



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**ÁLISON MOREIRA DA SILVA**

**O biocarvão como matéria prima para a produção de cápsulas densificadas  
veiculadoras de sementes**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2021

ÁLISON MOREIRA DA SILVA

**O BIOCÁRVÃO COMO MATÉRIA PRIMA PARA A PRODUÇÃO DE CÁPSULAS  
DENSIFICADAS VEICULADORAS DE SEMENTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Orientador: Prof. D. Sc Ananias Francisco Dias Júnior.

Coorientador: Prof. D. Sc Rodrigo Sobreira Alexandre.

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2021

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de  
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

S586b Silva, Alison Moreira da, 1995-  
O biocarvão como matéria prima para a produção de cápsulas  
densificadas veiculadoras de sementes / Alison Moreira da Silva.  
2021.  
89 f. : il.

Orientador: Ananias Francisco Dias Júnior.  
Coorientador: Rodrigo Sobreira Alexandre.  
Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade  
Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e  
Engenharias.

1. Biocarvão. 2. Pirólise. 3. Compactação. 4. Sementes. 5.  
Germinação. 6. Mudas. I. Dias Júnior, Ananias Francisco. II.  
Alexandre, Rodrigo Sobreira. III. Universidade Federal do  
Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. IV.  
Título.

CDU: 630

---

**O BIOCÁRVÃO COMO MATÉRIA PRIMA PARA A PRODUÇÃO DE  
CÁPSULAS DENSIFICADAS VEICULADORAS DE SEMENTES**

**Álison Moreira da Silva**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 19 de fevereiro de 2021.



---

**Prof. Dr. José Otávio Brito** (Examinador externo)  
Universidade de São Paulo



---

**Prof. Dr. Renato Ribeiro Passos** (Examinador externo)  
Universidade Federal do Espírito Santo



---

**Prof. Dr. Rodrigo Sobreira Alexandre** (Coorientador)  
Universidade Federal do Espírito Santo



---

**Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior** (Orientador)  
Universidade Federal do Espírito Santo

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Adilson e Débora que, ao lado de seus companheiros, passaram por todas as situações possíveis para que eu alcançasse meus objetivos. Por todo amor, carinho, incentivo, apoio, bons exemplos e pela luta empenhada em minha educação e formação de caráter.

À minha companheira, Simone, por todo carinho, parceria, paciência e sacrifícios realizados em prol dos nossos sonhos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela saúde e pela oportunidade de conhecer pessoas tão incríveis e vivenciar momentos únicos e especiais.

Aos meus pais, Adilson da Silva e Débora de Souza Moreira, por todo amor, todo sacrifício, por serem sempre meus exemplos e pelas vezes que abdicaram de seu conforto pela realização dos meus ideais.

À minha companheira, Simone Augusta dos Santos, pelos momentos compartilhados nesses oito anos de convívio. Pela paciência, amor e incentivo em todos os momentos. Sem você minha caminhada seria muito mais difícil.

À minha família, pelo carinho, apoio, momentos de alegria e por se mostrarem sempre orgulhosos de mim.

Aos amigos da vida, Maicon, Hiago, Mareto e Diego, que mesmo de longe, sempre me apoiaram e torceram por mim.

Ao Ricardo Pinheiro Cabral, pelo apoio, amizade e companheirismo de sempre. Amizades boas devem ser valorizadas, e a sua com certeza é uma delas.

Ao professor Ananias Francisco Dias Júnior, pela orientação, disponibilidade, oportunidades, ensinamentos, amizade e por acreditar na minha capacidade desde 2018, quando nos conhecemos. O senhor se mostrou não só um orientador, mas um amigo. Sou uma pessoa muito melhor por ter sido seu orientado. Pessoas especiais como o senhor merecem o melhor, sempre.

Ao professor Rodrigo, por abrir as portas do seu laboratório e me orientar em todo o projeto. Sem sua orientação, nada disso seria possível.

A todos que ajudaram neste trabalho, em especial ao Ronaldo Willian da Silva, Caroline Palacio de Araujo, Ingridh Medeiros Simões, Thuanny Lins, Tamyris de Mello e Otávio de Oliveira, que abdicaram de suas tarefas sem pensar duas vezes para ajudar sempre que eu precisava.

Aos membros do LEB Luís Filipe Cezario, Fabíola Delatorre, Gabriela Cupertino, Alfredo Júnior, Tayná Rebonato, Gabriel Zuqui, Maria Paula Reggiane, Jéssica Mesquita e Aécio Dantas. Agradeço a oportunidade em conhecê-los e dividir os momentos importantes nestes anos.

À Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCFL).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de pesquisa (Processo 88882.384877/2019-01).

Agradeço a todos que de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram para que eu pudesse chegar aonde estou.

*“Uma coisa é certa, nada passa em branco. Toda escolha ou omissão (omissão também é uma escolha), sem exceção, é uma semente, e toda semente terá o seu fruto correspondente.”*

Flávio Augusto

## RESUMO GERAL

SILVA, Álison Moreira da. **O biocarvão como matéria prima para a produção de cápsulas densificadas veiculadoras de sementes**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior, Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Sobreira Alexandre.

O biocarvão é um produto estável e rico em carbono, obtido por meio da pirólise de biomassa. Suas características únicas fazem deste material um ótimo condicionador de solo, resultando em melhorias que variam a medida com que se aumenta a temperatura de pirólise a que foi submetido. A baixa densidade deste componente torna sua permanência no solo dificultada, sendo facilmente lixiviada. Neste sentido, a produção de cápsulas densificadas de biocarvão possuem o propósito de contornar problemas de carreamento e lixiviação. Objetivou-se com este estudo investigar as temperaturas de pirólise e as pressões de compactação, na qualidade fisiológica de sementes da espécie *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* presentes em cápsulas densificadas de biocarvão veiculadoras de sementes, e nas características morfológicas de mudas de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* geradas a partir das mesmas. Os experimentos foram realizados no Departamento de Ciências Florestais e da Madeira do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias pertencente à Universidade Federal do Espírito Santo, município de Jerônimo Monteiro, ES. Os dados foram submetidos à análise de variância e, quando apresentadas diferenças significativas, foram realizados ajustes de modelo de regressão, e análises multivariadas, que auxiliaram na interpretação dos resultados. Os resultados indicam que a temperatura de pirólise e a pressão de compactação influenciam em parâmetros associados à qualidade fisiológica de sementes dispostas em cápsulas densificadas de biocarvão. Contudo, não influenciam na qualidade de mudas geradas. A utilização de cápsulas densificadas de biocarvão veiculadoras de sementes resulta em menor qualidade fisiológica de sementes e qualidade de plântulas inferior a uma semeadura convencional, mas ainda melhor que sementes adicionadas acima do substrato, simulando a semeadura a lanço ou uma natural “chuva de sementes”. Ao se desenvolverem, as mudas possuem características morfológicas equivalentes a mudas provenientes de semeadura convencional. Em resumo, cápsulas densificadas de biocarvão possuíram desempenho inferior em termos de desenvolvimento de sementes, mas ainda mais efetivo que a natural chuva de sementes, gerando mudas de qualidade e, de modo concomitante, possui o

potencial de melhorar as características físicas, químicas e biológicas do solo a curto, médio e longo prazo com a incorporação do biocarvão ao sistema.

**Palavras-chave:** Temperatura de pirólise; Pressão de compactação; Germinação; Emergência; Mudas.

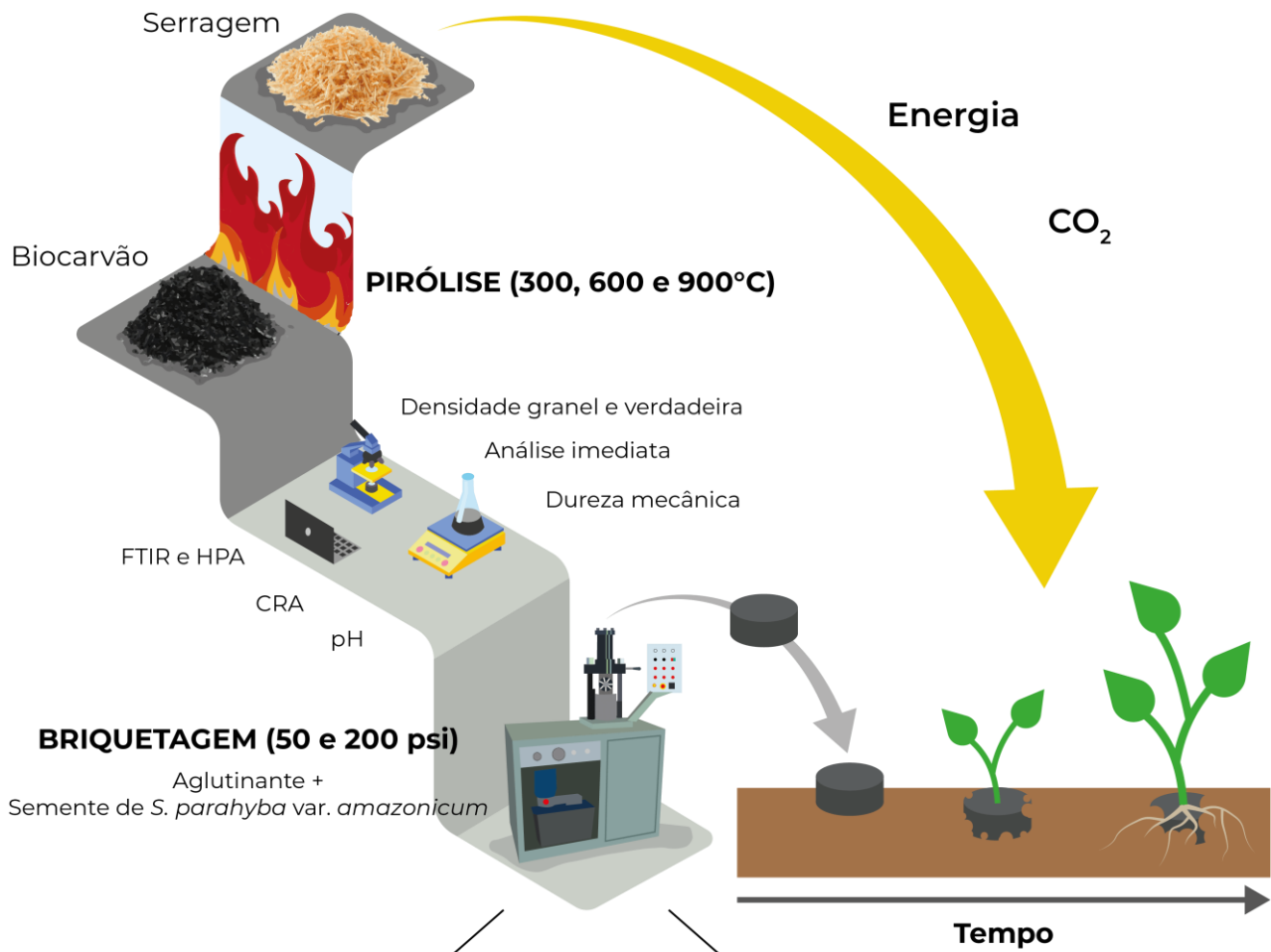
## GENERAL ABSTRACT

SILVA, Álison Moreira da. **Biochar as a raw material for the production of densified seed carrier capsules**. 2021. Dissertation (Master in Forest Sciences) - Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior, Co-advisor: Prof. Dr. Rodrigo Sobreira Alexandre.

Biochar is a stable and carbon-rich product, obtained through biomass pyrolysis. Its unique characteristics make this material an excellent soil conditioner, resulting in improvements that vary as the pyrolysis temperature increases. The low density of this component makes its permanence in the soil difficult, being easily leached. Thus, the production of densified biochar capsules aims to overcome transport and leaching problems. The objective of this study was to investigate pyrolysis temperatures and compaction pressures, in the physiological quality of *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* seeds, present in densified biochar seeds propagating capsules, and on the morphological characteristics of *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* seedlings generated from them. The experiments were performed at the Department of Forestry and Wood Sciences of the Center for Agricultural Sciences and Engineering belonging to the Federal University of Espírito Santo, city of Jerônimo Monteiro, ES. The data were submitted to analysis of variance and, when significant differences were expressed, were performed regression model adjustments and multivariate analyses, which helped in the interpretation of the results. The results indicate that the pyrolysis temperature and the compaction pressure influence parameters associated with the physiological quality of seeds present in densified biochar capsules. However, they do not influence the quality of seedlings generated. The use of densified biochar seeds propagating capsules results in lower physiological seed quality and lower seedling quality than conventional sowing, but even better than seeds added above the substrate, simulating seeds throw or a natural "seed rain". When developing, the seedlings have morphological characteristics equivalent to seedlings from conventional seeding. In summary, densified biochar capsules had a lower performance in terms of seed development, but even more effective than natural seed rain, generating quality seedlings and, concomitantly, it has the potential to improve physical, chemical and biological characteristics in the short, medium and long term with the incorporation of biochar to the system.

**Keywords:** Pyrolysis temperature; Compaction pressure; Germination; Emergency; Seedlings.

## RESUMO GRÁFICO



**Capítulo 1: Investigando variáveis da produção de cápsulas densificadas de biocarvão na qualidade fisiológica de sementes**



A temperatura de pirólise e a pressão de compactação influenciaram na qualidade fisiológica de sementes

**Capítulo 2: Respostas morfológicas de mudas *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* às variáveis da produção de cápsulas densificadas de biocarvão**



A temperatura de pirólise e a pressão de compactação não influenciaram nas características morfológicas das mudas

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>14</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>15</b>
2.1. Pirólise da biomassa e os fatores que implicam nas características do biocarvão .....	15
2.2. Biocarvão e os benefícios de sua aplicação no solo .....	17
<b>3. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>21</b>
<b>4. CAPÍTULO 1 – INVESTIGANDO VARIÁVEIS DA PRODUÇÃO DE CÁPSULAS DENSIFICADAS DE BIOCÁRVÃO NA QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES....</b>	<b>27</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>29</b>
<b>2. METODOLOGIA .....</b>	<b>30</b>
2.1. Obtenção e pirólise da biomassa .....	30
2.2. Caracterização do biocarvão para a produção das cápsulas densificadas .....	31
2.3. Produção das cápsulas densificadas de biocarvão .....	32
2.4. Germinação, emergência e crescimento inicial de plântulas de <i>S. parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> presentes em cápsulas densificadas de biocarvão. ....	34
2.5. Análise de dados.....	36
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>37</b>
3.1. Rendimentos dos produtos da pirólise .....	37
3.2. Características químicas e físicas do biocarvão .....	38
3.3. Características das cápsulas densificadas de biocarvão .....	43
3.4. Germinação, emergência e crescimento inicial de plântulas de <i>S. parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> a partir de cápsulas de biocarvão .....	45
<b>4. CONCLUSÕES .....</b>	<b>58</b>
<b>5. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>58</b>
<b>5. CAPÍTULO 2 – RESPOSTAS MORFOLÓGICAS DE MUDAS DE <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> ÀS VARIÁVEIS DA PRODUÇÃO DE CÁPSULAS DENSIFICADAS DE BIOCÁRVÃO. ....</b>	<b>66</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>68</b>
<b>2. METODOLOGIA .....</b>	<b>69</b>
2.1. Obtenção e pirólise da matéria prima biomassa.....	69
2.2. Produção das cápsulas de biocarvão .....	69
2.3. Teste de emergência e crescimento das plântulas emergidas das cápsulas de biocarvão .....	71
2.4. Análise de dados.....	73
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>74</b>
<b>4. CONCLUSÕES .....</b>	<b>83</b>

<b>5. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>84</b>
<b>6. CONCLUSÕES GERAIS.....</b>	<b>87</b>
<b>7. APÊNDICE.....</b>	<b>88</b>
7.1. APÊNDICE A.....	88

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O biocarvão é um produto estável e rico em carbono, obtido por meio da pirólise de biomassa. Sua distinção do carvão vegetal associa-se apenas pela sua aplicação como condicionador em solos (LEHMANN; JOSEPH, 2009), devido a suas características únicas que resultam em melhoria da biologia do solo, biorremediação em solos contaminados, melhor retenção de água e nutrientes no solo, aumento de pH de solos acidíferos, CTC e carbono orgânico, melhora as características físicas do solo, aumento na fixação biológica de nitrogênio e na disponibilidade de macro e micronutrientes e maior instalação de microfauna biológica (RONDON et al., 2007; DOWNIE et al., 2009; LEHMANN; JOSEPH, 2009; THIES; RILLIG, 2009; MENDES et al., 2018; SOLAIMAN; ABBOTT; MURPHY, 2019). Estas características que fazem do biocarvão uma alternativa como condicionador dos solos, pode variar a medida em que se aumenta a temperatura final de pirólise, uma vez que as características químicas e físicas do biocarvão serão diferenciadas (CHEN; WANG; ZHANG, 2019; ZHANG et al., 2019; WELDON et al., 2019; XU et al., 2019).

O aumento da temperatura de pirólise faz com que ocorram quebras e reorganizações de ligações químicas na biomassa, formando novos grupos funcionais como carboxila, lactona, lactol, quinina, cromeno, anidrido, fenol, éter, pirona, piridina, piridona e pirrol (MIA et al. 2017). As degradações e reorganizações de cadeias dão origem a um material de elevada área superficial, porosidade, pH e material volátil, além de ocorrer diminuição de grupos funcionais de sua superfície (LEHMANN et al., 2011; TOMCZYK; SOKOŁOWSKA; BOGUTA, 2020). A elevada porosidade faz do biocarvão um material extremamente leve, com baixa densidade, o que torna sua permanência no solo dificultada, sendo facilmente carregada (RUMPEL et al., 2006; NGUYEN et al., 2008; MAJOR et al., 2010; WANG et al., 2013). Neste sentido, a produção de cápsulas densificadas de biocarvão possuem o propósito de contornar problemas de carregamento, utilizando uma prática comumente utilizada em combustíveis sólidos da biomassa de baixa densidade.

As necessidades do mundo moderno em produzir com pequena influência sobre as mudanças climáticas, requerem menores gastos para que sistemas produtivos sejam viáveis economicamente. Ao serem adicionadas sementes no processo produtivo de cápsulas densificadas de biocarvão, procedimentos de plantio de semeadura convencional são eliminados, dando origem a uma nova forma de produção, mais compacta e prática, com grandes possibilidades de implementação de tecnologias embarcadas no processo de dispersão. Cápsulas densificadas de biocarvão veiculadoras de sementes agem de modo contundente em semeaduras ou reestabelecendo cobertura vegetal em áreas degradadas,

intensificado pela reestruturação do solo ocasionada pelo biocarvão, gerando plantas de qualidade com grande probabilidade de sobrevivência. Considerando o biocarvão um material de propriedades variáveis, sobretudo em diferentes temperaturas finais de pirólise, e que no processo produtivo de cápsulas, sementes são compactadas juntamente com o biocarvão, esta dissertação foi estruturada em dois capítulos. No capítulo 1, objetivou-se investigar as temperaturas de pirólise e as pressões de compactação de cápsulas densificadas de biocarvão veiculadoras de sementes, na qualidade fisiológica de sementes de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*. No capítulo 2, objetivou-se investigar a influência da temperatura de pirólise e da pressão de compactação nas características morfológicas de mudas de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, geradas a partir de sementes inseridas no processo de produção de cápsulas densificadas de biocarvão.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Pirólise da biomassa e os fatores que implicam nas características do biocarvão**

O material produzido no processo de pirólise possui potencial de utilização das mais variadas formas, como fonte energética ou matéria-prima para os mais diversos fins, como na indústria química, farmacêutica, siderurgia, cocção de alimentos (churrasco), termoelétrica, cimenteira, entre outros (BRITO, 1993). A necessidade de aquecimento e cocção de alimentos impulsionou o início da utilização de biomassa pirolisada como prática de manipulação alimentar realizada pela humanidade (WARNES, 2008). Esta fonte energética é resultado do processo de carbonização da madeira por meio de seu aquecimento sob temperaturas superiores a 200 °C na presença controlada de oxigênio, com o controle do tempo e da temperatura do processo (SANTOS et al., 2012). A pirólise, ou carbonização, consiste em um conjunto de complexas reações químicas acompanhadas de processos de transferência de calor e massa que ocorrem paralela, consecutiva e competitivamente (SCREMIN, 2012), promovendo alterações nos componentes da madeira, aumentando o teor de carbono fixo (OLIVEIRA et al., 2015).

De fato, o objetivo da pirólise é o aumento da concentração carbonácea e eliminação de oxigênio. Antes da carbonização, os teores médios de carbono e oxigênio presentes representam 49% e 44%, respectivamente, baseado em estudos utilizando 14 espécies de *Eucalyptus*. Após o processo, estes valores atingem, em média, 82% e 13,7%. No carvão vegetal, por exemplo, ficam retidos 57% do carbono inicialmente presente na madeira,

sendo o restante apresentado nos demais produtos da carbonização, como o líquido pirolenhoso e os gases não condensáveis (BARCELLOS, 2007; SANTOS, 2010).

A degradação da madeira geralmente é dividida em cinco fases, correspondentes a determinadas faixas de temperatura. A primeira fase corresponde à saída da “água livre” e “água higroscópica” da madeira, que estão retidas no lúmen e parede celular das células, ocorrendo entre a temperatura ambiente e 100 °C. Entre 100 e 250 °C, tem-se a segunda fase, ligada à eliminação de água higroscópica e da água de constituição, cuja eliminação é acompanhada por uma degradação irreversível da madeira, sobretudo de seus grupos hidroxílicos. A destruição da hemicelulose ocorre na terceira etapa, entre 250 e 330 °C. Já a celulose, é degradada entre 330 e 370 °C, determinando a quarta fase. A quinta e última fase manifesta-se acima de 370 °C, onde a produção de carvão vegetal tem uma forte ligação com o início da degradação da lignina (BRITO, 2006).

As características dos produtos formados dependem de vários fatores, dentre eles os principais são a temperatura de pirólise e a composição da biomassa (BASU, 2013). Na pirólise ocorre a desidratação, a descarboxilação e a condensação das estruturas orgânicas gerando principalmente três produtos, o combustível sólido, o combustível líquido e o gás combustível (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e outros hidrocarbonetos). Esses produtos apresentam maior grau de aromaticidade e condensação que as estruturas presentes na biomassa original (LEHMANN; JOSEPH, 2009).

O controle de entrada de ar no sistema, aliado à espécie vegetal e a qualidade da matéria prima, principalmente no que diz respeito à sua umidade, exerce um papel fundamental na eficiência da obtenção do produto (BRITO, 2012). As demais variações que interferem na produção são decorrentes do dimensionamento e da capacidade dos equipamentos empregados, materiais construtivos, níveis de controle do processo e o método de fornecimento do calor inicialmente necessário, que pode ser gerado externa ou internamente ao sistema (SCREMIN, 2012).

Há uma relação direta e positiva entre densidade básica da madeira utilizada e a densidade relativa aparente do material pirolisado, destacando que quanto mais denso, maior é a quantidade de energia por unidade de volume, além de caracterizar também um produto menos friável (VALE et al., 2001). O aumento da densidade real com o aumento da temperatura de 500 a 800 °C é causada pela conversão de carbono desordenado, de baixa densidade, em carbono turbostrático, de alta densidade, aproximando-se da estrutura de grafite, que possui densidade real de 2,25 kg dm<sup>-3</sup> (MA, 2017).

Neste sentido, a qualidade do material termodegradado é determinada por suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, que variam em função de sua matéria prima e

processo de pirólise. As propriedades mecânicas influenciam a resistência, rigidez, friabilidade e granulometria do material carbonoso, e são de fundamental importância para a qualificação do mesmo (BRITO; BARRICHELO; SEIXAS, 1983; COUTO et al., 2015). A menor resistência de biomassas pirolisadas resulta em um material mais susceptível à degradação, diminuindo seu tamanho médio e gerando maior quantidade de finos durante toda a sua produção, manuseio e transporte (BRITO; BARRICHELO; SEIXAS, 1983). Além disso, uma elevada umidade pode acarretar mudanças físicas no material e aumentar a geração de finos dentro do forno (BRITO; BARRICHELO; SEIXAS, 1983), que pode chegar até a 25% em todo o processo, até sua utilização (OLIVEIRA, 1977; ANDRADE; GONÇALVES, 1999; SANTIAGO; ANDRADE, 2005; ROUSSET et al., 2011).

## **2.2. Biocarvão e os benefícios de sua aplicação no solo**

O biocarvão ou biochar é um material sólido, rico em carbono de textura fina e com uma área superficial específica elevada (KOOKANA et al., 2011), obtido a partir da carbonização de biomassa, em que ocorre a conversão termoquímica da biomassa em temperatura controlada e ambiente limitado em oxigênio, por um processo denominado pirólise (TANG et al., 2015, TANG et al., 2016). O biocarvão possui estrutura molecular carbonácea arranjada de forma desorganizada, formada por pilhas de folhas planas dos anéis aromáticos ligados aleatoriamente. A parte inorgânica é formada por metais provenientes do material de origem, que é mencionado como o teor de cinzas, e é concentrado à medida que os materiais voláteis são liberados com o aumento da temperatura de pirólise. Esses nutrientes podem estar presentes na matriz carbonácea ou separados da mesma (LEHMANN; JOSEPH, 2009).

O biocarvão apresenta em sua estrutura alta porosidade e área superficial específica, conferindo condições susceptíveis à absorção de compostos orgânicos solúveis, contribuindo com a disponibilidade de nutrientes e retenção de água no solo (MADARI et al., 2006; TAN et al., 2015). A retenção e disponibilidade de nutrientes para as plantas, segundo Petter (2010), Petter e Madari (2012) se dá à medida que vai acontecendo a oxidação parcial do biocarvão e o surgimento de novos sítios eletroquímicos. A pirólise é uma técnica de conversão térmica de biomassa orgânica, que origina gases não condensáveis (syngas), vapor/líquido condensável (bio-óleo) e uma fração sólida, na ausência completa ou com quantidade mínima de oxigênio (SANTOS, 2011; CANABARRO et al., 2013).

As características do biocarvão variam de acordo com o processo de queima e seus desdobramentos (tipo de pirólise, temperatura, tempo de queima, quantidade de oxigênio disponível durante o processo), tipo e granulometria da biomassa (MORALES, 2010; TAG et al., 2016), os quais atribuem grande variação nas suas características químicas e físicas. Dessa forma, cada biocarvão tem um efeito diferenciado quando aplicado em determinados ambientes, como solo, por exemplo. Segundo Glaser et al. (2009), o biocarvão ganhou uma nova forma de produção, através do processo pirolítico da biomassa para fins específicos, como sequestro de carbono, gestão ambiental e até mesmo como condicionador do solo.

A investigação do uso de biocarvão para melhorar os atributos físicos, químicos e biológicos no solo iniciou-se a partir do estudo da fertilidade e produtividade das terras pretas de índio (TPI) (GLASER et al., 2001), que, apresentam boa fertilidade e produtividade, mesmo sem adubação, e isso foi atribuído à presença do carvão e peças de cerâmica. Segundo Mangrich, Maia e Novotny (2011), algumas pesquisas sugerem que essas TPI ocupam cerca 63 mil km<sup>2</sup> de toda a área de floresta na Amazônia. Não há certeza se o processo de formação das terras pretas pelos índios pré-colombianos foi um processo intencional de melhoria do solo ou se foi um subproduto das atividades agrícolas e de habitação desses povos. A TPI é caracterizada pela cor escura no solo e pela presença de fragmentos de artefatos de cerâmica. Além de apresentar maior valor de pH e concentração de matéria orgânica que os solos adjacentes, a TPI é caracterizada por apresentar elevada concentração de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), zinco (Zn) e cobre (Cu) entre outros (TEIXEIRA et al., 2009). Segundo Lehmann et al. (2003), a fertilidade desses solos está associada às altas quantidades de partículas finas de carvões, advinda da queima natural ou realizada por populações indígenas.

