

***Campus Colorado do Oeste* Coordenação do Curso em Engenharia
Agrônômica**

ANDRESSA FERREIRA COTA

**RETORNO DE BIOMASSA DE PODA DE ÁRVORES AO SOLO NA FORMA
DE BIOCARVÃO**

**COLORADO DO OESTE
2025**

ANDRESSA FERREIRA COTA

**RETORNO DE BIOMASSA DE PODA DE ÁRVORES AO SOLO NA FORMA DE
BIOCARVÃO**

Artigo científico entregue como Trabalho de Conclusão de Curso ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), *Campus* Colorado do Oeste como requisito parcial para obtenção do grau Bacharelado em Engenharia Agrônômica. sob a orientação da professora Stella Cristiani Gonçalves Matoso.

COLORADO DO OESTE

2025

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Gerador de Ficha Catalográfica do IFRO.

Cota, Andressa Ferreira.

Retorno de biomassa de poda de árvores ao solo na forma de biocarvão / Andressa Ferreira Cota. - Colorado do Oeste, 2025.
23 f.

Orientador(a): Prof^{fa}. Dra. Stella Cristiani Goncalves Matoso.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrônômica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO, Colorado do Oeste, 2025.

1. Agricultura conservacionista. 2. Biochar. 3. Condicionador de solo. 4. pirólise. I. Matoso, Stella Cristiani Goncalves (orient.). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO. III. Título.

Bibliotecário(a) Responsável: Juliana Machado da Silva Sasset, CRB-11/1140

RETORNO DE BIOMASSA DE PODA DE ÁRVORES AO SOLO NA FORMA DE BIOCARVÃO

Artigo científico entregue como Trabalho de Conclusão de Curso ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), *Campus* Colorado do Oeste como requisito parcial para obtenção do grau Bacharelado em Engenharia Agrônoma. sob a orientação da professora Stella Cristiani Gonçalves Matoso.

Aprovado em: 01/02/2025 pela banca examinadora.

Membro da Banca



Documento assinado digitalmente

LEANDRO CECILIO MATTE

Data: 31/07/2026 22:39:10-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro da Banca



Documento assinado digitalmente

MURILO VARGAS DA SILVEIRA

Data: 30/07/2026 17:08:50-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro da Banca



Documento assinado digitalmente

STELLA CRISTIANI GONCALVES MATOSO

Data: 08/07/2026 07:22:32-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador

RETORNO DE BIOMASSA DE PODA DE ÁRVORES AO SOLO NA FORMA DE BIOCARVÃO

Andressa Ferreira Cota

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de Rondônia (IFRO)

Stella Cristiani Gonçalves Matoso

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de Rondônia (IFRO)

Franciele da Silva Costa

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de Rondônia (IFRO)

Celina Martins Almodóvar

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de Rondônia (IFRO)

Andréia Fiorentin

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de Rondônia (IFRO)

Soraya Celino Martins

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de Rondônia (IFRO)

Xosé Lois Otero Pérez

Universidade de Santiago de Compostela (USC)

RESUMO

Biocarvão é um material rico em C, obtido pela pirólise de biomassa. Sua utilização vem causando entusiasmo na comunidade científica, por trazer benefícios tanto na área agrônômica, quanto ambiental. Um dos desafios atuais é selecionar as matérias-primas e os procedimentos adequados para obter biocarvões com propriedades específicas para as diferentes finalidades de uso. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi caracterizar as propriedades de biocarvões derivados de nove resíduos orgânicos, derivados de podas de árvores, e correlacionar essas propriedades com a possibilidade de uso agrônômico. Foram determinados rendimento, teor de umidade, teor de cinzas, densidade, pH, poder de neutralização, capacidade de troca de cátions, C oxidável e composição elementar (C, H, O, N, S, P, K, Ca, Mg, Na, Al, Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Co, Cr, Ni, Pb e Si). A análise estatística foi iniciada pela verificação dos pressupostos da análise de variância pelo teste de Shapiro Wilk (normalidade dos resíduos) e de Bartlett (homogeneidade das variâncias). A partir de dados normais empregou-se a análise de variância pelo teste F, seguida do teste de médias de Tukey. Conclui-se que a incorporação de biocarvões derivados de galhos e folhas de espécies florestais tem potencial de elevar a fertilidade do solo e o sequestro de carbono. As folhas geram biocarvões mais adequados ao condicionamento do solo, enquanto os galhos são adequados para obter biocarvão mais rico em carbono e mais recalcitrante.

Palavras-chave: agricultura conservacionista; biochar; condicionador de solo; pirólise.

INTRODUÇÃO

A utilização de carvão na agricultura, como o biocarvão, tem se destacado como uma alternativa promissora para melhorar as propriedades químicas, físico-hídricas e biológicas do solo, levando a um aumento significativo na produtividade das culturas (MARCELINO *et al.*, 2020; WANG; WANG, 2019). Essa prática é inspirada na observação das Terras Pretas de Índio, solos antropogênicos na Amazônia conhecidos por sua fertilidade elevada e resiliente, que inclui concentrações significativas de C orgânico P, Ca e micronutrientes (NÓBREGA, 2011). Pesquisas recentes têm reforçado o potencial do biocarvão em promover a qualidade dos solos e a sustentabilidade agrícola, destacando sua aplicação em diferentes contextos agroecológicos (ZHANG *et al.*, 2023).

Para a produção de biocarvão, a biomassa passa pelo processo de pirólise (300 a 900 °C, sob baixa ou nula presença de oxigênio), resultando em um produto sólido com elevado teor de C recalcitrante em sua fração orgânica, aumentando sua resistência aos processos de decomposição (WANG; WANG, 2019). Podem ser utilizados diversos materiais como matéria-prima para a obtenção de biocarvão, como resíduos de agroindústrias, domésticos, de estação de tratamento de esgoto, de criação de animais, de podas de árvores, entre outros (DOMINGUES *et al.*, 2017; MARCELINO *et al.*, 2020; WANG; WANG, 2019). Dessa forma, além da melhoria das condições do solo, pode se dar destino adequado à materiais que se degradariam em locais inadequados causando impactos ambientais (AHSAN *et al.*, 2022; GHODAKE *et al.*, 2021).

