

**INSTITUTO DE QUÍMICA  
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**FLAVIANA ANDRADE FARIA**

**Cinética da liberação de fertilizantes incorporados à biomassa do pseudocaule de  
bananeira torrefada**

**Araraquara  
2020**

**FLAVIANA ANDRADE FARIA**

**Cinética da liberação de fertilizantes incorporados à biomassa do pseudocaule de  
bananeira torrefada**

Tese apresentada ao Instituto de Química,  
Universidade Estadual Paulista, como parte dos  
requisitos para obtenção do título de Doutora em  
Química

**Orientador:** Prof. Dr. Clóvis Augusto Ribeiro

**Araraquara  
2020**

FICHA CATALOGRÁFICA

F224c Faria, Flaviana Andrade  
Cinética da liberação de fertilizantes incorporados à  
biomassa do pseudocaule de bananeira torrefada / Flaviana  
Andrade Faria. – Araraquara : [s.n.], 2020  
89 f. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista,  
Instituto de Química  
Orientador: Clóvis Augusto Ribeiro

1. Resíduos agrícolas. 2. Resíduos orgânicos como  
fertilizantes. 3. Carbonização. 4. Análise térmica. 5. Cinética  
química. I. Título.


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: "Cinética da liberação de fertilizantes incorporados à biomassa do pseudocaulo de bananeira torrefada"


AUTORA: FLAVIANA ANDRADE FARIA

ORIENTADOR: CLOVIS AUGUSTO RIBEIRO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em QUÍMICA, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. CLOVIS AUGUSTO RIBEIRO (Participação Virtual)   
Departamento de Química Analítica, Físico-Química e Inorgânica / Instituto de Química - UNESP - Araraquara

Prof.ª Dra. CAROLINA DOS SANTOS BATISTA BONINI (Participação Virtual)   
Coordenadora do Curso de Engenharia Agrônoma / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - UNESP - Dracena

Prof.ª Dr.ª EDILENE CRISTINA FERREIRA (Participação Virtual)   
Departamento de Química Analítica, Físico-Química e Inorgânica / Instituto de Química - UNESP - Araraquara

Prof.ª Dr.ª LUCIANA CAMARGO DE OLIVEIRA (Participação Virtual)   
Departamento de Física, Química e Matemática / Universidade Federal de São Carlos - UFSCar - Sorocaba

Prof.ª Dr.ª ROSA LUCIA SIMENCIO OTERO (Participação Virtual)   
Laboratório de Análise Térmica / Instituto de Química - USP - São Carlos

Araraquara, 14 de outubro de 2020

## DADOS CURRICULARES

### IDENTIFICAÇÃO

**Nome:** Flaviana Andrade Faria

**Nome em citações bibliográficas:** FARIA, Flaviana Andrade

**Nascimento:** 04/09/1981

**Nacionalidade:** Brasileira

**Naturalidade:** Itumbiara - GO

**Estado civil:** Solteira

### ENDEREÇO PROFISSIONAL

Avenida Presidente Juscelino Kubitschek de Oliveira, S/N - Jardim Tarraf II, São José do Rio Preto - SP, 15091-450

### FORMAÇÃO ACADÊMICA/TITULAÇÃO

- 2016 - 2020**      Doutoranda em Química.  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil  
Título: Cinética da liberação de fertilizantes incorporados à biomassa do pseudocaule de bananeira torrefada.  
Orientador: Clóvis Augusto Ribeiro
- 2010 - 2012**      Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos.  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil  
Título: Propriedades físico-químicas de abacate submetido a pré tratamento e secagem convectiva, Ano de obtenção: 2012  
Orientador (a): Maria Aparecida Mauro  
Bolsista da: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
- 2003 - 2008**      Graduação em Agronomia.  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil  
Título: Atividade antifúngica de extratos de folhas e ramos de *Momordica charantia* L. sobre *Sclerotium rolfsii* Sacc.  
Orientador (a): Marli de Fátima Stradioto Papa

### FOMAÇÃO COMPLEMENTAR

- 2011**              Microsoft EXCEL Avançado. (Carga horária: 20h).  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil
- 2010**              Curso de curta duração em Inovações em Bebidas Não Alcoólicas. (Carga horária: 8h).  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil
- 2010**              Curso de curta duração em Tecnologia Sucroalcooleira. (Carga horária: 8h).  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil
- 2008**              Jardinagem e Paisagismo. (Carga horária: 8h).  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil
- 2008**              Agricultura Orgânica e Agroecologia. (Carga horária: 4h).  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil
- 2007**              Legislação Profissional CREA/SP. (Carga horária: 5h).  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil
- 2004 - 2007**      Iniciação científica. (Carga horária: 783h).  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil
- 2006**              DEFTARA - Defesa Fitossanitária, Tecnologia de Aplicação e Receituário Agrônomo.  
(Carga horária: 16h).

- Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil
- 2006**                   Elaboração de resumos e Citações. (Carga horária: 4h).  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil
- 2005**                   Marketing Pessoal e Técnica de Vendas. (Carga horária: 6h).  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil
- 2005**                   Recursos Informativos disponíveis on-line. (Carga horária: 4h).  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil
- 2005**                   Homework. (Carga horária: 4h).  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil
- 2005**                   Biotecnologia e Qualidade de Alimentos. (Carga horária: 8h).  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil
- 2005**                   Apresentação oral utilizando o Power Point. (Carga horária: 4h).  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil
- 2004**                   Noções Básicas de Segurança Industrial. (Carga horária: 12h).  
Centrais Elétricas - Sede, FURNAS, Rio De Janeiro, Brasil
- 2004**                   Cana-de-açúcar. (Carga horária: 36h).  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil
- 2004**                   Produção de mudas (Estágio). (Carga horária: 71h).  
Centrais Elétricas - Sede, FURNAS, Rio De Janeiro, Brasil
- 2003**                   Extensão Rural. (Carga horária: 80h).  
COORDENADORIA DE ASSISTENCIA TECNICA INTEGRADA, CATI, São Paulo, Brasil
- 2003**                   Mercado de Trabalho do Engenheiro Agrônomo. (Carga horária: 36h).  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil

## **ATUAÇÃO PROFISSIONAL**

**2014 – Atual:** Professora Adjunta no Curso de Engenharia Civil da Universidade Paulista – UNIP, São José do Rio Preto/SP.

**2013 – 2018:** Professora nos Cursos de Engenharia Civil e Agronomia do Centro Universitário do Norte Paulista – UNORP, São José do Rio Preto/SP.