Neste contexto, o biocarvão tem sido utilizado para aumentar a fertilidade e melhorar a retenção de água no solo, inativar moléculas de pesticidas (biorremediação) e diminuir a emissão de gases do efeito estufa (REN et al., 2016), destacando-se como uma alternativa viável, principalmente por apresentar uma forma estável da matéria orgânica, que nos cultivos agrícolas proporcionam mudanças no solo, como densidade, retenção de água, estrutura, porosidade, condutibilidade térmica, capacidade de troca catiônica (CARVALHO, 2010), garantindo fertilidade por muito mais tempo e um maior número de microrganismos benéficos no solo (MAIA, 2013). Além disso, em solos ácidos e neutros, com texturas de média a arenosa, têm se observado uma elevada produtividade com a utilização do biocarvão (SMEBYE et al., 2016). Muitas vezes, esse aumento da produtividade vem associado às melhorias nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (MUKHERJEE; LAL; ZIMMERMAN, 2014). Outros benefícios importantes são a redução da

emissão de gases de efeito estufa (AGEGNEHU et al., 2016), a remoção de metais pesados de áreas contaminadas (QIAN et al., 2016) e a redução na perda de nitrogênio (N) do solo (ZHANG et al., 2016). Ao ser incorporado ao solo, o biocarvão está sujeito a sofrer oxidação biótica ou abiótica do C orgânico instável, o que provoca mudanças no seu comportamento físico-químico (LECROY et al., 2013). Esse processo de “envelhecimento” leva ao aumento dos grupos ácidos de superfície no biocarvão e, conseqüentemente, o aumento da CTC do solo, (SONG; GUO, 2012).

Trabalhando com solos da planície costeira dos Estados Unidos (solos arenosos, ácidos, com baixo teor de C e baixa capacidade de troca de cátions), Novak et al. (2009) avaliaram a influência da adição de biocarvão de casca de noz-pecã sobre a fertilidade do solo. Aos 67 dias de incubação em casa de vegetação, os autores constataram que o biocarvão aumentou o pH do solo, o carbono orgânico total e alguns nutrientes, e diminuiu a acidez trocável do solo. O biocarvão apresentou ainda uma alta capacidade de sorção de nutrientes, principalmente Ca, P, Zn e Mn. Brewer et al. (2014) utilizaram 17 biocarvões provenientes de diferentes matérias primas e produzidos sob diferentes condições de pirólise em solo de textura argilosa e, de forma geral, observaram que a aplicação de 36 t ha<sup>-1</sup> dos biocarvões aumentaram o pH dos solos, de 6,6 a 7,2 (biocarvão obtido pelo processo de gaseificação) e 6,3 a 7,0 (biocarvão obtido pelo processo de pirólise lenta) após oito semanas de avaliação.

Após a aplicação de 10 t ha<sup>-1</sup> de biocarvão fabricado a partir de resíduos das indústrias de celulose, Van Zwieten et al. (2010), em experimento em casa de vegetação utilizando um latossolo e um solo calcáreo de textura argilosa, observaram aumento de pH, da capacidade de troca de cátions, dos teores trocáveis de K e Ca e do teor total de carbono no solo. Devereux et al. (2012) avaliaram a capacidade potencial do biocarvão em melhorar a retenção de água em experimento em casa de vegetação e constataram que o tamanho médio dos poros do solo diminuiu de 0,07 mm<sup>2</sup>, no tratamento sem biocarvão, para 0,046 mm<sup>2</sup> no tratamento com 5% de biocarvão no solo. Também foi observado que o biocarvão diminuiu a condutividade hidráulica, a densidade e a repelência de água no solo, concluindo então que pode aumentar a retenção de água em solos propensos a períodos de seca, como os do Semiárido brasileiro.

Em um trabalho realizado em um solo calcário com a aplicação de 90 t ha<sup>-1</sup> de biocarvão, Liang et al. (2014) constataram que, três anos após da data de aplicação do biocarvão, houve aumento no pH, na disponibilidade de K e na capacidade de retenção de água e redução na densidade do solo.

Efeitos da aplicação de quatro doses (4; 8; 12 e 16 t ha<sup>-1</sup>) de biocarvão de resíduos de café (café moído e casca de café) em Latossolo em Garanhuns/PE sobre as características físico-químicas do solo, a eficiência do uso da água e produção do milho (*Zea mays*) foram avaliados por Lima et al. (2018). O experimento foi realizado em vasos em casa de vegetação por 45 dias. Os autores concluíram que a área superficial específica em dois tipos de biocarvão são maiores que as do solo. À medida que as doses aumentavam, as propriedades de retenção de nutrientes, de água do solo e o crescimento do milho melhoraram significativamente, sendo que a eficiência do uso da água foi 50% maior para o tratamento com a maior dose de biocarvão em comparação ao controle. El-naggar et al. (2018), em um experimento de incubação de 90 dias, utilizou três tipos de biocarvões (*Miscanthus sacchariflorus*, *Oryza sativa* e *Maesopsis eminii*) produzidos a 500-600 °C foram adicionados a dois tipos de solos inférteis (arenoso e franco-arenoso) em dose única de 30 t ha<sup>-1</sup>. No solo arenoso, a CTC aumentou significativamente de 0,3 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> (controle) para 0,7, 0,9 e 3,1 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> respectivamente, enquanto no solo franco-arenoso, a CTC aumentou apenas para biocarvão de arroz de 10,2 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> a 11,5 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>.

O efeito do biocarvão de casca de arroz, fertilizante N e suas interações no crescimento e produção de arroz e estado nutricional de um Argissolo foram determinados por Oladele, Adeyemo e Awodun (2019), na Nigéria, onde os tratamentos consistiram em quatro níveis de biocarvão (0, 3, 6 e 12 mg ha<sup>-1</sup>) e quatro níveis de fertilizante nitrogenado (Ureia - 46% N) (0, 30, 60 e 90 kg ha<sup>-1</sup>). A combinação de biocarvão e fertilizante inorgânico melhorou a produtividade do arroz irrigado. O efeito principal da alteração do biocarvão no solo foi para os níveis de P e K disponíveis, onde à medida que a dose aumentava o P disponível aumentava conjuntamente, porém o efeito foi inverso para K trocável.

Os estudos do biocarvão ampliam-se e mostram que este é um excelente adsorvente para poluentes de solos contaminados com metais pesados com base em suas propriedades, como a estrutura altamente porosa, alta capacidade de troca e grande poder tampão (REES et al., 2014; DAI et al., 2016; YANG et al., 2016), além da presença de vários grupos funcionais (MONTES-MORÁN et al., 2004; YUAN; XU, 2011; XU et al., 2013). Nesta conjuntura, o biocarvão pode ser considerado como um importante auxiliador no solo, melhorando seus atributos físicos, químicos e biológicos, tornando o solo propício para que plantas possam se desenvolver e prosperar. Assim como todo sistema de produção, estudos sobre gastos de energia devem ser elaborados para que o produto e sua utilização sejam considerados viáveis.

### 3. REFERÊNCIAS

- AGEGNEHU, G.; BASS, A. M.; NELSON, P. N.; BIRD, M. I. Benefits of biochar, compost and biochar–compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. **Science of the Total Environment**, v. 543, p. 295-306, 2016.
- ANDRADE, A. M.; GONÇALVES, F. G. Adaptação de um forno para o aproveitamento dos subprodutos da carbonização. **Revista Árvore**, v. 23, n. 2, p. 241-247, 1999.
- BARCELLOS, D. C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. 140 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. Viçosa, 2007.
- BASU, P. **Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: Practical design and theory** pyrolysis. Elsevier Inc., 2.ed. 2013. p. 548.
- 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 & Bioenergy**, v. 66, p. 176-185, 2014.
- BRITO, J. O. **Produção de carvão vegetal no Brasil e o atual estágio das tecnologias para aproveitamento dos gases do processo**. Universidade de São Paulo, 2012. 3 p.
- BRITO, J. O. **Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico**. Piracicaba: IPEF, 1993. 6 p. (Circular Técnica, 181).
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; SEIXAS, F. **Análise da produção energética e de carvão vegetal de espécies de eucalipto**. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF, Piracicaba, n. 23, p. 53-56, 1983.
- BRITO, J. O.; GARCIA, J. N.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; PESSOA, A. M. C.; SILVA, P. H. M. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termorreificação. **Cerne**, v. 12, n. 2, p. 182-188, 2006.
- CANABARRO, N.; SOARES, J. F.; ANCHIETA, C. G. KELLING, C. S.; MAZZUTTI, M. A. Thermochemical processes for biofuels production from biomass. **Sustainable Chemical Processes**, v. 1, n. 1, p. 22-32, 2013.
- CARVALHO, E. R. **Fertilizante mineral e resíduo orgânico sobre características agrônômicas da soja e nutrientes no solo**. Dissertação (Mestrado em Agronomia/ Fitotecnia). Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia. Universidade Federal de Lavras. Lavras - MG., 2010. 57 p.
- CHEN, G.; WANG, X.; ZHANG, R. Decomposition temperature sensitivity of biochars with different stabilities affected by organic carbon fractions and soil microbes. **Soil And Tillage Research**, v. 186, p. 322-332, 2019.
- COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; PROTÁSIO, T. P. Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 817-831, 2015.

DAI, Z.; MENG, J.; SHI, Q.; XU, B.; LIAN, Z.; BROOKES, P. C.; XU, J. M. Effects of manure and lignocellulose-derived biochars on adsorption and desorption of zinc by acidic types of soil with different properties. **European Journal of Soil Science**, v. 67, p. 40–50, 2016.

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

DOWNIE, A.; CROSKY, A.; MUNROE, P. Physical properties of biochar. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (eds) **Biochar for environmental management science and technology**, London: Earthscan, 2009. p. 13–32.

EL-NAGGAR, A.; LEE, S. S.; AWAD, Y. M.; YANG, X.; RYUF, C.; RIZWANG, M.; RINKLEBE, J.; TSANG, D. C. W.; OK, Y. S. Influence of soil properties and feedstocks on biochar potential for carbon mineralization and improvement of infertile soils. **Geoderma**, v. 332, p. 100-108, 2018.

GLASER, B.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. **Naturwissenschaften**, v. 88, n. 1, p. 37-41, 2001.

GLASER, B.; PARR, M.; BRAUN, C.; KOPOLO, G. Biochar is carbon negative. **Nature Geoscience**, v. 2, n. 2, p. 1, 2009.

KOOKANA, R. S.; SARMAH A. K.; VAN ZWIETEN, L.; KRULL, E.; SINGH, B. Biochar application to soil. **Advances in Agronomy**, v. 112, p. 103-143, 2011.

LECROY, C.; MASIELLO, C. A.; RUDGERS, J. A.; HOCKADAY, W. C.; SILBERG, J. J. Nitrogen, biochar, and mycorrhizae: Alteration of the symbiosis and oxidation of the char surface. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 58, p. 248–254, 2013.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: an introduction. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Ed.). **Biochar for environmental management science and technology**. New York: Earthsca, v. 53, p. 1–9, 2009.

LEHMANN, J.; RILLIG, M. C.; THIES, J.; MASIELLO, C. A.; HOCKADAY, W. C.; CROWLEY, D. Biochar effects on soil biota – A review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 9, p. 1812-1836, 2011.

LEHMANN, J.; SILVA JUNIOR, J. P.; STEINER, C.; NEHLS, T.; ZECH, W.; GLASER, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and Soil**, v. 249, p. 343–357, 2003.

LIANG, F.; LI, G. T.; LIN, Q. M.; ZHAO, X. R. Crop yield and soil properties in the first 3 years after biochar application to a calcareous soil. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 13, n. 3, p. 525–532, 2014.

LIMA, J. R. S.; SILVA, W. M.; MEDEIROS, E. V.; DUDA, G. P.; CORRÊA, M. M.; MARTINS FILHO, A. P.; CLERMONT-DAUPHIN, C.; ANTONIO, A. C. D.; HAMMECKER,

C. Effect of biochar on physicochemical properties of a sandy soil and maize growth in a greenhouse experiment. **Geoderma**, v. 319, p. 14–23, 2018.

MA, Z.; YANG, Y.; MA, Q.; ZHOU, H.; LUO, X.; LIU, X.; WANG, S. Evolution of the chemical composition, functional group, pore structure and crystallographic structure of bio-char from palm kernel shell pyrolysis under different temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 127, p. 350-359, 2017.

MADARI, B. E.; COSTA, A. R. DA; CASTRO, L. M.; SANTOS, J. L. S.; BENITES, V. M.; ROCHA, A. O.; MACHADO, P. L. O. A. Carvão vegetal como condicionador de solo para arroz de terras altas (cultivar Primavera): um estudo prospectivo. Embrapa Arroz e Feijão. **Comunicado técnico**, v. 125, p. 6, 2006.

MAIA, C. M. B. F.; LIMA, R. M.; GUIOTOKU, M. Efeito da Temperatura final de carbonização nas propriedades físico-químicas do biocarvão da fibra de coco. Embrapa Floresta - **Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, p. 4, 2013.

MAJOR, J.; LEHMANN, J.; RONDON, M.; GOODALE, C. Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration. **Global Change Biology**, v. 16, n. 4, p. 1366-1379, 2010.

MANGRICH, A. S.; MAIA, C. M. B. F.; NOVOTNY, E. H. Biocarvão - As terras pretas de índios e o sequestro de carbono. **Embrapa Solos**, v. 47, n. 281, p. 48–52, 2011.

MENDES, K. F.; ALMEIDA, C. S.; INOUE, M. H.; MERTENS, T. B.; TORNISIELO, V. L. Biochar impact on herbicides behavior in the soils: an approach in Brazil. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 17, n. 1, p. 106-117, 2018.

MONTES-MORÁN, M. A.; SUÁREZ, B.; MENÉNDEZ, J. A.; FUENTE, E. On the nature of basic sites on carbon surfaces: An overview. **Carbon**, v. 42, p. 1219-1225, 2004.

MORALES, M. M. **Efeito do biocarvão sobre o comportamento da matéria orgânica e do fósforo em solo degradado**. Tese (Doutorado / Agronomia). Faculdade de Ciências Agrômicas. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, p. 1-88, 2010,

MUKHERJEE, A.; ZIMMERMAN, A. R.; HAMDAN, R.; COOPER, W. T. Physicochemical changes in pyrogenic organic matter (biochar) after 15 months of field aging. **Solid Earth**, v. 5, n. 2, p. 693-704, 2014.

NGUYEN, B.; LEHMANN, J.; KINYANGI, J.; SMERNIK, R.; RIHA, S.; ENGELHARD, M. Longterm black carbon dynamics in cultivated soil. **Biogeochemistry**, v. 89, n. 3, p. 295-308, 2008.

NOVAK, J. M.; LIMA, I.; XING, B.; GASKIN, J. W.; STEINER, C.; DAS, K. C.; AHMEDNA, M.; REHRAH, D.; WATTS, D. W.; BUSSCHER, W. J.; SCHOMBERG, H. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. **Annals of Environmental Science**, v.3, p. 195-206, 2009.

OLADELE, S. O.; ADEYEMO, A. J.; AWODUN, M. A. Influence of rice husk biochar and inorganic fertilizer on soil nutrients availability and rain-fed rice yield in two contrasting soils. **Geoderma**, v. 336, n. 8, p. 1–11, 2019.

- OLIVEIRA, A. F.; BAVARESCO, A.; PESSUTI, C. A. A., MIYASHIRO, C. S.; FRANK, J. Análise da qualidade do carvão para consumo doméstico de quatro municípios do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, p. 102-111, 2015.
- OLIVEIRA, J. C. **Análise econômica do carvão vegetal**. In: Seminário sobre o carvão vegetal. Belo Horizonte, BDMG, p. 29-30, 1977 (patrocínio do IBS, ABM e BDMG).
- PETTER, F. A. **Biomassa carbonizada como condicionador de solo: aspectos agronômicos e ambientais do seu uso em solos de cerrado**. Tese (Doutorado /Produção Vegetal). Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, GO, p. 1-130, 2010.
- PETTER, F. A.; MADARI, B. E. Biochar: Agronomic and environmental potential in Brazilian savannah soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 7, p. 761–768, 2012.
- QIAN, L.; CHEN, B. Interactions of aluminum with biochars and oxidized biochars: Implications for the biochar aging process. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 62, n. 2, p. 373–380, 2014.
- REES, F.; SIMONNOT, M. O.; MOREL, J. L. Short-term effects of biochar on soil heavy metal mobility are controlled by intra-particle diffusion and soil pH increase. **European Journal of Soil Science**, v. 65, n. 01, p. 149–161, 2014.
- REN, X.; ZHANG, P.; ZHAO, L.; SUN, H. Sorption and degradation of carbaryl in soils amended with biochars: influence of biochar type and content. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 3, p. 2724–2734, 2016.
- RONDON, M. A.; LEHMANN, J.; RAMÍREZ, J.; HURTADO, M. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. **Biology Fertility Soils**, v. 43, p. 699-708, 2007.
- ROUSSET, P.; PIRES, A. C.; SABLÓWSKI, A.; RODRIGUES, T. LCA of eucalyptus wood charcoal briquettes. **Journal of Cleaner Production**, v.19, p. 1647-1653, 2011.
- RUMPEL, C.; CHAPLOT, V.; PLANCHON, O.; BERNADOU, J.; VALENTIN, C.; MARIOTTI, A. Preferential erosion of black carbon on steep slopes with slash and burn agriculture. **Catena**, v. 65, n. 1, p. 30-40, 2006.
- SANTIAGO, A. R.; ANDRADE, A. M. de. Carbonização de resíduos do processamento mecânico da madeira de eucalipto. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 1, p. 1-7, 2005.
- SANTOS, K. G. DOS. **Aspectos fundamentais da pirólise de biomassa em leito de jorro: fluidodinâmica e cinética do processo**. Tese (Doutorado / Engenharia Química). Programa de Pós-graduação Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia, p. 1-166, 2011.
- SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira. Lavras, p. 1-175, 2010.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.; CARVALHO, A. M. L. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, v. 18, n. 1, p. 143-151, 2012.

SCREMIN, A. L. T. **Estudo energético e fisicoquímico do carvão vegetal de *Eucalyptus dunnii* Maiden**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste. Programa de Pós-Graduação em Bioenergia. Guarapuava, p. 1-103, 2012.

SMEBYE, A.; ALLING, V.; VOGT, R. D.; GADMAR, T. C.; MULDER, J.; CORNELISSEN, G.; HALE, S. E. Biochar amendment to soil changes dissolved organic matter content and composition. **Chemosphere**, v. 142, p. 100–105, 2016.

SOLAIMAN, Z. M.; ABBOTT, L. K.; MURPHY, D. V. Biochar phosphorus concentration dictates mycorrhizal colonisation, plant growth and soil phosphorus cycling. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1-11, 2019.

SONG, W.; GUO, M. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 94, p. 138–145, 2012.

TAG, A. T.; TAGHIZADEH-TOOSI, A.; CLOUGH, T. J.; SHERLOCK, R. R.; CONDRON, L. M. Effects of feedstock type and pyrolysis temperature on potential applications of biochar. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 120, p. 200-206, 2016.

TAN, X.; LIU, Y.; ZENG, G.; WANG, X.; HU, X.; GU, Y.; YANG, Z. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. **Chemosphere**, v. 125, p. 70-85, 2015.

TANG, X. F.; LIU, Y. G.; GU, Y. L.; XU, Y.; ZENG, G. M.; HU, X. J.; LIU, S. B.; WANG, X.; LIU, S. M.; LI, J. Biochar-based nano-composites for the decontamination of wastewater: A review. **Bioresource Technology**, v. 212, p. 318–333, 2016.

TANG, X.; LIU, Y.; ZENG, G.; WANG, X.; HU, X.; GU, Y.; YANG, Z. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. **Chemosphere**, v. 125, p. 70-85, 2015.

TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, E.; N.; WOODS, W. **As terras pretas de índio da Amazônia: Sua caracterização e uso desse conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, p. 420, 2009.

TOMCZYK, A.; SOKOŁOWSKA, Z.; BOGUTA, P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. **Reviews in Environmental Science and Bio/technology**, v. 19, n. 1, p. 191-215, 2020.

VALE, A. T.; COSTA, A. F.; GONCALVES, J. C.; NOGUEIRA, M. Relações entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do cerrado. **Revista Árvore**, v. 25, n. 89, p. 89-95, 2001.

VAN ZWIETN, L.; KIMBER, S.; MORRIS, S.; CHAN, K. Y.; DOWNIE, A.; RUST, J.; JOSEPH, S.; COWIE, A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. **Plant and Soil**, v. 327, n. 1, p. 235–246, 2010.

WANG, C.; WALTER, M. T.; PARLANGE, J. -Y. Modeling simple experiments of biochar erosion from soil. **Journal of Hydrology**, v. 499, p. 140-145, 2013.

WARNES, A. **Savage barbecue: race, culture and the invention of america's first food**. Geórgia: British Library; 2008. 201 p.

WELDON, S.; RASSE, D. P.; BUDAI, A.; TOMIC, O.; DORSCH, P. The effect of a biochar temperature series on denitrification: which biochar properties matter? **Soil Biology and Biochemistry**, v. 135, p. 173-183, 2019.

XU, D.; CAO, J.; LI, Y.; HOWARD, A.; YU, K. Effect of pyrolysis temperature on characteristics of biochars derived from different feedstocks: A case study on ammonium adsorption capacity. **Waste Management**, v. 87, p. 652-660, 2019.

XU, X.; CAO, X.; ZHAO, L.; WANG, H.; YU, H.; GAO, B. Removal of Cu, Zn, and Cd from aqueous solutions by the dairy manure-derived biochar. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 20, p. 358-368, 2013.

YANG, X.; LIU, J.; MCGROUTHER, K.; HUANG, H.; LU, K.; GUO, X.; WANG, H. Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and enzyme activity in soil. **Environmental Science and Pollution Research International**. v. 23, p. 974-984, 2016.

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

ZHANG, D.; LIU, J.; LIU, R. Biochar helps enhance maize productivity and reduce greenhouse gas emissions under balanced fertilization in a rainfed low fertility inceptisol. **Chemosphere**, v. 142, p. 106–113, 2016.

ZHANG, Y.; XU, X.; ZHANG, P.; ZHAO, L.; QIU, H.; CAO, X. Pyrolysis-temperature depended quinone and carbonyl groups as the electron accepting sites in barley grass derived biochar. **Chemosphere**, v. 232, p. 273-280, 2019.

#### 4. CAPÍTULO 1 – INVESTIGANDO VARIÁVEIS DA PRODUÇÃO DE CÁPSULAS DENSIFICADAS DE BIOCARVÃO NA QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES

##### RESUMO

A aplicação do biocarvão no solo proporciona diversos benefícios que podem variar em intensidade, à medida que se aumenta a temperatura de pirólise. Entretanto, sua baixa densidade torna este material facilmente carregável, sendo retirado do sistema. Objetivou-se investigar as temperaturas de pirólise e da pressão de compactação de cápsulas veiculadoras densificadas de biocarvão, na qualidade fisiológica de sementes de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*. Produzido em três temperaturas finais de pirólise, 300, 600 e 900 °C, o biocarvão foi caracterizado por meio das análises de densidade a granel e verdadeira, composição imediata, caracterização das estruturas orgânicas por FTIR e análise de HPA's. Em seguida, o biocarvão foi compactado por briquetagem em duas pressões de compactação, 50 e 200 psi, com uma semente por cápsula, e avaliadas a germinação, emergência e qualidades de plântulas geradas. Após verificação de pressupostos, a análise de variância foi realizada seguindo delineamento inteiramente casualizado, em fatorial duplo 3x2, com dois tratamentos testemunhas adicionais, sendo quatro repetições por tratamento. Identificando diferenças significativas, foi realizado o ajuste de modelo de regressão. A análise multivariada de agrupamento de cluster foi utilizada para identificar semelhanças entre os tratamentos estudados, tanto de cápsulas, quanto de testemunhas. A temperatura de pirólise e a pressão de compactação influenciam a germinação de sementes, emergência e crescimento de plântulas. Os benefícios do biocarvão ao solo associados ao implemento de sementes fazem da produção de cápsulas densificadas de biocarvão uma alternativa a sementeiras convencionais, evitando altos gastos energéticos e financeiros, possibilitando inclusive a recuperação de áreas degradadas, mesmo em áreas em que o acesso seja dificultoso.

**Palavras-chave:** Temperatura de pirólise; Pressão de compactação; Germinação; Emergência; Desenvolvimento de plântulas.

## ABSTRACT

The application of biochar in the soil provides several benefits that can vary in intensity, as the pyrolysis temperature increases. However, its low density makes this material easily draggable, being removed from the system. This study aimed to investigate the pyrolysis temperatures and the compression pressure of densified biochar propagating capsules, in the physiological quality of *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*. Produced in three final pyrolysis temperatures, 300, 600 and 900 °C, the biochar was characterized by the analyses of bulk and true density, immediate composition, characterization of organic structures by FTIR and analysis of PAHs. Then, the biochar was compacted by briquetting in two compaction pressures, 50 and 200 psi, with one seed per capsule, and the germination, emergence and quality of generated seedlings were evaluated. After verifying prepositions, the analysis of variance was performed following a completely randomized design, in a 3x2 double factorial, with two additional control treatments, four repetitions per treatment. When significant differences were identified, was adjusted a regression model. The cluster multivariate analysis was used to identify similarities between the treatments studied, both for capsules and controls. The pyrolysis temperature and the compaction pressure influence the seed germination, seedling emergence and growth. The benefits of biochar to the soil associated with the implementation of seeds make the production of densified biochar capsules an alternative to conventional sowing, avoiding high energy and financial costs, even allowing the recovery of degraded areas, even in areas where access is difficult.

**Keywords:** Pyrolysis temperature; Compaction pressure; Germination; Emergency; Seedling development.

## 1. INTRODUÇÃO

Carvão vegetal, biocarvão ou *biochar* são termos que definem um material obtido por meio da pirólise, em que ocorre a conversão térmica de materiais orgânicos, como madeira, biomassa vegetal e animal em condições limitadas de oxigênio (ANCA-COUCÉ, 2016; PLACIDO; CAPAREDA; KARTHIKEYAN, 2016; DUFOURNY et al., 2019) e em temperaturas que podem chegar até 700 °C (LEHMANN; JOSEPH, 2009). Este material possui elevado teor de carbono, em estruturas que são responsáveis pela elevada resistência à degradação térmica. O uso desses materiais carbonosos no solo é muitas vezes associado às denominadas “Terra Preta de Índio”, que se diferenciam por serem altamente férteis, devido à alta capacidade de troca de cátions (CTC), elevados teores de matéria orgânica e nutrientes como nitrogênio, fósforo, cálcio e potássio (GLASER et al., 2001; GLASER; BIRK, 2012; KERN et al., 2019). Os benefícios do uso do biocarvão no solo podem variar, sobretudo em intensidade, à medida em que se aumenta a temperatura final de pirólise.

A decomposição de grupos carboxila e alquila alifáticos faz com que o biocarvão seja composto por várias estruturas aromáticas, quantidade intensificada com o aumento na temperatura final de pirólise (YUAN et al., 2013; AHMAD et al., 2014; ULLAH et al., 2019; WANG et al., 2020). A ação do calor, associada ao incremento da aromaticidade, faz do biocarvão um material complexo, com diferentes características físico-químicas. O aumento da temperatura resulta em aumento da área superficial específica, geração de micro e macroporos, aumento do pH e da capacidade de troca catiônica, aumento no teor de carbono fixo e cinzas, e diminuição no teor de materiais voláteis, importe na respiração dos solos (AHMAD et al., 2014; LI et al., 2018; HASSAN et al., 2020).