Associada ao destino adequado de resíduos, a conversão do C orgânico em formas recalcitrantes, torna a tecnologia do biocarvão ótima alternativa para mitigar as mudanças climáticas, contribuindo para o sequestro de C, para a filtração de água e redução da emissão de gases de efeito estufa (AHSAN *et al.*, 2022; GHODAKE *et al.*, 2021; MARCELINO *et al.*, 2020). Nesse sentido, a caracterização de biocarvões oriundos de diferentes resíduos orgânicos é um fator chave para a produção do biocarvão em larga escala, pois a biomassa afeta as propriedades dos biocarvões e deve ser considerada na tomada de decisão para a sua finalidade de uso (DOMINGUES *et al.*, 2017; GHODAKE *et al.*, 2021).

O uso de resíduos de poda para produzir biocarvão em vez de deixá-los decompor naturalmente oferece várias vantagens como, melhoria na fertilidade e

condições físico-hídricas do solo, pois o biocarvão condiciona o ambiente químico e a estrutura do solo, contribuindo na retenção de água e nutrientes, promove a atividade microbiana benéfica ao solo, o que, consequentemente, resulta em aumento na produtividade das plantas (CHEN *et al.*, 2024; DOMINGUES *et al.*, 2017).

Diante do exposto, objetivou-se determinar propriedades químicas e físicas de biocarvões derivados de resíduos orgânicos obtidos de podas de árvores nobres, cultivadas no ambiente amazônico.

MÉTODOS

A pesquisa foi realizada no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia, *Campus* Colorado do Oeste. O clima da região é classificado como quente e úmido (Aw, segundo a Classificação de Köppen), com estações seca e chuvosa bem definidas, média anual de temperatura de 24 °C e de precipitação pluviométrica de 1900 a 2400 mm (FISCH *et al.*, 1997; FRANCA, 2015). A região está inserida em um ecótono de transição entre Cerradão tropical subperenifólio e Floresta tropical subperenifólia (SANTOS *et al.*, 2015).

As matérias-primas foram coletadas em área experimental do *campus*. O experimento possui quatro blocos e cinco tratamentos, que correspondem a diferentes espécies arbóreas (*Khaya senegalensis*, *Khaya grandifoliola*, *Swietenia macrophylla*, *Tectona grandis* e *Toona ciliata*). No mês de maio de 2022, as espécies arbóreas passaram por um procedimento de poda dos ramos mortos e vivos que se encontram ao longo do fuste, com vista a melhorar a qualidade da madeira.

No dia 04 de maio de 2022 o material resultante da poda de três blocos de todas as espécies foi coletado e separado em galhos e folhas, com exceção da espécie *Swietenia macrophylla*, conhecida pelos nomes comuns de aguano ou mogno brasileiro, por não apresentar quantidade suficiente de galhos, assim, foram coletadas apenas as folhas. Logo, o presente experimento adotou o delineamento inteiramente casualizado (DIC) com nove tratamentos (galhos e folhas de quatro espécies - *Khaya senegalensis*, *Khaya grandifoliola*, *Tectona grandis* e *Toona ciliata* - e folhas da espécie *Swietenia macrophylla*) e três repetições, totalizando 27 parcelas.

O material selecionado durante a poda foi acondicionado em uma estufa de ventilação forçada a 60 °C até obter massa constante. Posteriormente, esse

material foi retirado da estufa e fracionado manualmente em partes menores para facilitar a trituração, que foi realizada em um moinho de facas com malha de 2 mm, seguida do armazenamento em sacos plásticos.

Após o processamento das biomassas foi realizada a produção do biocarvão, utilizando cadinhos de porcelanas (cadinhos) para comportar o material de cada tratamento. Os cadinhos forma repletos de biomassa e tampados, a fim de obter uma atmosfera rica em CO₂ durante o processo. Procedeu-se a pirólise em um forno tipo mufla (EDG equipado com controlador microprocessado) ajustado para 350 °C por 2 h, descontando-se o tempo de aquecimento do equipamento e o tempo de espera do resfriamento do material (temperatura ambiente).

O rendimento dos biocarvões foi obtido por meio da aferição da massa dos materiais antes e após a pirólise, em balança analítica com precisão de 0,1 mg. Os biocarvões foram então armazenados sob temperatura ambiente em recipientes fechados em um dessecador até o momento das análises, que foram determinadas em duplicata.

O teor de umidade e de cinzas dos biocarvões foi determinado de acordo o método da *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 1990). A umidade foi determinada pela diferença de massa antes e após o processo de secagem em estufa de ventilação forçada ajustada a 105 °C por 24 h e sem tampa. Para obter o teor de cinzas, as amostras secas foram acondicionadas em forno tipo mufla e aquecidas a 750 °C por 6 h, realizando-se novamente a aferição das massas. A partir do teor de umidade foi calculado o fator de correção de umidade residual (TEIXEIRA *et al.*, 2017) para ajustar os resultados das demais variáveis para a base seca.

A densidade foi determinada pelo método da proveta (EBC, 2024). Empregou-se proveta graduada de 100 mL, acondicionando-se uma amostra de massa conhecida de cada biocarvão. As provetas com os biocarvões foram compactadas 10 vezes sobre uma manta de borracha de 5 mm de espessura, com auxílio de uma régua para observar a altura de queda de 10 cm. Após esse procedimento o volume do biocarvão ocupado foi anotado e novamente aferição da massa da proveta com o material. A densidade foi então obtida pela razão entre a massa do biocarvão e seu respectivo volume.

O teor de C oxidável foi determinado pelo método de oxidação via úmida (TEIXEIRA *et al.*, 2017). 0,05 g de cada material foram aferidos e acondicionados

em erlenmeyer de 250 mL. Em seguida, empregou-se 50 mL da solução de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$, 0,0667 mol L⁻¹) por amostra, como agente oxidante, e procedeu-se a fervura branda em banho maria (Dubnoff SL-157) ajustado para aquecimento a 95 °C por 5 min, obtendo-se uma coloração amarelo-castanha da solução. Após o resfriamento das amostras, foram adicionados 250 mL de água deionizada. O material foi homogeneizado e retirado uma alíquota de 50 mL, utilizada para a titulação da solução restante de dicromato de potássio, que não foi reduzida durante o processo. Para isso, adicionaram-se 2 mL de ácido ortofosfórico e três gotas de solução indicadora. A titulação foi realizada com solução de sulfato ferroso amoniacal 0,1 mol L⁻¹, observando a viragem da cor para verde no centro do Erlenmeyer, anotando-se o volume de titulante gasto. A cada 10 repetições foram feitas duas provas em branco.

Para análise de pH, foi acondicionado 1g de biocarvão em tubo tipo Falcon de 50 mL, adicionando-se 20 mL de água deionizada. Os tubos foram agitados em agitador tipo vórtex por 10 segundos, e em seguida, as amostras ficaram em repouso por 1 h. Após, realizou-se a agitação para homogeneização da amostra, imediatamente antes da leitura, que foi efetuada com medidor de pH digital. Foram feitas calibrações do peagâmetro a cada dez leituras.

