

PROD. TEC. ITV DS - N025/2020

DOI: 10.29223/PROD.TEC.ITV.DS.2020.25.Pinto

## **PRODUÇÃO TÉCNICA ITV DS**

**USO DO BIOCARVÃO DE AÇAÍ E COMPOSTO COMERCIAL: EFEITO NA  
ISOTERMA DE P, NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO ESTÉRIL DE  
MINERAÇÃO E NO CRESCIMENTO DE *DIOCLEA APURENSIS***

**Duane Azevedo Pinto**

**Silvio Junio Ramos**

**Rafael Silva Guedes**

**Yan Nunes Dias**

**Cecílio Fróis Caldeira Jr**

**Markus Gastauer**

**Antonio Rodrigues Fernandes**

**Belém/PA**

**2020**

|                                                                                                                                                                                    |                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Título:</b> Uso do biocarvão de açaí e composto comercial: efeito na isoterma de P, nos atributos químicos do estéril de mineração e no crescimento de <i>Dioclea Apurensis</i> |                                 |
| <b>PROD. TEC. ITV DS - N0025/2020</b>                                                                                                                                              | <b>Revisão</b><br><br><b>00</b> |
| <b>Classificação:</b> ( ) Confidencial ( ) Restrita ( ) Uso Interno ( ) Pública                                                                                                    |                                 |

**Informações Confidenciais** - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

**Informações Restritas** - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

**Informações de Uso Interno** - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço

**Informações Públicas** - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados.

#### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

P659 Pinto, Duane Azevedo

Uso do biocarvão de açaí e composto comercial: efeito na isoterma de p, nos atributos químicos do estéril de mineração e no crescimento de *Dioclea apurensis* / Duane Azevedo Pinto; Rafael Silva Guedes; Silvio Junior Ramos; Yan Nunes Dias; Markus Gastauer; Cecílio Fróis Caldeira Jr; Antonio Rodrigues Fernandes. -- Belém, 2020.

24 p. : il.

Relatório Técnico (Instituto Tecnológico Vale) – 2020  
PROD.TEC.ITV.DS.N025/2020  
DOI 10.29223/PROD.TEC.ITV.DS.2020.25.Pinto

1. Isoterma P. 2. Fertilização fosfatada. 3. Resíduo de mineração.  
I. Guedes, Rafael Silva. II. Ramos, Silvio Junior. III. Dias, Yan Nunes. IV. Gastaur, Markus. V Caldeira Jr., Cecílio Fróis. VI. Fernandes, Antonio Rodrigues. VII Título

CDD 23. ed. 631.4098115

Bibliotecária responsável: Nisa Gonçalves / CRB 2 – 525

## RESUMO EXECUTIVO

A baixa disponibilidade de fósforo (P) é um dos principais problemas em áreas ricas em óxidos de Fe, o que dificulta o manejo da fertilização com fosfato devido às reações de sorção, notadamente nas áreas de mineração de Fe. O uso de materiais orgânicos, como biocarvão ou composto comercial são alternativas que podem reduzir os mecanismos de sorção de P e melhorar a fertilidade do solo, beneficiando a reabilitação de áreas impactadas pela mineração de Fe. Há poucos estudos sobre os efeitos da aplicação de substratos orgânicos e a fertilização com fosfato e seus mecanismos de sorção em solos minerados. Diante disto, este trabalho teve por objetivo avaliar as alterações nos atributos químicos do estéril de mineração de Fe, a capacidade máxima de sorção de P e o crescimento da *Dioclea apurensis* em função da aplicação de biocarvão de açaí e composto comercial. Para isso, um substrato coletado das pilhas de estéril de mineração de Fe da Província mineral de Carajás foi coletado e incubado por 30 dias com biocarvão de açaí (BC), composto orgânico comercial (CC) na proporção de 90% de estéril de mineração e 10% de BC e CC, mais o tratamento controle sem adição de compostos orgânicos (SC). O substrato da mineração com e sem a adição de biocarvão e composto comercial receberam cinco doses de P (0, 40, 80, 120 e 240 mg kg<sup>-1</sup> de P). Os resultados indicaram que adição de BC e CC promoveram aumento de pH e nutrientes ao estéril da mineração de Fe. As plantas cultivadas SC apresentaram maior crescimento. Os resultados dos experimentos de adsorção de P se ajustou bem ao modelo isotérmico de Langmuir. A capacidade máxima de adsorção de P reduziu em função da adição de BC. Assim, esses resultados permitem concluir que a aplicação de biocarvão de açaí reduziu a sorção de P, enquanto que tanto a aplicação de composto comercial como biocarvão podem alterar os atributos químicos e causar efeitos diferentes na dinâmica do fósforo em estéril de mineração.

**Palavra chave:** Isoterma P; fertilização fosfatada; resíduo de mineração.

## SUMÁRIO

|     |                                                                              |    |
|-----|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1   | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                                                      | 4  |
| 2   | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....                                             | 5  |
| 2.1 | Coleta e caracterização do estéril de mineração .....                        | 5  |
| 2.2 | Produção e caracterização do biocarvão e composto comercial.....             | 6  |
| 2.3 | Cultivo de plantas em casa de vegetação .....                                | 6  |
| 2.4 | Análise de plantas .....                                                     | 8  |
| 2.5 | Isotermas de adsorção de P .....                                             | 8  |
| 2.6 | Análise estatística .....                                                    | 9  |
| 3   | <b>RESULTADOS</b> .....                                                      | 9  |
| 3.1 | Alterações nos atributos do estéril .....                                    | 9  |
| 3.2 | Efeito do biocarvão de açaí e composto comercial na adsorção de P .....      | 10 |
| 3.3 | Crescimento da <i>Dioclea apurensis</i> .....                                | 11 |
| 4   | <b>DISCUSSÃO</b> .....                                                       | 13 |
|     | Efeito do biocarvão de açaí e composto comercial nos atributos do estéril de |    |
| 4.1 | mineração de Fe .....                                                        | 13 |
| 4.2 | Sorção de fósforo .....                                                      | 15 |
| 4.3 | Crescimento da <i>Dioclea apurensis</i> .....                                | 16 |
| 5   | <b>CONCLUSÃO</b> .....                                                       | 17 |
|     | <b>REFERÊNCIAS</b> .....                                                     | 18 |
|     | <b>APÊNDICE A</b> – Resultados e modelos de regressão .....                  | 22 |

## 1. INTRODUÇÃO

A Província mineral de Carajás (PMC) é uma das maiores províncias minerais do mundo e a mineração ocorre a céu aberto, ocasionando a reconformação da paisagem, com a formação de grandes cavas de mina e extensas pilhas de estéril (LOBATO *et al.*, 2005; GASTAUER *et al.*, 2018). Os substratos desses novos ambientes caracterizam pela elevada inclinação, baixa agregação e baixos teores de matéria orgânica e nutrientes (MITRE *et al.*, 2018), o que dificulta a recuperação.

As técnicas de recuperação em Carajás normalmente incluem revegetação com uso de espécies comerciais e nativas, bem como o manejo do solo com aplicação adubos minerais e orgânicos (GASTAUER *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2018). Nesse sentido, a fertilização fosfatada pode melhorar a funcionalidade química do solo e aumentar a disponibilidade de fósforo (P) (PENIDO *et al.*, 2019). Entretanto, o substrato dessas áreas mineradas apresentam elevados teores de oxihidróxidos de Fe e naturalmente baixos teores de P e alta capacidade de sorção do P aplicado via fertilização, o que reduz a eficiência dos programas de revegetação (SINGH *et al.*, 2015; VISCARRA; BUI, 2016). Desta maneira, torna-se necessário amenizar os processos de sorção de P no solo, a fim de promover maior eficiência na adubação fosfatada e das atividades de revegetação. Uma das maneiras para aumentar a disponibilidade de P no solo é adicionar materiais orgânicos ao substrato, para reduzir a adsorção de P no substrato, tornando o elemento mais prontamente disponível para as plantas (MANOLIKAKI *et al.*, 2016).

É rotineiramente utilizado um composto comercial nas atividades de revegetação das áreas mineradas de ferro em Carajás. No entanto, seus efeitos sobre a sorção de P em substratos minerados é desconhecido. Outro material orgânico amplamente encontrado no estado do PA é o açaí, principalmente o seu caroço após o beneficiamento da polpa. Estudos mostram que o caroço do açaí aplicado na forma de biocarvão promove melhorias nos atributos químicos do solo (SATO *et al.*, 2019). A conversão de resíduos orgânicos em biocarvão ou composto tem sido amplamente utilizada pela capacidade multifuncional para aplicações agrícolas e ambientais (DE SOUZA *et al.*, 2019). Vários estudos demonstraram que a adição de biocarvão e composto orgânico podem melhorar o fósforo disponível no solo (YANG *et al.*, 2016; ARIF *et al.*, 2018).