## **PRÊMIOS E TÍTULOS**

- 2016**                   Patronesse da II Turma do Curso de Agronomia, UNORP
- 2015**                   Prof.<sup>a</sup> Homenageada pela I Turma do curso de Agronomia, UNORP

## **PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **Artigos submetidos**

Flaviana Andrade Faria; Flávio Andrade Faria; Lucas Mattioli; Diogenes dos Santos Dias; Jorge Manuel Vieira Capela; Marisa Spirandeli Crespi; Marisa Veiga Capela; Clovis Augusto Ribeiro. Fertilizer release kinetics incorporated to torrefied banana-crop residues. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2020.

### **Artigos completos publicados em periódicos**

Diógenes dos Santos Dias; Flaviana Andrade Faria; Lucas Mattioli; Marisa Veiga Capela; Jorge Manuel Vieira Capela; Marisa Spirandeli Crespi; Clovis Augusto Ribeiro. Moisture adsorption of biochar from banana tree fiber according to the pyrolysis temperature. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2019.

Lima, Daniel L. de S.; Bott, Robson; Bello, Rodrigo D.; Nemoto, Marta C. M.; Faria, Flaviana A. Desempenho produtivo de soja em áreas de rotação com cana-de-açúcar. **Revista Ciência & Tecnologia: FATEC-JB**, v. 11, n. 1, p. 32-39, 2019. *ISSN 2178-9436*

Andrade, André. F. C.; Júnior, Nilton. C. A.; Souza, Valdemir A.; Faria, Flaviana A. Viabilidade do transporte de cana-de-açúcar. **Revista Ciência & Tecnologia: FATEC-JB**, v. 10, p. 10-27, 2018. *ISSN 2178-9436*

NAGAI, L. Y.; SANTOS, A. B.; FARIA, Flaviana A.; BOSCOLO, M.; MAURO, M. A. Osmotic Dehydration of Mango with Ascorbic Acid Impregnation: Influence of Process Variables. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 39, p. 384 - 393, 2015.

FARIA, Flaviana A.; BUENO, Cesar. J.; PAPA, Marli F. S. Atividade fungitóxica de *Momordica charantia* L. no controle de *Sclerotium rolfsii* Sacc. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 31, p. 383 - 389, 2009.

### **Trabalhos publicados em anais de eventos científicos**

RIBERIRO, CLÓVIS A.; FARIA, FLAVIANA A.; FARIA, FLÁVIO A.; DIAS, DIÓGENES S.; CAPELA, JORGE M. V.; Fertilizer release kinetics incorporated to banana-crop residues. In: XII Congresso Brasileiro de Análise Térmica e Calorimetria & V Congresso Pan-Americano de Análise Térmica e Calorimetria, 2020, Rio de Janeiro. **XII Congresso Brasileiro de Análise Térmica e Calorimetria & V Congresso Pan-Americano de Análise Térmica e Calorimetria**, 2020.

DIAS, DIÓGENES S.; FARIA, FLAVIANA A.; MATTIOLLI, L.; CRESPI, M. S.; RIBERIRO, C. A. Avaliação da adsorção de umidade por biocarvão obtidos em diferentes temperaturas de pirólise com o tempo. In: XI Congresso Brasileiro de Análise Térmica e Calorimetria, 2018, Rio de Janeiro. **XI Congresso Brasileiro de Análise Térmica e Calorimetria**, 2018.

NAGAI, L. Y.; FARIA, Flaviana Andrade; SANTOS, A. B.; BOSCOLO, M.; MAURO, M. A. Composition and Color Changes of Osmotically Processed Mango In: IUFoST 16th World Congress of Food Science and Technology, 2012, Foz do Iguaçu-PR. **IUFoST 16th World Congress of Food Science and Technology: Addressing Global Food Security and Wellness through Food Science and Technology**, 2012.

NAGAI, L. Y.; FARIA, Flaviana Andrade; SANTOS, A. B.; BOSCOLO, M.; MAURO, M. A. Vitamin C and Phenolic Compounds in Mangoes after Dehydration Process in Osmotic Solution Add Ascorbic Acid In: IUFoST 16th World Congress of Food Science and

Technology, 2012, Foz do Iguaçu-PR. **IUFoST 16th World Congress of Food Science and Technology: Addressing Global Food Security and Wellness through Food Science and Technology**, 2012.

NAGAI, L. Y.; FARIA, Flaviana Andrade; MAURO, M. A. CINÉTICA DE DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA DE MANGA (*Mangifera indica* L.) cv. PALMER In: IX Simpósio Latino Americano de Ciência de Alimentos, 2011, Campinas. **IX Simpósio Latino Americano de Ciência de Alimentos**, 2011.

FARIA, Flaviana Andrade; VIGANÓ, J.; NAGAI, L. Y.; MAURO, M. A. DIFUSIVIDADE EFETIVA NA SECAGEM DE ABACATE (*Persea Americana* MILL.) FRESCO E BRANQUEADO In: IX Simpósio Latino Americano de Ciência de Alimentos, 2011, Campinas. **Simpósio Latino Americano de Ciência de Alimentos**, 2011.

FARIA, Flaviana Andrade; VIGANÓ, J.; NAGAI, L. Y.; MAURO, M. A. ISOTERMAS DE DESSORÇÃO DE ABACATE (*Persea Americana* MILL.) FRESCO E BRANQUEADO In: IX Simpósio Latino Americano de Ciência de Alimentos, 2011, Campinas. **Simpósio Latino Americano de Ciência de Alimentos**, 2011.

OLIVEIRA, A. E. Z.; ISEPON, J. S.; QUEIROZ, J. R. G.; MARIANO, E.; ROSA, M. E.; QUINTANILHA, S.; FARIA, Flaviana Andrade; PEREIRA, L. B. Influência do armazenamento refrigerado associado ao uso de filme plástico na qualidade pós-colheita de pêra asiática In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 2010, Natal. **XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA**, 2010.

FARIA, Flaviana Andrade; BUENO, C. J.; Marli de Fátima Stradioto Papa. ATIVIDADE FUNGITÓXICA DE EXTRATOS DE *Momordica charantia* SOBRE *Sclerotium rolfsii* In: XXXI Congresso Paulista de fitopatologia, 2008, Campinas. **Summa phytopathologica**. Botucatu: Grupo Paulista de Fitopatologia, 2008.

FARIA, Flaviana Andrade; PEREIRA, W. V.; Marli de Fátima Stradioto Papa; BUENO, C. J. EFEITO FUNGITÓXICO DE EXTRATOS VEGETAIS SOBRE A GERMINAÇÃO DE ESPOROS DE *Fusarium oxysporum* In: XIX Congresso de Iniciação Científica, 2007, Ilha Solteira. **CD - XIX Congresso de Iniciação Científica da UNESP**, 2007.