Para a análise de poder de neutralização (PN) foi aferido 1,0 g de biocarvão em um recipiente de 70 mL. Em seguida, adicionaram-se 40 mL de água deionizada, agitando a mistura por 2 h. Após o período de agitação, foi feita a leitura do pH da solução. Sem retirar o eletrodo da amostra, procedeu-se a titulação da solução utilizando HCl 0,1 mol L⁻¹ até alcançar o pH final de 2,0, anotando-se o volume de solução utilizado. Após um período de 12 h de equilíbrio, verificou-se novamente o pH da solução. Quando o pH não estava estabilizado em 2,0, foi feita uma nova titulação até atingir o pH desejado, anotando-se o volume adicional de solução utilizada.

Para realizar a análise de capacidade de troca de cátions efetiva (CTCef) foi acondicionado 1 g de cada biocarvão em tubos percoladores com 0,5 g de areia quartzosa lavada. Em seguida, adicionou-se 20 mL de cloreto de amônio 1 mol L⁻¹ em cada tubo e deixaram-se as amostras em repouso por 14 h. Após, iniciou-se a percolação até recolher um total de 100 mL de lixiviado. No lixiviado determinaram-se os teores de Al, Ca, Mg e Na, usando um espectrofotômetro de

absorção atômica PerkinElmer modelo PinAAcle 500, e o pH, empregando um peagâmetro digital. Foram realizadas duas provas em branco.

Os biocarvões também foram caracterizados quanto ao teor de C, H, O, N, S, P, K, Ca, Mg, Na, Al, Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Co, Cr, Ni, Pb e Si. As análises elementares (C, H, N e S) foram realizadas por combustão seca em analisadores elementares THERMO FINNIGAN modelo FLASH 1112, Macromostra LECO modelo TruSpec CHN e LECO SC-144DR. A concentração de O foi determinada por diferença após a determinação do teor de cinzas por meio do aquecimento da amostra em forno mufla a 550 °C por 5 h. A partir dos resultados de C, H e O foram obtidas as relações moleculares H:C, O:C e C:N.

O conteúdo de P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Co, Cr, Ni, Pb e Si foi obtido por digestão ácida em micro-ondas (modelo Milestone ETHOS easy), empregando HNO₃ e HCl (3:1). Foram acondicionados 0,25 g de biocarvão nos tubos digestores, adicionando-se 9 mL de HNO₃ e 3 mL de HCl. Em seguida aplicou-se uma rampa de aquecimento de 20 min entre a temperatura ambiente até 180 °C, temperatura esta, que foi mantida por outros 20 min. Em seguida as amostras foram resfriadas até temperatura ambiente e transferidas para balões volumétricos, aferindo-se o volume de 25 mL, resultando em uma relação sólido: solução de 1:100.

O teor de P foi quantificado pelo método espectrofotométrico do ácido molibdovanadofosfórico, com absorbância medida a 880 nm, usando um espectrofotômetro JASCO modelo V630. O conteúdo de Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Co, Cr, Ni, Pb e Si foi determinado por espectrofotometria de absorção atômica, o K e o Na foram determinados por fotometria de chama, usando um espectrofotômetro PerkinElmer modelo PinAAcle 500.

A análise estatística foi efetuada pela verificação dos pressupostos da análise de variâncias, pelo teste de Bartlett (homogeneidade das variâncias) e de Shapiro-Wilk (normalidade dos resíduos). Para as variáveis de rendimento e teor de cinzas efetuou-se a transformação dos dados pelo método de Box-Cox. A partir de dados normais, realizou-se a análise de variância pelo teste F, seguida do teste de médias de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

RESULTADOS

Rendimento e propriedades físicas

Observa-se na Tabela 1 que biocarvões obtidos a partir das folhas de qualquer espécie apresentaram maior rendimento ($p < 0,05$) quando comparados os biocarvões derivados dos galhos, sendo que houve destaque para espécie *S. macrophylla*, que apresentou maior rendimento que as demais espécies, seguida da *T. ciliata*. Os biocarvões oriundos dos galhos das diferentes espécies não diferiram entre si ($p > 0,05$).

Tabela 1 - Médias de rendimento, teor de umidade e de cinzas e de densidade de nove biocarvões obtidos de resíduos de diferentes espécies florestais, Colorado do Oeste, RO.

Tratamento		Rendimento	Umidade	Cinzas	Densidade
Espécie	Parte da planta		%		kg dm ⁻³
<i>K. senegalensis</i>	Folhas	49,77abc	0,50c	22,71a	0,40ab
<i>K. grandifoliola</i>	Folhas	47,03bc	0,99bc	13,92a	0,39abc
<i>S. macrophylla</i>	Folhas	56,09a	1,30abc	14,43a	0,49a
<i>T. ciliata</i>	Folhas	52,06ab	2,10ab	13,09a	0,47a
<i>T. grandis</i>	Folhas	46,34c	0,39c	15,93a	0,41ab
<i>K. senegalensis</i>	Galhos	39,50d	0,94bc	10,90ab	0,36bcd
<i>K. grandifoliola</i>	Galhos	40,05d	0,92bc	7,54b	0,30cd
<i>T. ciliata</i>	Galhos	39,99d	0,99bc	7,26b	0,25d
<i>T. grandis</i>	Galhos	39,20d	2,32a	13,15a	0,44ab
Coeficiente de variação (%)		0,73	36,67	2,91	9,96

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Os biocarvões derivados de folhas também obtiveram maior ($p < 0,05$) teor de cinzas do que aqueles derivados de galhos, com exceção das espécies *K. senegalensis* e *T. grandis*, que não apresentaram diferença significativa entre folhas e galhos. Mesmo as amostras sendo armazenadas em recipientes fechados e em dessecador com a presença de sílica houve diferença ($p < 0,05$) no teor de umidade dos biocarvões (Tabela 1).

A densidade dos biocarvões variou ($p < 0,05$) em função da matéria-prima utilizada (Tabela 1), com maiores médias para os biocarvões obtidos das folhas de todas as espécies e de galhos de *T. grandis*.

Composição elementar e relações moleculares

Na Tabela 2, observa-se que os biocarvões derivados de galhos apresentaram as maiores concentrações de C em comparação aos biocarvões derivados de folhas ($p < 0,05$), com maiores médias para as espécies *T. ciliata* e *K. grandifoliola*. A concentração de H obteve comportamento inverso ao C, o que contribuiu para que maior relação H:C ($p < 0,05$) tenha sido obtida nos biocarvões derivados de folhas (0,96 a 1,04) do que naqueles derivados de galhos (0,77 a 0,84).