Talvez, o grande empecilho para a aplicação do biocarvão no solo seja o escoamento superficial deste componente em solos que possuem elevadas declividades, decorrente da sua baixa densidade. A prática da compactação por meio da briquetagem é comumente utilizada para contornar problemas de baixas densidades de combustíveis sólidos da biomassa, comprimindo materiais na forma desejada e em menor volume, aumentando consideravelmente a sua densidade (GANGIL, 2015; WANG et al., 2018; ZHANG et al., 2018). A produção de cápsulas densificadas de biocarvão torna-se uma solução a problemas de carreamento superficial do material, facilitando a aplicação e agregando ao solo benefícios que variam de acordo com a temperatura de pirólise. A inserção de sementes no processo produtivo é uma alternativa à semeadura convencional, onde gastos financeiros e energéticos envolvidos com força de trabalho, transporte e processos

burocráticos podem ser evitados com a disseminação em larga escala de cápsulas, em que se necessita de gastos menores em dispersão, possibilitando ainda o desenvolvimento de métodos de dispersão em veículos aéreos não tripulados (VANT's), conduzindo a uma redução de gastos ainda maior. A pressão de compactação exercida sobre as cápsulas, no entanto, deve ser o suficiente para manter a agregação das partículas de biocarvão, porém não ao ponto de inviabilizar a semente em seu interior.

Espera-se que a produção de cápsulas densificadas de biocarvão não influencie negativamente na germinação, emergência, crescimento e normalidade de plântulas a partir das sementes em seu interior, mas que dentro da produção, haja influência das variáveis “temperatura de pirólise” do biocarvão e “pressão de compactação” das cápsulas. Neste contexto, a produção de cápsulas densificadas de biocarvão veiculadoras de sementes se torna uma solução atrativa, uma vez que a aplicação de biocarvão no solo é facilitada, possibilita a reestruturação das propriedades do solo e amplia o estabelecimento da cobertura vegetal, mesmo em áreas degradadas e declivosas. Portanto, objetivou-se investigar as temperaturas de pirólise e as pressões de compactação de cápsulas densificadas de biocarvão veiculadoras de sementes, na qualidade fisiológica de sementes de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*.

## **2. METODOLOGIA**

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Sementes Florestais do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo (DCFM/UFES).

### **2.1. Obtenção e pirólise da biomassa**

Para a produção de biocarvão foi utilizada a madeira de *Eucalyptus* sp., que apresentava sete anos de idade no momento do corte. Este é o gênero mais utilizado para a produção de carvão vegetal no Brasil. O material foi preparado em serragem, obtida por meio do processo de moagem em moinho de facas, obtendo granulometria média de 8 mm. O material foi pirolisado em três temperaturas finais, 300, 600 e 900 °C, sob uma taxa de aquecimento de 6 °C min<sup>-1</sup> e tempo de permanência na temperatura final de 60 min. As pirólises foram conduzidas em um reator metálico, modelo SPPT-V60 e os gases condensáveis foram coletados por meio de um condensador, para a formação do líquido pirolenhoso. Após a pirólise, o biocarvão permaneceu no reator até que atingisse

temperatura ambiente ( $\pm 30$  °C). Com base na massa inicial da serragem da madeira e nas massas do biocarvão e do líquido pirolenhoso coletado, foram determinados os rendimentos gravimétricos em biocarvão, em líquido pirolenhoso e em gases não condensáveis, com auxílio das Equações 1, 2 e 3.

$$\text{RBC (\%)} = \left( \frac{M_{cv}}{M_m} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

$$\text{RLP (\%)} = \left( \frac{M_{lp}}{M_m} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

$$\text{RGNC (\%)} = 100 - (\text{RCV} + \text{RLP}) \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: RBC = rendimento em biocarvão (%); Mbc = massa seca de biocarvão (g); Mm = massa seca da madeira (g); RLP = rendimento em líquido pirolenhoso (%); MLp = massa do líquido pirolenhoso (g) e RGNC = rendimento em gases não condensáveis (%).

## 2.2. Caracterização do biocarvão para a produção das cápsulas densificadas

Para caracterizar o biocarvão, foram realizados os seguintes ensaios:

- Densidade a granel, de acordo com a ASTM D5057-17 (ASTM, 2017b);
- Densidade verdadeira, baseada nos processos descritos por Dias Júnior et al. (2016).

A análise imediata foi realizada seguindo a metodologia da D1762-84 (ASTM, 2007), para a determinação da umidade, teores de materiais voláteis (TMV), teor de cinzas (TCZ), teor de carbono fixo (TCF). Para a leitura de pH foi pesado 1 g de biocarvão em frascos plásticos e adicionados 20 mL de água deionizada. A mistura foi agitada em mesa agitadora orbital durante 1,5 horas a 200 rpm. Após agitação foram determinados os valores de pH das amostras.

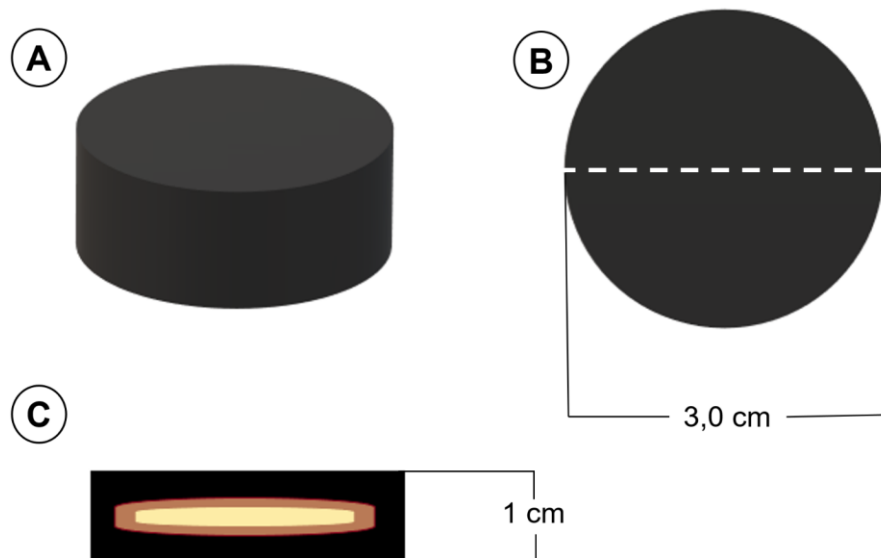
A caracterização das estruturas orgânicas presentes no biocarvão, para a identificação de características estruturais aromáticas (de grupos funcionais e de ligações presentes), foi realizada por análise de espectroscopia vibracional na região do infravermelho, por meio de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Foram identificados os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's) no biocarvão por meio da Cromatografia Gasosa com detector de Espectrometria de Massas

(CG-MS), para monitorar a presença de substâncias tóxicas para a saúde humana. A preparação das amostras de biocarvão e a determinação dos HPA's foram realizadas de acordo com as descrições feitas pelas normas EPA 3550 C (2007) e EPA 8270 D (2007), respectivamente. Os compostos analisados no biocarvão foram acenafteno, acenaftileno, antraceno, benzo[a]antraceno, benzo(a)pireno, benzo[b]fluoranteno, benzo[g,h,i]perileno, benzo[k]fluoranteno, criseno, Dibenz[a,h]antraceno, fenantreno, fluoranteno, fluoreno, indeno[1,2,3-cd]pireno, naftaleno e pyreno.

### 2.3. Produção das cápsulas densificadas de biocarvão

A composição das cápsulas (Figura 1) foi de biocarvão obtido em cada uma das temperaturas finais de pirólise (item 2.1), argila siltosa, como agente estrutural e aglutinante, na proporção 4:1 com o biocarvão, e carboximetilcelulose (CMC) gelatinizada em água (3%) como agente aglutinante, nas proporções 4:1 com biocarvão + argila.

Figura 1 - Representação da cápsula. A: Representação da cápsula em 3D; B: Vista superior da cápsula. C: Vista lateral da cápsula seccionada, evidenciando a semente introduzida em seu interior, posicionada no meio da cápsula.

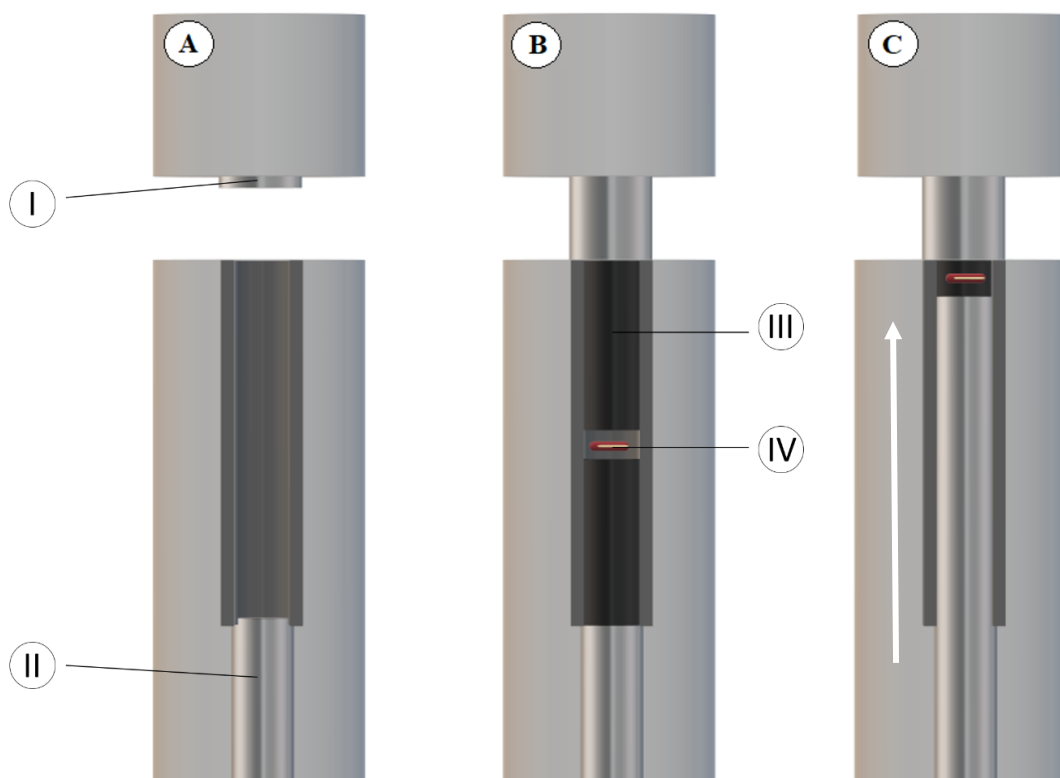


Fonte: o autor (2021).

A espécie *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby, conhecida popularmente como paricá, foi escolhida por ser de rápido crescimento, possuir madeira de elevado valor comercial, muito utilizada em sistemas mistos de restauração, com sementes caracterizadas como ortodoxa, de fácil germinação e de boa adaptação. As

sementes foram escarificadas de forma mecânica, lixando a parte oposta ao hilo, e em seguida, foram adicionadas no momento do preenchimento da coluna da briquetadeira com o material, intercalando material e semente (Figura 2).

Figura 2 - Esquema da produção de cápsula densificada de biocarvão (vista com corte transversal). Em que: I = Cilindro superior; II = Cilindro inferior; III = Biocarvão; IV = Semente de *S. parahyba* var. *amazonicum*; A = Coluna da briquetadeira vazia (cilindros superior e inferior imóveis); B = Preenchimento da coluna da briquetadeira com biocarvão, intercalando material e semente (cilindro superior abaixado); C = Confeção da cápsula (cilindro inferior sobe, para que a pressão seja alcançada).



Fonte: o autor (2021).

A compactação foi com pressão suficiente para proporcionar coesão entre os materiais, entretanto não o bastante para danificar a semente que foi juntamente processada. Para essa conclusão, foram realizados ensaios pilotos (Apêndice A), a fim de determinar as variáveis adotadas na confecção da cápsula aqui investigada. Dessa forma, na compactação da produção das cápsulas foi utilizada uma briquetadeira laboratorial, modelo LB 32, com temperatura ambiente (30 °C), pressões de 50 e 200 psi, com retirada instantânea das cápsulas. As cápsulas foram climatizadas em ambiente com umidade e temperatura controlada ( $65 \pm 1\%$  e  $30 \pm 3$  °C, respectivamente), por dois dias, até que atingissem peso constante.

A densidade aparente foi calculada pela relação entre a massa e volume de cada cápsula, considerando-se a forma cilíndrica que possuem. A análise da dureza será realizada utilizando um durômetro padrão Shore D de acordo com ASTM D2240 (ASTM, 1995). As medições de dureza do durômetro Shore foram repetidas 20 vezes para cada amostra, usando cápsulas e pontos diferentes em cada cápsula. Por meio desta análise foi possível verificar o quanto as cápsulas resistem à penetração imposta pela germinação das sementes de *S. parahyba* var. *amazonicum*. Para avaliação da capacidade de retenção de água (CRA), as amostras foram dispostas em anéis de borracha, saturadas e submetidas à tensão de -10 kPa em extrator de placa porosa (MÉNDEZ; TERRADILLOS; GASCÓ, 2013).

#### **2.4. Germinação, emergência e crescimento inicial de plântulas de *S. parahyba* var. *amazonicum* presentes em cápsulas densificadas de biocarvão.**

Os testes de germinação das sementes introduzidas nas cápsulas densificadas de biocarvão foram conduzidos juntamente com o teste de emergência, em que as cápsulas foram inseridas acima do substrato vermiculita. Dois tratamentos testemunhas foram adicionados, em que a semente foi inserida sob o substrato, como em uma semeadura convencional (Testemunha 1), e colocada sobre o substrato, simulando uma semeadura a lanço, ou uma natural “chuva de sementes” (Testemunha 2). Para a Testemunha 1, como não era possível a visualização da germinação, foi conduzido um teste de germinação em substrato rolo de papel. Neste estudo foram investigadas seis variações de parâmetros, com três temperaturas de pirólise e duas pressões de compactação:

- CB 50/300: pressão de compactação 50 psi e 300 °C de temperatura de pirólise;
- CB 50/600: pressão de compactação 50 psi e 600 °C de temperatura de pirólise;
- CB 50/900: pressão de compactação 50 psi e 900 °C de temperatura de pirólise;
- CB 200/300: pressão de compactação 200 psi e 300 °C de temperatura de pirólise;
- CB 200/600: pressão de compactação 200 psi e 600 °C de temperatura de pirólise;
- CB 200/900: pressão de compactação 200 psi e 900 °C de temperatura de pirólise.

Para o teste de germinação e emergência, as cápsulas foram dispostas sobre caixas com substrato, com entrada de oxigênio, assim como nos tratamentos testemunhas. As regas foram feitas com água destilada com volume correspondente a 60% da capacidade

de retenção de água do substrato (BRASIL, 2009). A contagem da germinação foi realizada diariamente, observando-se a emergência da radícula como critério de germinação (BEWLEY; BLACK, 1994). Ao iniciar a embebição das sementes, as cápsulas se abriam naturalmente, expondo o momento exato em que as sementes iniciavam o processo de germinação, não impedindo sua visualização. Os oito tratamentos foram incubados em câmara de germinação tipo BOD, a 25 °C e fotoperíodo de 12 h. Cada tratamento foi composto por quatro repetições, com cada repetição composta por 25 cápsulas, totalizando 100 cápsulas por tratamento.

Para o teste de germinação, as variáveis estudadas foram: % de germinação (%G), estabelecida com base na observação da germinação diariamente após a sementeira até o 20º dia; índice de velocidade de germinação (I.V.G.), de acordo com Maguire (1962) (Equação 8); e, o tempo médio de germinação (T.M.G.), segundo Labouriau (1983) (Equação 9).

$$I. V. G. = \frac{G_1}{N_1} + \frac{G_2}{N_2} + \dots + \frac{G_n}{N_n} \quad (\text{Equação 8})$$

$$T. M. G. = \frac{(G_1 * N_1) + (G_2 * N_2) + \dots + (G_n * N_n)}{G_1 + G_2 + \dots + G_n} \quad (\text{Equação 9})$$

Em que: I.V.G. = índice de velocidade de germinação; G = número de sementes germinadas; N = número de dias da sementeira à 1ª, 2ª ... enésima avaliação; T.M.G. = tempo médio de germinação.

Para o teste de emergência e crescimento inicial de plântulas, as variáveis estudadas foram: % de emergência (%E), estabelecida com base na observação da emergência diariamente após a sementeira até o 15º dia, sendo consideradas como emergidas no momento em que os cotilédones forem expostos; índice de velocidade de emergência (I.V.E.), de acordo com Maguire (1962) (Equação 8); o tempo médio de emergência (T.M.E.), segundo Labouriau (1983) (Equação 9); a altura de plântulas e comprimento da raiz, realizada ao 20º dia com o auxílio de régua graduada em milímetros, sendo os dados obtidos expressos em centímetros; o diâmetro do coleto, com o auxílio de um paquímetro digital; massa seca da parte aérea e massa seca da raiz, obtidas após secagem em estufa de circulação de ar forçado a 65 °C até obtenção de peso constante, com uso de balança analítica com precisão de 0,0001 g. O teste de emergência foi conduzido utilizando-se de

leituras diárias pelo tempo necessário para a uniformização (estabilização) de emergência em pelo menos um dos tratamentos.

$$\text{I. V. E.} = \frac{E_1}{N_1} + \frac{E_2}{N_2} + \dots + \frac{E_n}{N_n} \quad (\text{Equação 10})$$

$$\text{T. M. E.} = \frac{(E_1 * N_1) + (E_2 * N_2) + \dots + (E_n * N_n)}{E + E_2 + \dots + E_n} \quad (\text{Equação 11})$$

Em que: I.V.E. = índice de velocidade de emergência; E = número de plântulas normais computadas nas contagens; N = número de dias da semeadura à 1ª, 2ª ... enésima avaliação; T.M.E. = tempo médio de emergência.

## 2.5. Análise de dados

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e de homocedasticidade (Bartlett). A análise de variância realizada seguindo delineamento inteiramente aleatorizado, com três variáveis respostas relacionadas à pirólise do biocarvão (300, 600 e 900 °C) e duas variáveis respostas relacionadas à pressão de compactação (50 e 200 psi). Identificando diferenças significativas com relação a alguma variável dependente, foi realizado o ajuste de modelo de regressão por superfície de resposta. Os testes foram executados a 95% de probabilidade. Medidas de dispersão do desvio padrão foram fornecidas para melhor entender o intervalo de confiança obtido para cada variável estudada.

A análise multivariada de agrupamento foi utilizada para identificar semelhanças entre os tratamentos estudados, tanto de cápsulas, quanto de testemunhas, em que a semente de *S. parahyba* var. *amazonicum* foi colocada sob o solo, simulando a semeadura convencional (Tratamento 1), e sobre o solo, simulando a natural “chuva de sementes” que normalmente ocorre em florestas (Tratamento 2). A análise de agrupamento hierárquico aglomerativo (HAC, do inglês *Hierarchical Agglomerative Clustering*) foi realizada para esse fim. A distância de Manhattan foi adotada como medida de proximidade, e o método do *Average Link*, também conhecido como UPGMA (do inglês, *Unweighted Pair Groupmethod Using Arithmetic Averages*), foi utilizado como técnica de agrupamento de tratamentos semelhantes (EVERITT, 2011). A qualidade do dendrograma obtido foi avaliada pelo coeficiente de correlação cofenética que mede a correlação entre as distâncias recuperadas do dendrograma e a matriz de distâncias original. As médias aritméticas de todas as

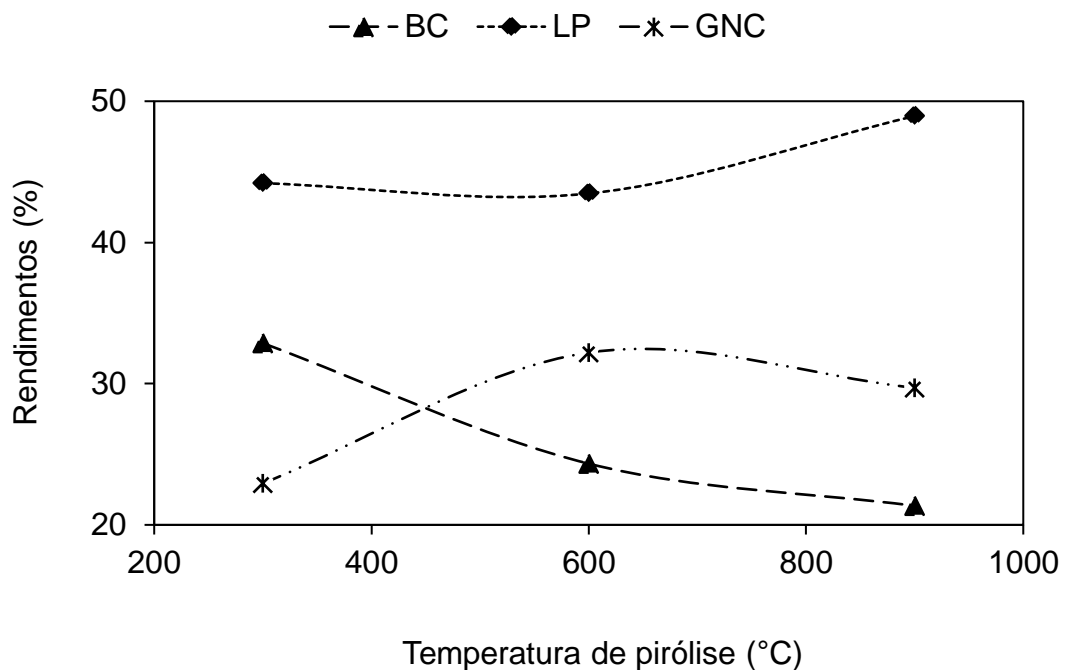
variáveis consideradas para o estudo foram padronizadas com média 0 e variância 1. O software R Core Team foi utilizado para as análises citadas.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Rendimentos dos produtos da pirólise

Os rendimentos dos produtos da pirólise estão dispostos na Figura 3.

Figura 3 - Rendimentos dos produtos da pirólise de *Eucalyptus* sp.



Em que: BC = rendimento em biocarvão; LP = rendimento em líquido pirolenhoso; GNC = rendimento em gases não condensáveis. Fonte: o autor (2021).

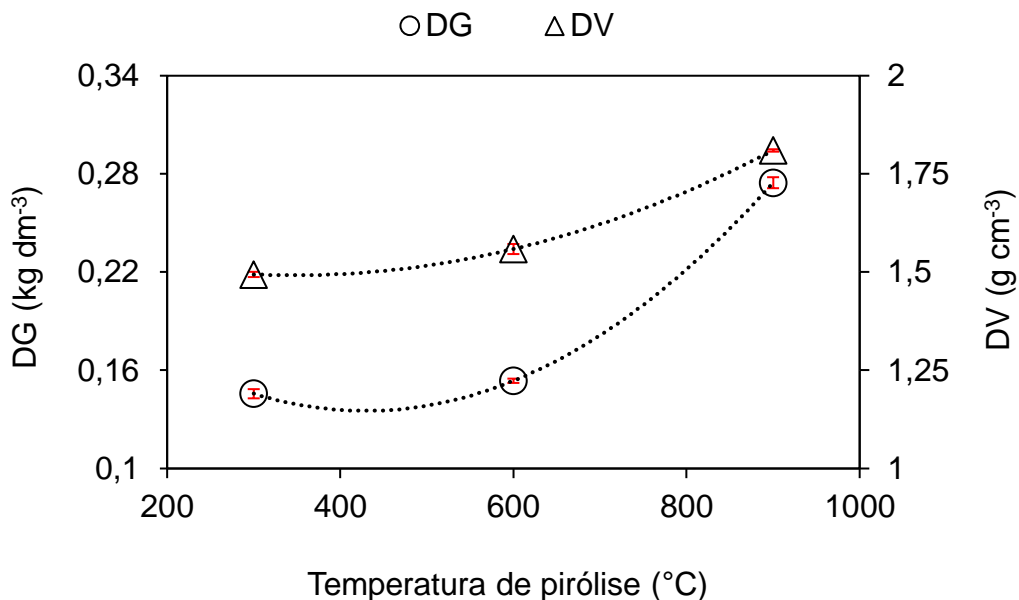
Observa-se que o rendimento gravimétrico em biocarvão diminuiu à medida que se aumenta a temperatura de pirólise, com rendimento em torno de 33% a 300 °C, chegando aos 21% a 900 °C. O aumento na temperatura final da pirólise e no tempo de residência reduz o rendimento em biocarvão (WEBER; QUICKER, 2018; DUFOURNY et al., 2019), impactando diretamente na produção de cápsulas densificadas, onde se há necessidade de incorporar mais matéria prima para pirólises realizadas a altas temperaturas, para se obter mesma produção que pirólises em temperaturas mais baixas. Este comportamento em rendimento de biocarvão reflete nos rendimentos em líquido pirolenhoso e gases não

condensáveis, onde o rendimento em líquido pirolenhoso se manteve parcialmente estável entre 300 e 600 °C, aumentando consideravelmente aos 900 °C, sendo observado maiores rendimentos em gases não condensáveis nas pirólises conduzidas a 600 e 900 °C, 32 e 30% respectivamente.

### 3.2. Características químicas e físicas do biocarvão

Os resultados dispostos na Figura 4 evidenciam que a densidade verdadeira aumenta à medida em que se aumenta a temperatura de pirólise, enquanto a densidade a granel tem uma leve diminuição por volta dos 450 °C, aumentando de acordo com o aumento da temperatura de pirólise.

Figura 4 – Densidade a granel e verdadeira dos biocarvões em função da temperatura de pirólise.



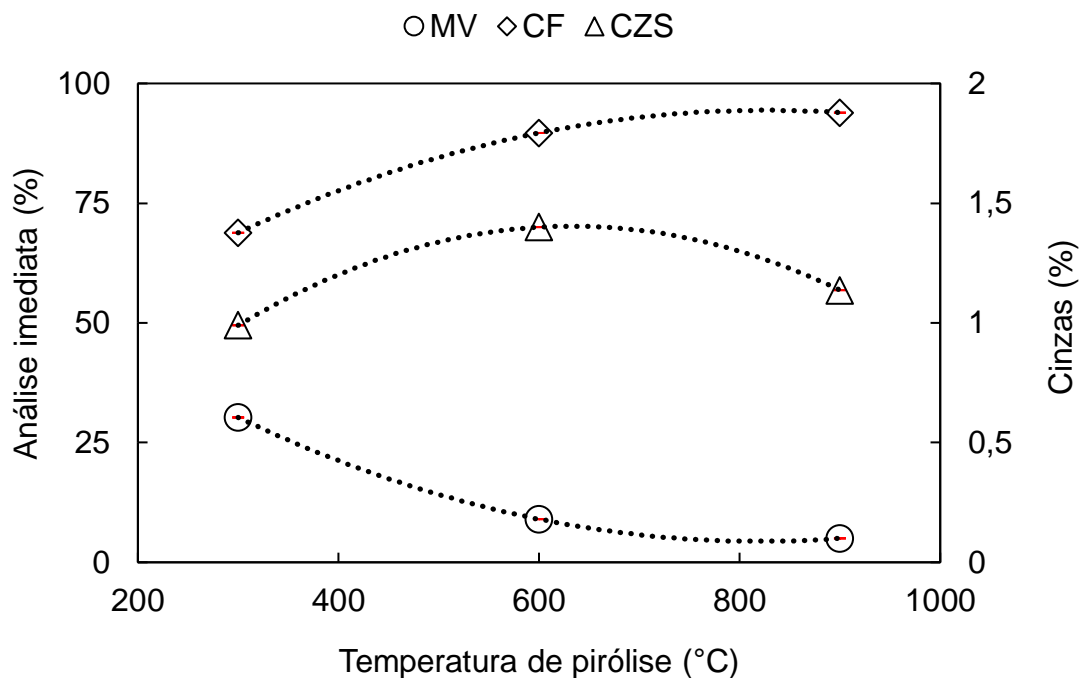
Em que: DG = densidade a granel; DV = densidade verdadeira. Equações de regressão:  $DG = 0,2508 - 0,0005TEMP + 6E-07TEMP^2$ ,  $R^2 = 0,9987$ ;  $DV = 1,6559 - 0,0009TEMP + 1E-06 TEMP^2$ ,  $R^2 = 0,9975$  ( $p$ -valor < 0,05), onde TEMP = temperatura de pirólise. Fonte: o autor (2021).