Portanto, a aplicação de biocarvão e composto comercial podem ser alternativas capazes reduzir os mecanismos de sorção de P em substratos minerados, além de aumentar a eficiência do uso dos fertilizantes fosfatados e promover maior crescimento de plantas nos substratos minerados de Carajás. Assim, o objetivo do presente estudo foi investigar as alterações nas propriedades químicas de um estéril da mineração de ferro após adição de biocarvão de açaí e composto comercial, bem como avaliar as isotermas de adsorção de P em função da adição desses materiais e o efeito no crescimento de uma espécie nativa de Carajás.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1. Coleta e caracterização do estéril de mineração**

O substrato utilizado no presente estudo foi coletado na Província Mineral de Carajás (PMC), situado no sudeste do estado do Pará-Brasil. As reservas minerais da PMC estão associadas ao seu arcabouço geológico e mineralógico com importantes reservas de ferro (Fe), manganês (Mn) e cobre (Cu) (GALARZA; MACAMBIRA, 2002).

A amostragem ocorreu em taludes de pilhas de estéril, na profundidade de 0-20 cm, o substrato depois de coletado foi seco em temperatura ambiente e peneirado (2 mm) e encaminhados para as análises químicas e físicas, de acordo com Embrapa (2017); pH foi determinado em água na proporção de 1:2.5. O P e K foram extraídos com solução de Mehlich-1 ( $0.05 \text{ mol L}^{-1}$  de HCl +  $0.0125 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ); onde K foi determinado por fotometria de chama e o P foi determinado por colorimetria. O  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  trocáveis foram extraídos com KCl 1M, onde  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  foram determinados por espectrometria de absorção atômica e  $\text{Al}^{3+}$  foi determinado por titulação. A acidez potencial (H+Al) foi determinada por extração com acetato de cálcio 0,5M e quantificado por titulação. Os teores disponíveis de Fe, Mn, Zn e Cu foram extraídos em solução de DTPA a pH 7.3 e determinados por espectrometria de absorção atômica (IAC, 2011). O teor de matéria orgânica (MO) foi estimado pela concentração de carbono orgânico do solo determinada por combustão úmida (Embrapa 2017). As formas cristalinas de Fe e Al foram extraídas com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB) e os óxidos pouco cristalinos de Fe e Al por oxalato ácido de amônio (LOEPPERT AND INSKEEP, 1996; MEHRA AND JACKSON, 1960).

## 2.2 Produção do biocarvão e caracterização dos materiais orgânicos

Foram utilizados dois materiais, sendo o primeiro um composto comercial amplamente utilizado nas atividades de revegetação em Carajás, este material é o resultado da compostagem de materiais orgânicos de origem vegetal e animal. O outro material utilizado foi um biocarvão produzido a partir do caroço de açaí, coletado em feiras urbanas da cidade de Belém, Pará. O material foi lavado em água destilada três vezes, e em seguida foi seco em estufa a 50°C por 24 h. A temperatura de pirólise foi 400 °C durante 4 h, em um forno mufla com taxa de aquecimento de 3.3°C min<sup>-1</sup>. O material foi resfriado lentamente dentro da mufla para posterior pesagem. Após o processo de pirólise, o biocarvão foi macerado em cadinho de porcelana e passado por uma peneira de malha de 2 mm.

Os teores de macro e micronutrientes no composto comercial e no biocarvão de açaí foram analisados pelo método EPA 3051A e quantificados por espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS). A capacidade de troca catiônica foi medida por extração de acetato de amônio (NH<sub>4</sub>OAC) (SONG & GUO, 2012). Resumidamente, 40 mL de NH<sub>4</sub>OAC 1 M foram adicionados a 0.1 g de biocarvão (1g em caso de solo), em tubo de 50 mL e subsequentemente agitado (20 min) e filtrado. Posteriormente, o resíduo foi lavado com 30 mL de isopropanol (para remover o excesso de NH<sub>4</sub>) e 40 mL de KCl 1 M (para remover o NH<sub>4</sub> das cargas do solo). O NH<sub>4</sub><sup>+</sup> contido na solução de KCl foi quantificado utilizando o método colorimétrico de salicilato (HAGEMANN *et al*, 2017), e a CTC (cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>) foi calculado normalizando a quantidade de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> com o peso do biocarvão ou do composto (0,1 g).

## 2.3 Cultivo de plantas em casa de vegetação

O experimento foi conduzido em casa de vegetação em vasos de polietileno com volume de 1 dm<sup>3</sup> (peso seco), os tratamentos aplicados na base da matéria seca (m/m) foram 90% de estéril de mineração com 10% de biocarvão de açaí (EB); 90% de estéril de mineração com 10% de composto comercial (EC); e estéril de mineração sem a adição de qualquer material orgânico (tratamento de controle, E) (Tabela 1). Foram utilizados 10% de compostos orgânicos devido ao alto teor de Fe do substrato. Após a geração das misturas, as amostras foram incubadas a 60 % da umidade da capacidade de campo por 30 dias. As amostras foram totalmente agitadas por 10 min diariamente. O substrato da mineração com e sem a adição de biocarvão e composto comercial receberam cinco doses de P 0, 40, 80, 120 e 240 mg kg<sup>-1</sup> de P (Fosfato monoamônico), e

o teor de N em cada dose de P foi abatido da quantidade final de N a ser aplicada. As doses usadas foram estabelecidas com base em experimentos anteriores no Instituto Tecnológico Vale com espécies nativas da região de Carajás.

**Tabela 1**

Identificação para os tratamentos de acordo com a mistura do composto comercial e biocarvão de açaí com estéril.

| Mistura de estéril                | Identificação e doses de P          |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Controle: Estéril                 | E-0, E-40, E-80, E-120 e E-240      |
| 10% de biocarvão + 90% de estéril | EB-0, EB-40, EB-80, EB-120 e EB-240 |
| 10% de composto + 90% de estéril  | EC-0, EC-40, EC-80, EC-120 e EC-240 |

A espécie nativa *Dioclea apurensis* amplamente encontrada em Carajás e utilizada nas atividades de revegetação das áreas mineradas foi utilizada nesse estudo. As sementes dessa espécie foram coletadas nas áreas nativas de Carajás, depois transferidas para sacos de papel e armazenadas na câmara de sementes a baixa temperatura e umidade do ar para o semeio nos diferentes tratamentos.

O delineamento utilizado nesse estudo foi o inteiramente casualizado, com quinze tratamentos e cinco repetições, totalizando 75 unidades experimentais. O composto comercial e o biocarvão de açaí foram misturados e homogeneizados ao estéril e permaneceu incubado em sacos plásticos por 30 dias, mantido a 60 % da umidade da capacidade de campo. As amostras incubadas foram totalmente agitadas por 10 min diariamente.

Antes do plantio, sementes de *Dioclea apurensis* foram escarificadas com lixa manual para quebra de dormência. As sementes foram semeadas diretamente nos vasos, três sementes para cada vaso. Após 30 dias foi feito o desbaste para uma planta por vaso, seguindo critérios de uniformidades das plantas. O cultivo foi conduzido durante 120 dias. A temperatura e a umidade relativa do ar na casa de vegetação foram mantidas em 28 °C e 88%, respectivamente. Os vasos foram regados diariamente com água destilada.

Cada vaso recebeu doses de macro e micronutrientes de forma parcelada, uma aplicação antes da semeadura, à segunda aplicação aos 45 dias e a terceira aplicação aos 90 dias, com exceção de P. O fosfato monoamônico (MAP) foi utilizado para cinco doses (0, 40, 80, 120 e 240 mg kg<sup>-1</sup> de P) e completado com Uréia (115, 96.5, 78.8, 59.6 e 4.2 mg kg<sup>-1</sup> de N), respectivamente. 100 mg kg<sup>-1</sup> de K na forma de KCl, 80 mg kg<sup>-1</sup> de Ca na forma de CaCl<sub>2</sub> e 25 mg kg<sup>-1</sup> de Mg na forma de MgSO<sub>4</sub> foram utilizados como fonte de potássio, cálcio e magnésio, respectivamente. Para micronutrientes foram

aplicados  $0.5 \text{ mg kg}^{-1}$  de B na forma de  $\text{H}_3\text{BO}_3$  de alta qualidade,  $3.6 \text{ mg kg}^{-1}$  de Mn na forma de  $\text{MnSO}_4$ ,  $1.5 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cu na forma de  $\text{CuSO}_4$ ,  $0.5 \text{ mg kg}^{-1}$  molibdato de amônio,  $5 \text{ mg kg}^{-1}$  de Zn na forma  $\text{ZnSO}_4$ .

#### 2.4 Análises de plantas

Após o período de cultivo de 120 dias, as plantas foram colhidas e separadas em parte aéreas e raízes, sendo imediatamente quantificada a biomassa fresca. A avaliação da biomassa seca nesses tecidos foi feita por secagem em estufa de ventilação forçada de ar, a  $65^\circ\text{C}$  até peso constante, com posterior pesagem e moagem do material seco. Os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn foram determinados segundo descrito por MALAVOLTA et al. (1997).

