETTIM, M.; REZENDE, G.; LOPES, P.; PEREIRA, A.; BECHARA, E.; OLIVEIRA, A.; FREIRE, R.; STEVANI, C. Bioensaios fúngicos para monitoramento ambiental. **Fronteiras em Bioengenharia e Biotecnologia**, v. 10, 2022.
- SCHULZ, H.; DUNST, G.; GLASER, B. Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, p. 817-827, 2013.
- TEREKHOVA, V. A. Soil bioassay: problems and approaches. **Eurasian Soil Science**, v. 44, p. 173-179, 2011.
- TOUMEY, J. W. **Seeding and planting, a manual for the guidance of forestry students, foresters, nurserymen, forest owners, and farmers**. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1916.
- TINUS, R. W.; MCDONALD, S. E. **How to grow tree seedlings in containers in greenhouses**. Fort Collins: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1979. (GTR-RM-60).
- TRAZZI, P. A.; CALDEIRA, M. V. W.; COLOMBI, R.; GONÇALVES, E. O. Qualidade de mudas de *Murraya paniculata* produzidas em diferentes substratos. **Floresta**, v. 42, n. 3, 2012.
- TRAZZI, P. A.; HIGA, A. R.; DIECKOW, J.; MANGRICH, A. S.; HIGA, R. C. V. Biocarvão: realidade e potencial de uso no meio florestal. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 875-887, 2018.
- VAN GESTEL, C. A. M.; BORGMAN, E.; VERWEIJ, R. A.; DIEZ ORTIZ, M. The influence of soil properties on the toxicity of molybdenum to three species of soil invertebrates. **Ecotoxicol. Environ. Saf.**, v. 74, p. 1-9, 2011.
- ZHANG, J.; LU, F.; ZHANG, H.; SHAO, L.; CHEN, D.; HE, P. Multiscale visualization of the structural and characteristic changes of sewage sludge biochar oriented towards potential agronomic and environmental implication. **Scientific Reports**, v. 5, 2015.
- ZORTÉA, T.; REIS, T. R.; SERAFINI, S.; SOUSA, J. P.; SILVA, A. S.; BARETTA, D. Ecotoxicological effect of fipronil and its metabolites on *Folsomia candida* in tropical soils. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 62, p. 203-209, 2018.
- ZORTÉA, T.; BARETTA, D.; MACCARI, A. P.; SEGAT, J. C.; BOIAGO, E. S.; SOUSA, J. P.; DA SILVA, A. S. Influence of cypermethrin on avoidance behavior, survival and reproduction of *Folsomia candida* in soil. **Chemosphere**, v. 122, p. 94-98, 2015.
- ZWIETEN, V. L et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. **Plant and Soil**, v. 327, p. 235-246, 2010.
- WALLER, P. L.; WILSON, G. C. D. Evaluation of growing media for consumer use. **Acta Horticulturae**, v. 150, p. 51-58, 1983.

- WANG, X.; ZHU, J.; PENG, Q.; WANG, Y.; GE, J.; YANG, G.; WANG, X.; CAI, L.; SHEN, W. Multi-level ecotoxicological effects of imidacloprid on earthworm (*Eisenia fetida*). **Chemosphere**, v. 219, p. 923-932, 2019.
- WESTHEIDE, W.; GRAEFE, U. Two new terrestrial *Enchytraeus* species (Oligochaeta, Annelida). **Journal of Natural History**, v. 26, p. 479-488, 1992.
- WILSON, G. C. S. The physico-chemical and physical properties of horticultural substrates. **Acta Horticulturae**, v. 150, p. 19-32, 1983.
- WROBEL-TOBISZEWSKA, A.; BOERSMA, M.; ADAMS, P.; SINGH, B.; FRANKS, S.; SARGISON, J. Biochar para plantações florestais de eucalipto. **Acta Horticulturae**, p. 55-62, 2016.
- YAVARI, S.; MALAKHAMAD, A.; SAPARI, N. B. Biochar efficiency in pesticides sorption as a function of production variables-a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, p. 13824-13841, 2015.
- YANG, Y.; OWINO, A. A.; GAO, Y.; YAN, X.; XU, C.; WANG, J. Occurrence, composition and risk assessment of antibiotics in soils from Kenya, Africa. **Ecotoxicology**, v. 25, n. 6, p. 1194-1201, 2016.
- YIN, R.; KARDOL, P.; THAKUR, M. P.; GRUSS, I.; WU, G. L.; EISENHAEUER, N.; SCHÄDLER, M. Soil functional biodiversity and biological quality under threat: intensive land use outweighs climate change. **Soil Biol. Biochem**, v. 147, 2020.