Estes comportamentos, também observados por Dias Junior et al. (2020), ocorrem devido à diminuição da massa que se torna maior que a diminuição em volume no material a ser pirolisado em temperaturas mais baixas, em um primeiro momento. À medida que se aumenta a temperatura de pirólise, a perda em massa torna-se menor que a diminuição em volume, refletindo em maior densidade no material (TSAI; LIU, 2013). Ao ser arremessado, o biocarvão compactado em cápsulas incorpora-se ao solo, o que faz com que a densidade

do solo venha a diminuir. Em termos de densidade do solo, um valor mais baixo é o indicador de melhor estrutura do solo, a qual proporciona estabilidade de agregados e aeração (OK et al., 2016) melhorando o transporte de água e solutos no solo, trocas gasosas e o crescimento das raízes (SKOPP; GARDNER; TYLER, 1981; ALGHAMDI; ALKHASHA; IBRAHIM, 2020). Associada à baixa densidade, a natureza porosa do biocarvão pode ainda fornecer as condições ideais para o crescimento microbiano. Isso pode induzir a imobilização de N, diminuindo assim a biodisponibilidade de N no solo e, portanto, diminuindo as emissões de N<sub>2</sub>O por meio da limitação de substratos para nitrificação e desnitrificação (OK et al., 2016).

Os resultados dos teores de matérias voláteis, carbono fixo e cinzas, são mostrados na Figura 5.

Figura 5 - Composição imediata do biocarvão produzido em função da temperatura de pirólise.



Em que: MV = materiais voláteis; CF = carbono fixo; CZS = cinzas. Equações de regressão:  $MV = 0,6972 - 0,0016TEMP + 1E-06TEMP^2$ ,  $R^2 = 0,9997$  ( $p$ -valor < 0,05);  $CF = 0,3137 + 0,0015TEMP - 9E-07TEMP^2$ ,  $R^2 = 0,9997$  ( $p$ -valor < 0,05);  $CZS = -0,0009 + 5E-05TEMP - 4E-08TEMP^2$ ,  $R^2 = 0,9676$  ( $p$ -valor < 0,05), em que: MV = materiais voláteis; CF = carbono fixo; CZ = cinzas; TEMP = temperatura de pirólise. Fonte: o autor (2021).

O teor de materiais voláteis diminui à medida que a temperatura da pirólise aumenta (AMELOOT et al., 2013; GHIDOTTI; FABBRI; HORNUNG, 2016; DIAS JUNIOR et al., 2020). Para a pirólise realizada a 300 °C, o teor médio foi de 30,25%, enquanto a 900 °C foi de 5,00%, variação de aproximadamente 84% entre extremos. Naturalmente, o

biocarvão absorve os gases de pirólise gerados durante a produção (CHOUCHENE et al., 2010; MUN; KU, 2010; SONG; PENG, 2010) e quando adicionado ao solo por meio das cápsulas densificadas, pode também absorver outros compostos voláteis diretamente do meio ambiente (MASCLET et al., 1987). Esta propriedade importante do biocarvão influencia na respiração dos solos, em que o conteúdo de material volátil do biocarvão se correlaciona a emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub> de solos corrigidos, e estimula os microorganismos do solo pelo fornecimento de um substrato prontamente disponível (AMELOOT et al., 2013). Spokas (2010) quantificou as taxas variáveis de produção de etileno originadas de diferentes biocarvões, especulando que poderia estar envolvido nas respostas microbianas da planta e do solo, observadas a partir da adição de biocarvão. De modo geral, os materiais voláteis do biocarvão desempenham um papel misto no sistema solo-planta, em que compostos individuais podem agir como estimulantes para sistemas biológicos.

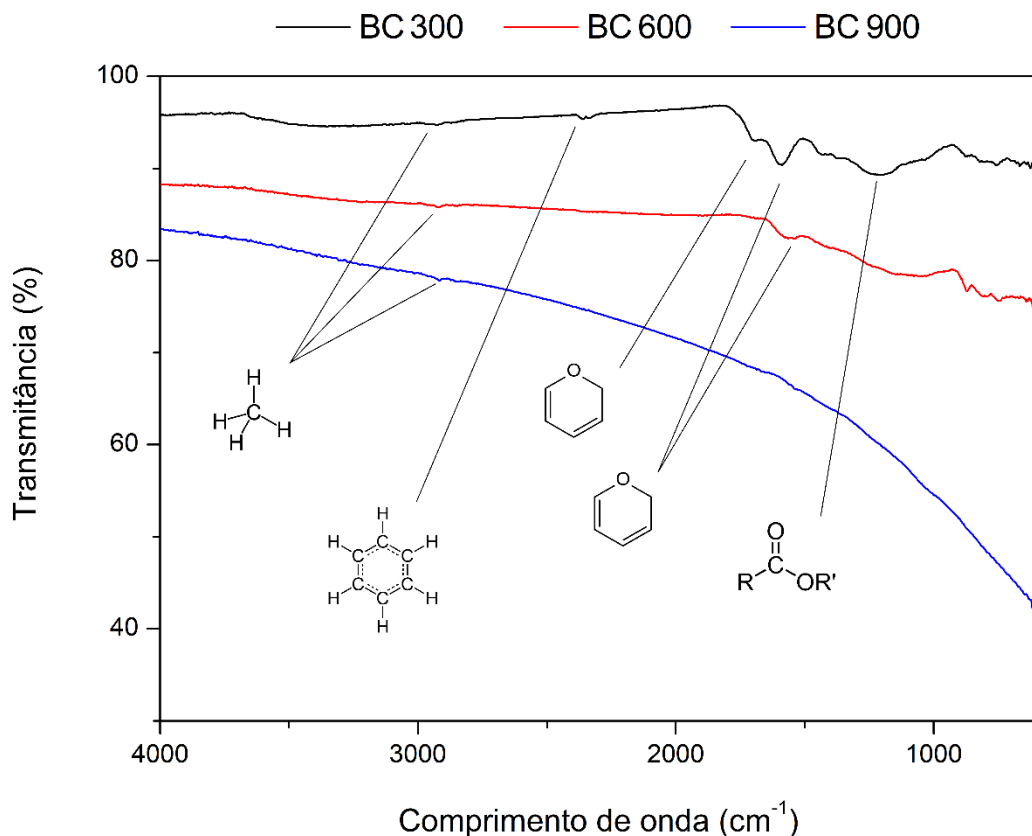
Em consequência à diminuição dos materiais voláteis, ocorre o aumento no teor de carbono fixo devido ao aumento das temperaturas, uma vez que a função do mecanismo forno é concentrar C. Por ser formada essencialmente por biocarvão, as cápsulas produzidas com alto teor de C fixo possui em sua constituição componentes termicamente estáveis (DAS et al., 2021), que possuem maior tempo de residência no solo e mais recalcitrância no ambiente (ALBALASMEH et al., 2020), tornando-as parte de um sistema em que a capacidade de armazenamento em C no solo é superior à liberação de C na atmosfera, integrando-as como “carbono negativo”.

O teor de cinzas variou 0,41% entre as pirólises realizadas a 300 e 600 °C, e 0,15% entre 300 e 900 °C. As cinzas são atribuídas à fração mineral do material de origem, não termodegradável, e normalmente são valores muito variáveis, sendo atribuída a vários fatores (TRUGILHO et al., 2001). A contribuição das cinzas no solo se estende tanto ao fornecimento de macro e micronutrientes, quanto ao aumento de pH, fortemente correlacionado ao aumento na temperatura de pirólise (ALBALASMEH et al., 2020). Ao serem realizadas as leituras de pH nos biocarvões produzidos, encontraram-se valores de 5,4 para pirólise realizada a 300 °C, 8,55 para 600 °C, e 9,20 para 900 °C. De modo geral, os biocarvões possuem natureza alcalina, o que permite aumentar o pH de solos em condições específicas, reduzindo a acidez e neutralizando o Al<sup>3+</sup> (DAI et al., 2017; FIDEL et al., 2017). O pH ácido encontrado no biocarvão pirolisado a 300 °C pode estar associado à não transformação completa da madeira pela ação do calor, uma vez que o pH da madeira de *Eucalyptus* é de caráter ácido (POONIA; TRIPATHI, 2017; CARVALHO et al., 2020). Ao serem produzidas cápsulas densificadas com biocarvão produzido a temperaturas mais elevadas, quando incorporadas aos solos ácidos, contribuirão positivamente para a

elevação do pH, tornando macronutrientes mais disponíveis às plantas, seja por efeitos indiretos ou diretos, permitindo o desenvolvimento pleno. Yuan e Xu (2011) observaram que o aumento no pH do solo foi fortemente correlacionado com a alcalinidade do biocarvão utilizado ( $R^2 = 0,95$ ). Yuan, Xu e Zhang (2011) constataram que, embora carbonatos e óxidos sejam os principais componentes que contribuem para a alcalinidade da maioria dos biocarvões, os grupos funcionais do biocarvão como ligações simples  $\text{COO}^-$  e  $\text{O}^-$  também contribuíram muito para a alcalinidade do biocarvão quando pirolisados a temperaturas mais baixas (300-500 °C).

Os espectros de análise FTIR do biocarvão estão dispostos na Figura 6.

Figura 6 - Espectros de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) do biocarvão produzidos em diferentes temperaturas de pirólise (Bandas na faixa de 600 - 4000  $\text{cm}^{-1}$ ).



Em que BC = biocarvão. Fonte: o autor (2021).

Os espectros de FTIR indicam que o biocarvão é dominado por grupos funcionais típicos de hidrocarbonetos oxigenados, refletindo a estrutura de carboidratos da celulose e hemiceluloses (GHANI et al., 2013; TOMCZYK; SOKOŁOWSKA; BOGUTA, 2020). A banda centrada em  $3353 \text{ cm}^{-1}$  foi atribuída ao alongamento vibracional característico do grupo hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) da água adsorvida, possivelmente de um grupo carboxila, fenol ou álcool

(YAKOUT; EL-DEEN, 2016; ZHANG et al., 2018; TOMCZYK; SOKOŁOWSKA; BOGUTA, 2020). As bandas em torno de  $2930\text{ cm}^{-1}$  são atribuídas aos alongamentos vibracionais simétricos e assimétricos de grupos C-H, onde baixas intensidades evidenciam a ocorrência da pirólise do biocarvão (BRUM et al., 2008; XU et al., 2014; ZHANG et al., 2018). A banda em  $2361\text{ cm}^{-1}$  é causada pela extensão da ligação C=C do anel de benzeno (WU et al., 2017; ZENG et al., 2020). O pico observado em  $1692\text{ cm}^{-1}$  foi provavelmente devido à vibração de alongamento da ligação C = O não conjugada do anel aromático, enquanto que em torno de  $1600\text{ cm}^{-1}$ , os espectros de biocarvão apresentam uma banda de alta intensidade, possivelmente atribuída à vibração de grupos C = C e C = O conjugada de anéis aromáticos (MYGLOVETS et al., 2014), geralmente relacionada à presença de lignina e também à formação de compostos aromáticos originados da eliminação de hidrogênio e oxigênio de compostos alifáticos durante a pirólise, onde  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  é temperatura suficiente para isso (JAGTOYEN; DERBYSHIRE, 1993; DIAS JÚNIOR, 2019). A banda centrada em  $1202\text{ cm}^{-1}$  foi atribuída à presença de grupos C – O – C e éteres arílicos, fenólicos associados à lignina (KARDAM et al., 2012). A banda ocorrendo a  $1055\text{ cm}^{-1}$  é característica do alongamento de CO simétrico em celulose e hemiceluloses (JEEVITHA et al., 2015; QAMBRANI et al., 2017). Todas as bandas em números de onda menores que  $1000\text{ cm}^{-1}$  são eliminadas no biocarvão com o aumento da temperatura de pirólise. Essas bandas estariam relacionadas à celulose e à lignina e sua diminuição indica a degradação dos componentes da madeira (LAMMERS; KEIL; DIGHTON, 2009; DAVRIEUX; ROUSSET, 2010).

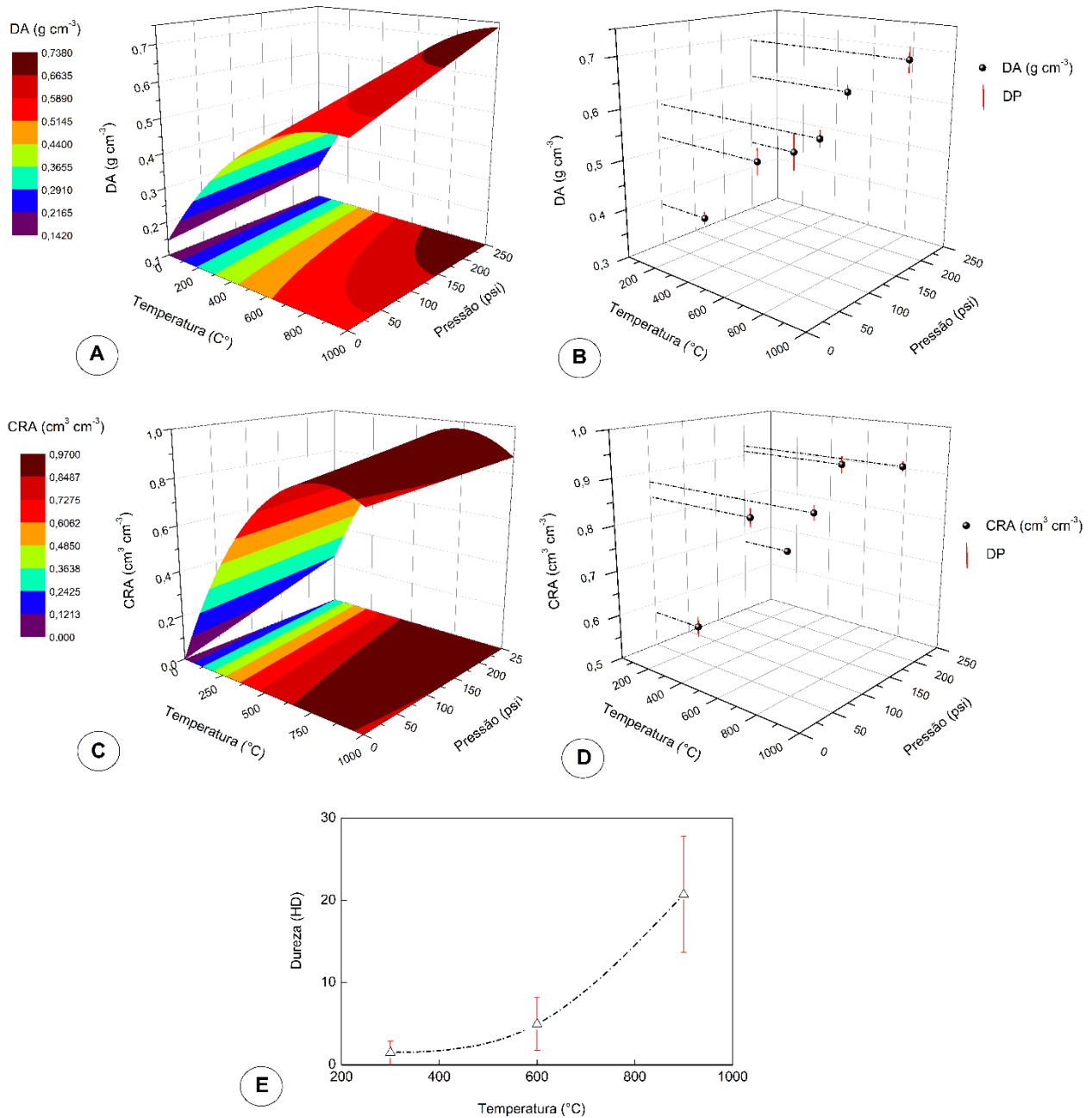
A elevação da temperatura decorrida do processo de pirólise do biocarvão provocou o desaparecimento de bandas características de amostras de biocarvão, sendo completamente exauridas para a amostra pirolisada a  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ . O aquecimento a temperaturas de até  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  quebra e reorganiza as ligações químicas na biomassa, formando novos grupos funcionais, como carboxila, lactona, lactol, quinina, cromeno, anidrido, fenol, éter, pirona, piridina, piridona e pirrol (MIA et al., 2017; TOMCZYK; SOKOŁOWSKA; BOGUTA, 2020). A redução e desaparecimento quantitativo dos grupos ácidos com o aumento da temperatura, tais como -COOH e -OH, pode contribuir para a alcalinidade do biocarvão juntamente com a formação de alguns grupos oxigenados provenientes da conversão térmica da celulose (CHUN et al., 2004; JOSEPH et al., 2009; YUAN; XU, 2011). Isso faz com que as cápsulas produzidas com biocarvão tratadas por temperaturas mais elevadas de pirólise tenham maior poder de neutralização de solos ácidos, impactando em melhor desenvolvimento vegetal por maior disponibilidade de nutrientes.

Independente da temperatura em que foi pirolisado, o biocarvão apresentou níveis de HPAs abaixo do limite de qualificação (LQ,  $<0,01 \text{ mg kg}^{-1}$ ), com exceção ao biocarvão pirolisado a  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , que apresentou  $0,21 \text{ mg kg}^{-1}$  de naftaleno. A CONAMA 420/09 (2009), que define valores para o naftaleno no solo para diversos usos no Brasil, determina os valores de investigação para uso agrícola como  $30 \text{ mg kg}^{-1}$ , enquanto que na Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) os níveis de triagem para naftaleno em solo industrial e residencial é de 17 e  $3,8 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente (USEPA, 2018). Em ambos os casos, a quantidade encontrada de naftaleno foi abaixo dos parâmetros estabelecidos, não havendo empecilho para aplicação ao solo.

### **3.3. Características das cápsulas densificadas de biocarvão**

Os dados referentes à densidade aparente, capacidade de retenção de água e dureza mecânica estão dispostos na Figura 7. As superfícies de resposta refletem o aumento da “densidade aparente” e “capacidade de retenção de água” das cápsulas densificadas a medida que se aumenta a temperatura de pirólise e a pressão de compactação, enquanto o modelo que mais se ajustou a predição da “dureza mecânica” considera apenas a temperatura de pirólise como variável significativa.

Figura 7 - Superfícies de resposta e distribuição de dados de (A; B) densidade aparente, (C; D) capacidade de retenção de água e (E) dureza mecânica das cápsulas de biocarvão produzidas.



Em que: DA = densidade aparente; CRA = capacidade de retenção de água; DU = dureza mecânica; DP = desvio padrão. Equações de regressão:  $DA = 1,433E-01 + 8,811E-04 \text{ TEMP} + 2,470E-04 \text{ PRES} + 4,545E-07 \text{ TEMP PRES} - 4,618E-07 \text{ TEMP}^2$ ,  $R^2 = 0,9734$  ( $p\text{-valor} < 0,001$ );  $CRA = + 2,186E-03 \text{ TEMP} + 9,650E-04 \text{ PRES} - 7,938E-07 \text{ TEMP PRES} - 1,357E-06 \text{ TEMP}^2$ ,  $R^2 = 0,9996$  ( $p\text{-valor} < 0,001$ );  $DU = 9,722 - 4,825E-02 \text{ TEMP} + 6,720E-05 \text{ TEMP}^2$ ,  $R^2 = 0,7751$  ( $p\text{-valor} < 0,001$ ). Em que: DA = densidade aparente; CRA = capacidade de retenção de água; DU = dureza mecânica; TEMP = temperatura de pirólise; PRES = pressão de compactação. Fonte: o autor (2021).

Com o aumento da temperatura de pirólise, ocorre perda de massa e aumento na porosidade do biocarvão, justificado pela liberação de voláteis, principalmente nas

temperaturas de decomposição entre 200 e 500 °C (DIAS JUNIOR et al., 2020). Entretanto, em temperaturas mais elevadas ocorre reestruturação da matriz de carbono, contraindo o biocarvão, reduzindo assim seu volume (PASTOR-VILLEGAS et al., 2007; SOMERVILLE; JAHANSHAH, 2015). Associado a isso, a compactação faz com que ocorra o rearranjo das partículas e a densificação do biocarvão, concentrando mais massa em menores volumes. A relação entre esses fenômenos resulta em aumento da densidade aparente das cápsulas de biocarvão, assim como o aumento da dureza mecânica. Conseqüentemente, cápsulas mais pesadas e mais duras possuem melhor estrutura física, que por sua vez minimiza a fragmentação precoce à disseminação e posterior incorporação ao solo, admite maior resistência ao carreamento, que pode se tornar um problema em solos declivosos por aglomerar cápsulas em locais de menor relevo, e confere um alicerce estrutural para o desenvolvimento de sementes presentes em seu interior.

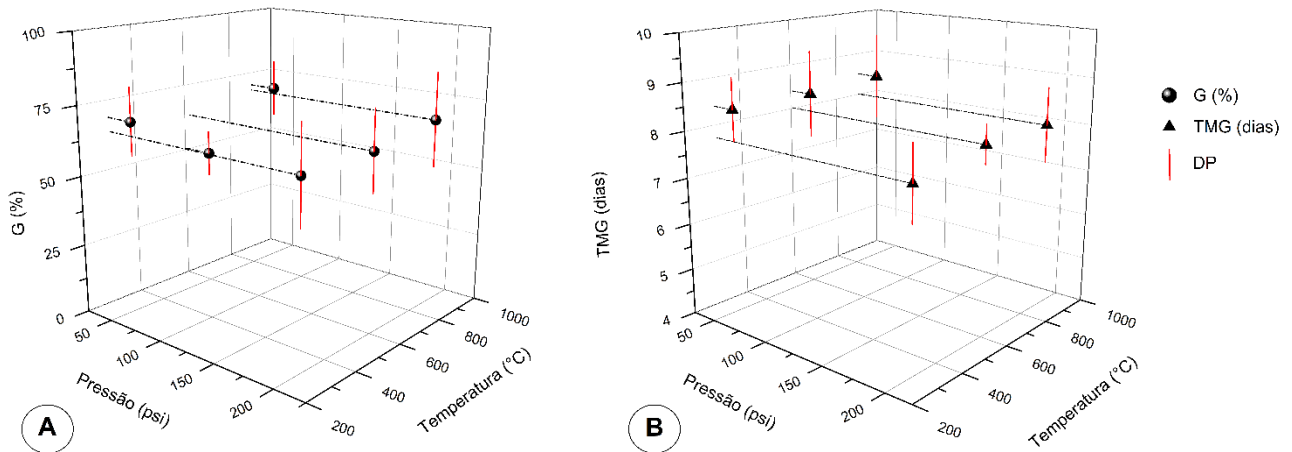
A temperatura de pirólise é o principal fator que interfere na capacidade de retenção de água no biocarvão, por ser o desencadeador de outros fatores que contribuem para a mudança de grandeza desta variável. Conforme a temperatura de carbonização aumenta, o número de microporos aumenta gradualmente (ZHAO; LI; LIU, 2013; LIBBRECHT et al., 2017; XI et al., 2020) e aumenta-se a quantidade de grupos funcionais ácidos na superfície do biocarvão, que contribuem para sua molhabilidade e capacidade de retenção de água (ZHANG; YOU, 2013; SULIMAN et al., 2017).

Considerando que a densidade das cápsulas aumenta de acordo com a pressão de compactação e com a temperatura de pirólise a que foi submetido o biocarvão, cápsulas produzidas com maiores densidades possuem elevada quantidade de material por unidade de volume, conseqüentemente resultando em maior capacidade de retenção de água. A incorporação de cápsulas de biocarvão no solo faz com que sua alta área de superfície e sua estrutura porosa possibilite a melhoria na estrutura dos poros do solo e o armazenamento de água, acarretando maior retenção de água no solo. Ainda, no que diz respeito ao desenvolvimento de sementes, a água armazenada nas cápsulas pode ser fornecida à semente que, por embebição, reidrata os tecidos e, por conseqüência, permite a ativação enzimática, decomposição, translocação e uso de material de armazenamento de reserva para o fornecimento de energia, garantindo o subsequente crescimento do eixo embrionário, culminando na protrusão da raiz primária ou germinação.

#### **3.4. Germinação, emergência e crescimento inicial de plântulas de *S. parahyba* var. *amazonicum* a partir de cápsulas de biocarvão**

A germinação média foi de 62%, enquanto o tempo médio de germinação ficou em torno de 8 dias (Figura 8). Não houve diferenças significativas entre as diferentes pressões e temperaturas de pirólise ( $p > 0,05$ ).

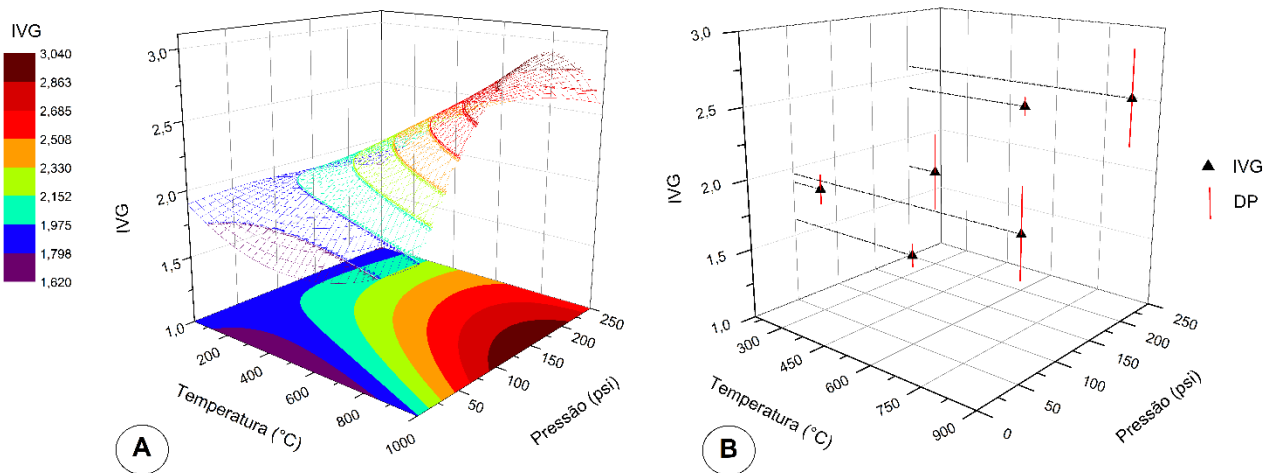
Figura 8 - (A) Porcentagem de germinação e (B) tempo médio de germinação de sementes de *S. parahyba* var. *amazonicum* em cápsulas densificadas de biocarvão.



Em que: G (%) = porcentagem de germinação; TMG = tempo médio de germinação; DP = desvio padrão. Fonte: o autor (2021).

Os resultados referentes ao índice de velocidade de germinação sofreram influência significativa da pressão de compactação, temperatura de pirólise e a interação entre ambas ( $p$ -valor  $< 0,05$ ). A distribuição dos dados, assim como a superfície de resposta do modelo de regressão ajustado, está disposta na Figura 9.

Figura 9 - Índice de velocidade de germinação (IVG) de sementes de *S. parahyba* var. *amazonicum* em cápsulas de biocarvão. (A) Superfície de resposta do modelo de regressão ajustado; (B) Distribuição dos dados de índice de velocidade de germinação das sementes presentes nas cápsulas de biocarvão.