Tabela 2 - Médias do conteúdo elementar (C, H, O e N) e das relações moleculares (H:C, O:C e C:N) de nove biocarvões obtidos de resíduos de diferentes espécies florestais, Colorado do Oeste, RO

Tratamento		C	H	O	N	H:C	O:C	C:N
Espécie	Parte da planta	g kg ⁻¹						
<i>K. senegalensis</i>	Folhas	575,57c	47,33a	220,57b	30,05a	0,99a	0,29a	22,35e
<i>K. grandifoliola</i>	Folhas	556,53d	48,21a	215,36b	30,51a	1,04a	0,29a	21,28e
<i>S. macrophylla</i>	Folhas	551,73d	45,33ab	224,33b	21,68b	0,99a	0,31a	29,86de
<i>T. ciliata</i>	Folhas	563,63cd	49,33a	211,00b	29,53a	1,05a	0,28a	22,27e
<i>T. grandis</i>	Folhas	563,47cd	45,23ab	214,10b	18,23c	0,96a	0,29a	36,35d
<i>K. senegalensis</i>	Galhos	591,23b	41,37bc	236,57ab	10,82d	0,84b	0,30a	63,78c
<i>K. grandifoliola</i>	Galhos	619,67a	43,08b	240,82b	8,16de	0,84b	0,29a	88,67b
<i>T. ciliata</i>	Galhos	629,60a	41,38bc	249,93a	5,93e	0,79b	0,30a	123,87a
<i>T. grandis</i>	Galhos	594,90b	38,34c	230,74ab	10,56d	0,77b	0,29a	67,01c
Coeficiente de variação (%)		0,91	3,36	3,49	6,12	3,43	3,99	8,76

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

A maior concentração de O foi observada no biocarvão derivado de galhos de *T. ciliata* (249,93 g kg⁻¹) sem diferença estatística quando comparado aos biocarvões obtidos de galhos de *K. senegalensis* e *T. grandis* que, por sua vez, não diferiram dos demais biocarvões que apresentaram as menores médias. Apesar de diferença estatística ter sido observada nos teores de C e de O, para a relação O:C (0,28 a 0,31), não houve diferença entre os tratamentos (Tabela 2).

Maiores ($p < 0,05$) teores de N foram observados nos biocarvões derivados de folhas, com destaque para as espécies *K. senegalensis*, *K. grandifoliola* e *T. ciliata*. A relação C:N foi maior ($p < 0,05$) nos biocarvões obtidos de galhos, especialmente em *T. ciliata* (123,87) e *K. grandifoliola* (88,67) (Tabela 2).

Na Tabela 3, verifica-se que a composição elementar dos macronutrientes S, P, K, Ca e Mg foi variável em função da combinação entre espécie e parte

da planta, sem um padrão claramente destacável. A concentração de S variou de 0,99 a 2,59 g kg⁻¹, com maior teor observado no biocarvão de folhas de *K. grandifoliola*. O conteúdo de P variou de 1,81 a 3,16 g kg⁻¹ e os biocarvões das espécies *K. senegalensis* (galhos) e *T. grandis* (folhas) foram os que apresentaram maiores médias (p < 0,05).

Para K, a variação das médias entre os tratamentos foi de 15,34 a 36,76 g kg⁻¹, e o maior valor (p < 0,05) foi obtido no biocarvão de galhos de *K. senegalensis*. Para Ca houve uma discreta tendência de maior conteúdo nos biocarvões derivados de folhas (valores de 20,59 a 42,57 g kg⁻¹) do que aqueles derivados de galhos (intervalo de 3,08 a 16,48 g kg⁻¹), sendo que o biocarvão derivado das folhas da espécie *S. macrophylla* apresentou a maior concentração de Ca. Os valores de Mg variaram de 1,98 a 5,51 g kg⁻¹ e o tratamento com maior média (p < 0,05) foi o biocarvão obtido de folhas de *T. grandis* (Tabela 3).

Os biocarvões derivados de folhas obtiveram maior conteúdo de Si do que aqueles obtidos de galhos (Tabela 4). Apesar de haver diferença estatística entre os tratamentos para os demais elementos, não houve um padrão notável entre espécies e partes da planta para a maior parte dos elementos.

Tabela 3 - Médias do conteúdo elemental (S, P, K, Ca e Mg) de nove biocarvões obtidos de resíduos de diferentes espécies florestais, Colorado do Oeste, RO

Tratamento		S	P	K	Ca	Mg
Espécie	Parte da planta	g kg ⁻¹				
<i>K. senegalensis</i>	Folhas	1,79bc	2,57b	23,77cd	21,36c	2,82e
<i>K. grandifoliola</i>	Folhas	2,59a	2,80b	30,20b	25,69b	3,72c
<i>S. macrophylla</i>	Folhas	1,86b	1,81c	15,34e	42,57a	2,32ef
<i>T. ciliata</i>	Folhas	1,29cd	2,46b	26,61bc	25,86b	4,79b
<i>T. grandis</i>	Folhas	0,99d	2,90ab	18,03de	20,59c	5,51a
<i>K. senegalensis</i>	Galhos	1,40cd	3,16a	36,76a	15,14d	2,68e
<i>K. grandifoliola</i>	Galhos	1,52c	2,12bc	26,06c	11,19e	1,98f
<i>T. ciliata</i>	Galhos	1,66bc	2,72bc	21,33d	3,08f	3,04d
<i>T. grandis</i>	Galhos	1,21d	2,58b	26,67bc	16,48d	4,38b
Coeficiente de variação (%)		3,43	6,81	5,76	3,73	6,62

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

O conteúdo dos elementos Cd, Co, Cr, Ni e Pb não foi apresentado porque em nenhuma amostra foi constatado o nível de detecção do equipamento de leitura. Estes limites são de 2,5 mg kg⁻¹ para Cd, Co e Ni e de 10 mg kg⁻¹ para Cr e Pb.