MOURA, R. S.; TARSIANO, M. A. A.; MELO, M. A. G.; FARIA, Flaviana Andrade; PEREIRA, W. V. Análise do custo de produção e lucratividade da rúcula (*Eruka sativa*) no cinturão verde de Ilha Solteira In: XII Reunião de Iniciação Científica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006, Ilha Solteira. **RIC.**, 2006.

PEREIRA, W. V.; FARIA, Flaviana Andrade; CELOTO, M. I. B.; Marli de Fátima Stradioto Papa Desenvolvimento de *Colletotrichum* spp. em frutos tratados com extratos vegetais In: XXXIX Congresso Brasileiro de Fitopatologia, 2006, Salvador. **Revista Brasileira de Fitopatologia**, 2006.

FARIA, Flaviana Andrade; PEREIRA, W. V.; BUENO, C. J.; Marli de Fátima Stradioto Papa Efeito fungitóxico dos extratos de melão-de-são-caetano e pacari sobre *Sclerotium rolfsii*, *Rhizoctonia solani* e *Macrophomina phaseolina* In: XIV Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP, 2006, Piracicaba. **CD - XIV Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP**, 2006.

FARIA, Flaviana Andrade; BUENO, C. J.; Marli de Fátima Stradioto Papa SOBREVIVÊNCIA DE ESCLERÓDIOS DE *Sclerotium rolfsii* SUBMETIDOS AOS TRATAMENTOS COM EXTRATOS VEGETAIS In: XII Reunião de Iniciação Científica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006, Ilha Solteira. **RIC.**, 2006.

FARIA, Flaviana Andrade; Marli de Fátima Stradioto Papa; BUENO, C. J. SOBREVIVÊNCIA DE ESCLERÓDIOS DE *Sclerotium rolfsii* SUBMETIDOS AOS TRATAMENTOS COM EXTRATOS VEGETAIS In: XVIII Congresso de Iniciação Científica, 2006, Jaboticabal. **CD - XVIII Congresso de Iniciação Científica da UNESP**, 2006.

#### **Apresentações de trabalho**

FARIA, Flaviana Andrade; VIGANÓ, J.; Nagai, L. Y.; MAURO, M. A. **DIFUSIVIDADE EFETIVA NA SECAGEM DE ABACATE (*Persea americana* MILL.) FRESCO E BRANQUEADO**, 2011.

FARIA, Flaviana Andrade; VIGANÓ, J.; Nagai, L. Y.; MAURO, M. A. **ISOTERMAS DE DESSORÇÃO DE ABACATE (*Persea americana* MILL.) FRESCO E BRANQUEADO**, 2011.

FARIA, Flaviana Andrade; PEREIRA, W. V.; Marli de Fátima Stradioto Papa; BUENO, C. J. **EFEITO FUNGITÓXICO DE EXTRATOS VEGETAIS SOBRE A GERMINAÇÃO DE ESPOROS DE *Fusarium oxysporum***, 2007.

FARIA, Flaviana Andrade; PEREIRA, W. V.; BUENO, C. J.; Marli de Fátima Stradioto Papa **Efeito fungitóxico dos extratos de melão-de-são-caetano e pacari sobre *Sclerotium rolfsii*, *Rhizoctonia solani* e *Macrophomina phaseolina***, 2006.

FARIA, Flaviana Andrade; Marli de Fátima Stradioto Papa; BUENO, C. J. **Sobrevivência de escleródios de *Sclerotium rolfsii* submetidos aos tratamentos com extratos vegetais**, 2006.

#### **Demais produções técnicas**

FARIA, Flaviana A.; SOARES, José. A. **Projeto Pecuária de Leite. (Estágio CATI)**, 2003

#### **PARTICIPAÇÃO EM BANCAS**

BOLOGNINI, E. J.; ARMANI, J. A.; **FARIA, FLAVIANA ANDRADE**. Participação em banca de LARISSA SILVA; LAVÍNIA PELOZO; LETÍCIA AMADO; THAINÁ S. ESTUDO DA DOSAGEM DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE GARRAFA PET EM SUBSTITUIÇÃO

AOS MATERIAIS NATURAIS. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Paulista.

BOLOGNINI, E. J.; **FARIA, Flaviana Andrade**; ARMANI, J. A. Participação em banca de Beatriz Pascutti; Letícia Seron Petrocelli; Naynara Pereira. **CONFECÇÃO DE CONCRETO PERMEÁVEL COM TRITURADOS DE PNEUS**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Paulista.

ARMANI, J. A.; **FARIA, Flaviana Andrade**; BOLOGNINI, E. J. Participação em banca de Bárbara M.; Jhonatan F.; João G.; Raylander T; Rodrigo; Tiago. **Saneamento Básico e sua relação com o Meio Ambiente e a Saúde Pública**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Paulista.

ARMANI, J. A.; **FARIA, Flaviana Andrade**; BOLOGNINI, E. J. Participação em banca de FRANCIELLY ROCHA DOS SANTOS; THAINÁ REGINA LYRA. **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE ESTRUTURA METALICA E ESTRUTURA DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Paulista.

**FARIA, Flaviana Andrade**; ARMANI, J. A. Participação em banca de Ane Caroline Ferreira Ribeiro; Jeovane Silva Alves; Renan dos Santos Perozo; Yngrid Carolyne Torre. **"CONTROLE E GESTÃO DE PERDAS DE ÁGUA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE SÃO JOSÉ DO RIO PRETO"**, 2019. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

**FARIA, Flaviana Andrade**; ARMANI, J. A. Participação em banca de Eduardo Augusto Galvão; Higor Wueslei Alves; Maurício Joquim Jr; Paloma Soler; Pedro Nogueira; Thalles Biocarto. **"LIGHT STEEL FRAME X ALVENARIA - ESTUDO DE CASO COM PROJEÇÃO QUANTO Á VIABILIDADE"**, 2019. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

**FARIA, Flaviana Andrade**; ARMANI, J. A. Participação em banca de Igor Renato Margutti Grossi; Pedro Augusto Garcia; Pedro Henrique Frassatto; Robson Hiroito de Souza Canossa. **"ESTUDO DE PATOLOGIAS NO SISTEMA HIDRAULICO PREDIAL"**, 2019. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

**FARIA, Flaviana Andrade**; ARMANI, J. A. Participação em banca de Geovana dos Santos Oste; Gustavo Henrique Rosa; Taynan dos Santos Alves. **"ANÁLISE DA PROPOSTA DE FINANCIAMENTO DE UNIDADE ISOLADA - PFUI"**, 2019. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