Equação de regressão:  $IVG = 3,507 - 6,851E-03TEMP - 1,426E-02PRES + 5,676E-05 TEMP PRES + 3,835E-06 TEMP^2 - 1,615E-10 TEMP^2PRES^2$ ,  $R^2 = 0,6929$  ( $p$ -valor < 0,001), onde IVG = índice de velocidade de germinação; TEMP = temperatura de pirólise; PRES = pressão de compactação. Fonte: o autor (2021).

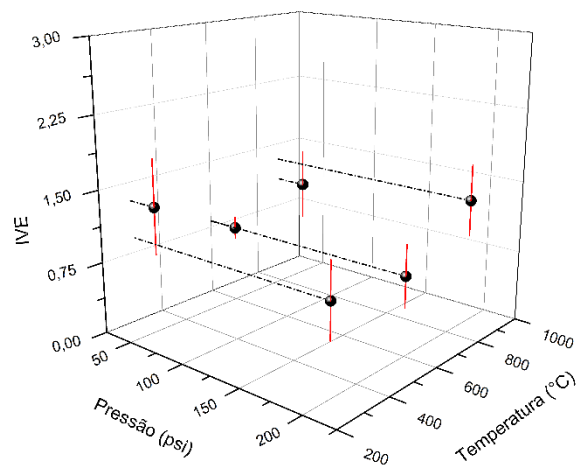
Verifica-se aumento no IVG à medida que se aumenta a temperatura de pirólise, associada ao aumento na pressão de compactação (Fig. 10). Concomitante a isto, cápsulas de maiores densidades possuem mais material em menor volume, além de serem mais estruturadas fisicamente e contemplar maior capacidade de retenção de água, fatores que podem ter disponibilizado ambiente mais propício ao crescimento inicial das plântulas. A germinação começa com a captação de água, que desencadeia de forma progressiva os processos celulares necessários para a protrusão da raiz primária (NONOGAKI; BASSEL; BEWLEY, 2010; GÓMEZ-MAQUEO et al., 2020). Uma diminuição na disponibilidade de água para a semente na cápsula poderia atrasar a segunda fase da absorção ou limitar e reduzir a divisão e alongamento celular, o crescimento da raiz primária e a germinação das sementes (LARSEN et al., 2004; TEIMORI et al., 2020), retardando a velocidade com que as sementes germinam.

Os efeitos do biocarvão sobre as sementes e as plantas são pouco conhecidos, visto a complexidade que este componente agrega ao conjunto solo-planta, e as mais diferentes variáveis utilizadas para a sua produção. O que se percebe é que diferentes tipos de biomassas utilizadas para a produção de biocarvão, além de diferentes características de produção, convergem a diferentes resultados, onde é possível haver impactos negativos a germinação (SOLAIMAN; MURPHY; ABBOTT, 2011; GASCÓ et al., 2016), neutros (FREE

et al., 2010; GRAVEL; DORAIS; MÉNARD, 2013; GASCÓ et al., 2016) e positivos (SOLAIMAN; MURPHY; ABBOTT, 2011; FRENCH; IYER-PASCUZZI, 2018), em que se sugere que o biocarvão afeta as características relacionadas a via da giberelina (GA), hormônio responsável pela germinação das sementes, diminuindo o tempo e elevando a porcentagem de germinação sob a adição do biocarvão (FRENCH; IYER-PASCUZZI, 2018).

O IVE médio foi de 1,04 (Figura 10), não havendo diferença significativa relacionada a esta variável em diferentes pressões e temperaturas de pirólise ( $p$ -valor < 0,05).

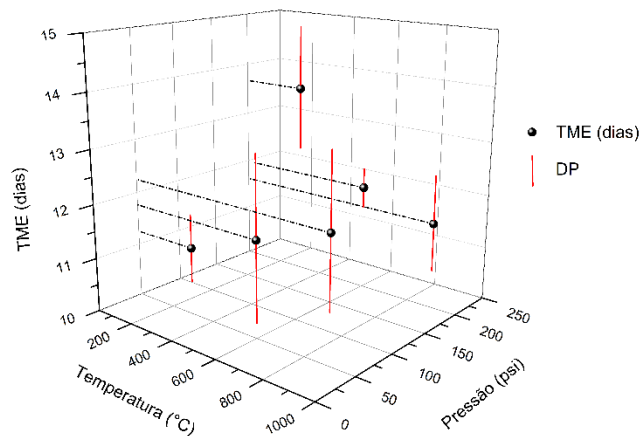
Figura 10 - Índice de velocidade de emergência (IVE) de plântulas de *S. parahyba* var. *amazonicum* em cápsulas densificadas de biocarvão.



Em que: IVE = índice de velocidade de emergência; DP = desvio padrão. Fonte: o autor (2021).

De forma isolada, a pressão de compactação e a temperatura de pirólise não influenciaram o tempo médio de emergência, apenas a interação entre ambas ( $p$ -valor < 0,05). Contudo, não foi possível ajustar um modelo de regressão que permitisse prever o comportamento desta variável ( $p$ -valor > 0,05) (Figura 11).

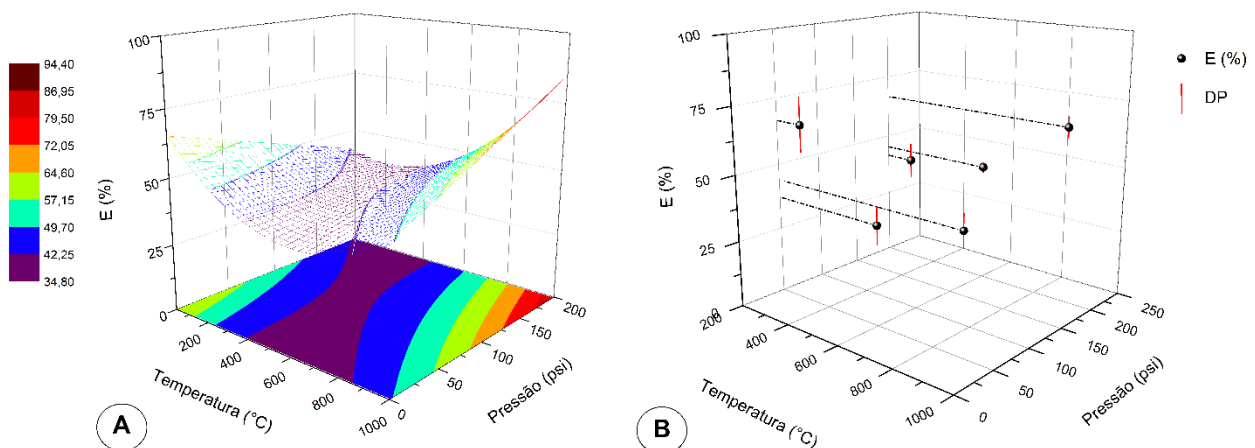
Figura 11 - Tempo médio de emergência de plântula de *S. parahyba* var. *amazonicum* em cápsulas de biocarvão.



Em que: TME = tempo médio de emergência; DP = desvio padrão. Fonte: o autor (2021).

A temperatura de pirólise e a interação entre esta variável e a pressão de compactação expressaram influência significativa em relação à porcentagem de emergência ( $p$ -valor < 0,05). A distribuição dos dados está disposta na Figura 12, assim como a superfície de resposta do modelo de regressão ajustado.

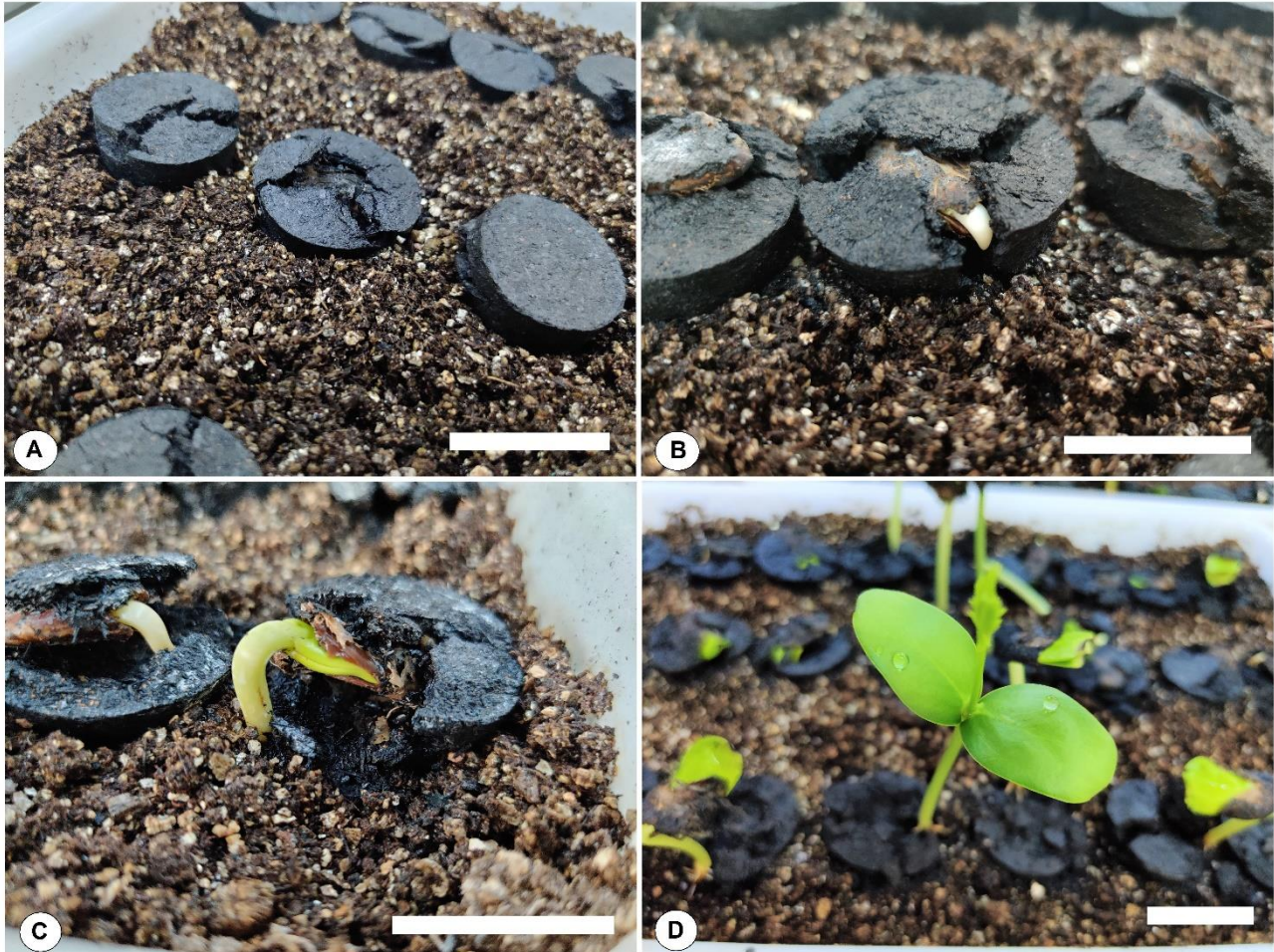
Figura 12 - Porcentagem de emergência de plântulas de *S. parahyba* var. *amazonicum* em cápsulas de biocarvão. (A) Superfície de resposta do modelo de regressão ajustado; (B) Distribuição dos dados de porcentagem de emergência das plântulas de sementes presentes nas cápsulas de biocarvão.



Equação de regressão:  $E (\%) = 1,325 - 2,446E-03TEMP - 3,078E-03PRES + 5,333E-06TEMPPRES + 1,5E-06TEMP^2$ ,  $R^2 = 0,7545$  ( $p$ -valor < 0,001), onde  $E (\%)$  = porcentagem de emergência; TEMP = temperatura de pirólise; PRES = pressão de compactação. Fonte: o autor (2021).

Assim como a germinação, a emergência pode sofrer influência significativa em função do substrato utilizado (DUTRA et al., 2016; GORDIN; MARQUES; SCALON, 2016; MOURA et al., 2020), em que fatores como estrutura, aeração e capacidade de retenção de água podem variar segundo o material utilizado, favorecendo ou prejudicando a emergência e estabelecimento das plântulas. Os resultados encontrados refletem um comportamento em que melhores porcentagens de emergências podem ser atingidas em situações em que se eleva a pressão de compactação em biocarvão produzido a maiores temperaturas. Ao iniciar o processo de germinação, a semente embebe em água e rompe a cápsula de biocarvão (Figura 13A), uma vez que as cápsulas se tornam frágeis ao serem umedecidas. A partir do momento em que a protrusão da raiz primária, esta fica exposta ao ambiente até direcionar-se ao solo (Figura 13B), onde estarão disponíveis os nutrientes necessários para o crescimento de uma plântula normal (Figura 13C e 13D). O fator determinante para o resultado encontrado pode estar associado à estrutura das cápsulas que comportam as sementes, que disponibilizam um referencial fixo para que a semente se estabeleça ao emitir a raiz primária, apoiando-se, permitindo maiores valores para o estabelecimento de plântulas.

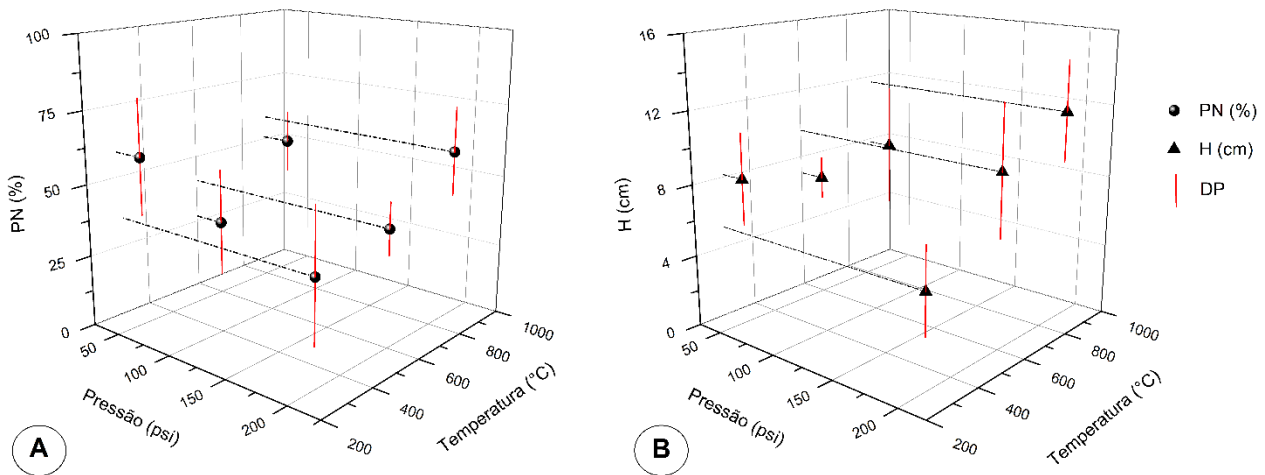
Figura 13 - Crescimento inicial das plântulas de *S. parahyba* var. *amazonicum* em cápsulas de biocarvão. Barra de escala: 3,0 cm. (A) Rompimento da cápsula de biocarvão pela embebição da semente; (B) Protrusão da raiz primária; (C) Estabelecimento da raiz primária no substrato e emergência da plântula; (D) Plântula estabelecida.



Fonte: o autor (2021).

A média de plântulas normais encontrada foi de 47%, com altura média de 8,24 cm (Figura 14), não havendo diferença significativa entre as diferentes temperaturas de pirólise e pressão de compactação.

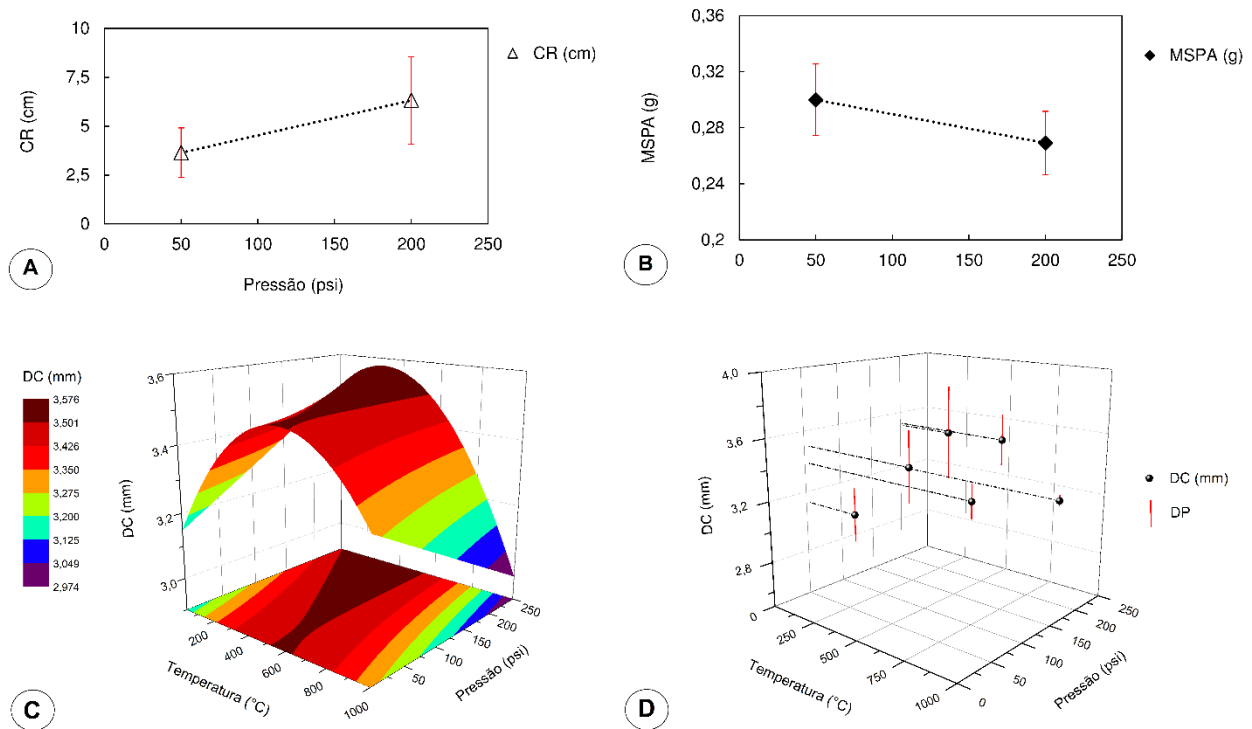
Figura 14 - (A) Porcentagem de plântulas normais e (B) altura média de plântulas de *S. parahyba* var. *amazonicum* em cápsulas de biocarvão.



Em que: H = altura; PN (%) = plântulas normais; DP = desvio padrão. Fonte: o autor (2021).

A pressão de compactação, de forma isolada, influenciou significativamente o comprimento das raízes e a massa seca da parte aérea ( $p$ -valor < 0,05), enquanto os resultados de diâmetro do coleto foram influenciados pela interação entre a temperatura de pirólise e a pressão de compactação (Figura 15). Não foi possível encontrar um modelo que predissesse as variáveis estudadas com coeficiente de determinação considerado satisfatório.

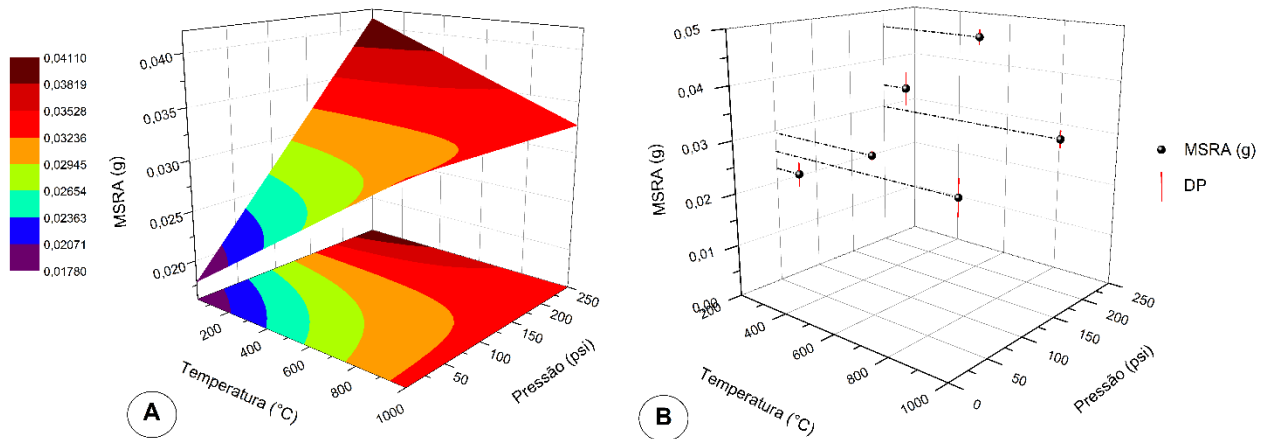
Figura 15 - (A) Comprimento médio de raízes, (B) massa seca de parte aérea; (C) Superfície de resposta do modelo de regressão ajustado do diâmetro médio do coleto; e (D) Distribuição dos dados de diâmetro médio do coleto de plântula de *S. parahyba* var. *amazonicum* em cápsulas densificadas de biocarvão.



Em que: CR (cm) = comprimento médio de raízes; MSPA (g) = massa seca média da parte aérea; DC (mm) = diâmetro médio do coleto. Equação de regressão:  $CR = -2,74629 + 0,01786PRES$ ,  $R^2 = 0,3730$  ( $p$ -valor < 0,05);  $MSPA = 0,3102972 - 0,0002059PRES$ ,  $R^2 = 0,3094$  ( $p$ -valor < 0,05);  $DC = 2,191 - 2,284E-06TEMP^2 + 3,491E-03TEMP + 4,216E-03PRES - 6,335E-06TEMPPRES$ ,  $R^2 = 0,3730$  ( $p$ -valor < 0,05). Em que: CR (cm): comprimento médio de raízes; MSPA (g): massa seca média da parte aérea; DC (mm): diâmetro médio do coleto; TEMP = temperatura de pirólise; PRES = pressão de compactação. Fonte: o autor (2021).

Os resultados referentes à variável “massa seca de raízes” sofreram influência da temperatura de pirólise e da pressão de compactação de modo isolados, além da interação entre ambos ( $p$ -valor < 0,05). A distribuição desta variável está disposta na Figura 16, assim como a superfície de resposta referente ao modelo de regressão que mais se ajustou.

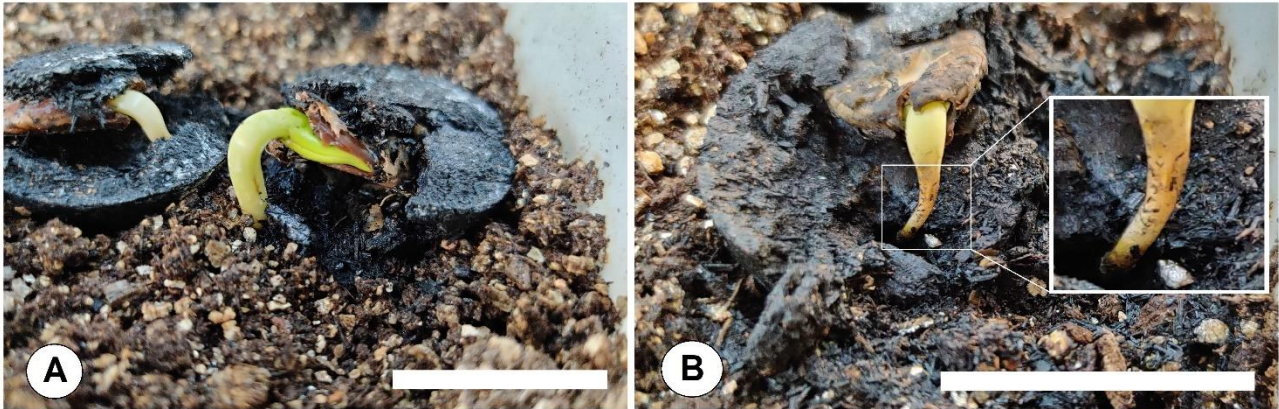
Figura 16 - Massa seca média de raízes de plântulas de *S. parahyba* var. *amazonicum* resultantes de sementes presentes em cápsulas de biocarvão. (A) Superfície de resposta do modelo de regressão ajustado; (B) Distribuição dos dados de massa seca média de raízes de plântulas geradas de sementes presentes em cápsulas de biocarvão.



Em que: Equação de regressão:  $MSRA (g) = 3,357E-05 TEMP + 2,228E-04 PRES - 2,271E-07 TEMP PRES$ ,  $R^2 = 0,956$  ( $p\text{-valor} < 0,001$ ), onde  $MSRA (g)$  = massa seca das raízes;  $TEMP$  = temperatura de pirólise;  $PRES$  = pressão de compactação. Fonte: o autor (2021).

A massa seca das raízes indica o nível de crescimento radicular da plântula e quanto maior sua grandeza, melhor será o aproveitamento de água e nutrientes disponíveis no solo, requisitos essenciais para que a plântula exponha todo seu potencial em crescimento, desenvolvimento e produção. Ao observar a superfície de resposta percebe-se que em se tratando de reduzidas pressões de compactação, a temperatura de pirólise é determinante para que se atinjam altos valores de massa seca das raízes, de modo que o aumento deste parâmetro eleva a massa de raízes. Já em pressões de compactação mais elevadas, a temperatura de pirólise pouco influencia, sendo encontrados valores mais elevados de massa seca de raízes em toda faixa de temperatura. O fato de maiores pressões de compactação e maiores temperaturas de pirólise do biocarvão influenciarem positivamente na estruturação física das cápsulas densificadas, como visto no item 3.3, pode explicar os resultados aqui encontrados. Ao desenvolver a raiz primária e se estabelecer, a planta busca um ponto de referência física para a associação (Figura 17A) e, quando não encontrada, percebe-se uma má formação do sistema radicular, ocasionando baixa eficiência em captação de nutrientes e má formação da plântula (Figura 17B).

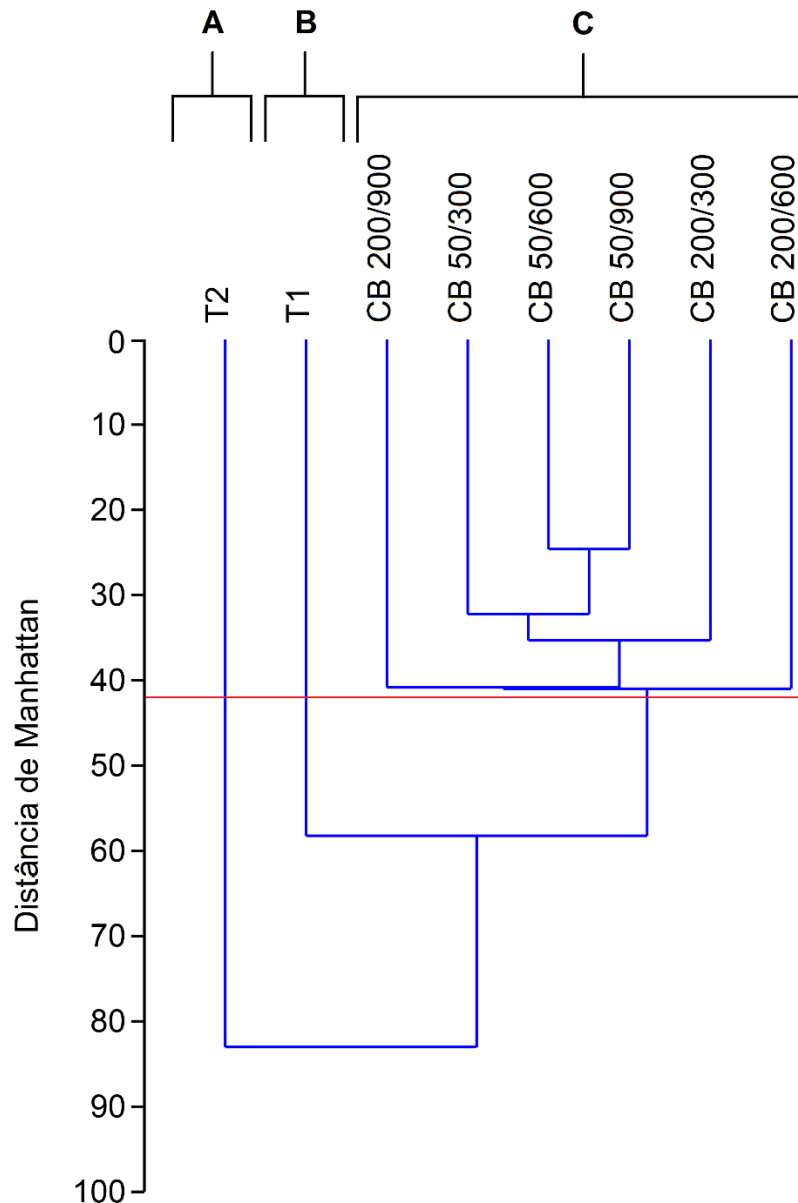
Figura 17 - Crescimento da raiz primária de sementes de *S. parahyba* var. *amazonicum* presentes em cápsulas densificadas de biocarvão. Barra de escala: 3,0 cm. (A) Raiz primária bem desenvolvida, onde encontrou-se apoio físico na cápsula para penetrar no substrato; (B) Raiz primária com baixo desenvolvimento, com início de escurecimento, onde a cápsula não possui estrutura física suficiente que permita o apoio da semente.