Tabela 4 - Médias do conteúdo elementar (Fe, Cu, Mn, Zn, Si e Na) de nove biocarvões obtidos de resíduos de diferentes espécies florestais, Colorado do Oeste, RO

Tratamento		Fe	Cu	Mn	Zn	Si	Na
Espécie	Parte da planta	mg kg ⁻¹					
<i>K. senegalensis</i>	Folhas	260,54bc	22,933a	151,48cd	17,81d	608,43a	73,94a
<i>K. grandifoliola</i>	Folhas	258,47bc	17,44b	285,23b	14,61d	494,81b	<20,00c
<i>S. macrophylla</i>	Folhas	300,20ab	10,68d	192,17c	10,54d	530,02ab	40,50bc
<i>T. ciliata</i>	Folhas	274,84b	12,30cd	119,51d	100,82a	603,11a	<20,00c
<i>T. grandis</i>	Folhas	326,55a	22,72a	255,29bc	42,37b	524,65ab	41,86bc
<i>K. senegalensis</i>	Galhos	237,38c	17,01b	83,41de	32,84c	<20,00d	39,97bc
<i>K. grandifoliola</i>	Galhos	207,30c	13,04c	135,98cd	26,38c	259,25c	26,23c
<i>T. ciliata</i>	Galhos	324,02a	7,62e	24,58e	11,69d	<20,00d	51,32b
<i>T. grandis</i>	Galhos	244,13bc	22,88a	255,29bc	30,72c	321,34c	53,85ab
Coeficiente de variação (%)		4,46	4,33	12,35	7,58	10,05	19,47

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Propriedades químicas e físico-químicas

O teor de C oxidável foi maior ($p < 0,05$) nos biocarvões produzidos a partir dos galhos (Tabela 5). Verificou-se maior média para as espécies *T. ciliata* e *K. grandifoliola*, seguidas de *K. senegalensis* e de *T. grandis*.

Ainda na Tabela 5 pode-se observar que o pH de todos os biocarvões é de reação alcalina, porém com maior média ($p < 0,05$) para os biocarvões derivados das folhas das espécies *T. ciliata* e *T. grandis*. Os biocarvões obtidos de galhos apresentaram menor pH que aqueles derivados de folhas, com exceção da espécie *T. grandis*, que não obteve diferença estatística entre as diferentes partes da planta. O pH medido em NH4Cl 1 M apresentou tendência similar.

Tabela 5 - Médias de C oxidável, pH em água, poder de neutralização (PN), capacidade de troca de cátions efetiva (CTCef) e pH em NH₄Cl 1M de nove biocarvões de diferentes espécies florestais, Colorado do Oeste, RO

Tratamento		C oxidável	pH	PN	NH ₄ Cl 1 M	
Espécie	Parte da planta	g kg ⁻¹	H ₂ O	HCl un pH ⁻¹	CTCef cmolc kg ⁻¹	pH
<i>K. senegalensis</i>	Folhas	524,86cd	8,87cd	1,58e	49,68e	6,16bc
<i>K. grandifoliola</i>	Folhas	490,01de	9,38ab	2,96bc	101,28b	6,78a
<i>S. macrophylla</i>	Folhas	495,80de	9,02bc	3,21b	119,75a	6,84a
<i>T. ciliata</i>	Folhas	487,36de	9,42a	3,70a	96,15b	6,82a
<i>T. grandis</i>	Folhas	468,13e	9,40a	2,89bc	77,04c	6,61ab
<i>K. senegalensis</i>	Galhos	562,58bc	8,53de	3,38ab	101,00b	6,07cd
<i>K. grandifoliola</i>	Galhos	589,37ab	8,12f	2,92bc	64,42d	5,82d
<i>T. ciliata</i>	Galhos	608,65a	8,33ef	2,23d	62,65d	5,78d
<i>T. grandis</i>	Galhos	554,22bc	9,13abc	2,65c	82,31c	6,41b
Coeficiente de variação (%)		2,70	1,46	4,88	0,71	<0,01

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

O PN mede a capacidade de neutralizar ácidos dos materiais, as folhas de *T. ciliata* e os galhos de *K. senegalensis* geraram os biocarvões com maior PN ($p < 0,05$), seguida por *S. macrophylla*. O biocarvão obtido das folhas de *K. senegalensis* obteve o menor PN, indicando menor capacidade de neutralização de acidez (Tabela 5).

As folhas de *S. macrophylla* geraram o biocarvão de maior CTCef ($p < 0,05$), seguidas das espécies *K. grandifoliola* e *T. ciliata*. O biocarvão obtido das folhas de *K. senegalensis* apresentou o menor teor de CTCef em comparação com as demais espécies. Com relação aos biocarvões derivados de galhos, *K. senegalensis* obteve a maior CTCef, enquanto *K. grandifoliola* e *T. ciliata* apresentaram os menores valores dessa variável (Tabela 5).

DISCUSSÃO

Benefícios da conversão de biomassa de poda de árvores em biocarvão

Resíduos de podas de espécies florestais são frequentemente deixados nas áreas de cultivo como fonte de matéria orgânica para promover a ciclagem de nutrientes e a proteção física do solo. Entretanto, esta pesquisa inova propondo a

conversão destes restos culturais em biocarvão. Com base nos resultados obtidos e informações da literatura pode-se destacar algumas vantagens dessa proposta:

1. A conversão de biomassa em biocarvão traz a vantagem da esterilização do material devido as altas temperaturas de pirólise ($>300\text{ }^{\circ}\text{C}$) (WANG; WANG, 2019). Assim, o material orgânico incorporado ao solo não constitui fonte de inóculo de pragas e doenças, mesmo se a poda for fitossanitária.
2. Estima-se que durante a decomposição natural da biomassa em um ambiente tropical perde-se até 80% do material em forma de água e gases e apenas 10% do C adicionado é efetivamente retido no solo (SANTOS *et al.*, 2008). Na Tabela 1, verifica-se que o rendimento dos biocarvões variou de 39 a 56%, demonstrando o maior retorno de massa ao solo. Além disso, de 55 a 63% dessa biomassa foi composta por C (Tabela 2). Relacionando os valores de C oxidável (Tabela 5) com o C total (Tabela 1), tem-se um resultado interessante. Observa-se que adição de biocarvão ao solo incorpora imediatamente de 3 a 16% do C total sob formas não oxidáveis. O envelhecimento do biocarvão no solo tende a aumentar este percentual. Chen *et al.* (2024) demonstraram que a incorporação de biomassa ao solo durante quatro ciclos de cultivo de arroz manteve os estoques de C orgânico total inalterados, enquanto a adição das mesmas biomassas sob forma de biocarvão aumentou o estoque de C em 24%.
3. Foi demonstrado que a incorporação de biocarvão tem maior potencial de elevar a atividade microbiana do solo do que a adição de biomassa não decomposta e que isso resulta em maior agregação das partículas, formando macroagregados e melhorando o condicionamento físico-hídrico do solo (CHEN *et al.*, 2024).
4. A incorporação de biocarvão ao solo eleva imediatamente a CTC do solo, não sendo necessário esperar o processo de decomposição natural. Ademais, o processo de envelhecimento do biocarvão no solo tende a elevar as cargas negativas deste material (CHIA *et al.*, 2014).