O teor de N foi determinado pelo método Kjeldahl. As amostras foram submetidas à digestão nitroperclórica em bloco digestor, para determinar os teores de macro e micronutrientes. Nesse extrato, os teores de Ca, Mg, Cu, Fe e Zn foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica, o de K, por fotometria de chama, e o de S, por turbidimetria (ALVAREZ *et al.*, 2001). O B foi extraído por incineração e determinado por colorimetria de azometina (MALAVOLTA *et al.*, 1997).

#### 2.5 Isoterma de adsorção de P

Foram realizados testes de adsorção para determinar a capacidade máxima de adsorção de P nos substratos. A mesma proporção de 10% (m/m) dos materiais (biocarvão de açaí e composto comercial) misturados ao estéril, incubados no período de 30 dias foram utilizados. Um total de 0,1 g de cada substrato de cultivo foram pesados e misturados com 30 mL de KCL  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  contendo 40, 80, 120, e  $240 \text{ mg L}^{-1}$  de P ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ). As amostras foram agitadas por 24 h em temperatura ambiente. As suspensões foram então centrifugadas (3000 rpm, 30 min) e depois filtradas através de papel filtro Whatman 42. O extrato de P foi analisado pelo método colorimétrico (azul-molibdênio).

Com os dados obtidos, duas equações isotérmicas foram testadas para simular o comportamento de P nos substratos:

$$x/m = K_L C B_L / 1 + K_L C, \text{ Langmuir} \quad (1)$$

$$x/m = K_F C^n, \text{ Freundlich} \quad (2)$$

onde  $x/m$  é a quantidade de P sorvido em  $\text{mg g}^{-1}$ ;  $K_L$  e  $K_F$  é a constante de Langmuir e Freundlich relacionada a energia de ligação em  $\text{L mg}^{-1}$ ;  $C$  é a concentração de P na

solução de equilíbrio em  $\text{mg L}^{-1}$ ;  $\beta_L$  é a capacidade máxima de adsorção de P em  $\text{mg kg}^{-1}$ .

## 2.6 Análise estatística

Todas as análises estatísticas foram realizadas com os dados em distribuição normal (Shapiro-Wilke) e submetidos à ANOVA. Quando apresentou diferença significativa, as médias foram comparadas pelo teste de Scott Knott ( $P < 0,05$ ). Os dados referentes às doses de P foram submetidos à análise de regressão, calculada para equações lineares e quadráticas. A análise estatística foi realizada no ambiente R, versão 3.2.4 r (R Development Core Team 2018).

## 3. RESULTADOS

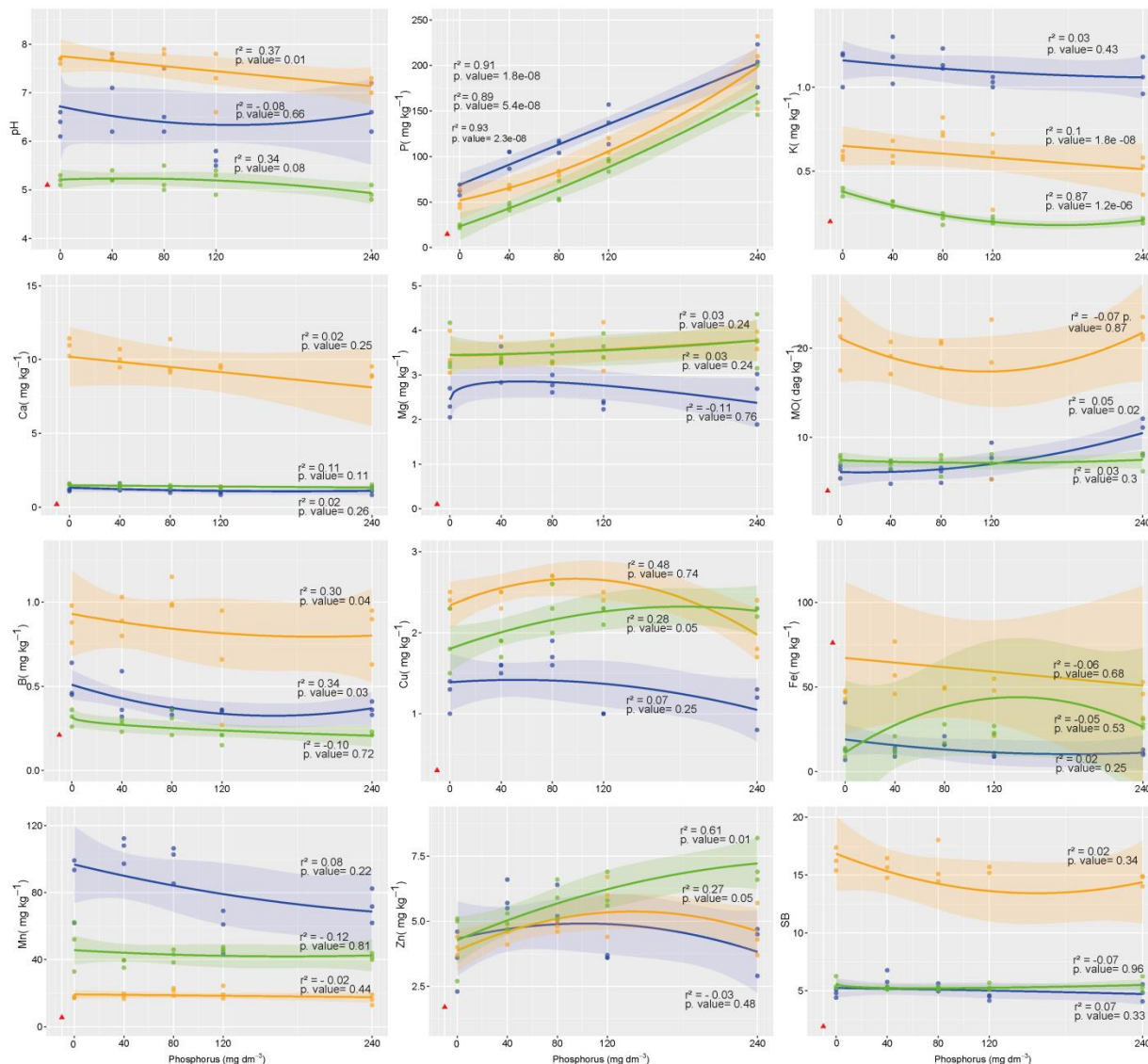
### 3.1 Alterações nos atributos do estéril

Os atributos químicos do estéril, antes e após a aplicação do biocarvão de açaí e composto comercial e, posteriormente cultivado com *D. apurensis*, podem ser encontrados na figura 1. Observou-se que a aplicação de ambos os materiais orgânicos foi favorável em aumentar a disponibilidade de nutrientes no estéril durante o cultivo da *D. apurensis*.

O pH do estéril foi inferior durante o cultivo da *D. apurensis* sem a aplicação do biocarvão e composto comercial em todas as doses de P. Por outro lado, a aplicação de composto comercial promoveu os maiores valores de pH do estéril de mineração de Fe, mas que tendeu a reduzir o pH à medida que elevou as doses P no estéril, enquanto que a aplicação do biocarvão proporcionou valores intermediários ao pH do estéril, não variando em função das doses P aplicadas.

Quando aplicados, o biocarvão e o composto comercial promoveram maior disponibilidade de P no estéril, sendo os maiores valores obtidos quando o biocarvão foi utilizado. Por outro lado, a aplicação desse produto levou ao menor teor de Mg e Cu e, manteve baixa a SB, semelhante ao estéril sem a adição de tratamento. Biocarvão também promoveu maior disponibilidade de K e Mn durante o cultivo da *D. apurensis*, embora não houve incremento nos teores de ambos os elementos. A aplicação do composto comercial elevou os teores de Ca, MO, B e SB em todas as doses de P, e nas doses iniciais de P para o teor de Cu no estéril. De maneira geral, os teores de Fe em todas as doses de P, e o teor de Zn nas doses iniciais de P, não foram influenciados pela adição do biocarvão e composto comercial durante o cultivo da *D. apurensis*.

**Figura 1:** Atributos do estéril em função da aplicação de biocarvão (azul), composto comercial (laranja) e sem aplicação desses produtos (verde) após experimento. Triângulo vermelho representa atributos do estéril antes do cultivo de *D. apurensis* e sem a aplicação de biocarvão e composto comercial.