**FARIA, Flaviana Andrade**; ARMANI, J. A. Participação em banca de André Luiz Viselli Souza; Ariovaldo Souza Novais; Saulo César R. Martins; Seomar G. Franhan. **"ESTUDO DA RESISTÊNCIA DO BLOCO DE CONCRETO COM FIBRAS DE GARRAFA PET"**, 2019. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

**FARIA, Flaviana Andrade;** ARMANI, J. A. Participação em banca de Ana Cláudia Figueiredo Navarrete; André Luis Fumagalli Zuliani; Felipe Jose Rodrigues Jorge; Henrique Nappi Zuliani; Letícia de Fátima Fernandes de Jesus. **"AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DA PAVIMENTAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DO ASFALTO - BORRACHA EM RELAÇÃO AO ASFALTO CONVENCIONAL"**, 2019. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

**FARIA, Flaviana Andrade;** ÁVILLA, J. Participação em banca de Elton José de Carvalho; Gustavo Silva Lima; Renan Augusto Cunha Migliaris; Vinícius Francelino Ferraz. **"ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES RESIDUAIS EM INDÚSTRIAS DE PINTURA ELETROSTÁTICA: DIMENSIONAMENTO E APLICABILIDADE"**, 2019. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

**FARIA, Flaviana Andrade;** NATALIN, L. A. Participação em banca de Bruna Cristina Bragiato Rodrigues; Bruno Henrique da Silva Viaro. **" PAVIMENTO ASFÁLTICO PERMEÁVEL"**, 2019. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

**FARIA, Flaviana Andrade;** NATALIN, L. A. Participação em banca de Carolyne Cadamuro Ferreira; Cecília Catalan Ferreira Trevelim; Gabriela Maria de Paula Bassos; Isadora Mazer Spergiorin; Renata Pessoa Ferreira. **"ESTUDO DE TIJOLO ECOLÓGICO COM MISTURAS DO BAGAÇO DA CANA DE AÇUCAR"**, 2019. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

**FARIA, Flaviana Andrade;** NATALIN, L. A. Participação em banca de Caroline Priscila Oliveira Leite; Isadora Sanches; Nathália Barbosa Queiroz; Pedro Henrique Calvo Camargo; Samara Salvagnini Turchetto; Rosa Elisabete Alves. **"ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICO COM A CONEXÃO À REDE ELÉTRICA EM HABITAÇÕES POPULARES"**, 2019. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

**FARIA, Flaviana Andrade;** VILELA, R. L. Participação em banca de Gustavo Adami; Jean Carlos Ferreira Nunes; Leonardo Zarpelon. **"ANÁLISE DAS PRINCIPAIS PATOLOGIAS EM PONTES DE CONCRETO ARMADO"**, 2019. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

NEMOTO, M. C. M.; **FARIA, Flaviana Andrade;** ARMANI, J. A. Participação em banca de Fabrícia N. Silva; José C. N.; Marcela F. Paula. **A escolha do melhor tipo de fundação**, 2015. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

NEMOTO, M. C. M.; **FARIA, Flaviana Andrade;** ARMANI, J. A. Participação em banca de Igor Colombo; Marcos M. S. Junior; Murilo R. C. Silva; Pamela. **Análise sobre a Resistência do Tijolo de Solo Cimento com a adição de pó de vidro**, 2015. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

OLIVEIRA, J. A.; **FARIA, Flaviana Andrade;** ARMANI, J. A.; NEMOTO, M. C. M.

Participação em banca de Fábio F. Vicentin; Hebert S. Ferreira; João E. M. Batista; J. **Compactação: Dificuldades Reais na Obra**, 2015. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

ARMANI, J. A.; **FARIA, Flaviana Andrade**; AZEVEDO, A. Participação em banca de Ricardo Paniche; Renato Fantini; Rafael C. T. Ferreira; Chry. **Estudo das Anomalias em Alvenaria Estrutural**, 2015. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

AZEVEDO, A.; **FARIA, Flaviana Andrade**; ARMANI, J. A. Participação em banca de Braian H. K. O. Wai; João V. Gasparini; Bruna Ornellas. **Estudo De Viabilidade Para Uso da Energia Fotovoltaica na Construção Civil**, 2015. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

ARMANI, J. A.; **FARIA, Flaviana Andrade**; NEMOTO, M. C. M. Participação em banca de Marília Peres; Priscila M. Batista; Anderson M. F. **Sistema construtivo Light Steel Frame x Sistema convencional para a construção de moradias populares**, 2015. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

ARMANI, J. A.; **FARIA, Flaviana Andrade**; AZEVEDO, A. Participação em banca de Eduardo Nakao; Lucas B. S. Santos; Caio M. Tavares; Vitor H. **Vantagens de uma construção auto-sustentável em relação a um sistema convencional**, 2015. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

ARMANI, J. A.; FARIA, Flaviana Andrade; NEMOTO, M. C. M. Participação em banca de Daniel Prado Rosa, Adriana Gouveia, Willian Cadurim. **Estudo das Patologias Hidráulicas**, 2014. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

FARIA, Flaviana Andrade; NEMOTO, M. C. M.; ARMANI, J. A. Participação em banca de Caio Vicente Mirosevic, Danilo Rogério Rocha, João Victor. **Reuso da Água em Instalações Hidráulicas**, 2014. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

ARMANI, J. A.; NEMOTO, M. C. M.; **FARIA, Flaviana Andrade**. Participação em banca de Raphael Mazim; Felipe Benfati Brandi; Gustavo Leite. **Segurança do trabalho aplicada na construção de edifício**, 2014. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

ARMANI, J. A.; FARIA, Flaviana Andrade; NEMOTO, M. C. M. Participação em banca de Barbara Laurienne Gonçalves, Diego Zeviani, Victor Costa. **Técnicas Construtivas De Pontes**, 2014. (Engenharia Civil) Universidade Paulista.

#### **PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS**

**IV Mostra dos Trabalhos de Extensão da Unesp**, 2017.

**IV Simpósio de Microbiologia do IBILCE/UNESP**, 2010.

**XXIV Semana de Engenharia de Alimentos**, 2010.

**II Encontro de Ciências da Vida**, 2008.

**XXX Congresso Paulista de Fitopatologia**, 2007.

XXIX Congresso Paulista de Fitopatologia, 2006.  
XXII Semana da Agronomia, 2006.  
XVIII Congresso de Iniciação Científica, 2006.  
XVII Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2005.  
XXI Semana da Agronomia, 2005.  
XX Semana da Agronomia, 2004.  
XIX Semana da Agronomia, 2003.