Benefícios agronômicos dos biocarvões derivados de poda de árvores

Analisando os resultados das variáveis rendimento, teor de cinzas, teor de umidade, densidade, pH, PN e CTCef (Tabelas 1 e 5) verificou-se que, de modo

geral, os biocarvões derivados de folhas apresentam maior potencial para o uso como condicionador de solos do os biocarvões derivados de galhaos.

O caule das árvores, geralmente, apresenta maior teor de C do que as folhas. Logo, é nas folhas que se encontra maior conteúdo de outros elementos, como N, Ca, Mg, K, Fe, Si etc. (TAIZ; ZAIGER, 2010; FERNANDES *et al.*, 2018). Assim, analisando os resultados de rendimento, conteúdo de cinzas e composição elementar dos biocarvões, verificou-se que para retornar maior variedade de nutrientes ao solo, o uso das folhas é mais adequado, já para sequestrar C, os galhos consistem em melhor alternativa.

A variação na densidade dos biocarvões reforça a influência significativa da matéria-prima sobre a qualidade do biocarvão produzido. Maior densidade pode implicar em menores quantidades de produto aplicadas no campo. Os valores mais altos de densidade encontrados nos bicarvões derivados das folhas podem ser explicados pelo acúmulo de nutrientes ser maior do que naqueles oriundos de galhos (TAIZ; ZAIGER, 2010; FERNANDES *et al.*, 2018). Essa premissa é corroborada pelos maiores valores de cinzas nos biocarvões produzidos de folhas e pelo maior conteúdo de C total nos biocarvões derivados de galhos (Tabelas 1 e 2).

A capacidade de adsorção de água, indicada pelo teor de umidade, foi diferente nos biocarvões, sendo que aqueles produzidos de galhos de *T. grandis*, e de folhas de *S. macrophylla* e de *T. ciliata* apresentaram maior teor de umidade (Tabela 1). Esse é um indicativo do comportamento físico-hídrico desses biocarvões no solo, podendo consistir em boas alternativas para elevar a retenção de água no solo. Esta premissa é corroborada pelos altos valores de CTCef verificados nestes mesmos biocarvões (Tabela 5), indicando a presença de cargas negativas que podem contribuir para a retenção de água.

Em regiões com estação seca bem definida, como é o caso de Rondônia (FRANCA, 2015), esse é um indicativo importante, pois esses biocarvões podem ser mais bem estudados para o condicionamento físico-hídrico dos solos, principalmente, daqueles cultivados com culturas perenes, a fim de evitar ou reduzir o estresse hídrico das plantas.

A CTC é um indicador direto da capacidade de retenção de nutrientes. Os solos tropicais são reconhecidos pela baixa CTC que, mesmo em solos argilosos, não ultrapassa os 15 cmolc kg⁻¹, devido ao predomínio de argilominerais de baixa atividade e ao pouco teor de matéria orgânica destes solos (LUMBRERAS *et al.*,

2019). Assim, o biocarvão vem sendo reconhecido como um produto promissor para condicionar solos tropicais, devido a sua elevada CTC (DOMINGUES *et al.*, 2017). Todos os biocarvões produzidos apresentaram CTCef maior que 49 cmolc kg⁻¹ (Tabela 5).

As folhas de *S. macrophylla* geraram o biocarvão com maior de CTCef, próximo a 120 cmolc kg⁻¹, seguidas das folhas das espécies *K. grandifoliola* e *T. ciliata* (Tabela 5), indicando que esses produtos podem contribuir no condicionamento dos solos, aumentando substancialmente a retenção de nutrientes, como cálcio, magnésio, sódio, potássio e nitrogênio na forma amoniacal. Essa característica pode ser vantajosa em ambientes com baixa fertilidade ou nos quais a lixiviação de nutrientes é intensa, como em solos tropicais (NÓBREGA, 2011).

Constatou-se que os biocarvões derivados das folhas das espécies *T. ciliata* e *T. grandis* apresentaram os maiores valores médios de pH ($p < 0,05$), em comparação com os biocarvões provenientes de outras espécies e partes da planta (Tabela 5). Os biocarvões obtidos dos galhos apresentaram valores de pH menores em comparação com aqueles obtidos das folhas, com a exceção da espécie *T. grandis*, onde não houve diferença estatística entre os biocarvões das folhas e dos galhos (Tabela 5). Essa exceção pode ser explicada por uma composição química semelhante, principalmente dos teores de Ca, Mg, Na e K entre as folhas e galhos de *T. grandis* (Tabela 3), indicando que os materiais pirolisados desta espécie mantêm uma alcalinidade consistente independentemente da parte da planta utilizada.

A medida do pH em uma solução de NH₄Cl 1 M apresentou tendência similar à observada para o pH em água, o que reforça a consistência dos resultados. O uso de NH₄Cl 1 M para medir o pH pode fornecer informações adicionais sobre o comportamento dos biocarvões em diferentes condições de interação com íons presentes em soluções. A tendência similar sugere que as propriedades alcalinas dos biocarvões são robustas e mantêm-se estáveis em diferentes condições de teste (SILVA *et al.*, 2018).

É importante observar que os valores de pH não estão diretamente relacionados com o potencial de neutralização da acidez (BOLAN *et al.*, 2023; DOMINGUES *et al.*, 2017). O PN indica o valor de calagem dos materiais, ou seja, a capacidade de neutralizar a acidez ativa e trocável do solo, e essa característica é importante para a interação da planta com o ambiente, especialmente em solos

ácidos (DOMINGUES *et al.*, 2017). Os dados mostraram que biocarvões derivados de folhas de *T. ciliata* e de *S. macrophylla* têm maior capacidade de neutralizar a acidez do solo (Tabela 5), o que pode ser uma vantagem no condicionamento de solos mais ácidos (SILVA *et al.*, 2018).

Por outro lado, biocarvão obtido das folhas de *K. senegalensis* apresentou o menor PN. Entretanto, nos galhos, essa espécie apresenta um comportamento oposto, com um dos maiores PN. Essa diferença entre folhas e galhos pode sugerir que diferentes partes da planta influenciam papéis diferentes no equilíbrio químico, onde os galhos podem ter uma maior função em neutralizar, ou as folhas podem estar mais expostas a influências ambientais que diminuem sua capacidade de neutralização (SILVA *et al.*, 2018).