Fonte: o autor (2021).

A Figura 18, que representa o Dendrograma da Análise de Cluster, pode gerar várias interpretações quanto à quantidade de grupos formados. Portanto, para minimizar a quantidade de grupos, objetivando homogeneização, decidiu-se escolher a distância 42 como ponto de corte. Nesse caso, são gerados três grupos como resultado da análise, representados pelo grupo A (Tratamento 2), B (Tratamento 1), e C (Cápsulas), em que as novas médias para os três grupos formados estão dispostas na tabela 1.

Figura 18 - Dendrograma obtido pelo método de agrupamento hierárquico da ligação média entre grupos (UPGMA), a partir da distância de Manhattan entre cápsulas de biocarvão e dois tratamentos testemunhas. (Coeficiente de correlação cofenética = 0,8992 e significativo a 5% de probabilidade).



Em que: T1 = tratamento com sementes por baixo do substrato; Cápsulas = Tratamentos com sementes presentes em cápsulas de biocarvão; T2 = tratamento com sementes por cima do substrato, simulando uma "chuva de sementes"; "CB \*\*/\*\*" = Tratamentos com sementes presentes em cápsulas de biocarvão, em que a primeira numeração se refere à pressão de compactação, e a segunda refere-se à temperatura de pirólise em que o biocarvão foi submetido. Fonte: o autor (2021).

Tabela 1 - Germinação, emergência e parâmetros iniciais de plântulas geradas a partir de sementes de *S. parahyba* var. *amazonicum* presentes em cápsulas densificadas de biocarvão.

GRUPO	VARIÁVEIS					
	G (%)	IVG	TMG (dias)	E (%)	IVE	TME (dias)
A	18,0 (2,0)	0,4 (0,2)	13,4 (0,3)	8,0 (1,9)	0,1 (0,1)	14,7 (0,5)
B	99,0 (16,3)	3,8 (0,6)	6,7 (0,7)	97,3 (15,7)	2,5 (0,4)	9,9 (1,2)
C	62,4 (11,5)	2,0 (0,2)	8,2 (1,2)	50,3 (3,3)	1,0 (0,1)	12,1 (7,5)

GRUPO	H (cm)	DC (mm)	CR (cm)	MSPA (g)	MSRA (g)
A	4,1 (1,0)	3,16 (0,22)	2,4 (0,4)	0,21 (0,01)	0,034 (0,002)
B	15,4 (3,2)	3,24 (0,23)	8,2 (2,4)	0,25 (0,03)	0,034 (0,010)
C	8,2 (1,3)	3,38 (0,43)	5,0 (1,3)	0,28 (0,10)	0,032 (0,013)

Em que: G (%) = porcentagem de germinação; IVG = índice de velocidade de germinação; TMG = tempo médio de germinação; E (%) = porcentagem de emergência; IVE = índice de velocidade de emergência; TME = tempo médio de emergência; H = altura média; DC = diâmetro médio do coleto; CR = comprimento médio de raízes; MSPA = massa seca média da parte aérea; MSRA = massa seca média de raízes. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão da média.

A temperatura de pirólise e a pressão de compactação influenciaram em parâmetros associados à qualidade fisiológica de sementes dispostas em cápsulas densificadas de biocarvão. Em termos gerais, as cápsulas de biocarvão obtiveram desempenho inferior ao tratamento testemunha 1, onde sementes foram avaliadas sem nenhum impedimento, introduzidas diretamente no substrato (Tabela 1). Contudo, sementes lançadas ao solo, sem cápsulas, simulando uma “chuva de sementes” que ocorre naturalmente em uma floresta, tiveram desempenho ainda inferior ao das cápsulas, onde os resultados possuem maior similaridade com o tratamento testemunha 1 (Figura 18). Em resumo, a semeadura tradicional é eficaz, mas é uma prática que requer tempo, força de trabalho e custos, fato que poderia ser contornado com o uso de cápsulas densificadas de biocarvão, onde se consegue um desempenho inferior em termos de desenvolvimento de sementes, mas que é ainda mais efetivo que a natural chuva de sementes e, de modo concomitante, melhora os atributos físicos, químicos e biológicos do solo a curto, médio e longo prazo com a incorporação do biocarvão ao sistema.

Os resultados aqui encontrados auxiliam em previsões onde, acredita-se que a produção de cápsulas de biocarvão introduzidas com sementes seja eficaz em semeaduras, inclusive em recuperação de áreas degradadas, mesmo em áreas em que o acesso seja dificultoso e, no futuro, cápsulas poderão juntamente com veículos aéreos não

tripulados (VANT's) promover a recomposição em larga escala de forma rápida e de baixo custo.

#### 4. CONCLUSÕES

A temperatura de pirólise e a pressão de compactação influenciam a germinação de sementes, emergência e crescimento inicial de plântulas. Os benefícios do biocarvão ao solo associados ao implemento de sementes fazem da produção de cápsulas densificadas de biocarvão uma alternativa a semeaduras convencionais, evitando altos gastos energéticos e financeiros com grande quantidade de força de trabalho, fertilização, além de possuir potencial para dispersão em massa via veículos aéreos não tripulados, possibilitando inclusive a recuperação de áreas degradadas, mesmo em áreas em que o acesso seja dificultoso.

#### 5. REFERÊNCIAS

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.

ALBALASMEH, A.; GHARAIBEH, M. A.; MOHAWESH, O.; ALAJLOUNI, M.; QUZAIH, M.; MASAD, M.; HANANDEH, A. E. Characterization and Artificial Neural Networks Modelling of methylene blue adsorption of biochar derived from agricultural residues: effect of biomass type, pyrolysis temperature, particle size. **Journal of Saudi Chemical Society**, v. 24, n. 11, p. 811-823, 2020.

ALGHAMDI, A. G.; ALKHASHA, A.; IBRAHIM, H. M. Effect of biochar particle size on water retention and availability in a sandy loam soil. **Journal of Saudi Chemical Society**, v. 24, n. 12, p. 1042-1050, 2020.

AMELOOT, N.; NEVE, S.; JEGAJEEVAGAN, K.; YILDIZ, G.; BUCHAN, D.; FUNKUIN, Y. N.; PRINS, W.; BOUCKAERT, L.; SLEUTEL, S. Short-term CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions and microbial properties of biochar amended sandy loam soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 57, p. 401-410, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 2240-91**: Test Method for Rubber Property – Durometer Hardness. Philadelphia, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-1762-84**: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. Philadelphia, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-5057-17**: Standard method for screening apparent specific gravity and bulk density of waste. Philadelphia, 2017.

ANCA-COUCÉ, A. Reaction mechanisms and multi-scale modelling of lignocellulosic biomass pyrolysis. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 53, p. 41-79, 2016.

BEWLEY, J. D.; BLACK, M. **Seeds**: physiology of development and germination. 2 ed. New York: Plenum Press, 1994. p. 445.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília, DF: MAPA/ACS, 2009. 395 p.

BRUM, S. S.; BIANCHI, M. L.; SILVA, V. L.; GONÇALVES, M.; GUERREIRO, M. C.; OLIVEIRA, L. C. A. de. Preparação e caracterização de carvão ativado produzido a partir de resíduos do beneficiamento do café. **Revista Química Nova**, v. 31, n. 5, p. 1048-1052, 2008.

CARVALHO, A. G.; ZANUNCIO, A. J. V.; CARNEIRO, A. C. O.; SILVA, C. M. S.; ERKEL, E. G.; VITAL, B. R. Hydrothermal treatment of *Eucalyptus* strand particles for improvement of oriented strand board (OSB) panels. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 32, n. 2, p. 136-143, 2020.

CHOUCHENE, A.; JEGUIRIM, M.; KHIARI, B.; TROUVÉ, G.; ZAGROUBA, F. Study on the emission mechanism during devolatilization/char oxidation and direct oxidation of olive solid waste in a fixed bed reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 87, n. 1, p. 168-174, 2010.

CHUN, Y.; SHENG, G.; CHIOU, C. T.; XING, B. Compositions and sorptive properties of crop residue-derived chars. **Environmental Science & Technology**, v. 38, p. 4649-4655, 2004.

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Disponível em: < <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620> >. Acesso em: 20 jan. 2021.

DAI, Z.; ZHANG, X.; TANG, C.; MUHAMMAD, N.; WU, J.; BROOKES, P. C.; XU, J. Potential role of biochars in decreasing soil acidification - A critical review. **Science of the Total Environment**, v. 581-582, p. 601-611, 2017.

DAS, S. K.; GHOSH, G. K.; AVASTHE, R. K.; SINHA, K. Compositional heterogeneity of different biochar: effect of pyrolysis temperature and feedstocks. **Journal of Environmental Management**, v. 278, p. 111501-111513, 2021.

DAVRIEUX, F.; ROUSSET, P. L. A.; PASTORE, T. C. M.; MACEDO, L. A.; QUIRINO, W. F. Discrimination of native wood charcoal by infrared spectroscopy. **Química Nova**, v. 33, n. 5, p. 1093-1097, 2010.

DIAS JUNIOR, A. F.; ESTEVES, R. P.; SILVA, A. M.; SOUSA JÚNIOR, A. D.; OLIVEIRA, M. P.; BRITO, J. O.; NAPOLI, A.; BRAGA, B. M. Investigating the pyrolysis temperature to define the use of charcoal. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 78, n. 1, p. 193-204, 2020.

DIAS JÚNIOR, A. F.; OLIVEIRA, R. N.; DEGLISE, X.; SOUZA, N. D.; BRITO, J. O. Infrared spectroscopy analysis on charcoal generated by the pyrolysis of *Corymbia citriodora* wood. **Matéria**, v. 24, n. 3, p. 12387-12394, 2019.

DIAS JÚNIOR, A. F.; PIROLA, L. P.; TAKESHITA, S.; LANA, A. Q.; BRITO, J. O.; ANDRADE, A. M. Higoscopicity of charcoal produced in different temperatures. **Cerne**, v. 22, n. 4, p. 423-430, 2016.

DUFOURNY, A.; VAN DE STEENE, L.; HUMBERT, G.; GUIBAL, D.; MARTIN, L.; BLIN, J. Influence of pyrolysis conditions and the nature of the wood on the quality of charcoal as a reducing agent. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 137, p. 1-13, 2019.

DUTRA, A. F.; ARAUJO, M. M.; RORATO, D. G.; MIETH, P. Germinação de sementes e emergência de plântulas de *Luehea divaricata* Mart. Et. Zucc. em diferentes substratos. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 411-419, 2016.

EPA - US Environmental Protection Agency. **Method 3550 C**: Ultrasonic extraction. p. 17, 2007.

EPA - US Environmental Protection Agency. **Method 8270D**: Semivolatile organic compounds by gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS). p. 70, 2007.

EVERITT, B. S.; LANDAU, S.; LEESE, M.; STAHL, D. **Cluster Analysis**. 5. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, p. 76, 2011.

FIDEL, R. B.; LAIRD, D. A.; THOMPSON, M. L.; LAWRENKO, M. Characterization and quantification of biochar alkalinity. **Chemosphere**, v. 167, p. 367-373, 2017.

FREE, H.; MCGILL, C.; ROWARTH, J.; HEDLEY, M. The effect of biochars on maize (*Zea mays*) germination. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 53, n. 1, p. 1-4, 2010.

FRENCH, E.; IYER-PASCUZZI, A. S. A role for the gibberellin pathway in biochar-mediated growth promotion. **Scientific Reports**, v. 8, n. 5389, p. 1-10, 2018.

GANGIL, S. Benefits of weakening in thermogravimetric signals of hemicellulose and lignin for producing briquettes from soybean crop residue. **Energy**, v. 81, p. 729-737, 2015.

GASCÓ, G.; CELY, P.; PAZ-FERREIRO, J.; PLAZA, C.; MÉNDEZ, A. Relation between biochar properties and effects on seed germination and plant development. **Biological Agriculture & Horticulture**, v. 32, n. 4, p. 237-247, 2016.

GHANI, W. A. W. A. K.; MOHD, A.; SILVA, G.; BACHMANN, R. T.; TAUFIQ-YAP, Y. H.; RASHID, U.; AL-MUHTASEB, A. H. Biochar production from waste rubber-wood-sawdust and its potential use in C sequestration: chemical and physical characterization. **Industrial Crops and Products**, v. 44, p. 18-24, 2013.

GHIDOTTI, M.; FABRI, D.; HORNING, A. Profiles of volatile organic compounds in biochar: insights into process conditions and quality assessment. **Acs Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 5, n. 1, p. 510-517, 2016.

GLASER, B.; BIRK, J. J. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio). **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 82, p. 39-51, 2012.

GLASER, B.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. **Naturwissenschaften**, v. 88, n. 1, p. 37-41, 2001.

GÓMEZ-MAQUEO, X.; SORIANO, D.; VELÁZQUEZ-ROSAS, N.; ALVARADO-LÓPEZ, S.; JIMÉNEZ-DURÁN, K.; GARCIADIEGO, M. M.; GAMBOA-DEBUEN, A. The seed water content as a time-independent physiological trait during germination in wild tree species such as *Ceiba aesculifolia*. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 10429-10443, 2020.

GORDIN, C. R. B.; MARQUES, R. F.; SCALON, S. P. Q. Emergence and initial growth of *Hancornia speciosa* (Gomes) seedlings with different substrates and water availability. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 59, n. 4, p. 352-362, 2016.

GRAVEL, V.; DORAIS, M.; MÉNARD, C. Organic potted plants amended with biochar: its effect on growth and pythium colonization. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 93, n. 6, p. 1217-1227, 2013.

HASSAN, M.; LIU, Y.; NAIDU, R.; PARIKH, S. J.; DU, J.; QI, F.; WILLETT, I. R. Influences of feedstock sources and pyrolysis temperature on the properties of biochar and functionality as adsorbents: a meta-analysis. **Science of the Total Environment**, v. 744, p. 140714-140729, 2020.

JAGTOYEN, M.; DERBYSHIRE, E. F. The transformation of wood to activated carbon. **Energeia**, v. 4, n. 4, pp. 1-6, 1993.

JEEVITHA, R. S. J.; BELLA, G. R.; BOOSHAN, S. A. T. Preparation and characterization of micro crystalline cellulose fiber reinforced chitosan based polymer composites. **Asian Journal of Research in Chemistry**, v. 8, n. 7, p. 453-454, 2015.

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. **Soil Research**, v. 48, p. 501-515, 2010.

KARDAM, A.; RAJ, K. R.; SRIVASTAVA, S. Green nanotechnology for bioremediation of toxic metals from waste water. In: KHEMANI, L. D.; SRIVASTAVA, M. M.; SRIVASTAVA, S. (eds) **Chemistry of phytopotentials: health, energy and environmental perspectives**. Berlin: Springer, 2012. p. 373-377.

KERN, J.; GIANI, L.; TEIXEIRA, W.; LANZA, G.; GLASER, B. What can we learn from ancient fertile anthropic soil (Amazonian Dark Earths, shell mounds, Plaggen soil) for soil carbon sequestration? **Catena**, v. 172, p. 104-112, 2019.

LABOURIAU, L.G. **A germinação das sementes**. Washington: OEA, 1983. 174p.

LAMMERS, K.; ARBUCKLE-KEIL, G.; DIGHTON, J. FT-IR study of the changes in carbohydrate chemistry of three New Jersey pine barrens leaf litters during simulated control burning. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 2, p. 340-347, 2009.

LARSEN, S. U.; BAILLY, C.; CÔME, D.; CORBINEAU, F. Use of the hydrothermal time model to analyse interacting effects of water and temperature on germination of three grass species. **Seed Science Research**, v. 14, n. 1, p. 35-50, 2004.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: an introduction. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Ed.). **Biochar for environmental management science and technology**. New York: Earthsca, v. 53, p. 1–9, 2009.

LI, S.; BARRETO, V.; LI, R.; CHEN, G.; HSIEH, Y. P. Nitrogen retention of biochar derived from different feedstocks at variable pyrolysis temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 133, p. 136-146, 2018.

LIBBRECHT, W.; VERBERCKMOES, A.; THYBAUT, J. W.; VOORT, P. D.; CLERCQ, J. Soft templated mesoporous carbons: tuning the porosity for the adsorption of large organic pollutants. **Carbon**, v. 116, p. 528-546, 2017.

MAGUIRE, J. D. Speed of germination aid in selection and evaluation for emergence and vigour. **Crop Science**, v. 2, p. 176-177, 1962.

MASCLET, P.; BRESSON, M.; MOUVIER, G. Polycyclic aromatic hydrocarbons emitted by power stations, and influence of combustion conditions. **Fuel**, v. 66, n. 4, p. 556-562, 1987.

MÉNDEZ, A.; TERRADILLOS, M.; GASCÓ, G. Physicochemical and agronomic properties of biochar from sewage sludge pyrolysed at different temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 102, p. 124–130, 2013.

MIA, S.; SINGH, B.; DIJKSTRA, F. A. Aged biochar affects gross nitrogen mineralization and recovery: a <sup>15</sup>N study in two contrasting soils. **Gcb Bioenergy**, v. 9, n. 7, p. 1196-1206, 2017.

MOURA, C. C.; COSTA, T. R.; OLIVEIRA, P. A.; MOURA, L. C.; CARVALHO, L. R.; TITON, M.; PEREIRA, I. M.; MACHADO, E. L. M. Different substrates and protected environments for the initial development of *Richeria grandis* Vahl seedlings. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 3, p. 1-8, 2020.

MUN, S. P.; KU, C. S. Pyrolysis GC-MS analysis of tars formed during the aging of wood and bamboo crude vinegars. **Journal of Wood Science**, v. 56, n. 1, p. 47-52, 2010.

MYGLOVETS, M.; PODDUBNAYA, O. I.; SEVASTYANOVA, O.; LINDSTRÖM, M. E.; GAWDZIK, B.; SOBIESIAK, M.; TSYBA, M. M.; SAPSAY, V. I.; KLYMCHUK, D. O.; PUZIY, A. M. Preparation of carbon adsorbents from lignosulfonate by phosphoric acid activation for the adsorption of metal ions. **Carbon**, v. 80, p. 771-783, 2014.

NONOGAKI, H.; BASSEL, G. W.; BEWLEY, J. D. Germination-Still a mystery. **Plant Science**, v. 179, n. 6, p. 574-581, 2010.

- OK, Y. S.; UCHIMIYA, S. M.; CHANG, S. X.; BOLAN, N. (ed.). **Biochar: production, characterization, and applications**. London: Crc Press Taylor & Francis Group, 2016. 406 p.
- PASTOR-VILLEGAS, J.; RODRÍGUEZ, J. M. M.; PASTOR-VALLE, J. F.; GARCÍA, M. G. Changes in commercial wood charcoals by thermal treatments. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 80, n. 2, p. 507-514, 2007.
- PLACIDO, J.; CAPAREDA, S.; KARTHIKEYAN, R. Production of humic substances from cotton stalks biochar by fungal treatment with *Ceriporiopsis subvermispora*. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 13, p. 31-37, 2016.
- POONIA, P. K.; TRIPATHI, S. Effect of microwave heating on ph and durability. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 29, n. 3, p. 389-394, 2017.
- QAMBRANI, N. A.; RAHMAN, M. D. M.; WON, S.; SHIM, S.; RA, C. Biochar properties and eco-friendly applications for climate change mitigation, waste management, and wastewater treatment: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 255-273, 2017.
- SKOPP, J.; GARDNER, W. R.; TYLER, E. J. Solute movement in structured soils: two-region model with small interaction. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, n. 5, p. 837-842, 1981.
- SOLAIMAN, Z. M.; MURPHY, D. V.; ABBOTT, L. K. Biochars influence seed germination and early growth of seedlings. **Plant and Soil**, v. 353, n. 1-2, p. 273-287, 2011.
- SOMERVILLE, M.; JAHANSHAHI, S. The effect of temperature and compression during pyrolysis on the density of charcoal made from Australian eucalypt wood. **Renewable Energy**, v. 80, p. 471-478, 2015.
- SONG, J.; PENG, P. Characterisation of black carbon materials by pyrolysis-gas chromatography–mass spectrometry. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 87, n. 1, p. 129-137, 2010.
- SPOKAS, A. K. Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios. **Carbon Management**, v. 1, n. 2, p. 289-303, 2010.
- SULIMAN, W.; HARSH, J. B.; ABU-LAIL, N. I.; FORTUNA, A.; DALLMEYER, I.; GARCIA-PÉREZ, M. The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. **Science of the Total Environment**, v. 574, p. 139-147, 2017.
- TEIMORI, H.; BALOUCHI, H.; MORADI, A.; SOLTANI, E. Quantifying seed germination response of deteriorated *Trigonella foenum-graecum* L. seed to temperatures and water potentials: thermal time, hydrottime and hydrothermal time models. **Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants**, v. 20, p. 100276-100284, 2020.
- THIES, J. E.; RILLIG, M. C. Characteristics of biochar: biological Properties. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Ed.). **Biochar for environmental management: science and technology**. London: Earthscan, 2009. p. 85-106.

TOMCZYK, A.; SOKOŁOWSKA, Z.; BOGUTA, P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. **Reviews in Environmental Science and Bio/technology**, v. 19, n. 1, p. 191-215, 2020.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T., MORI, F. A., LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, v. 7, p. 104-114, 2001.

TSAI, W.; LIU, S. Effect of temperature on thermochemical property and true density of torrefied coffee residue. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 102, p. 47-52, 2013.

ULLAH, H.; ABBAS, Q.; ALI, M. U.; AMINA; CHEEMA, A. I.; YOUSAF, B.; RINKLEBE, J. Synergistic effects of low-/medium-vacuum carbonization on physico-chemical properties and stability characteristics of biochars. **Chemical Engineering Journal**, v. 373, p. 44-57, 2019.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). **Contaminant candidate list regulatory determination support document for naphthalene**. 2003. Disponível em: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-09/documents/support\\_cc1\\_naphthalene\\_ccl\\_regdet.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-09/documents/support_cc1_naphthalene_ccl_regdet.pdf). Acesso em: 15 jan. 2021.

WANG, L.; OK, Y. S.; TSANG, D. C. W.; ALESSI, D. S.; RINKLEBE, J.; WANG, H.; MAŁEK, O.; HOU, R.; O'CONNOR, D.; HOU, D. New trends in biochar pyrolysis and modification strategies: feedstock, pyrolysis conditions, sustainability concerns and implications for soil amendment. **Soil Use and Management**, v. 36, n. 3, p. 358-386, 2020.

WANG, Y.; WU, K.; SUN, Y. Effects of raw material particle size on the briquetting process of rice straw. **Journal of the Energy Institute**, v. 91, n. 1, p. 153-162, 2018.

WEBER, K.; QUICKER, P. Properties of biochar. **Fuel**, v. 217, p. 240-261, 2018.

WU, Y.; LINDSEY, A. C.; LOYD, M.; STAND, L.; ZHURAVLEVA, M.; KOSCHAN, M.; MELCHER, C. L. Scintillation properties of a 2-inch diameter  $KCa_{0.8}Sr_{0.2}I_3$ : eu2+single crystal. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 866, p. 13-17, 2017.

XI, J.; LI, H.; XI, J.; TAN, S.; ZHENG, J.; TAN, Z. Preparation of high porosity biochar materials by template method: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 17, p. 20675-20684, 2020.

XU, J.; CHEN, L.; QU, H.; JIAO, Y.; XIE, J.; XING, G. Preparation and characterization of activated carbon from reedy grass leaves by chemical activation with  $H_3PO_4$ . **Applied Surface Science**, v. 320, p. 674-680, 2014.

YAKOUT, S. M.; EL-DEEN, G. S. Characterization of activated carbon prepared by phosphoric acid activation of olive stones. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 9, p. 1155-1162, 2016.

YUAN, H.; LU, T.; ZHAO, D.; HUANG, H.; NORIYUKI, K.; CHEN, Y. Influence of temperature on product distribution and biochar properties by municipal sludge

pyrolysis. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 15, n. 3, p. 357-361, 2013.

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

YUAN, J. H.; XU, R. K.; ZHANG, H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 3488-3497, 2011.

ZENG, H.; ZENG, H.; ZHANG, H.; SHAHAB, A.; ZHANG, K.; LU, Y.; NABI, I.; NASEEM, F.; ULLAH, H. Efficient adsorption of Cr (VI) from aqueous environments by phosphoric acid activated eucalyptus biochar. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, p. 124964-124974, 2020.

ZHANG, G.; SUN, Y.; XU, Y. Review of briquette binders and briquetting mechanism. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 477-487, 2018.

ZHANG, J.; YOU, C. Water holding capacity and absorption properties of wood chars. **Energy & Fuels**, v. 27, n. 5, p. 2643-2648, 2013.

ZHANG, X.; LV, L.; QIN, Y.; XU, M.; JIA, X.; CHEN, Z. Removal of aqueous Cr (VI) by a magnetic biochar derived from Melia azedarach wood. **Bioresource Technology**, v. 256, p. 1-10, 2018.

ZHAO, X.; LI, W.; LIU, S. Coupled soft-template/hydrothermal process synthesis of mesoporous carbon spheres from liquefied larch sawdust. **Materials Letters**, v. 107, p. 5-8, 2013.

## 5. CAPÍTULO 2 – RESPOSTAS MORFOLÓGICAS DE MUDAS DE *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* ÀS VARIÁVEIS DA PRODUÇÃO DE CÁPSULAS DENSIFICADAS DE BIOCÁRVÃO.

### RESUMO

Produto da pirólise, o biocarvão pode exercer vários benefícios quando aplicado ao solo, devido às peculiaridades físicas e químicas de sua estrutura, que podem variar, sobretudo em intensidade, à medida que se aumenta a temperatura de pirólise. Objetivou-se neste estudo investigar as temperaturas de pirólise e da pressão de compactação de cápsulas veiculadoras densificadas de biocarvão, na qualidade de mudas geradas a partir de sementes de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* presentes em cápsulas densificada de biocarvão. Produzidos em três temperaturas finais de pirólise, 300, 600 e 900 °C, os biocarvões foram compactados em duas pressões de compactação, 50 e 200 psi, com uma semente por cápsula, e em seguida, teve avaliada a qualidade de mudas em casa de sombra sobre substrato. A análise de variância foi realizada seguindo delineamento em blocos aleatorizados, em fatorial duplo 3x2, com tratamento testemunha adicional, considerando quatro repetições por tratamento. Identificando diferenças significativas, foi realizado o ajuste de modelos de regressão. A análise multivariada de componentes principais foi realizada a fim de simplificar as variações presentes nos dados correspondentes ao desenvolvimento das plantas, sendo projetada em um número reduzido de dimensões, preservando ao mesmo tempo o máximo de informação. A análise multivariada de agrupamento de cluster foi utilizada para identificar semelhanças entre os tratamentos estudados, tanto de cápsulas, quanto de testemunhas. A temperatura de pirólise e a pressão de compactação não influenciam na qualidade de mudas geradas a partir de sementes presentes em cápsulas densificadas de biocarvão. Ao serem adotadas como alternativa à semeadura convencional, são obtidas mudas com características morfológicas equivalentes ao modo tradicional, permitindo menor gasto por requerer menos força de trabalho, agregando potencialidades para diversificação de uso.