### **ORIENTAÇÕES DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**

Vinícius Ferrareze de Jesus; Mariana Cristina dos Santos Pedreti. **AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE CINZAS DE CALDEIRA NA PRODUÇÃO DE TIJOLO SOLO-CIMENTO EM SUBSTITUIÇÃO AO CONCRETO.** 2020. Curso (Eng. Civil) – Universidade Paulista, Bolsa Santander.

### **ORIENTAÇÕES DE TCC**

Ademir José Mialichi Júnior; Amado Batista; Claudemir Bazela. **Produtividade de Cana sob diferentes tipos de adubação.** 2016. Curso (Agronomia) - Centro Universitário do Norte Paulista.

Bruno Maurício; Fagner Lula; Leandro Comar. **Importância do Zoneamento Agoclimático na Heveicultura.** 2015. Curso (Agronomia) - Centro Universitário do Norte Paulista.

Daniel Leite de Souza Lima; Robson Bott; Rodrigo Duarte de Bello. **Desempenho produtivo de soja em áreas de rotação com cana-de-açúcar.** 2015. Curso (Agronomia) - Centro Universitário do Norte Paulista.

Luís O. G. Ferreira; Rosalvo S. Junior; Leonardo A. Silveira. **Projeto de fundação em Radier em Conjunto Popular em comparação às Sapatas Corridas.** 2015. Curso (Engenharia Civil) - Universidade Paulista.

Altair Ângelo de Amorim Junior; Bárbara Silva de Godoy; Clayton Gomes Martins, Franciele de Campos; Marina Pereira Michelin; Wanderson de Souza Neves. **Projeto de uma casa ecológica.** 2015. Curso (Engenharia Civil) - Centro Universitário do Norte Paulista.

André Fernando Camillo de Andrade, Nilton César Aguiar Júnior, Valdemir de Almeida Souza. **Viabilidade do Transporte de Cana-de-açúcar.** 2015. Curso (Agronomia) - Centro Universitário do Norte Paulista.

Ana Paula de Castro; Tiago da Silva Lula e Vagner Martinez. **Avaliação de Milho Transgênico.** 2014. Curso (Agronomia) - Centro Universitário do Norte Paulista.

Caio Vicente Mirosevic, Danilo Rogério Rocha, João Victor. **Reuso da Água em Instalações Hidráulicas.** 2014. Curso (Engenharia Civil) - Universidade Paulista.

*À Deus  
pela vida, por me dar forças  
para enfrentar todos os obstáculos*

*À minha mãe  
por todo esforço para que alcançasse  
novos degraus na minha educação*

*Ao meu irmão  
pelo companheirismo, paciência e compreensão*

*À minha avó, (In memoriam)  
por todo amor dedicado,  
gratidão e saudades eterna*

DEDICO

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por nunca me desamparar nos momentos mais difíceis da minha vida e iluminar meus pensamentos, possibilitando assim a superação de todos os obstáculos enfrentados nesta jornada.

Ao Prof. Dr. Clóvis Augusto Ribeiro, orientador, pela paciência, conforto à alma e oportunidade proporcionada para a realização deste projeto.

Ao Prof. Dr. José Anchieta Gomes Neto, pelo auxílio, informação e contribuição para a realização do trabalho, sem os quais nada disto seria possível.

Ao Prof. Dr. Jorge Manuel Vieira Capela, por toda ajuda e colaboração.

Ao Prof. Dr. Flávio Andrade Faria, por todo apoio, incentivo, sugestões, ensinamentos, acreditando e colaborando para que tudo acontecesse.

Ao Departamento de Química Analítica e aos funcionários, agradeço a todos pelo auxílio.

A pós graduação, minha sincera gratidão.

À equipe de trabalho do Laboratório: Lucas Mattioli, Jovan Duran, Francisco, Cláudia e Márcia, pela amizade e, em especial, ao Diógenes Dias, pela sua sabedoria, humildade e empatia, sempre me estendeu a mão para eu não desistir, contribuindo na realização dos experimentos e nas correções textuais.

A Milena Nova, por todo ensinamento, paciência e compaixão. Que Deus te fortaleça, mesmo com todas as adversidades que enfrentamos e onde quer que você esteja, saiba que estarás pra sempre em meu coração.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, ajudaram na execução deste trabalho.

“Há homens que lutam um dia, e são bons; há outros que lutam muitos dias, e são muito bons; há homens que lutam muitos anos, e são melhores; mas há os que lutam toda a vida, esses são os imprescindíveis!”

**Bertolt Brecht**

“É durante as fases de maior adversidade que surgem as grandes oportunidades de se fazer o bem a si mesmo e aos outros.”

**Dalai Lama**

"Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito."

**Martin Luther King**

## RESUMO

A bananicultura representa um importante segmento na estrutura socioeconômica do Brasil. Entretanto, os resíduos dessa cultura são descartados de forma inadequada, causando problemas de contaminação na lavoura e no meio ambiente. A grande produção mundial de banana e, particularmente no Brasil, faz com que os subprodutos dessa cultura tenham elevado interesse comercial. Tecnologias de reaproveitamento de resíduos para o desenvolvimento de novos materiais com alto potencial condicionante e nutricional dos solos estão surgindo como uma forma eficiente e economicamente viável em termos de produção e valor de mercado. Dentre estas tecnologias emergentes se encontra a torrefação dos resíduos da bananicultura como biomassa alternativa na geração de um biofertilizante de liberação lenta. O biocarvão foi produzido a partir do pseudocaule da bananeira em temperatura de torrefação de 240 °C (FBT). Foram adicionados ao biocarvão Ureia (N), fosfato de diamônio (P) e KCl (K), em seguida peletizados para produzir os fertilizantes FBT-N, FBT-P e FBT-K. A determinação das propriedades físico-químicas, análise imediata, como umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas, dos resíduos da bananeira foram realizadas por Termogravimetria. A identificação da composição química dos nutrientes incorporados ao biocarvão foram estimadas por Espectrofotometria, Termogravimetria (TG/DTG), Fotometria de Emissão em Chama e Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR). A cinética de sorção relativa na água pelo tempo foi avaliada usando um modelo exponencial com um máximo de 10,5 % (p / p) de sorção para a amostra FBT-N e um tempo máximo de adsorção (95 %) de 22,25 h. O intumescimento da FBT em água foi avaliado por TMA, com um máximo  $\epsilon = 22,8$  %. Curvas TG e DTG foram usadas para obter a análise imediata, a estabilidade térmica das amostras e o teor de ureia ao longo do tempo da amostra de FBT-N em meio aquoso e nos solos. Os espectros de FTIR permitiram avaliar as interações de N, P e K com a FBT durante a produção de FBT-N, FBT-P e FBT-K. Dois modelos, exponencial e quociente, foram propostos e avaliados quanto à cinética de liberação parâmetros de N, P e K de FBT-N, FBT-P e FBT-K na água e dois tipos de solo sob condições controladas. Os parâmetros cinéticos permitiram uma discussão sobre os mecanismos de liberação de nutrientes em água e solo, e o ajuste da cinética do modelo proposto mostrou o potencial de aplicação como fertilizantes de liberação lenta.