A menor relação C:N e maior relação H:C dos biocarvões obtidos das folhas, quando comparados àqueles derivados dos galhos também demonstra maior potencial agrônomo dos primeiros. Pois essas variáveis indicam menor recalcitrância e maior suscetibilidade a decomposição do material e, consequente, liberação dos nutrientes (DOMINGUES *et al.*, 2017; TRAZZI *et al.*, 2018).

Nas Tabelas 3 e 4, as espécies *K. senegalensis* e *K. grandifoliola* mostram variações significativas entre folhas e galhos em termos de concentração de nutrientes. *S. macrophylla* se destaca pela alta concentração de Ca no biocarvão gerado de folhas. A *T. grandis* apresenta níveis elevados de Mg tanto no biocarvão obtido das folhas, quanto dos galhos. Essa análise pode ajudar a identificar as espécies e partes das plantas mais ricas em determinados nutrientes, o que pode ser útil para determinar a finalidade de uso do biocarvão (TRAZZI *et al.*, 2018).

Na Tabela 4 observa-se que as espécies *T. grandis* e *T. ciliata* geraram biocarvões mais ricos em Fe e Cu, tanto de folhas, quanto de galhos. Os biocarvões da espécie *K. senegalensis* destacaram-se pela alta concentração de Si nas folhas e de Zn nos galhos. Já a *T. grandis* se destacou por possuir maior concentração de Mn e Si no biocarvão obtido dos galhos.

Os elementos Cd, Co, Cr, Ni e Pb não foram detectados nos tratamentos analisados, uma vez que seus teores estão abaixo dos limites de detecção do equipamento utilizado. Esses limites de detecção são específicos: 2,5 mg kg⁻¹ para Cd, Co e Ni, e 10 mg kg⁻¹ para Cr e Pb. Este resultado sugere que as concentrações desses elementos nos tratamentos são muito baixas, possivelmente

indicando um baixo risco de contaminação ambiental por esses metais pesados (GUILHERME *et al.*, 2005).

Esse resultado é relevante, pois a presença de Cd, Co, Cr, Ni e Pb em concentrações elevadas pode ser prejudicial tanto para o ambiente, quanto para a saúde humana. Os metais pesados englobam alguns, como o Pb, Cd, Hg, As, Ti, e U, bem como elementos essenciais ou micronutrientes em pequenas concentrações, mas que podem se tornar tóxicos em elevadas concentrações, como é o caso de Cu, Mn, Fe e Zn às plantas e animais (GUILHERME *et al.*, 2005).

Benefícios ambientais dos biocarvões derivados de poda de árvores

Os resultados do conteúdo elementar (C, H, O e N) e as relações moleculares (Tabela 6) evidenciam que os galhos, especialmente de *T. ciliata* e *K. grandifoliola*, produzem biocarvões com maior teor de C e menores teores de N, o que pode ser vantajoso para aplicações nas quais a estabilização de C é prioritária (DOMINGUES *et al.*, 2017). Sendo assim, a presença de C estável, que não se decompõe facilmente, é crucial para sequestrar C e não só para melhorar as propriedades físicas do solo.

Todos os biocarvões demonstraram potencial para elevar a fertilidade dos solos tropicais, bem como as suas condições físico-hídricas (Tabelas 1 a 5). Este condicionamento resulta em melhor ambiente para o desenvolvimento das plantas e maior potencial de sequestro de C na biomassa vegetal (MAJUMDER *et al.*, 2019; XU *et al.*, 2024).

Os biocarvões derivados de folhas e galhos apresentaram CTC mais elevada que a maioria dos solos cultivados no Brasil, com maior destaque para os biocarvões derivados de folhas (Tabela 5). Este resultado tem grande relevância, pois a CTC, além de ser uma propriedade chave na fertilidade do solo (NOVAIS *et al.*, 2007) é responsável pela retenção de nutrientes no solo e, por consequência, menor lixiviação e contaminação dos recursos hídricos (SHANMUGAVEL *et al.*, 2023). É sabido que esta propriedade é resiliente no solo, podendo até aumentar com o tempo em relação ao biocarvão recém incorporado (CHIA *et al.*, 2014).

O condicionamento do solo proporcionado pela incorporação do biocarvão também possibilita a redução do uso de insumos como calcário e adubos, diminuindo a pressão por recursos extraídos de rochas e/ou com elevado custo

energético de produção, como é o caso dos fertilizantes nitrogenados (LAPIDO-LOUREIRO; FIGUEIREDO NETO, 2008; SHANMUGAVEL *et al.*, 2023).

CONCLUSÃO

Conclui-se que a incorporação de biocarvões derivados de galhos e folhas de espécies florestais tem potencial de elevar a fertilidade do solo e o sequestro de carbono. As folhas geram biocarvões mais adequados ao condicionamento do solo, enquanto os galhos são apropriados para obter biocarvão mais rico em carbono e mais recalcitrante. Portanto, o retorno da biomassa dos galhos e folhas de forma conjunta à área de silvicultura consiste em boa estratégia para obter benefícios agronômicos e ambientais.

Se o material convertido em biocarvão for para a aplicação em outras áreas a escolha entre o uso de folhas ou galhos para o preparo do biocarvão deve considerar o objetivo específico do manejo do solo. Para a reposição de nutrientes, as folhas mostram-se mais adequadas, pois possuem um maior teor de nutrientes essenciais. Já os galhos, por sua maior concentração de carbono, são mais indicados quando o foco é o sequestro de carbono no solo. Assim, o melhor biocarvão para condicionamento do solo dependerá das necessidades específicas do solo e da cultura. A escolha ideal deve ser adaptada às características locais do solo e ao tipo de manejo agrícola.

A espécie *Tectona grandis* apresenta menor diferença nas propriedades dos biocarvões derivados das diferentes partes da planta.

Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Rondônia pela concessão de bolsa e taxa de bancada (Edital nº 9/2022; Edital nº 14/2023) e a Universidade de Santiago de Compostela pelo apoio na realização das análises.