**Palavras-chave:** Temperatura de pirólise; Pressão de compactação; Desenvolvimento de mudas; Semeadura convencional;

## ABSTRACT

As a product of pyrolysis, biochar can have several benefits when applied to the soil, due to the physical and chemical peculiarities of its structure, which can vary, especially in intensity, as the pyrolysis temperature increases. This study aimed to investigate the pyrolysis temperatures and the compression pressure of densified biochar propagating capsules in the quality of generated seedlings from *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* present in densified biochar seeds propagating capsules. Produced in three final pyrolysis temperatures, 300, 600 and 900 °C, the biochar was compacted in two compaction pressures, 50 and 200 psi, with one seed per capsule, and then the quality of seedlings was evaluated in greenhouse on substrate. The analysis of variance was performed following a block design, in a 3x2 double factorial, with additional witness treatment. When significant differences were identified, was performed the adjustment of regression model. The multivariate analysis of main components was carried out to simplify the variations present in the data corresponding to the development of the plants, being projected in a reduced number of dimensions, while preserving the maximum information. The cluster multivariate analysis was used to identify similarities between the treatments studied, both for capsules and controls. The pyrolysis temperature and the compaction pressure do not influence the quality of seedlings generated from seeds present in densified biochar capsules. When adopted as an alternative to conventional sowing, seedlings with morphological characteristics equivalent to the traditional way are obtained, allowing less expensive because it requires less workforce, adding the potential for diversification of use.

**Keywords:** Pyrolysis temperature; Compaction pressure; Seedling development; Conventional seeding.

## 1. INTRODUÇÃO

Produto da pirólise, o biocarvão é um material sólido, rico em carbono orgânico estabilizado e recalcitrante, produzido por meio do aquecimento de biomassa sob baixas concentrações de oxigênio, a temperaturas geralmente entre 300 e 1000 °C (WEBER; QUICKER, 2018; SOUZA et al., 2021). Além de evitar que o carbono capturado pelas plantas se degrade e retorne para a atmosfera, a diversidade de características físico-químicas do biocarvão permite seu uso como condicionador de solos (SOHI, 2012; WEBER; QUICKER, 2018; NGUYEN et al., 2021). Este componente age, sobretudo, no pH, densidade, disponibilidade de macro e micronutrientes, estruturação do solo, capacidade de troca de cátions (CTC) e na presença de microrganismos (WEBER; QUICKER, 2018; CHEN et al., 2021; ISLAM et al., 2021), benefícios mutáveis, orquestrados pela temperatura final de pirólise em que a biomassa foi submetida.

O aumento da temperatura de pirólise ocasiona uma série de reações, como decomposições de grupos carboxila e alquila alifáticos e a separação de elementos alcalinos (Ca, Mg e K) dos constituintes orgânicos durante a pirólise (WEBER; QUICKER, 2018; ULLAH et al., 2019; WANG et al., 2020; SOUZA et al., 2021). Estas mudanças convergem em aumento do pH, da área superficial específica, da CTC, dos teores de carbono fixo e cinzas, e geração de macro e micro porosidade, responsável pela baixa densidade do biocarvão que o torna susceptível ao carreamento superficial quando adicionado ao solo (AHMAD et al., 2014; LI et al., 2018; HASSAN et al., 2020; ISLAM et al., 2021). Cápsulas densificadas de biocarvão buscam contornar problemas de carreamento, por agregar maior quantidade de material em menor volume.

Ao serem adicionadas sementes no processo produtivo de cápsulas densificadas de biocarvão, são eliminados procedimentos que haveria em uma semeadura convencional. Deste modo, é facilitado o estabelecimento de cobertura vegetal e impulsionado pela reestruturação do solo ocasionada pelo biocarvão, resultando em desenvolvimento de plantas de qualidade com maior probabilidade de sobrevivência, seja em áreas agrícolas degradadas ou em recomposição florística. Neste sentido, o objetivo deste estudo foi investigar a influência da temperatura de pirólise e da pressão de compactação no desenvolvimento de plantas de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby, geradas a partir de sementes inseridas no processo de produção de cápsulas densificadas de biocarvão.

## 2. METODOLOGIA

O experimento foi conduzido em casa de sombra pertencente ao Viveiro Florestal Universitário do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo (DCFM/UFES). O viveiro florestal se encontra situado sob as coordenadas latitude 20 °47' S e longitude 41 °24' W. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região do estudo é do tipo Aw, com verão chuvoso e inverno seco. A temperatura média das mínimas do mês mais frio é de 11,8 °C e a média das máximas do mês mais quente é de 34 °C (PEZZOPANE; CECÍLIO, 2012). O índice médio pluviométrico anual é de 1293 mm (INCAPER, 2019).

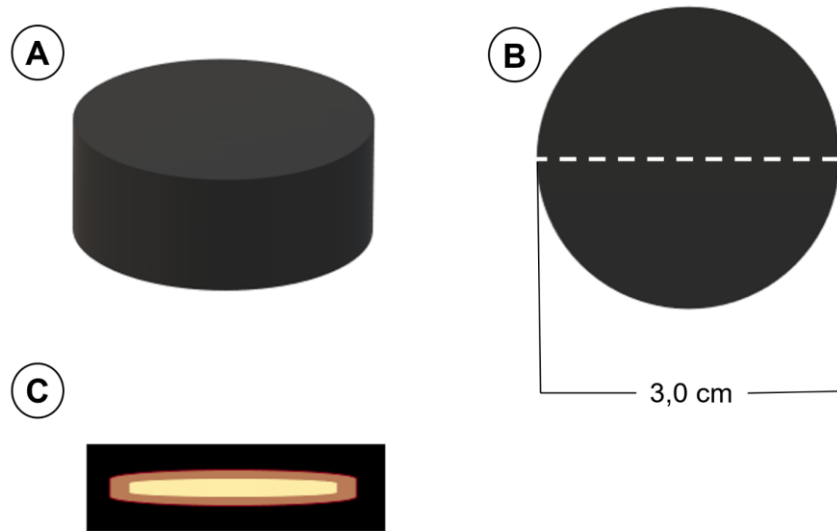
### 2.1. Obtenção e pirólise da matéria prima biomassa

O biocarvão foi produzido da madeira de *Eucalyptus* sp., gênero mais utilizado para a produção de carvão vegetal no Brasil, a qual apresentava sete anos de idade. O material foi triturado em moinho de facas, obtendo serragem com granulometria média de 8 mm. Deste modo, o material foi pirolisado em um forno elétrico tipo mufla, em três temperaturas finais, 300, 600 e 900°C, sob uma taxa de aquecimento de 6 °C min<sup>-1</sup> e tempo de permanência na temperatura final de 60 min. As pirólises foram conduzidas em um reator metálico, modelo SPPT-V60 e os gases condensáveis foram coletados por meio de um condensador, para a formação do líquido pirolenhoso. Após a pirólise, o biocarvão permaneceu no reator até que atingisse temperatura ambiente ( $\pm 30$  °C).

### 2.2. Produção das cápsulas de biocarvão

As cápsulas produzidas (Figura 1) possuíam em sua composição biocarvão, obtido em cada uma das temperaturas finais (item 2.1), argila siltosa, como agente estrutural e aglutinante, na proporção 4:1 com o biocarvão, e carboximetilcelulose (CMC) gelatinizada em água (3%) como agente aglutinante, nas proporções 4:1 com biocarvão + argila.

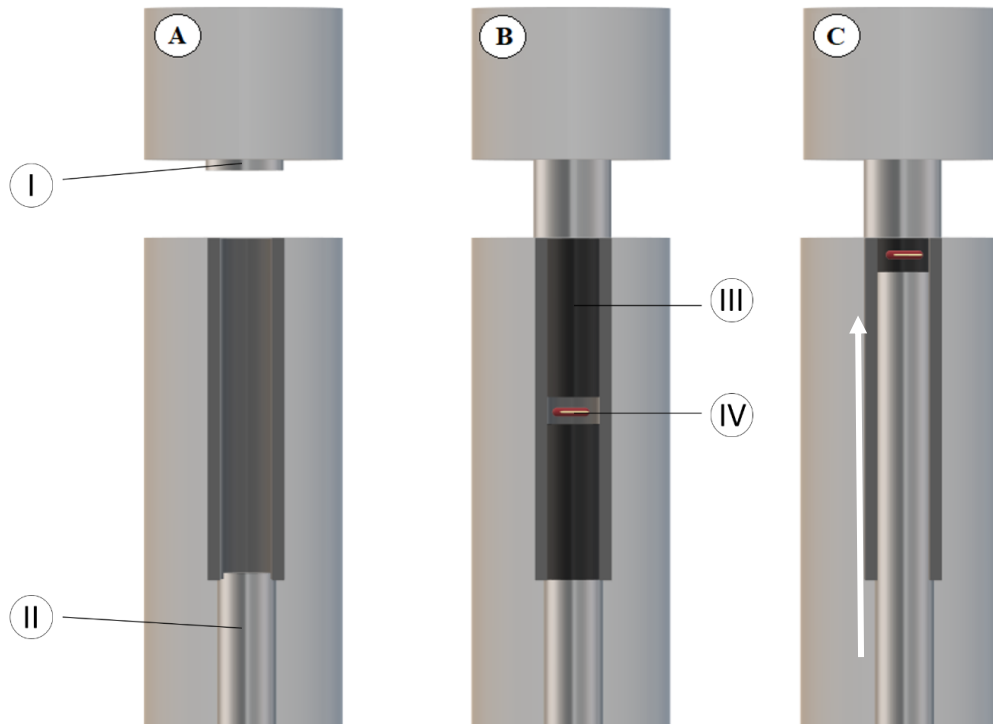
Figura 1. Representação da cápsula. A: Representação da cápsula em 3D; B: Vista superior da cápsula. C: Vista lateral da cápsula seccionada, evidenciando a semente de *S. parahyba* var. *amazonicum* em seu interior, posicionada no meio da cápsula.



Fonte: o autor (2021).

A espécie *S. parahyba* var. *amazonicum* foi escolhida por ser sementes ortodoxas, de fácil germinação, rápido crescimento, boa adaptação, possuir madeira de elevado valor comercial e muito utilizada em sistemas mistos de restauração. As sementes foram escarificadas de forma mecânica, lixando a parte oposta ao hilo, e em seguida, foram adicionadas no momento do preenchimento da coluna da briquetadeira com o material, intercalando material e semente (Figura 2).

Figura 2. Esquema da produção de cápsula de biocarvão na briquetadeira (vista com corte transversal). A: Coluna da briquetadeira vazia (cilindros superior e inferior imóveis); B: Preenchimento da coluna da briquetadeira com finos de carvão vegetal, intercalando material e semente (cilindro superior abaixado); C: Confeção da cápsula (cilindro inferior sobe, para que a pressão seja alcançada). I: Cilindro superior; II: Cilindro inferior; III: Biocarvão; IV: Semente de *S. parahyba* var. *amazonicum*.



Fonte: o autor (2021).

A compactação foi com pressão suficiente para proporcionar coesão entre os materiais, entretanto não o bastante para danificar a semente que foi juntamente processada. Para tanto, foram realizados ensaios pilotos, a fim de determinar as variáveis adotadas na confecção da cápsula. Dessa forma, na compactação da produção das cápsulas foi utilizada uma briquetadeira laboratorial, modelo LB 32, com temperatura ambiente (30 °C), pressão de 50 e 200 psi, com retirada instantânea das cápsulas. As cápsulas foram climatizadas em ambiente com umidade e temperatura controlada ( $65 \pm 1\%$  e  $30 \pm 3$  °C, respectivamente), por dois dias, até que atingissem peso constante.

### 2.3. Teste de emergência e crescimento das plântulas emergidas das cápsulas de biocarvão

As mudas foram cultivadas em tubetes de 280 cm<sup>3</sup>, em casa de sombra, com sombreamento de 50% e irrigação por microaspersão automática com quatro irrigações por dia às 07h, 11h, 13h e 16h, e duração de 5 min nos primeiros 45 dias, ampliada para 10

minutos nos últimos 45 dias. A implantação foi realizada em blocos casualizados, em que foram utilizadas quatro repetições com 25 cápsulas, totalizando 100 cápsulas por tratamento (variáveis respostas). Foram investigadas seis variações de parâmetros, com três temperaturas de pirólise e duas pressões de compactação:

- CB 50/300: pressão de compactação 50 psi e 300 °C de temperatura de pirólise;
- CB 50/600: pressão de compactação 50 psi e 600 °C de temperatura de pirólise;
- CB 50/900: pressão de compactação 50 psi e 900 °C de temperatura de pirólise;
- CB 200/300: pressão de compactação 200 psi e 300 °C de temperatura de pirólise;
- CB 200/600: pressão de compactação 200 psi e 600 °C de temperatura de pirólise;
- CB 200/900: pressão de compactação 200 psi e 900 °C de temperatura de pirólise;

As variáveis de emergência estudadas foram: % de emergência (%E), estabelecida com base na observação da emergência diariamente após a semeadura, até o 15º dia, sendo consideradas como emergidas no momento em que os cotilédones forem expostos; índice de velocidade de emergência (I.V.E.), de acordo com Maguire (1962) (Equação 8); o tempo médio de emergência (T.M.E.), segundo Labouriau (1983) (Equação 9).

$$I. V. E. = \frac{E_1}{N_1} + \frac{E_2}{N_2} + \dots + \frac{E_n}{N_n} \quad (\text{Equação 8})$$

$$T. M. E. = \frac{(E_1 * N_1) + (E_2 * N_2) + \dots + (E_n * N_n)}{E + E_2 + \dots + E_n} \quad (\text{Equação 9})$$

Em que: I.V.E. = índice de velocidade de emergência; E = número de plântulas normais computadas nas contagens; N = número de dias da semeadura à 1ª, 2ª ... enésima avaliação; T.M.E. = tempo médio de emergência.

Após 90 dias de implantação do experimento, foi realizada a avaliação das mudas de cada tratamento, avaliando-se as seguintes características:

- Altura (H): A altura da parte aérea foi medida com régua graduada (cm), a partir do nível do substrato até a gema apical, com origem à última folha (GOMES et al., 2002).
- Diâmetro do coleto (DC): O diâmetro do coleto (cm) foi medido rente ao nível do substrato com paquímetro eletrônico (GOMES et al., 2002).

- Massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca de raízes (MSRA): Para mensuração desses parâmetros foi realizado o seccionamento do caule próximo ao substrato, dividindo-as em duas partes. Os sistemas radiculares foram lavados em água corrente sobre peneira. Em seguida, as partes aéreas e radiculares foram, separadamente, colocadas em sacos de papel Kraft e levadas à estufa a 70 °C, até atingirem massa constante, para posteriormente serem pesadas em balança eletrônica de precisão.

Para avaliar o crescimento das mudas, foi calculado o coeficiente de Dickson et al. (1960), conforme a Equação 10:

$$I. Q. D. = \frac{MST}{\frac{H}{DC} + \frac{MSPA}{MSRA}} \quad (\text{Equação 10})$$

Em que: I. Q. D. = índice de qualidade de Dickson; MST = massa seca total; H = altura; DC = diâmetro do coleto; MSPA = massa seca da parte aérea; MSRA = massa seca de raízes.

#### 2.4. Análise de dados

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e de homocedasticidade (Bartlett). A análise de variância realizada seguindo delineamento em blocos, com três variáveis respostas relacionadas à pirólise do biocarvão (300, 600 e 900 °C) e duas variáveis respostas relacionadas à pressão de compactação (50 e 200 psi). Identificando diferenças significativas com relação a alguma variável, foi realizado o ajuste de modelo de regressão que melhor predissesse o comportamento dos dados. O tratamento testemunha foi comparado ao fatorial (com cápsulas) por contraste ortogonal. Foi aplicado o teste F, aceitando-se ou rejeitando-se a hipótese H<sub>0</sub> (Y=0). Os testes foram executados a 95% de probabilidade. Medidas de dispersão do desvio padrão foram fornecidas para melhor entender o intervalo de confiança obtido para cada variável estudada. O conjunto de dados foi padronizado para posteriores análises multivariadas, sendo obtida para cada descritor média nula e desvio padrão unitário.

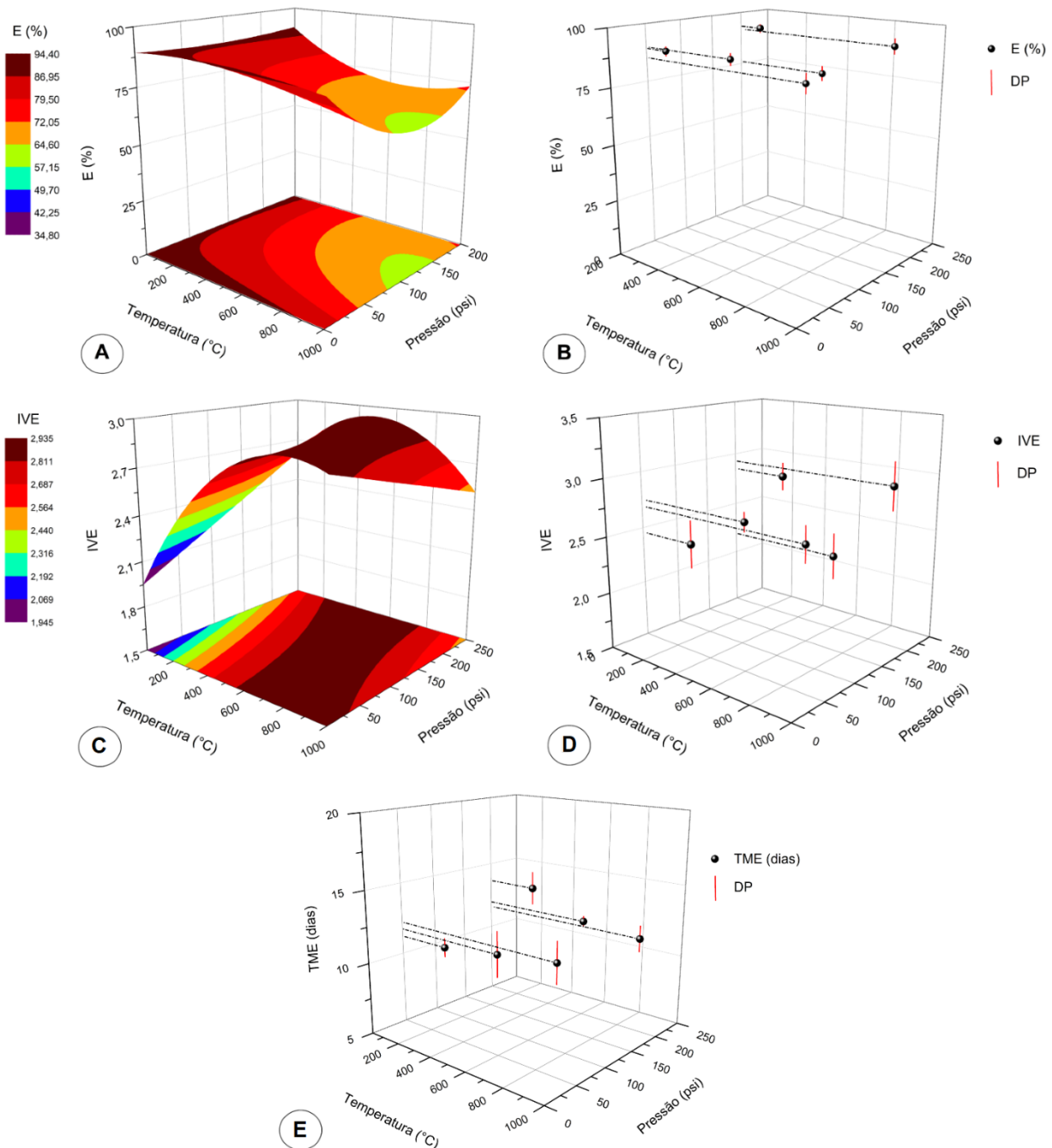
A análise multivariada de componentes principais (PCA) foi realizada a fim de simplificar as variações presentes nos dados correspondentes ao desenvolvimento das plantas, sendo projetada em um número reduzido de dimensões, preservando ao mesmo tempo o máximo de informação. Para isto, a matriz de dados originais é aproximada para duas matrizes menores (matrizes de escores e de pesos), resultando em gráficos coordenados de dispersão bimensionais de scores como resultado da análise, facilitando a

visualização dos dados experimentais. A análise multivariada de agrupamento foi utilizada para identificar semelhanças entre os tratamentos estudados, tanto de cápsulas, quanto de testemunha, em que a semente de *S. parahyba* var. *amazonicum* foi colocada sob o solo, simulando a semeadura convencional (Tratamento 1). A análise de agrupamento hierárquico aglomerativo (HAC, do inglês *Hierarchical Agglomerative Clustering*) foi realizada para esse fim. A distância de Manhattan foi adotada como medida de proximidade, e o método do *Average Link*, também conhecido como UPGMA (do inglês, *Unweighted pair group method using arithmetic averages*), foi utilizado como técnica de agrupamento de tratamentos semelhantes (EVERITT, 2011). A qualidade do dendrograma obtido foi avaliada pelo coeficiente de correlação cofenética que mede a correlação entre as distâncias recuperadas do dendrograma e a matriz de distâncias originais. As médias aritméticas de todas as variáveis consideradas para o estudo foram padronizadas com média 0 e variância 1. O software R Core Team foi utilizado para as análises citadas.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes à porcentagem, índice de velocidade e tempo médio de emergência sofreram influência significativa da temperatura de pirólise e da interação entre a temperatura de pirólise e a pressão de compactação ( $p$ -valor < 0,05). As distribuições dos dados, assim como as superfícies de resposta dos modelos de regressão ajustados, estão dispostas na Figura 3. Não foi possível ajustar um modelo de regressão que permitisse prever o comportamento da variável tempo médio de emergência ( $p$ -valor > 0,05).

Figura 3 - Superfícies de resposta e distribuição de dados das variáveis (A; B) porcentagem de emergência, (C; D) índice de velocidade de emergência e (E) tempo médio de emergência de plântulas de *S. parahyba* var. *amazonicum* geradas a partir de sementes presentes em cápsulas densificadas de biocarvão, em casa de sombra.



Em que: E(%) = porcentagem de emergência; IVE = índice de velocidade de emergência; TME = tempo médio de emergência. Equações de regressão:  $E(\%) = 6,311E+01 + 1,133E-01 \text{ TEMP} + 4,045E-01 \text{ PRES} - 1,689E-03 \text{ TEMP PRES} - 4,396E-05 \text{ TEMP}^2 + 5,729E-09 \text{ TEMP}^2 \text{ PRES}^2$ ,  $R^2 = 0,8056$  ( $p$ -valor < 0,001);  $IVE = 7,003E-03 \text{ TEMP} + 7,715E-03 \text{ PRES} - 1,109E-05 \text{ TEMP PRES} - 4,116E-06 \text{ TEMP}^2$ ,  $R^2 = 0,9664$  ( $p$ -valor < 0,001). Em que: E(%) = porcentagem de emergência; IVE = índice de velocidade de emergência; TEMP = temperatura de pirólise; PRES = pressão de compactação. Fonte: o autor (2021).

Ao analisar a superfície de resposta, percebe-se uma previsão de diminuição na porcentagem de emergência à medida que se aumenta a temperatura de pirólise, associada ao aumento na pressão de compactação (Figura 3A e 3C). Enquanto menores temperaturas de pirólise acarretaram baixos índices de velocidade de emergência, a pressão de compactação ao qual são submetidas as cápsulas exerceram pouca influencia sobre esse parâmetro.

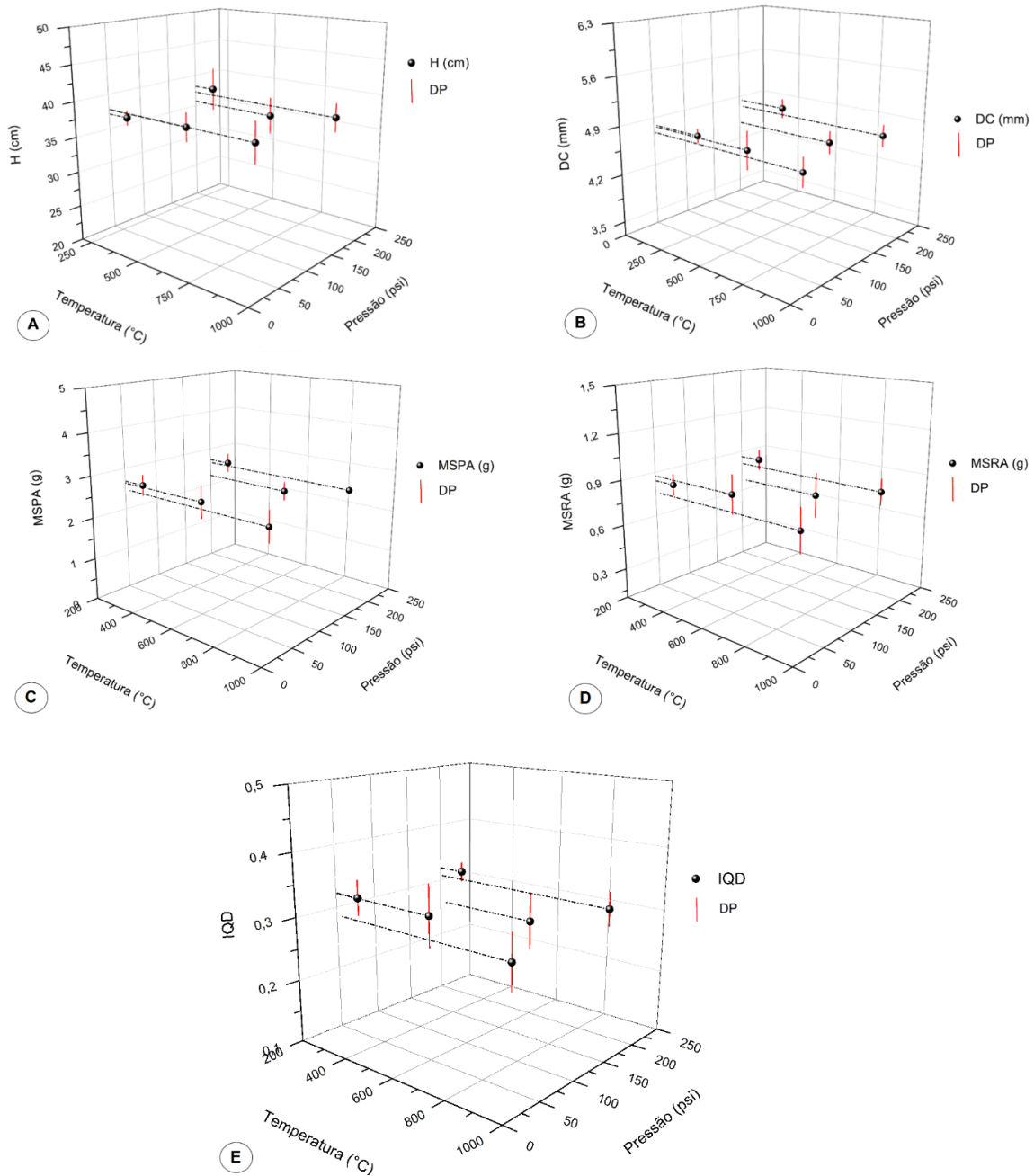
Pode-se inferir que cápsulas produzidas com biocarvão de altas temperaturas resultam em menores porcentagens de emergência em sementes dispostas em seu interior, mas que emergem mais rapidamente que sementes dispostas em cápsulas produzidas com biocarvão de baixas temperaturas. Uma explicação pode ser devido à alta capacidade de adsorção que possui o biocarvão, que pode ter influenciado na ação dos hormônios giberelina, auxina e citocinina na semente, interferindo seu pleno desenvolvimento. As giberelinas são vitais na germinação de sementes. São responsáveis pela síntese de alfa-amilase nas células, que catalisa o amido em açúcar. O açúcar produzido aumenta a pressão osmótica da célula, que faz com que a água do ambiente externo entre por osmose, resultando em aumento da célula (ZULFIQAR; ASHRAF, 2020). As auxinas são conhecidas por seus papéis de crescimento e desenvolvimento nas plantas, atuando na regulação do mecanismo de defesa oxidativa (ZULFIQAR; ASHRAF, 2020). A citocinina, por sua vez, regula vários processos em plantas, agindo principalmente na divisão celular desde a germinação da semente até os estágios adultos. Pode agir também na regulação das atividades enzimáticas envolvidas no metabolismo e na biossíntese de fatores de crescimento (CORTLEVEN et al., 2019; ZULFIQAR; ASHRAF, 2020). A capacidade de adsorção do biocarvão, propriedade explorada pela remediação de metais pesados, agrotóxicos e poluentes no solo, é correlacionada positivamente à temperatura de pirólise (PARK et al., 2019; CHOI et al., 2020; XU et al., 2021). Apesar de algumas literaturas mostrarem que a adição do biocarvão no solo aumenta a germinação de sementes (DAS; GHOSH; AVASTHE, 2020a; DAS; GHOSH; AVASTHE, 2020b; BU et al., 2020; THOMAS, 2021), a grande concentração no seu entorno, em cápsulas densificadas, pode ter feito com que a propriedade de adsorção deste componente tenha influenciado na ação dos hormônios que auxiliam na germinação, impedindo o desenvolvimento das sementes, bloqueando a germinação ou retardando a velocidade de emergência.