**Palavras-chave:** Resíduos de bananeira. Fertilizantes de liberação lenta. Torrefação. Caracterização térmica. Avaliação cinética.

## ABSTRACT

Banana farming represents an important segment in Brazil's socio-economic structure. However, the residues of this fruit are discarded in the environment, causing problems of contamination in the crop and environmental. The large banana production in the world and particularly in Brazil makes the byproducts of its production have high commercial value. Waste reuse technologies for the production of new chemical compounds with high conditioning and nutritional potential of soils are emerging as an efficient and economically viable way in terms of production and market value. Among these emerging technologies is the torrefaction of banana residues as an alternative biomass in the generation of a slow release biofertilizer. Biochar was produced from banana-crop pseudostem by torrefaction at 240 °C (BF sample). Urea (N), KCl (K), and diammonium phosphate (P) were added to BF, then pelletized to produce the BF-N, BF-K, and BF-P fertilizers. The determination of the physicochemical properties, immediate analysis, such as moisture, volatiles, fixed carbon and ash, of the roasting of the banana residues were performed through Thermogravimetric. Identification of the chemical composition of the nutrients incorporated into the biochar by Spectrophotometry, Thermogravimetric (TG/DTG), Flame Emission Photometry and Infrared Spectroscopy with Fourier Transform (FTIR). The relative water sorption kinetics by time was evaluated using an exponential method, with a maximum of 10.5 % (w/w) sorption for the BF-N sample and a maximum adsorption time (95 %) of 22.25 h. The swelling of BF in water was evaluated by TMA, with a maximum  $\varepsilon = 22.8$  %. TG and DTG curves were used to obtain the proximate analysis, the thermal stability of the samples, and the urea content overtime of the BF-N sample in an aqueous medium and soil. FTIR spectra allowed to evaluate the interactions of N, P, and K with BF during the production of BF-N, BF-P, and BF-K. Two models, exponential and quotient, were proposed and assessed for release kinetic parameters of N, P, and K from BF, BF-N, BF-P and BF-K fertilizers in water and two kinds of soils under controlled conditions. The kinetics parameters allowed a discussion on the mechanisms of nutrient release in both water and soil, and the adjustment of the kinetic release model showed the potential for application as slow-release fertilizers.

**Keywords** Banana-crop residues. Slow release fertilizers. Torrefaction. Thermal characterization. Release Kinetic.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Biomassa do pseudocaule de bananeira in natura e torrefada .....	36
<b>Figura 2</b> Amostras dos pellets em meio aquoso .....	42
<b>Figura 3</b> Amostras dos pellets em meio sólido contendo: solo A (argiloso) e solo B (arenoso) na parte superior da foto e na inferior, metade da camada do solo (A), disposição do pellet sobre o solo (B) e cobertura do pellet com a outra camada de solo (C) .....	43
<b>Figura 4</b> Câmara de crescimento contendo os vasos estudados em cada experimento.....	44
<b>Figura 5</b> Curvas TG e DTG: (A e B) da ureia (N), FBT e FBT com a incorporação da ureia (FBT-N); (C e D) do fósforo (P), FBT e FBT com a incorporação do fósforo (FBT-P) e (E e F) do potássio (K), FBT e FBT com a incorporação do potássio (FBT-K), a 240 °C, em atmosfera de oxigênio (100 mL.min <sup>-1</sup> ) e razão de aquecimento de 10 °C até 600 °C.....	52
<b>Figura 6</b> Espectroscopia do infravermelho da FB in natura e torrefada a 240 °C .....	54
<b>Figura 7</b> Espectros no infravermelho da ureia, fosfato de diamônio e cloreto de potássio (A); FBT (B); FBT-N com a incorporação de 10 % de ureia (C); FBT-P com a incorporação de 10 % de fosfato de diamônio (D) e FBT-K com a incorporação de 10 % de cloreto de potássio.....	56
<b>Figura 8</b> Coeficiente de expansão da FBT pelo tempo .....	57
<b>Figura 9</b> Umidade absorvida dos pellets da FBT e incorporados com fertilizantes NPK .....	59
<b>Figura 10</b> DTG da FBT a 240 °C com 10 % de incorporação de ureia, em atmosfera de ar comprimido (100 mL min <sup>-1</sup> ) e razão de aquecimento de 20 °C min <sup>-1</sup> até 300 °C .....	62
<b>Figura 11</b> Cinética da liberação do nitrogênio na FBT pelo tempo, em água.....	63
<b>Figura 12</b> Cinética de liberação do fósforo na FBT pelo tempo, em água .....	64
<b>Figura 13</b> Cinética da liberação do potássio presente na FBT pelo tempo, em água ...	65
<b>Figura 14</b> Cinética da liberação do potássio com incorporação do KCl pelo tempo, em água.....	66
<b>Figura 15</b> Cinética da liberação do nitrogênio em FBT pelo tempo, em solo arenoso ..	70
<b>Figura 16</b> Cinética da liberação do nitrogênio em FBT pelo tempo, em solo argiloso...	71
<b>Figura 17</b> Cinética da liberação de fósforo em FBT pelo tempo, em solo arenoso .....	72
<b>Figura 18</b> Cinética da liberação do fósforo em FBT pelo tempo, em solo argiloso .....	73
<b>Figura 19</b> Cinética da liberação do potássio em FBT pelo tempo, em solo arenoso.....	75
<b>Figura 20</b> Cinética da liberação do potássio em FBT pelo tempo, em solo argiloso.....	76