### 3.2 Efeito do biocarvão de açaí e composto comercial na adsorção de P

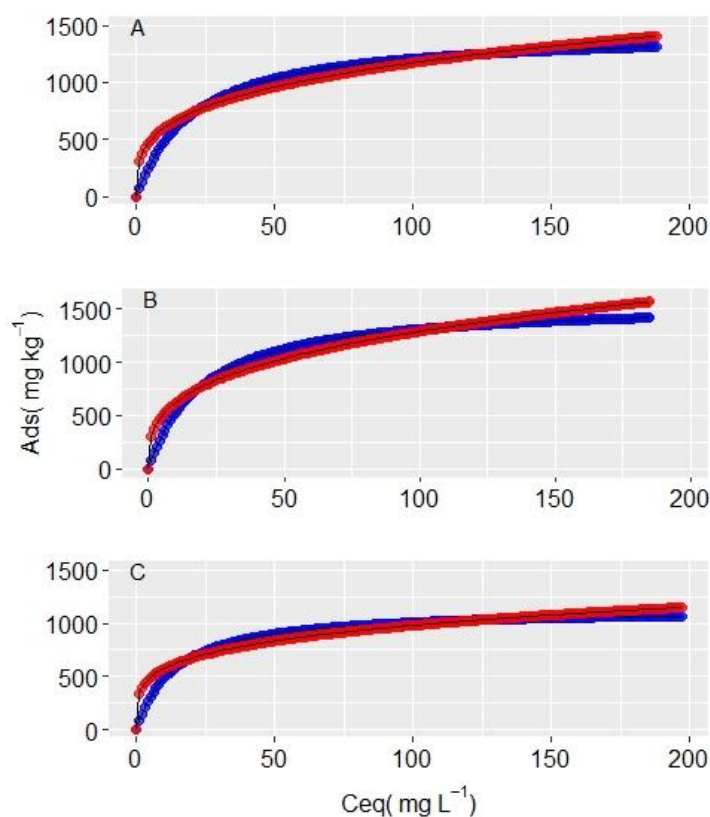
As isotermas de adsorção de P descrevem um comportamento aproximado entre as amostras de estéril que receberam ou não o biocarvão de açaí e composto comercial, cujo maior ajuste ocorreu pelo modelo de Langmuir (Tabela 2, Figura 2). O modelo de Freundlich previu um aumento na capacidade de adsorção (KF), assim como da intensidade deste processo (1/n) a partir da adição de biocarvão ao estéril da mineração. Entretanto, o modelo de Langmuir estimou a capacidade máxima de adsorção de P, a qual reduziu com a aplicação de biocarvão, reduzindo também a energia de ligação (K<sub>L</sub>) com que o P é retido.

**Tabela 2:** Ajustes e parâmetros das equações de Langmuir e Freundlich observados para adsorção de P em estéril sem emendas orgânicas (SC) com biocarvão (BC), e com composto comercial (CC).

| Sample | Langmuir |             |       | Freundlich |       |       |
|--------|----------|-------------|-------|------------|-------|-------|
|        | $K_L$    | $Ads_{max}$ | $R^2$ | $K_F$      | $1/n$ | $R^2$ |
| SC     | 0.05b    | 1452.5a     | 0.99  | 309.4a     | 3,46a | 0.93  |
| CC     | 0.05b    | 1564.7a     | 0.90  | 299.4a     | 3,16a | 0.78  |
| BC     | 0.07a    | 1144.2b     | 0.99  | 333.6b     | 4,27b | 0.87  |

$Ads_{max}$ : capacidade máxima de adsorção ( $mg\ kg^{-1}$ );  $K_L$ : constante de Langmuir relacionada à energia de ligação;  $K_F$  e  $1/n$ : constantes de Freundlich relacionadas à capacidade e intensidade de adsorção, respectivamente;  $R^2$ : ajustes dos modelos. Valores com a mesma letra não representa diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos pelo teste de Scott Knott.

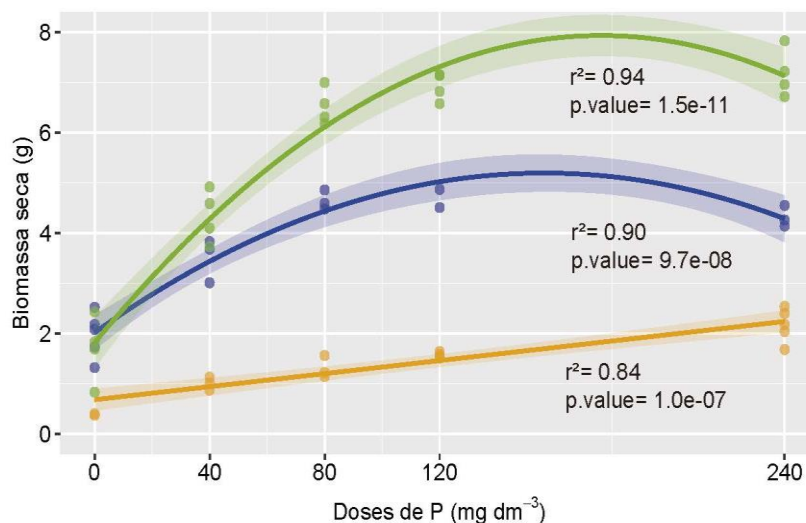
**Figura 2:** Isotermas de adsorção de P ajustadas aos modelos de Langmuir (azul) e Freundlich (vermelho) em estéril sem adição de emendas orgânicas (a), com composto comercial (b) e com biocarvão (c).



### 3.3 Crescimento de *Dioclea apurensis*

A produção de biomassa total de *D. apurensis* foi significativamente influenciada pelas doses de P, bem como pela presença ou ausência de biocarvão de açaí e composto comercial (Figura 3).

**Figura 3:** Biomassa seca total de *D. apurensis* em resposta a doses de P sem a aplicação de material orgânico (verde), com biocarvão de açaí (azul) e com composto comercial (laranja).



O aumento nas doses de P promoveu incremento na biomassa na *D. apurensis*, sendo a maior produção obtida na ausência de biocarvão e composto comercial. A aplicação de composto comercial levou a uma resposta linear e a menor produção na biomassa total na espécie estudada. Enquanto que a adição de biocarvão promoveu intermediária produção de biomassa na *D. apurensis*, não apresentando efeito no crescimento dessa espécie vegetal a partir da dose de 40 mg kg<sup>-1</sup> de P no estéril da mineração de ferro.

Os teores de nutrientes na parte aérea e nas raízes de *D. apurensis* são representados na tabela 4. De maneira geral, foi observado que os teores de Ca e B tenderam a ser maiores na parte aérea que nas raízes, enquanto que os teores de Cu e Fe foram maiores das raízes que na parte aérea. Na parte aérea, se observou que os teores de N e Fe apresentaram variação com os tratamentos aplicados. O teor de P aumentou somente na dose de 240 mg kg<sup>-1</sup> de P na presença de biocarvão de açaí. Além disso, os teores de K, S e B foram maiores na presença de biocarvão e composto comercial nas doses de P aplicadas. Da mesma maneira, o teor de Ca na parte aérea foi superior quando o composto comercial foi adicionado ao cultivo da *D. apurensis*.

Nas raízes, foi observado incremento maior do teor de P na maior dose desse elemento e na presença de biocarvão, enquanto que os teores de Mg e B não apresentaram variação com os tratamentos utilizados. Além disso, foi observado nas raízes que os teores de Fe e Cu foram sempre menores quando biocarvão e composto comercial foram adicionados ao cultivo da *D. apurensis*, enquanto o contrário foi observado, ou seja, o aumento para os teores de Ca e Mn dependeu da presença do

biocarvão, mas principalmente do composto comercial. Também, foi observado que os teores de N foram reduzidos pela aplicação do composto comercial no cultivo de *D. apurensis*.

**Tabela 4:** Análises dos teores de macro e micro nutrientes da parte aérea e raízes de *D. apurensis* em função das doses de P com estéril não tratado (E) tratado com biocarvão de açaí (EB) e com composto comercial (EC).