REFERÊNCIAS

- AHSAN, M.; SINGH, M.; SINGH, R. P.; YADAV, V.; TANDON, S.; SAIKIA, B. K.; KARAK, T.; KHARE, P. An innovative circular model for recycling the wastes into biochar using distillation units. **Journal of Cleaner Production**, v. 361, Article 132258, 2022.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. **Standard method for chemical analysis of wood charcoal. D1762-84**. Philadelphia: ASTM, 1990.
- BOLAN, N.; SARMAH, A. K.; BORDOLOI, S.; BOLAN, S.; PADHYE, L. P.; van ZWIETEN, L.; SOORIYAKUMAR, P.; KHAN, B. H.; AHMAD, M.; SOLAIMAN, Z. M.; RINKLEBE, J.; WANG, H.; SINGH, B. P.; SIDDIQUE, K. H. M. Soil acidification and the liming potential of biochar. **Environmental Pollution**, v. 317, Article 120632, 2023.
- CHEN, S.; XIA, X.; DING, Y.; FENG, X.; LIN, Q.; LI, T.; BIAN, R.; LI, L.; CHENG, K.; ZHENG, J.; ZHANG, X.; XIA, S.; WANG, Y.; LIU, X.; PAN, G. Changes in aggregate-associated carbon pools and chemical composition of topsoil organic matter following crop residue amendment in forms of straw, manure and biochar in a paddy soil. **Geoderma**, v. 448, Article 116967, 2024.
- CHIA, C. H.; SINGH, B. P.; JOSEPH, S.; GRABER, E. R.; MUNROE, P. Characterization of an enriched biochar. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 108, p. 26-34, 2014.
- DOMINGUES, R. R.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, C. A.; de MELO, I. C. N. A.; MELO, L. C. A.; MAGRIOTIS, Z. M.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A. Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **Plos One**, v. 12, Article e0176884, 2017.
- EBC. European Biochar Certification. **Analytical Methods**. Disponível em: < <https://www.european-biochar.org/en/ct/8-Analytical-Methods> >. Acesso em: 6 out. 2024.
- FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. de; SANTOS, L. A. **Nutrição mineral de plantas**. 2. ed. Viçosa: SBCS, 2018. 670 p.
- FISCH, G.; MARENGO, J.; NOBRE, C. Clima da Amazônia. **Acta Amazonica**, n. 28, p. 102-126. 1997.
- FRANCA, R. R. da. Climatologia das chuvas em Rondônia: período 1981-2011. **Geografias**, v. 11, n. 1, 2015.
- GHODAKE, G. S.; SHINDE, S. K.; KADAM, A. A.; SARATALE, R. G.; SARATALE, G. D.; KUMAR, M.; PALEM, R. R.; AL-SHWAIMAN, H. A.; ELGORBAN, A. M.; SYED, A.; KIM, D.-Y. Review on biomass feedstocks, pyrolysis mechanism and physicochemical properties of biochar: State-of-the-art framework to speed up vision of circular bioeconomy. **Journal of Cleaner Production**, v. 297, Article 126645, 2021.
- GUILHERME, L. R. G.; MARQUES J. J.; PIERANGELI, M. A. P.; QUEIRÓZ, Z.; CAMPOS, M. L.; MARCHI, G. **Elementos-traço em solos e sistemas aquáticos**. In: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Tópicos em Ciência do Solo IV. Viçosa, MG: SBCS, 2005. p. 345-390.
- LAPIDO-LOUREIRO, F. E.; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, E. J. **Fertilizantes: agroindústria & sustentabilidade**. Brasília: Ministério de Ciência e Tecnologia, 2008.
- LUMBRERAS, J. F.; SILVA, L. M. da; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; WADT, P. G. S.; PEREIRA, M. G.; DELARMEILINDA-HONORÉ, E. A.; BURITY, K. T. L. **Guia de campo da XII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC de Rondônia**. Brasília, DF: Embrapa, 2019.
- MAJUMDER, S.; NEOGI, S.; DUTTA, T.; POWEL, M. A.; BANIK, P. The impact of biochar on soil carbon sequestration: meta-analytical approach to evaluating environmental and economic advantages. **Journal of Environmental Management**, v. 250, Article 109466, 2019.

MARCELINO, I. P.; LOSS, A.; ANDRADE, M. A. N. Potencialidades do uso do biochar para melhoria dos atributos edáficos. *In: MAGNONI JUNIOR, L.; FREITAS, C. M. de; LOPES, E. S. S.; CASTRO, G. R. B.; BARBOSA, H. A.; LONDE, L. R.; MAGNONI, M. da G. M.; SILVA, R. S.; TEIXEIRA, T.; FIGUEIREDO, W. dos S. Redução do risco de desastres e a resiliência no meio rural e urbano*. 2. ed. São Paulo: CPS, 2020. p. 584-601.

NÓBREGA, I. P. C. 2011. 38 f. **Efeitos do Biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: sequestro de carbono no solo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Instituto Técnico de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. 1017 p.

SANTOS, G. de A.; SILVA, L. S. da; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. de O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metropole, 2008. 654 p.

SANTOS, R. D. dos; SANTOS H. G. dos; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. dos; SHIMIZU, S. H. (Eds.). **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7. ed. Viçosa: SBCS, 2015. 102 p.

SHANMUGAVEL, D.; RUSYN, I.; SOLORZA-FERIA, O.; KAMARAJ, S.-K. Sustainable SMART fertilizers in agriculture systems: A review on fundamentals to in-field applications. **Science of The Total Environment**, v. 904, Article 166729, 2023.

SILVA, T. R.; PEDROSO, A. L. B.; OLIVEIRA, M. L. S. D.; SGANZERLA, N. C.; HANKE, D.; ALTEMBURG, S. G. N. **Determinação do potencial hidrogeniônico de biocarvões produzido a partir de diferentes fontes de biomassa vegetal**. *In: Anais do 10º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão – SIEPE*. Universidade Federal do Pampa - Santana do Livramento, 6 a 8 de novembro de 2018. Disponível em: https://guri.unipampa.edu.br/uploads/evt/arq_trabalhos/16620/seer_16620.pdf. Acesso em: 25 ago. 2024.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Tradução de Eliane Romanato Santarém [*et al.*]. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848 p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

TRAZZI, P. A.; HIGA, A. R.; DIECKOW, J.; MANGRICH, A. S.; HIGA, R. C. V. Biochar: realidade e potencial de uso no meio florestal. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 875-887, 2018.

WANG, J.; WANG, S. Preparation modification and environmental application of biochar: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 1002-1022, 2019.

XU, L.; WU, K. C.; DENG, Z. N.; HUANG, C. M.; VERMA, K. K.; PANG, T.; HUANG, H. R. Biochar and its impact on soil profile and plant development. **Journal of Plant Interactions**, v. 19, n. 1, Article: 2401356, 2024.

ZHANG, Y.; LI, M.; WANG, J. Effects of biochar on soil properties and crop yields: A review of recent advances. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 342, p. 108113, 2023.