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> Composição dos reagentes .....	37
<b>Tabela 2</b> Composição dos reagentes da solução vanadomolibdica.....	38
<b>Tabela 3</b> Resultado da análise química dos solos estudados .....	49
<b>Tabela 4</b> Resultado dos micronutrientes dos solos estudados.....	49
<b>Tabela 5</b> Resultados da análise física dos solos estudados .....	49
<b>Tabela 6</b> Análise imediata da FB in natura e torrefada a 240 °C.....	50
<b>Tabela 7</b> Decomposição térmica das amostras estudadas .....	51
<b>Tabela 8</b> Bandas no infravermelho dos principais componentes do pseudocaule da bananeira.....	53
<b>Tabela 9</b> Estimativas dos parâmetros e tempos $t$ (horas) para atingir a umidade de equilíbrio $\alpha$ 0,5; 0,90 e 0,95 .....	60
<b>Tabela 10</b> Valores médios da umidade residual dos solos estudados .....	60
<b>Tabela 11</b> Valores médios da umidade atual dos solos estudados.....	61
<b>Tabela 12</b> Parâmetros cinéticos dos modelos matemáticos em meio aquoso .....	68
<b>Tabela 13</b> Parâmetros cinéticos dos modelos matemáticos em meio sólido.....	77

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
Objetivo Geral.....	26
Objetivos Específicos.....	26
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>27</b>
2.1 Cultura da bananeira .....	27
2.2 Resíduos da bananicultura .....	27
2.3 Pseudocaule da bananeira .....	28
2.4 Biocarvão.....	28
2.5 Torrefação.....	29
2.6 Termogravimetria (TG/DTG).....	30
2.7 Cinética de liberação de fertilizantes .....	31
2.8 Modelos cinéticos não lineares .....	31
2.9 Fertilizantes agrícolas .....	32
2.10 Propriedades físicas e químicas dos solos .....	33
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>35</b>
3.1 Amostra.....	35
3.2 Preparação das amostras .....	35
3.3 Tratamento das amostras .....	35
3.4 Fertilizantes minerais (NPK) .....	36
3.5 Tipos de solos.....	37
3.6 Determinações Analíticas .....	37
3.6.1 Caracterização Térmica.....	37
3.6.2 Análise imediata.....	37
3.6.3 Análise do Nitrogênio por Termogravimetria.....	38
3.6.4 Análise do Fósforo por Espectrofotometria na região do UV-Vis .....	38
3.6.5 Análise do Potássio por Fotometria de Chama.....	39
3.7 Análise das amostras estudadas por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) .....	39
3.8 Análise Termomecânica.....	39
3.9 Ensaios de Umidade .....	40
3.9.1 Umidade absorvida pelos pellets .....	40
3.9.2 Umidade dos solos .....	40
3.9.2.1 Umidade residual .....	40
3.9.2.2 Umidade atual .....	41

3.10 Ensaio Cinéticos em Meio líquido .....	41
3.10.1 Análise do Nitrogênio (N) .....	41
3.10.2 Análise do Fósforo (P) .....	41
3.10.3 Análise do Potássio (K) .....	42
3.11 Ensaio Cinéticos em Meio sólido .....	42
3.11.1 Análise do Nitrogênio (N) .....	44
3.11.2 Análise do Fósforo (P) e do Potássio (K) .....	45
3.10 Ajustes cinéticos da liberação dos fertilizantes .....	45
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>48</b>
4.1 Caracterização da amostra .....	48
4.1.1 Espessura do pellet do pseudocaule de bananeira torrefado .....	48
4.1.2 Torrefação do pseudocaule de bananeira .....	48
4.1.3 Características físicas e químicas dos solos estudados .....	48
4.1.4 Análise imediata .....	50
4.1.5 TG/DTG .....	50
4.2 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) .....	53
4.3 Análise Termomecânica .....	57
4.4 Ensaio de Umidade .....	58
4.4.1 Umidade absorvida pelos pellets .....	58
4.4.2 Umidade residual dos solos .....	60
4.4.3 Umidade atual dos solos .....	61
4.5 Ensaio de Liberação dos Fertilizantes em Meio Líquido .....	61
4.5.1 Nitrogênio (N) .....	61
4.5.2 Fósforo (P) .....	63
4.5.3 Potássio (K) .....	64
4.6 Ensaio de Liberação dos Fertilizantes em Meio sólido .....	69
4.6.1 Nitrogênio (N) .....	69
4.6.2 Fósforo (P) .....	71
4.6.3 Potássio (K) .....	75
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>81</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento populacional, aumentou-se a demanda por alimentos e, conseqüentemente, a necessidade por áreas agricultáveis, o que em sua grande maioria, significa em aumento na derrubada e queima da mata em áreas de preservação e reserva, promovendo a degradação do meio ambiente, diminuição da fertilidade natural do solo e aumento da liberação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e outros gases de efeito estufa para a atmosfera, contribuindo para o aquecimento global [1].

Nas áreas agricultáveis, o Brasil é um dos três maiores produtores mundiais de frutas, ficando atrás apenas da China e Índia, com uma produção estimada em 44,0 milhões de toneladas. A cadeia produtiva de frutas abrange 2,6 milhões de hectares e gera 6,0 milhões de empregos diretos. O mercado externo conta com uma oferta de frutas durante boa parte do ano, e isso se deve a extensa área territorial do país, posição geográfica e condições de clima e solo privilegiadas [2,3].

A produção de banana (*Musa spp.*) representa um importante segmento na estrutura socioeconômica do Brasil. Destaca-se como uma das frutas mais vendidas e consumidas no mundo, devido as suas qualidades nutricionais (sais minerais como: cálcio, magnésio, ferro, potássio, sódio e vitaminas, tais como: retinol, tiamina, riboflavina, niacina e ácido ascórbico) [4]. É a segunda fruta mais produzida no país, com 7,11 milhões de toneladas colhidas, correspondentes a 16,16 % do volume das frutas. O estado de São Paulo destaca-se como o principal estado produtor, com 1,07 milhões de toneladas colhidas, seguido por Bahia e Minas Gerais, com 1,04 milhões e 814,5 mil toneladas, respectivamente, na safra de 2019 [5]. Entretanto, anualmente são produzidos de 180 a 200 toneladas por hectare de resíduos da bananicultura considerando o pseudocaule, folhas e ráquis, que são fontes de contaminação na lavoura e ambientais pelo aumento na incidência de pragas e doenças e na liberação de CO<sub>2</sub> atmosférico, o que tem impulsionado estudos que propiciem o reaproveitamento desse material [6].

Novas propostas de tratamento para esses resíduos têm sido estudadas, entre elas o processo de torrefação, que consiste de um tratamento térmico da biomassa, que permite a obtenção de um material intermediário entre o material in natura e o carvão vegetal, com altos rendimentos gravimétricos, num processo que possui baixa demanda energética, com temperaturas entre 200-300 °C [7,8].