| Trat <sup>a</sup> . | N                  | P     | K      | Ca     | Mg    | S     | B                   | Cu     | Fe        | Mn       | Zn     |
|---------------------|--------------------|-------|--------|--------|-------|-------|---------------------|--------|-----------|----------|--------|
|                     | g kg <sup>-1</sup> |       |        |        |       |       | mg kg <sup>-1</sup> |        |           |          |        |
|                     | Parte aérea        |       |        |        |       |       |                     |        |           |          |        |
| <sup>b</sup> EC-0   | -                  | -     | -      | -      | -     | -     | -                   | -      | -         | -        | -      |
| <sup>c</sup> EB-0   | 21.3 a             | 1.0 b | 27.8 a | 9.1 b  | 5.6 a | 2.2 a | 37.9 a              | 2.3 b  | 251.5 a   | 812.3 a  | 36.4 a |
| <sup>d</sup> E-0    | 24.2 a             | 0.6 b | 13.8 b | 8.7 b  | 4.7 a | 1.4 b | 39.3 a              | 5.9 a  | 213.8 a   | 855.7 a  | 43.7 a |
| <sup>e</sup> EC-40  | 18.8 a             | 0.5 b | 16.1 b | 17.5 a | 3.2 b | 1.8 a | 35.3 a              | 2.6 b  | 229.1 a   | 86.3 c   | 30.5 a |
| <sup>f</sup> EB-40  | 20.5 a             | 0.7 b | 21.6 a | 7.8 b  | 4.9 a | 1.5 b | 39.0 a              | 2.8 b  | 307.3 a   | 646.1 b  | 32.4 a |
| <sup>g</sup> E-40   | 21.4 a             | 0.7 b | 12.1 b | 7.8 b  | 4.1 a | 1.3 b | 39.4 a              | 5.5 a  | 222.2 a   | 616.6 b  | 48.7 a |
| <sup>h</sup> EC-80  | 18.3 a             | 0.6 b | 19.6 a | 17.1 a | 3.5 b | 1.7 a | 40.4 a              | 2.4 b  | 215.4 a   | 93.4 c   | 17.4 b |
| <sup>i</sup> EB-80  | 19.8 a             | 0.9 b | 22.0 a | 7.8 b  | 4.3 a | 1.5 b | 42.3 a              | 3.2 b  | 198.2 a   | 761.4 a  | 24.3 b |
| <sup>j</sup> E-80   | 18.6 a             | 0.8 b | 9.9 b  | 8.4 b  | 3.1 b | 1.3 b | 37.9 a              | 3.8 b  | 219.6 a   | 536.6 b  | 40.5 a |
| <sup>l</sup> EC-120 | 18.0 a             | 0.5 b | 18.9 a | 18.3 a | 4.4 a | 1.8 a | 47.4 a              | 2.4 b  | 224.7 a   | 92.5 c   | 11.2 b |
| <sup>m</sup> EB-120 | 19.3 a             | 1.0 b | 21.9 a | 9.1 b  | 4.2 a | 1.9 a | 40.5 a              | 1.5 b  | 192.4 a   | 777.5 a  | 25.9 b |
| <sup>n</sup> E-120  | 20.0 a             | 0.8 b | 9.0 b  | 7.1 b  | 3.3 b | 1.3 b | 34.6 a              | 3.2 b  | 181.1 a   | 490.0 b  | 29.5 a |
| <sup>o</sup> EC-240 | 18.9 a             | 0.8 b | 15.5 b | 17.8 a | 3.4 b | 1.9 a | 43.2 a              | 1.8 b  | 152.9 a   | 72.4 c   | 7.0 b  |
| <sup>p</sup> EB-240 | 21.3 a             | 2.1 a | 25.4 a | 7.7 b  | 5.0   | 2.5 a | 42.5 a              | 2.1 b  | 201.3 a   | 833.7 a  | 32.4 a |
| <sup>q</sup> E-240  | 22.8 a             | 1.1 b | 8.1 b  | 6.2 b  | 2.9 b | 1.6 b | 24.9 b              | 3.4 b  | 235.3 a   | 513.0 b  | 35.1 a |
|                     | Raiz               |       |        |        |       |       |                     |        |           |          |        |
| <sup>b</sup> EC-0   | -                  | -     | -      | -      | -     | -     | -                   | -      | -         | -        | -      |
| <sup>c</sup> EB-0   | 24.0 a             | 1.9 b | 16.9 c | 3.5 d  | 3.4 a | 2.8 b | 20.8 a              | 29.1 a | 12930.9 b | 477.1 b  | 30.3 c |
| <sup>d</sup> E-0    | 25.2 a             | 0.9 c | 8.1 e  | 3.9 d  | 3.3 a | 2.1 d | 21.0 a              | 37.8 a | 30512.5 a | 969.5 a  | 77.9 a |
| <sup>e</sup> EC-40  | 19.3 c             | 0.7 c | 8.4 e  | 9.0 c  | 3.3 a | 1.9 e | 20.3 a              | 19.8 b | 16782.1 b | 553.9 b  | 28.5 c |
| <sup>f</sup> EB-40  | 21.2 b             | 1.0 c | 14.4 d | 3.6 d  | 3.2 a | 1.9 e | 20.4 a              | 23.7 b | 14085.0 b | 679.6 a  | 36.5 c |
| <sup>g</sup> E-40   | 20.2 b             | 1.1 c | 7.8 e  | 3.2 d  | 4.6 a | 1.9 e | 20.5 a              | 34.1 a | 3206.4 a  | 1008.4 a | 51.0 b |
| <sup>h</sup> EC-80  | 18.9 c             | 1.0 c | 11.1 e | 9.9 b  | 3.9 a | 2.8 b | 21.4 a              | 22.5 b | 26301.3 a | 809.8 a  | 38.9 c |
| <sup>i</sup> EB-80  | 23.7 a             | 1.6 b | 19.1 b | 3.5 d  | 4.3 a | 2.7 b | 20.9 a              | 21.4 b | 26301.3 b | 809.8 a  | 38.9 c |
| <sup>j</sup> E-80   | 23.7 a             | 1.6 b | 9.3 e  | 3.1 d  | 4.4 a | 2.1 d | 22.5 a              | 28.9 a | 29482.0 a | 1033.5 a | 49.5 b |
| <sup>l</sup> EC-120 | 17.3 c             | 0.8 c | 9.6 e  | 10.5 a | 3.6 a | 2.2 c | 20.2 a              | 18.3 b | 16928.3 b | 541.1 b  | 29.3 c |
| <sup>m</sup> EB-120 | 21.6 b             | 1.8 b | 21.9 a | 3.6 d  | 3.6 a | 3.3 a | 23.2 a              | 19.3 b | 17223.6 b | 660.6 b  | 33.5 c |
| <sup>n</sup> E-120  | 20.4 b             | 1.4 b | 7.7 e  | 3.6 d  | 4.2 a | 2.3 c | 24.1 a              | 28.6 a | 29482.0 a | 1033.5 a | 49.5 b |
| <sup>o</sup> EC-240 | 17.7 c             | 1.7 b | 9.8 e  | 10.8 a | 3.5 a | 2.5 c | 18.2 a              | 16.9 b | 12226.8 b | 396.7 b  | 21.5 c |
| <sup>p</sup> EB-240 | 24.6 a             | 4.5 a | 17.4 c | 3.5 d  | 3.7 a | 3.1 a | 20.5 a              | 14.1 b | 8952.2 b  | 450.4 b  | 41.0 c |
| <sup>q</sup> E-240  | 23.3 a             | 3.8 a | 8.7 e  | 4.1 d  | 4.6 a | 2.4 c | 19.8 a              | 18.5 b | 13821.4 b | 466.5 b  | 36.8 c |

<sup>a</sup>Matéria orgânica; <sup>b</sup>Capacidade de troca de cations; <sup>c</sup>Composto dose 0; <sup>d</sup>Biocarvão dose 0; <sup>e</sup>Estéril dose 0; <sup>f</sup>Composto dose 40; <sup>g</sup>Biocarvão dose 40; <sup>h</sup>Estéril dose 40; <sup>i</sup>Composto dose 80; <sup>j</sup>Biocarvão dose 80; <sup>l</sup>Estéril dose 80; <sup>m</sup>Composto dose 120; <sup>n</sup>Biocarvão dose 120; <sup>o</sup>Estéril dose 120; <sup>p</sup>Composto dose 240; <sup>q</sup>Biocarvão dose 240; <sup>r</sup>Estéril dose 240.

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1 Efeito do biocarvão de açaí e composto comercial nos atributos do estéril de mineração de Fe

A aplicação de biocarvão e composto comercial favoreceu o aumento do pH do substrato durante o cultivo de *D. apurensis*, o que pode estar relacionado ao elevado pH

do biocarvão, e a provável geração de cargas de superfície e elevada capacidade de retenção de íons  $H^+$  desses dois materiais orgânicos utilizados (MENSAH; FRIMPONG 2018). O aumento do pH do solo é reportado como um dos principais benefícios da aplicação de materiais orgânicos, o que também pode favorecer a retenção de cátions trocáveis ou elementos aniônicos essenciais, como o P ou S (PETRUCCELLI; DI LONARDO, 2020). Da mesma maneira, Forján *et al.*, (2018) testaram o efeito da aplicação de biocarvão e composto em estéril da mineração e observaram reduções na acidez do solo.

Apesar do aumento do pH do substrato de cultivo com a aplicação de biocarvão e composto comercial, o uso de fertilizantes fosfatados pode aumentar a acidez do solo, como observado neste estudo. Por isso, explica a redução no pH do solo com o aumento das doses de P nas misturas de estéril de mineração com materiais orgânicos observado no presente estudo. De acordo com Delgado *et al.* (2016), isso ocorre devido à liberação ou ganho de íons  $H^+$  pelas moléculas de fosfato em solos dependentes de pH. Este fato é confirmado por Bindraban *et al.* (2020) e Büll *et al.* (2004) que relataram que com a adição de fontes de P a base de  $H_2PO_4^-$  (como superfosfato simples ou triplo e monoamônio fosfato) há o aumento da acidez em solos com pH maior que 7,2, devido a dissociação de  $H^+$  da molécula de  $H_2PO_4$ , porém essas fontes não alteram a acidez do solo em condições ácidas, o que se relaciona com a condição do estéril não tratado ou tratado com biocarvão deste experimento.