Um outro fator a ser levado em consideração é o pH do biocarvão, que aumenta deliberadamente ao aumentar-se a temperatura de pirólise. Isto pode ter criado um ambiente desfavorável à germinação das sementes, acarretando menores porcentagens de emergência, ou ainda influenciando na emergência, diminuindo a velocidade com que

ocorra. Estudos de Zhang e Mu (2009) mostram que a alta intensidade do estresse alcalino em solos inibiu a germinação, o crescimento, a fotossíntese e a atividade do sistema radicular de *Lathyrus quinquenervius*, enquanto Önen et al. (2018) perceberam aumento da germinação de *Sicyos angulatus* a medida em que se aumenta o pH do solo, saindo de ácido a neutro, mas diminuindo em pH acima de 7.

A altura média das plantas obtidas foi de 37,33 cm, enquanto a média do diâmetro do coleto foi de 4,72 mm. Em relação às médias da massa seca da parte aérea e massa seca das raízes, os valores corresponderam à 2,56 e 0,81 gramas, respectivamente. Já o índice de qualidade de Dickinson médio, parâmetro que determina a qualidade de mudas, obtido foi de 0,30 (Figura 4). Não houve diferença significativa entre as variáveis em diferentes pressões de compactação e temperaturas de pirólise ( $p > 0,05$ ).

Figura 4 - Distribuição de dados das variáveis (A) altura, (B) diâmetro do coleto, (C) massa seca da parte aérea, (D) massa seca de raízes e (E) índice de qualidade de Dickson de plântulas geradas a partir de sementes presentes em cápsulas densificadas de biocarvão, em casa de sombra.



Em que: H = altura; DC = diâmetro do coleto; MSPA = massa seca da parte aérea; MSRA = massa seca de raízes; IQD = índice de qualidade de Dickson; DV = desvio padrão.

O fato de plantas geradas de sementes presentes em cápsulas densificadas de biocarvão não apresentarem diferenças em parâmetros relacionados à qualidade de desenvolvimento auxilia na tomada de decisão ao serem confeccionadas cápsulas em larga escala, em que poderá se escolher entre as variáveis de produção que exigirem menor custo que, em se tratando de desenvolvimento de plantas, estas teriam os mesmos padrões. Entretanto, percebe-se que as variáveis temperatura de pirólise e pressão de compactação interferem em parâmetros relacionados ao desenvolvimento primário, como emergência das plântulas. Além disso, as características advindas do biocarvão a ser

utilizado também deve ser levado em consideração, uma vez que a temperatura de pirólise é fator determinante para que o biocarvão desencadeie uma série de reações que elevam a acidez do material, disponibilidade de macro e micronutrientes, porosidade, entre outros atributos que influem diretamente ao solo utilizado, fazendo com que plantas se desenvolvam de modo a expressar todo seu potencial de desenvolvimento. Em se tratando de recuperação de áreas degradadas, por exemplo, a escolha do biocarvão utilizado pode ser determinante para o estabelecimento de outras espécies no sistema, intensificando e colaborando para o sucesso da implantação.

Quando contrastadas com o tratamento testemunha (Tabela 1), em que houve semeadura diretamente sob o solo, percebe-se que o uso de cápsulas de biocarvão, de modo geral, resulta em porcentagem e índice de velocidade de emergência pouco inferior ao tratamento testemunha, com ambas possuindo mesmo tempo médio de emergência. Já em relação às características morfológicas das mudas, tratamentos de cápsulas e testemunha apresentam valores iguais em diâmetro do coleto, massa seca da parte aérea, massa seca de raízes e índice de qualidade de Dickson, apresentando altura média pouco menor em tratamentos com cápsulas.

Tabela 1 - Parâmetros avaliados na emergência e desenvolvimento de plantas geradas a partir de sementes de presentes em cápsulas densificadas de biocarvão.

<b>Tratamentos</b>	<b>E (%)</b>	<b>IVE</b>	<b>TME (dias)</b>	<b>H (cm)</b>	<b>DC (mm)</b>	<b>MSPA (g)</b>	<b>MSRA (g)</b>	<b>IQD</b>
Fatorial (cápsulas)	87,67*	2,65*	8,37	37,33*	4,72	2,56	0,81	0,30
Testemunha	97,00	2,91	8,47	40,12	4,82	2,83	0,88	0,32

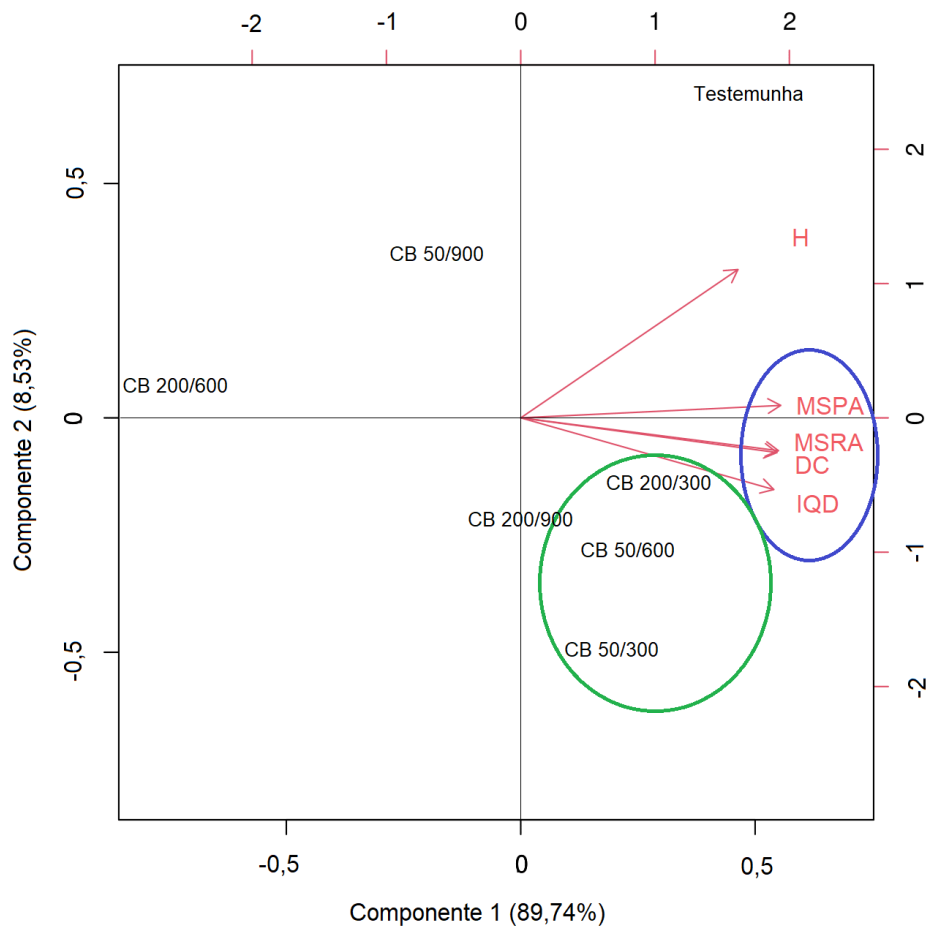
Em que: E(%) = porcentagem de emergência; IVE = índice de velocidade de emergência; TME = tempo médio de emergência; H = altura; DC = diâmetro do coleto; MSPA = massa seca da parte aérea; MSRA = massa seca de raízes; IQD = índice de qualidade de Dickson. \* Significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F da análise de variância.

Ao serem encontrados valores de parâmetros morfológicos iguais entre tratamentos de cápsulas e o tratamento testemunha, admite-se que mudas geradas a partir de cápsulas densificadas de biocarvão e de semeadura convencional possuirão mesma capacidade fotossintética, área de superfície de transpiração, durabilidade e tamanho do sistema radicular (DURYEA; LANDIS, 1984; SOUZA et al., 2017; LIN; WU; CHANG, 2018), refletindo em mesmo comportamento em termos de captação e assimilação de nutrientes. Em se tratando de índice de qualidade de Dickson, quanto maior o valor, maior é a qualidade das plantas, havendo maiores valores em altura, diâmetro do coleto, massa seca de raízes e massa seca da parte aérea, uma vez que seu cálculo se baseia em nestes

parâmetros. Caione, Lange e Schoninger (2012) encontraram 0,36 de IQD para mudas de *S. amazonicum* aos 90 dias após a semeadura, sem nenhuma adubação, enquanto Vieira, Weber e Scaramuzza (2014) encontraram 0,1 para a mesma espécie, 120 dias após semeadura em substrato 100% solo, e média de 0,27 para mudas com outros tipos de substratos com resultados significativamente iguais. A adoção de cápsulas densificadas veiculadoras de sementes pode ser uma alternativa a semeadura convencional, em que mudas podem atingir qualidade igual ou superior, com menos gastos energéticos e financeiros envolvidos, seja para uso agrícola ou em recuperação de áreas degradadas.

Dos cinco componentes principais encontrados, dois foram selecionados, uma vez que ambos respondiam por 98,27% de toda variação, sendo 89,74% correspondente apenas pelo “componente 1” (Figura 5).

Figura 5 - Análise dos componentes principais dos parâmetros de crescimento das plântulas geradas a partir de sementes presentes em cápsulas densificadas de biocarvão.

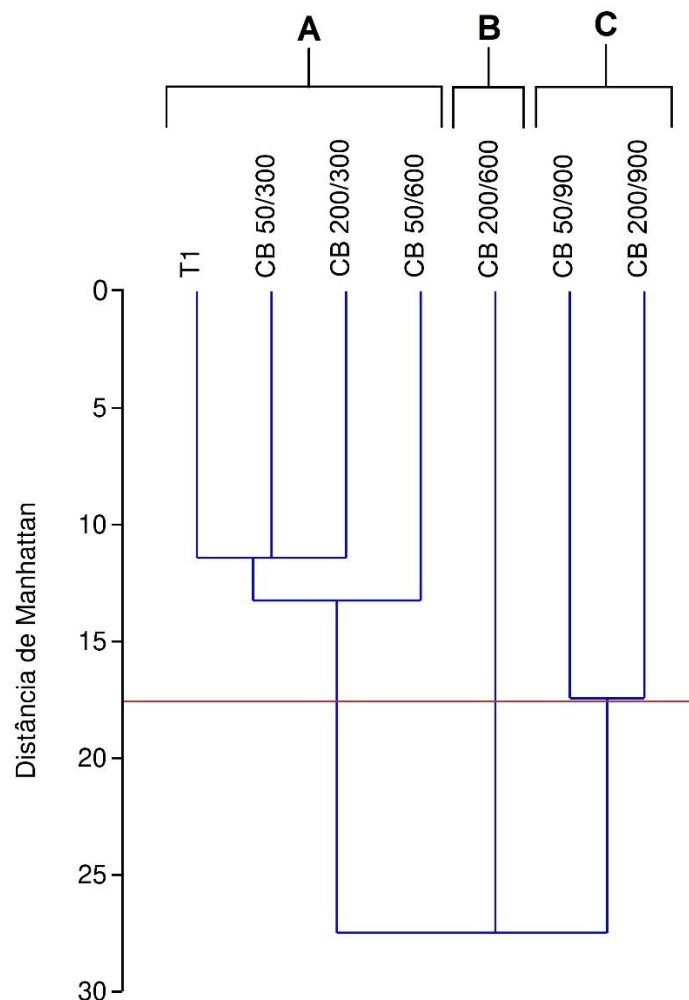


Em que: Testemunha = tratamento com sementes por baixo do substrato; “CB \*\*/\*\* ” = Tratamentos com sementes presentes em cápsulas de biocarvão, em que a primeira numeração se refere à pressão de compactação, e a segunda refere-se à temperatura de pirólise em que o biocarvão foi submetido. Fonte: o autor (2021).

O primeiro eixo da PCA se correlacionou positivamente com todos os parâmetros de crescimento das plântulas. Uma inter-relação é formada entre os parâmetros massa seca da parte aérea, massa seca de raízes, diâmetro do coleto e índice de qualidade de Dickson, evidenciado pelo círculo azul, uma vez que a planta tende a seguir um padrão correlacionado de crescimento quando está em pleno desenvolvimento (DURYEA; LANDIS, 1984; DURYEA; DOUGHERTY, 1991). É possível observar que o tratamento testemunha admitiu maiores valores para os parâmetros analisados, seguido dos tratamentos “CB 200/300”, “CB 50/600” e “CB 50/300”, inversamente proporcional ao tratamento “CB 200/600”, o que possuiu os menores valores. Um agrupamento tende a ser formado entre os tratamentos “CB 200/300”, “CB 50/600” e “CB 50/300” evidenciados pelo

círculo de cor verde, em que são mais bem observados no dendrograma da análise de agrupamento por cluster, na Figura 6, onde foi admitida a distância 17,5 como ponto de corte, a fim de minimizar a quantidade de grupos e maximizar a homogeneização.

Figura 6 - Dendrograma obtido pelo método de agrupamento hierárquico da ligação média entre grupos (UPGMA), a partir da distância de Manhattan entre cápsulas de biocarvão e o tratamento testemunha (T1). (Coeficiente de correlação cofenética = 0,945 e significativo a 5% de probabilidade).



Em que: T1 = tratamento com sementes por baixo do substrato; Cápsulas = Tratamentos com sementes presentes em cápsulas densificadas de biocarvão; “CB \*\*/\*\* ” = Tratamentos com sementes presentes em cápsulas de biocarvão, em que a primeira numeração se refere à pressão de compactação, e a segunda refere-se à temperatura de pirólise em que o biocarvão foi submetido. Fonte: o autor (2021).

As novas médias para os grupos formados são dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Médias e desvios padrão dos novos grupos formados na análise de agrupamento por Clusters.

GRUPO	H	DC	MSPA	MSRA	IQD
A	38,32 (2,29)	4,81 (0,15)	2,72 (0,26)	0,86 (0,08)	0,32 (0,03)
B	35,72 (2,68)	4,47 (0,17)	2,26 (0,23)	0,69 (0,16)	0,26 (0,05)
C	37,54 (2,20)	4,72 (0,16)	2,55 (0,24)	0,79 (0,11)	0,30 (0,03)

Em que: H = altura média; DC = diâmetro médio do coleto; MSPA = massa seca média da parte aérea; MSRA = massa seca média de raízes; IQD = índice de qualidade de Dickson. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão da média.

Ao analisar a Figura 6, percebe-se a formação de três grupos (A, B, C), em que os tratamentos com cápsulas produzidas em menores temperaturas de pirólise, 300°C nas duas pressões de compactação, e 600 °C apenas com a pressão de 50 psi, assemelharam-se em características de desenvolvimento das plantas, juntamente à testemunha. Uma vez que a testemunha possuiu os maiores valores para todos os parâmetros, como observado na análise de componentes principais, é possível afirmar que a utilização de cápsulas densificadas de biocarvão como meio para veicular sementes possibilita o pleno desenvolvimento de plantas, as quais possuem características suficientes para chegarem a fase adulta, garantindo o sucesso da implantação.

A procura por sistemas enxutos de produção e meios de economia são cada vez mais visados em qualquer área de atuação, e cápsulas densificadas de biocarvão tornam-se parte de um grupo seletivo de produtos em que se atinge a qualidade do produto tradicional, com diminuição de custos, agregando potencialidades para diversificação de uso. Os resultados aqui encontrados auxiliam em tomadas de decisão e fecham lacunas acerca do uso de cápsulas densificadas de biocarvão veiculadoras de sementes, inserindo o produto como alternativa à semeadura tradicional, inclusive em recuperação de áreas degradadas, mesmo em áreas em que o acesso seja dificultoso. No futuro, cápsulas poderão juntamente com veículos aéreos não tripulados (VANT's) promover a recomposição em larga escala de forma rápida e de baixo custo.

#### 4. CONCLUSÕES

A temperatura de pirólise e a pressão de compactação não influenciam na qualidade de mudas geradas a partir de sementes presentes em cápsulas densificadas de biocarvão. A utilização de cápsulas densificadas de biocarvão veiculadoras de sementes como alternativa a semeaduras convencionais resulta em qualidade de mudas equivalente ao

obtido de modo tradicional, com a vantagem de requerer menos força de trabalho, com diminuição de custos, agregando potencialidades para diversificação de uso.

## 5. REFERÊNCIAS

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.

BU, X.; XUE, J.; WU, Y.; MA, W. Effect of biochar on seed germination and seedling growth of *Robinia pseudoacacia* L. in karst calcareous soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 51, n. 3, p. 352-363, 2020.

CAIONE, G.; LANGE, A.; SCHONINGER, E. L. Crescimento de mudas de *Schizolobium amazonicum* (Huber ex Ducke) em substrato fertilizado com nitrogênio, fósforo e potássio. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 94, p. 213-221, 2012.

CHEN, X.; LEWIS, S.; HEAL, K. V.; LIN, Q.; SOHI, S. P. Biochar engineering and ageing influence the spatiotemporal dynamics of soil pH in the charosphere. **Geoderma**, v. 386, p. 114919-114929, 2021.

CHOI, Y.; CHOI, T.; GURAV, R.; BHATIA, S. K.; PARK, Y.; KIM, H. J.; KAN, E.; YANG, Y. Adsorption behavior of tetracycline onto *Spirulina* sp. (microalgae)-derived biochars produced at different temperatures. **Science of the Total Environment**, v. 710, p. 136282-136293, 2020.

CORTLEVEN, A.; LEUENDORF, J. E.; FRANK, M.; PEZZETTA, D.; BOLT, S.; SCHMÜLLING, T. Cytokinin action in response to abiotic and biotic stresses in plants. **Plant, Cell & Environment**, v. 42, n. 3, p. 998-1018, 2019.

DAS, S. K.; GHOSH, G. K.; AVASTHE, R. Ecotoxicological responses of weed biochar on seed germination and seedling growth in acidic soil. **Environmental Technology & Innovation**, v. 20, p. 101074-101085, 2020a.

DAS, S. K.; GHOSH, G. K.; AVASTHE, R. Evaluating biomass-derived biochar on seed germination and early seedling growth of maize and black gram. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 10, n. 3, p. 1-14, 2020b.

DICKSON, A.; LEAF, A.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **The Forest Chronicle**, v. 36, p. 10-13, 1960.

DURYEA, M. L.; DOUGHERTY, P. M. **Forest Regeneration Manual**. Florida: Springer, 1991. 433 p. (36).

DURYEA, M. L.; LANDIS, T. D. (ed.). **Forest nursery manual: production of bareroot seedlings**. Corvallis: Springer, 1984. 365 p. (11).

EVERITT, B. S.; LANDAU, S.; LEESE, M.; STAHL, D. **Cluster Analysis**. 5. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, p. 76, 2011.

GOMES, J. M.; COUTO, L.; LEITE, H. G.; XAVIER, A.; GARCIA, S. L. R. Parâmetros morfológicos na avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 26, n. 6, p. 655-664, 2002.

HASSAN, M.; LIU, Y.; NAIDU, R.; PARIKH, S. J.; DU, J.; QI, F.; WILLET, I. R. Influences of feedstock sources and pyrolysis temperature on the properties of biochar and functionality as adsorbents: a meta-analysis. **Science of the Total Environment**, v. 744, p. 140714-140729, 2020.

INCAPER. **Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural**. Disponível em: <<https://meteorologia.incaper.es.gov.br/graficos-da-serie-historica-alegre>>. Acesso em: jan. 2021.

ISLAM, M. U.; JIANG, F.; GUO, Z.; PENG, X. Does biochar application improve soil aggregation? A meta-analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 209, p. 104926-104934, 2021.

LABOURIAU, L.G. **A germinação das sementes**. Washington: OEA, 1983. 174p.

LI, S.; BARRETO, V.; LI, R.; CHEN, G.; HSIEH, Y. P. Nitrogen retention of biochar derived from different feedstocks at variable pyrolysis temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 133, p. 136-146, 2018.

LIN, K.; WU, C.; CHANG, Y. Applying Dickson Quality Index, chlorophyll fluorescence, and leaf area index for assessing plant quality of *Pentas lanceolata*. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v. 47, n. 1, p. 169-176, 2018.

MAGUIRE, J. D. Speed of germination aid in selection and evaluation for emergence and vigour. **Crop Science**, v. 2, p. 176-177, 1962.

NGUYEN, B. T.; LE, L. B.; PHAM, L. P.; NGUYEN, H. T.; TRAN, T. D.; VAN THAI, N. The effects of biochar on the biomass yield of elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schumach) and properties of acidic soils. **Industrial Crops and Products**, v. 161, p. 113224-113235, 2021.

ÖNEN, H.; FAROOQ, S.; TAD, S.; ÖZASLAN, C.; GUNAL, H.; CHAUHAN, B. S. The influence of environmental factors on germination of burcucumber (*Sicyos angulatus*) seeds: implications for range expansion and management. **Weed Science**, v. 66, n. 4, p. 494-501, 2018.

PARK, J.; WANG, J. J.; KIM, S.; KANG, S.; JEONG, C. Y.; JEON, J.; PARK, K. H.; CHO, J.; DELAUNE, R. D.; SEO, D. Cadmium adsorption characteristics of biochars derived using various pine tree residues and pyrolysis temperatures. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 553, p. 298-307, 2019.

PEZZOPANE, J. R. M.; CECÍLIO, R. A. **Agrometeorologia: aplicações para o Espírito Santo**. 1. ed. Vitória: UFES, 178, 2012.

SOHI, S. P. Carbon storage with benefits. **Science**, v. 338, n. 6110, p. 1034-1035, 2012.

SOUZA, A. G.; SPINELLI, V. M.; SOUZA, R. O.; SMIDERLE, O. J.; BIANCHI, V. J. Optimization of germination and initial quality of seedlings of *Prunus persica* tree rootstocks. **Journal of Seed Science**, v. 39, n. 2, p. 166-173, 2017.

SOUZA, C. S.; BOMFIM, M. R.; ALMEIDA, M. C.; ALVES, L. S.; SANTANA, W. N.; AMORIM, I. C. S.; SANTOS, J. A. G. Induced changes of pyrolysis temperature on the physicochemical traits of sewage sludge and on the potential ecological risks. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1-13, 2021.

THOMAS, S. C. Biochar effects on germination and radicle extension in temperate tree seedlings under field conditions. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 51, n. 1, p. 10-17, 2021.

VIEIRA, C. R.; WEBER, O. L. S.; SCARAMUZZA, J. F. Estudo de resíduos orgânicos como substrato para a produção de mudas de paricá. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 2, n. 8, p. 47-60, 2014.

WANG, L.; OK, Y. S.; TSANG, D. C. W.; ALESSI, D. S.; RINKLEBE, J.; WANG, H.; MAŁEK, O.; HOU, R.; O'CONNOR, D.; HOU, D. New trends in biochar pyrolysis and modification strategies: feedstock, pyrolysis conditions, sustainability concerns and implications for soil amendment. **Soil Use and Management**, v. 36, n. 3, p. 358-386, 2020.

WEBER, K.; QUICKER, P. Properties of biochar. **Fuel**, v. 217, p. 240-261, 2018.

XU, Y.; BAI, T.; LI, Q.; YANG, H.; YAN, Y.; SARKAR, B.; LAM, S. S.; BOLAN, N. Influence of pyrolysis temperature on the characteristics and lead(II) adsorption capacity of phosphorus-engineered poplar sawdust biochar. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 154, p. 105010-105021, 2021.

ZHANG, J.; MU, C. Effects of saline and alkaline stresses on the germination, growth, photosynthesis, ionic balance and anti-oxidant system in an alkali-tolerant leguminous forage *Lathyrus quinquenervius*. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 55, n. 5, p. 685-697, 2009.

ZULFIQAR, F.; ASHRAF, M. Bioregulators: unlocking their potential role in regulation of the plant oxidative defense system. **Plant Molecular Biology**, v. 105, n. 1-2, p. 11-41, 2020.

## 6. CONCLUSÕES GERAIS

A temperatura de pirólise e a pressão de compactação influenciam em parâmetros associados à qualidade fisiológica de sementes dispostas em cápsulas densificadas de biocarvão. Contudo, não influenciam na qualidade de mudas geradas. A utilização de cápsulas densificadas de biocarvão veiculadoras de sementes resulta em menor qualidade fisiológica de sementes e qualidade de plântulas inferior a uma semeadura convencional, mas ainda melhor que a semeadura a lanço ou uma natural “chuva de sementes”. Ao se desenvolverem, as mudas geradas possuem qualidade equivalente a mudas provenientes de semeadura convencional. Em resumo, a semeadura tradicional é eficaz, mas é uma prática que requer tempo, força de trabalho e custos, fatos que poderiam ser contornados com o uso de cápsulas densificadas de biocarvão. Ao serem adotadas, cápsulas conseguem um desempenho inferior em termos de parâmetros fisiológicos de sementes, mas que pode ser ainda mais efetivo que a semeadura a lanço ou uma natural “chuva de sementes”. Mudas de qualidade são geradas e, de modo concomitante, cápsulas possuem o potencial de melhorar as características físicas, químicas e biológicas do solo a curto, médio e longo prazo com a incorporação do biocarvão ao sistema. No futuro, cápsulas poderão juntamente com veículos aéreos não tripulados (VANT's) promover a recomposição em larga escala de forma rápida e de baixo custo, inclusive em recuperação de áreas degradadas, possibilitando abordar áreas em que o acesso seja dificultoso.

## 7. APÊNDICE

### 7.1. APÊNDICE A

Ensaio piloto para determinação de variáveis fixas no processo de produção das cápsulas de biocarvão. Barra de escala: 3,0 cm.



Fonte: o autor (2021).