A aplicação de biocarvão aumentou a disponibilidade de K, o que segundo Zhao *et al.*, (2020) pode estar associado à liberação lenta do nutriente retido na superfície do biocarvão, o que pode favorecer a absorção desse elemento pelas plantas cultivadas. Desta forma, o uso do biocarvão pode favorecer as práticas de recuperação do solo com espécies de maior demanda nutricional em K. No presente estudo, biocarvão tendeu a promover maior teor de K na parte aérea de *D. apurensis*. Além disso, o aumento da disponibilidade de outros elementos como o P, B e Mn foi observada no estéril de mineração, possivelmente devido à liberação desses nutrientes na estrutura ou da superfície desses materiais orgânicos utilizados (GAO *et al.*, 2016). De acordo com Prasad *et al.*, (2020), o biocarvão pode apresentar altas quantidades de Mn e P disponível, sendo prontamente liberado ao solo. Da mesma forma, Safaei khorram *et al.*, (2019) relataram que a aplicação de biocarvão aumentou a disponibilidade de K e P, promovendo benefícios ao crescimento das plantas. Por outro lado, é possível que o biocarvão reduza a disponibilidade de elementos que já estão em baixas quantidades no

solo como Mg e Cu (YANG *et al.*, 2018; YU *et al.*, 2019). No presente estudo, o biocarvão promoveu menor disponibilidade de Mg, Cu, Fe e Zn, enquanto menores teores de Mn foram encontrados na presença de composto comercial. Uma das principais aplicações do uso de biocarvão é a captura de elementos metálicos do solo, os quais reagem fortemente com as cargas de superfície desse material, podendo reduzir a disponibilidade desses para as plantas (XIANG *et al.*, 2020).

O efeito positivo do composto comercial foi mais facilmente observado para os aumentos dos teores de Ca, MO, B, além de Cu e SB no estéril de mineração utilizado nesse estudo. Algumas características dos materiais orgânicos como a elevada concentração de nutrientes são preponderantes para solos com baixos teores em nutrientes (PAPAFILIPPAKI *et al.*, 2015). Além disso, compostos comerciais podem ser produzidos pela compostagem e isso pode ser favorável para a maior liberação de nutrientes no solo (LIU *et al.*, 2019). Pelos resultados encontrados no presente estudo, verifica que o uso de biocarvão de açaí e composto comercial promovem benefícios nos atributos do substrato de mineração de Fe para o cultivo de plantas, no entanto, apresentam diferentes efeitos, ou seja, o incremento de alguns atributos do solo pode significar a redução de outros quando se aplica biocarvão ou composto comercial, fato também comprovado por Mensah and Frimpong (2018) e Safaei khorram *et al.*, (2019). Por isso, é importante que se avalie quais materiais orgânicos apresentam os melhores efeitos, podendo esses ser mais ou menos adsorvente e recalcitrante (YU *et al.*, 2019).

#### 4.2 Sorção de fósforo

O ajuste encontrado da adsorção de P aos modelos de Langmuir e Freundlich descreve condições de elevada afinidade entre o substrato de mineração de Fe com íons fosfato, o que pode gerar baixa disponibilidade de P nesse material. A elevada afinidade do P com o substrato ocorre devido a um conjunto de fatores observados neste estudo, como elevado teor de óxidos de Fe, tanto na forma cristalina como na forma pouco cristalina (Tabela 1). De acordo com Gérard (2016), as formas pouco cristalinas dos óxidos de Fe e Al apresentam maior carga de superfície, uma vez que possuem estrutura cristalina pouco consolidada, entretanto as formas cristalinas são de grande importância devida sua maior proporção no solo. Além disso, é importante considerar a forte presença de argilominerais observados no substrato, que possuem forte capacidade de interação com fosfato (WEI *et al.*, 2014).

Apesar do aumento da adsorção estimada pelo modelo de Freundlich, o modelo de Langmuir foi o melhor ajustado e estimou redução da capacidade máxima e da energia de adsorção do P em função da adição do biocarvão de açaí. A redução da capacidade de adsorção é um fenômeno observado com menor frequência quando se analisa materiais como biocarvão, tendo em conta o seu elevado potencial adsorptivo (RASHMI *et al.*, 2019). Entretanto, as possíveis alterações que o biocarvão causa no solo, como elevação do pH, liberação de substâncias orgânicas com elevada carga de superfície, a presença de outros íons em elevada concentração, além da liberação do P contido no biocarvão podem aumentar a disponibilidade de P, bem como reduzir a capacidade máxima de adsorção (NGATIA *et al.*, 2019).

O aumento da disponibilidade de P e a redução da capacidade de adsorção de P em função da aplicação de biocarvão foi observada também por Soenne *et al.* (2014) e Han *et al.* (2018), que atribuíram esse fato ao aumento do pH do solo promovido pelo uso desse material. As elevações de pH aumentam a formação de cargas negativas em superfície das partículas do solo, aumentando as forças de repulsão, reduzindo a adsorção de P, além de reduzir a formação de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , espécie química que preferencialmente adsorve nos colóides do solo (NGATIA *et al.*, 2019; XU *et al.*, 2014). É importante destacar que o aumento da disponibilidade de P e redução da  $\text{Ads}_{\text{max}}$ , promovida pela aplicação de biocarvão, não necessariamente implica em uma melhor condição de desenvolvimento para a planta, uma vez que a adição de biocarvão pode reduzir a disponibilidade de outros nutrientes (PURAKAYASTHA *et al.*, 2019). Da mesma forma, o uso de composto orgânico, mesmo sem efeito na  $\text{Ads}_{\text{max}}$ , pode ser importante para outras características fundamentais do solo como estruturação, CTC e pH (LIU *et al.*, 2019). Assim, Rodríguez-vila *et al.* (2015) observaram que a aplicação de composto orgânico mesmo em pouco tempo de incubação foi suficiente para elevar o pH de estéril de mina com elevada acidez, destacando a importância do uso de composto orgânico para a recuperação de áreas degradadas.

#### 4.3 Crescimento da *Dioclea apurensis*

A *D. apurensis* é uma espécie nativa das cangas ferruginosas de Carajás e conhecida por ser tolerante às condições edáficas desse ambiente (ZAPPI *et al.*, 2018), que apresentam solos ácidos e baixa disponibilidade de nutrientes (MITRE *et al.*, 2018). O resultado encontrado nesse estudo mostra que o crescimento de *D. apurensis* foi comprometido com a aplicação de biocarvão e composto orgânico, o que possivelmente

se deve a espécie apresentar baixa demanda de nutrientes, particularmente o P, assim a produtividade obtida reflete na resposta para os tratamentos utilizados. A adição do composto comercial promoveu a maior elevação do pH do substrato de cultivo, e isso implicou e menor crescimento dessa espécie, enquanto o biocarvão promoveu aumento intermediário pH do solo e crescimento da *D. apurensis*. Por outro lado, a não adição de ambos biocarvão e composto comercial não elevou o pH do estéril de mineração de Fe, e isso foi favorável para o maior crescimento da *D. apurensis*. Esse resultado corrobora com aos encontrados por Ramos *et al.* (2019) os quais observaram que o crescimento da *D. apurensis* foi favorecida pela adição de nutrientes sem realizar a elevação do pH do solo de cultivo. Desta maneira, o resultado encontrado aqui mostra que a *D. apurensis* é uma espécie tolerante a pH ácido, apresentando maior crescimento nessas condições, tendo seu crescimento comprometido em pH maior que 6.0 no substrato de cultivo.

O aumento do teor de P na parte aérea foi diretamente relacionado ao aumento da disponibilidade de P promovido pelo uso do biocarvão. Assim, quanto maior for à disponibilidade de P no solo, maior tende a ser o acúmulo do elemento na planta. Da mesma forma, o teor de Ca na parte aérea foi fortemente influenciado pelo alto teor do elemento no composto comercial. Por outro lado, a presença do composto comercial não foi eficiente em aumentar o teor de N na planta, e isso comprometeu o crescimento da *D. apurensis*. A taxa de crescimento vegetal foi diretamente relacionada à absorção de N pela planta, tendo em conta sua participação na formação de compostos nitrogenados como aminoácidos e proteínas (ZAGHDOUD *et al.*, 2016).

## 5. CONCLUSÃO

A aplicação de biocarvão de açaí e composto orgânico comercial apresentou benefícios nas alterações químicas do estéril de mina, devido ao aumento de pH e nutrientes. No entanto, o uso do biocarvão de açaí e composto comercial não refletiu diretamente no maior crescimento da *D. apurensis*, sendo menor crescimento sendo observado na aplicação do composto comercial. As doses de P e a acidez no solo favoreceram o crescimento da *D. apurensis*. A aplicação de biocarvão reduziu a capacidade máxima de adsorção, gerando atraso na retenção de P, ocasionando maior disponibilidade de P por mais tempo no estéril de mineração de Fe. Assim, o presente estudo mostrou que o biocarvão derivado do açaí pode ser uma alternativa para maximizar os benefícios da fertilização fosfatada e aumentar a absorção de P pelas

plantas, e ambos os materiais orgânicos mostraram serem úteis na melhoria dos atributos químicos nos solos impactados pela mineração de Fe.

## REFERÊNCIAS

ALVAREZ V., V.H. *et al.* **Métodos de análises de enxofre em solos e plantas.** Viçosa: UFV, 2001. 131p.

ARIF, M. S.; RIAZ, M.; SHAHZAD, S. M.; YASMEEN, T.; ASHRAF, M.; SIDDIQUE, M., . . . BUTTLER, A. Fresh and composted industrial sludge restore soil functions in surface soil of degraded agricultural land. **Sci Total Environ**, v. 619-620, p. 517-527 Apr 1. 2018.

BINDRABAN, P. S., DIMKPA, C. O., & PANDEY, R. (2020). Exploring phosphorus fertilizers and fertilization strategies for improved human and environmental health. **Biology and Fertility of Soils**, 56(3), 299–317. 2020. doi:10.1007/s00374-019-01430-2

BÜLL, L. T., COSTA, M. C. G., NOVELLO, A., FERNANDES, D. M., & VILLAS BÔAS, R. L.(2004). Doses and forms of application of phosphorus in vernalized garlic. **Scientia Agricola**, 61(5), 516–521. doi:10.1590/S0103-90162004000500009

DELGADO, A., QUEMADA, M., & VILLALOBOS, F. J. (2016). Fertilizers. In *Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture* (pp. 321–339). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-46116-8\_23

DE SOUZA, E. S.; DIAS, Y. N.; DA COSTA, H. S. C.; PINTO, D. A.; DE OLIVEIRA, D. M.; DE SOUZA FALCAO, N. P., . . . FERNANDES, A. R. Organic residues and biochar to immobilize potentially toxic elements in soil from a gold mine in the Amazon. **Ecotoxicol Environ Saf**, v. 169, p. 425-434 Mar. 2019.

EMBRAPA. (2017). **Manual de métodos de análise de solo.** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (3rd ed.). Rio de Janeiro: Embrapa Solos.

FORJÁN, R., RODRÍGUEZ-VILA, A., CERQUEIRA, B., COVELO, E. F., MARCET, P., & ASENSIO, V. (2018). Comparative effect of compost and technosol enhanced with biochar on the fertility of a degraded soil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(10), 610. doi:10.1007/s10661-018-6997-4

GASTAUER, M.; SILVA, J. R.; CALDEIRA JUNIOR, C. F.; RAMOS, S. J.; SOUZA FILHO, P. W. M.; FURTINI NETO, A. E.; SIQUEIRA, J. O. Mine land rehabilitation: Modern ecological approaches for more sustainable mining. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 1409-1422 2018.

GAO, S., HOFFMAN-KRULL, K., BIDWELL, A. L., & DELUCA, T. H. (2016). Locally produced wood biochar increases nutrient retention and availability in agricultural soils of the San Juan Islands, USA. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 233, 43–54. doi:10.1016/j.agee.2016.08.028

GÉRARD, F. (2016). Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils - A myth revisited. *Geoderma*, 262, 213–226. doi:10.1016/j.geoderma.2015.08.036

- HAN, Y., CHOI, B., & CHEN, X. (2018). Adsorption and Desorption of Phosphorus in Biochar-Amended Black Soil as Affected by Freeze-Thaw Cycles in Northeast China. *Sustainability*, 10(5), 1574. doi:10.3390/su10051574
- LIU, L., WANG, S., GUO, X., & WANG, H. (2019). Comparison of the effects of different maturity composts on soil nutrient, plant growth and heavy metal mobility in the contaminated soil. *Journal of Environmental Management*, 250(180), 109525. doi:10.1016/j.jenvman.2019.109525
- LIANG, B.; LEHMANN, J.; SOLOMON, D.; KINYANGI, J.; GROSSMAN, J.; O'NEILL, B., . . . NEVES, E. G. Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 5, p. 1719-1730 2006.
- LOBATO LM, ROSIE`RE CA, SILVA RCF, ZUCCHETTI M, BAARS FJ, SEOANE JCS, RIOS FX, PIMENTEL M, MENDES GE, MONTEIRO AM (2005) A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás-Controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província. In: Marini OJ, Queiroz ET, Ramos BW (eds) Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia, 1st edn. DNPM-CT/MINERAL-ADIMB, Brasília, pp 20–92.
- MALAVOLTA, E; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas. Princípios e aplicações. 2ª ed. Piracicaba : POTAFOS, 1997, 319p.
- MANOLIKAKI, I. I., MANGOLIS, A., DIAMADOPOULOS, E. The impact of biochars prepared from agricultural residues on phosphorus release and availability in two fertile soils. **Journal of Environmental Management**, 2016, 536-543. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.012>
- MENSAH, A. K., & FRIMPONG, K. A. (2018). Biochar and/or Compost Applications Improve Soil Properties, Growth, and Yield of Maize Grown in Acidic Rainforest and Coastal Savannah Soils in Ghana. **International Journal of Agronomy**, 2018, 1–8. doi:10.1155/2018/6837404
- MITRE, S. K.; MARDEGAN, S. F.; CALDEIRA, C. F.; RAMOS, S. J.; FURTINI NETO, A. E.; SIQUEIRA, J. O.; GASTAUER, M. Nutrient and water dynamics of Amazonian canga vegetation differ among physiognomies and from those of other neotropical ecosystems. **Plant Ecology**, v. 219, n. 11, p. 1341-1353 2018.
- NGATIA, L. W., GRACE III, J. M., MORIASI, D., BOLQUES, A., OSEI, G. K., & TAYLOR, R. W. (2019). Biochar Phosphorus Sorption-Desorption: Potential Phosphorus Eutrophication Mitigation Strategy. In **Biochar - An Imperative Amendment for Soil and the Environment** (pp. 1–15). IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.82092
- PAPAFILIPPAKI, A., PARANYCHIANAKIS, N., & NIKOLAIDIS, N. P. (2015). Effects of soil type and municipal solid waste compost as soil amendment on Cichorium spinosum (spiny chicory) growth. **Scientia Horticulturae**, 195, 195–205. doi:10.1016/j.scienta.2015.09.030
- PETRUCCELLI, R., & DI LONARDO, S. (2020). Role of biochars in soil fertility management of fruit crops. In *Fruit Crops* (pp. 431–444). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-818732-6.00031-9
- PRASAD, M., CHRYSARGYRIS, A., MCDANIEL, N., KAVANAGH, A., GRUDA,

- N. S., & TZORTZAKIS, N. (2020). Plant Nutrient Availability and pH of Biochars and Their Fractions , with the Possible Use as a Component in a Growing Media, 1–17. doi:10.3390/agronomy10010010
- PURAKAYASTHA, T. J., BERA, T., BHADURI, D., SARKAR, B., MANDAL, S., WADE, P., ET AL. (2019). A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: Pathways to climate change mitigation and global food security. *Chemosphere*, 227, 345–365. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.03.170
- VISCARRA ROSSEL, R. A.; BUI, E. N. A new detailed map of total phosphorus stocks in Australian soil. **Sci Total Environ**, v. 542, n. Pt B, p. 1040-9Jan 15. 2016.
- RAMOS, S. J.; GASTAUER, M.; MITRE, S. K.; CALDEIRA, C. F.; SILVA, J. R.; FURTINI NETO, A. E., . . . SIQUEIRA, J. O. Plant growth and nutrient use efficiency of two native Fabaceae species for mineland revegetation in the eastern Amazon. **Journal of Forestry Research**, 2019.
- RASHMI, I., JHA, P., & BISWAS, A. K. (2019). Phosphorus Sorption and Desorption in Soils Amended with Subabul Biochar. **Agricultural Research**. doi:10.1007/s40003-019-00437-3
- RODRÍGUEZ-VILA, A., COVELO, E. F., FORJÁN, R., & ASENSIO, V. (2015). Recovering a copper mine soil using organic amendments and phytomanagement with Brassica juncea L. **Journal of Environmental Management**, 147, 73–80. doi:10.1016/j.jenvman.2014.09.011
- SAFAEI KHORRAM, M., ZHANG, G., FATEMI, A., KIEFER, R., MADDAH, K., BAQAR, M., et al. (2019). Impact of biochar and compost amendment on soil quality, growth and yield of a replanted apple orchard in a 4-year field study. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 99(4), 1862–1869. doi:10.1002/jsfa.9380
- SATO, M. K.; DE LIMA, H. V.; COSTA, A. N.; RODRIGUES, S.; PEDROSO, A. J. S.; DE FREITAS MAIA, C. M. B. Biochar from Acai agroindustry waste: Study of pyrolysis conditions. **Waste Manag**, v. 96, p. 158-167Aug 1. 2019.
- SILVA, J. R.; GASTAUER, M.; RAMOS, S. J.; MITRE, S. K.; FURTINI NETO, A. E.; SIQUEIRA, J. O.; CALDEIRA, C. F. Initial growth of Fabaceae species: Combined effects of topsoil and fertilizer application for mineland revegetation. **Flora**, v. 246-247, p. 109-117 2018.
- SINGH, G.; GOYNE, K. W.; KABRICK, J. M. Determinants of total and available phosphorus in forested Alfisols and Ultisols of the Ozark Highlands, USA. **Geoderma Regional**, v. 5, p. 117-126 2015.
- SOINNE, H., HOVI, J., TAMMEORG, P., & TURTOLA, E. (2014). Effect of biochar on phosphorus sorption and clay soil aggregate stability. **Geoderma**, 219–220, 162–167. doi:10.1016/j.geoderma.2013.12.022
- SONG, W., & GUO, M. (2012). Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 94, 138–145. doi:10.1016/j.jaap.2011.11.01
- WEI, S., TAN, W., LIU, F., ZHAO, W., & WENG, L. (2014). Surface properties and phosphate adsorption of binary systems containing goethite and kaolinite. *Geoderma*,

213, 478–484. doi:10.1016/j.geoderma.2013.09.001

XIANG, W., ZHANG, X., CHEN, J., ZOU, W., HE, F., HU, X., ET AL. (2020). Biochar technology in wastewater treatment: A critical review. **Chemosphere**, 252, 126539. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.126539

XU, G., SUN, J., SHAO, H., & CHANG, S. X. (2014). Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity. **Ecological Engineering**, 62, 54–60. doi:10.1016/j.ecoleng.2013.10.027

YANG, X., IGALAVITHANA, A. D., OH, S.-E., NAM, H., ZHANG, M., WANG, C.-H., ET AL. (2018). Characterization of bioenergy biochar and its utilization for metal/metalloid immobilization in contaminated soil. **Science of The Total Environment**, 640–641, 704–713. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.05.298

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. **Environ Sci Pollut Res Int**, v. 23, n. 2, p. 974-84Jan. 2016.

YU, H., ZOU, W., CHEN, J., CHEN, H., YU, Z., HUANG, J., ET al. (2019). Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review. **Journal of Environmental Management**, 232(October 2018), 8–21. doi:10.1016/j.jenvman.2018.10.117

ZHAO, W., ZHOU, Q., TIAN, Z., CUI, Y., LIANG, Y., & WANG, H. (2020). Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain. **Science of The Total Environment**, 722, 137428. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137428

**APÊNDICE A-** Resultados de modelos de regressão para variáveis da figura 1 e 3.

| Substratos         | Variáveis                            | Modelos                                  | R <sup>2</sup> |
|--------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|----------------|
| Biocarvão de açaí  | pH                                   | $Y = 6.75 + (-7.152x) + 2.66x^2$         | -0.08          |
| Composto comercial | pH                                   | $Y = 7.75 + (-0.00x)$                    | 0.37           |
| Estéril            | pH                                   | $Y = 5.21 + 0.00x + (-0.00x^2)$          | 0.34           |
| Biocarvão de açaí  | P (mg kg <sup>-1</sup> )             | $Y = 6.75 + (-0.01x)$                    | 0.92           |
| Composto comercial | P(mg kg <sup>-1</sup> )              | $Y = 5.189 + 2.87x + 1.34x^2$            | 0.89           |
| Estéril            | P(mg kg <sup>-1</sup> )              | $Y = 2.327 + 4.750x + 5.491x^2$          | 0.93           |
| Biocarvão de açaí  | K(mg kg <sup>-1</sup> )              | $Y = 1.159 + (-7.205x) + 1.236x^2$       | 0.03           |
| Composto comercial | K(mg kg <sup>-1</sup> )              | $Y = 0.6508805 + (-0.00x)$               | 0.1            |
| Estéril            | K(mg kg <sup>-1</sup> )              | $Y = 3.789 + (-2.295x) + 6.589x^2$       | 0.87           |
| Biocarvão de açaí  | Ca(mg kg <sup>-1</sup> )             | $Y = 1.206377 + (-0.00x)$                | 0.02           |
| Composto comercial | Ca(mg kg <sup>-1</sup> )             | $Y = 10.190189 + (-0.00x)$               | 0.02           |
| Estéril            | Ca(mg kg <sup>-1</sup> )             | $Y = 1.4847799 + (-0.00x)$               | 0.25           |
| Biocarvão de açaí  | Mg(mg kg <sup>-1</sup> )             | $Y = 2.665 + 1.469x + (-9.600x^2)$       | -0.11          |
| Composto comercial | Mg(mg kg <sup>-1</sup> )             | $Y = 3.421195 + 0.00x$                   | 0.03           |
| Estéril            | Mg(mg kg <sup>-1</sup> )             | $Y = 3.414340 + 0.00x$                   | 0.03           |
| Biocarvão de açaí  | MO (dag kg <sup>-1</sup> )           | $Y = 6.105 + (-3.038x) + 8.875x^2$       | 0.5            |
| Composto comercial | MO (dag kg <sup>-1</sup> )           | $Y = 21.1045875 + (-0.00x) + 0.00x^2$    | 0.03           |
| Estéril            | MO (dag kg <sup>-1</sup> )           | $Y = 7.2622642 + 0.00x$                  | -0.07          |
| Biocarvão de açaí  | B(mg kg <sup>-1</sup> )              | $Y = 5.093 + (-2.288x) + 7.104x^2$       | 0.34           |
| Composto comercial | B(mg kg <sup>-1</sup> )              | $Y = 9.311 + (-1.384x) + 3.523x^2$       | -0.1           |
| Estéril            | B(mg kg <sup>-1</sup> )              | $Y = 11.323914 + (-1.107x) + 2.773x^2$   | 0.3            |
| Biocarvão de açaí  | Cu(mg kg <sup>-1</sup> )             | $Y = 1.389 + 1.120X + (-1.059X^2)$       | 0.07           |
| Composto comercial | Cu(mg kg <sup>-1</sup> )             | $Y = 2.338 + 6.652x + (-3.397x^2)$       | 0.48           |
| Estéril            | Cu(mg kg <sup>-1</sup> )             | $Y = 1.802 + 5.723x + (-1.572x^2)$       | 0.28           |
| Biocarvão de açaí  | Fe(mg kg <sup>-1</sup> )             | $Y = 17.03145 + (-0.03019x)$             | 0.07           |
| Composto comercial | Fe(mg kg <sup>-1</sup> )             | $Y = 67.23899 + (-0.067x)$               | -0.06          |
| Estéril            | Fe(mg kg <sup>-1</sup> )             | $Y = 11.323914 + 0.473293x + (-0.00x^2)$ | -0.05          |
| Biocarvão de açaí  | Mn(mg kg <sup>-1</sup> )             | $Y = 96.7403279 + (-0.1771x) + 0.00x^2$  | 0.08           |
| Composto comercial | Mn(mg kg <sup>-1</sup> )             | $Y = 19.2792 + (-0.00x)$                 | -0.02          |
| Estéril            | Mn(mg kg <sup>-1</sup> )             | $Y = 45.6600 + (-0.0432x)$               | -0.12          |
| Biocarvão de açaí  | Zn(mg kg <sup>-1</sup> )             | $Y = 4.329 + 1.151x + (-5.672x^2)$       | -0.03          |
| Composto comercial | Zn(mg kg <sup>-1</sup> )             | $Y = 3.872 + 2.138x + (-7.614x^2)$       | 0.27           |
| Estéril            | Zn(mg kg <sup>-1</sup> )             | $Y = 4.272 + 2.031x + (-3.346x^2)$       | 0.61           |
| Biocarvão de açaí  | SB                                   | $Y = 5.252075 + (-0.00x)$                | 0.07           |
| Composto comercial | SB                                   | $Y = 16.8432 + (-0.04x) + 0.00x^2$       | 0.02           |
| Estéril            | SB                                   | $Y = 5.352 + 5.97x$                      | -0.07          |
| Biocarvão de açaí  | Biomassa seca (mg kg <sup>-1</sup> ) | $Y = 2.017 + 4.066x + (-1.300x^2)$       | 0.9            |
| Composto comercial | Biomassa seca (mg kg <sup>-1</sup> ) | $Y = 0.6803846 + 0.006x$                 | 0.84           |
| Estéril            | Biomassa seca (mg kg <sup>-1</sup> ) | $Y = 1.816 + 6.948x + (-1.972x^2)$       | 0.94           |