Das matérias primas utilizadas neste processo pode-se destacar, as cascas de frutas ou partes de vegetais que podem ser usados como biocarvão enriquecido de compostos químicos, utilizados na fertilização do solo.

Atualmente, observa-se o interesse na produção de materiais adsorventes alternativos, principalmente pelo fato desses materiais serem reaproveitados, uma vez que são, frequentemente, constituídos de resíduos da atividade agrícola [9]. O principal atrativo da adsorção é o baixo custo associado a um bom desempenho de liberação de elementos químicos [8].

Hoje, o Brasil é o maior produtor de carvão vegetal no mundo, contribuindo com 38,5 % da produção mundial, utilizando-se da pirólise lenta para alcançar este número. O produto principal da pirólise lenta é largamente usado para produção de energia. Entretanto, o produto também pode ser usado como sequestrador de carbono e fertilizante agrícola, através da produção de biocarvão ou também conhecido como biochar [1].

Biocarvão é qualquer material rico em carbono obtido de biomassa carbonizada sob baixa ou ausência de atmosfera de oxigênio, para uso como condicionador de solos. Praticamente qualquer fonte de biomassa pode ser carbonizada e aplicada ao solo [10].

A ideia do biocarvão surgiu de estudos da matéria orgânica das Terras Pretas de Índios (TPI), solos amazônicos antropogênicos com excelentes características agrônômicas e ambientais, alta fertilidade e alto conteúdo de carbono estável em sua fração orgânica, o que forneceu um modelo de solo adequado ao sequestro de carbono [11].

A biodegradação (transformação) do biocarvão no solo é um processo relativamente lento que resulta na mobilização do carbono e na alteração das propriedades da superfície do carvão. Devido a algumas características do carvão como: reatividade, tempo de degradação, estrutura química, a qual apresenta uma estrutura basicamente aromática, superfície específica grande, hidrofobicidade, entre outras, faz com que este material seja considerado relativamente inerte no solo e de alta estabilidade, o que pode contribuir para a melhoria das características químicas, físico-hídricas e conseqüentemente biológicas [12].

A temperatura de pirólise é o fator que mais exerce influência sobre as propriedades físicas do biocarvão [13]. A carbonização da madeira, por exemplo, leva a uma perda de massa em volume, na forma de compostos voláteis. Com a perda

desses compostos voláteis, que incluem a hemicelulose, celulose e lignina, formam-se compostos com alto teor de carbono [14], responsáveis pela formação de macro, meso e microporos, que contribuem para o aumento da área de superfície específica do biocarvão. Geralmente, esse aumento é proporcional a elevação da temperatura até certo ponto [15]. Entretanto, em altas temperaturas ocorre a degradação dos compostos aromáticos, e conseqüentemente perda de carbono e atributos físicos desejáveis, como a porosidade. A porosidade do biocarvão, pode aumentar significativamente a capacidade de retenção de água, sobretudo em solos de textura arenosa [16].

Dentre os diferentes resíduos do setor agrícola, a bananeira destaca-se pela grande quantidade de material gerado por hectare de área produzida [6], desta forma, o aproveitamento dos resíduos da bananeira está diretamente ligado ao desenvolvimento sustentável e a possibilidade de comercialização desse subproduto. Os principais constituintes moleculares dessa biomassa é uma mistura complexa de polímeros naturais, tais como celulose e hemicelulose, além de lignina e pequenas quantidades de outras substâncias, como extrativos (resina) e inorgânicos [17].

Durante o tratamento térmico de uma amostra, esta pode sofrer volatilização ou pirólise (com dissociação ou decomposição), onde a taxa da perda de massa é diretamente proporcional ao fluxo de calor que essa amostra recebe [18].

As técnicas termoanalíticas, em particular a Termogravimetria (TG) e a Termogravimetria Derivada (DTG), permitem a obtenção de tais informações de maneira simples e rápida [18,19,20].

Diversos autores têm proposto o estudo termogravimétrico de subprodutos industriais, possibilitando sua utilização em outros processos e também na geração de energia limpa [19,21].

Além dos estudos térmicos neste trabalho, também foram realizados experimentos de liberação de fertilizantes, em meio aquoso e no solo, incorporados ao material por prensagem a frio após o processo de torrefação.

O pseudocaule da bananeira, que, por suas características físico-químicas, pode ser uma matéria-prima satisfatória na produção de biocarvão, pois apresenta altos níveis de elementos minerais, como o potássio, cálcio, magnésio, sódio, entre outros. Esta biomassa apresenta grande capacidade de adsorção, sendo esta aumentada significativamente quando modificada quimicamente [8].

A capacidade de biossorção é obtida por meio das cinéticas de adsorção/dessorção, sendo fundamental o conhecimento do comportamento térmico e dos parâmetros cinéticos da biomassa durante o processo de termoconversão [17].

O estudo da cinética no processo de adsorção ou dessorção é importante para se determinar o tempo em que as amostras atingirão o equilíbrio [22].

Diversos estudos com biomassas têm abordado os resultados da aplicação do biocarvão no solo e seus efeitos nos atributos físicos, químicos e biológicos, sobre a matéria orgânica, ciclos biogeoquímicos do carbono, desempenho agrônômico de culturas anuais, espécies florestais, olerícolas, na emissão de gases de efeito estufa ( $N_2O$ ,  $CO_2$  e  $CH_4$ ) e mais recentemente, efeitos sobre a dinâmica de pesticidas no solo [1].

A aplicação dessa biomassa torrefada no solo é proposta como um mecanismo de sequestro de carbono, pois por meio dessa prática espera-se evitar a emissão de carbono em forma de gases de efeito estufa sendo ele armazenado no solo em formas mais estáveis, comparado com a deposição de resíduos diretamente ao solo, em formas mais lábeis [23].

Pesquisas indicam que o uso do biocarvão tem um potencial global de sequestro de  $CO_2$  atmosférico da escala de bilhões de toneladas ( $10^9$  t ano<sup>-1</sup>) no espaço de 30 anos [24]. Além disto, pode reduzir diretamente as emissões de outros gases estufa do solo, tais como o óxido nitroso e o metano, e indiretamente pelo aumento da eficiência no uso de fertilizantes e calcários, obtida quando o biocarvão é aplicado no solo [25].

Experimentos em vasos com arroz de terras altas responderam positivamente à aplicação de biocarvão de *Eucalyptus* sp [23]. Foi verificado também, aumento na produtividade de arroz e outras gramíneas quando aplicado biocarvão junto com fertilizante [26,27,28,29,30]. Além disso, ocorre melhora da microbiota e das características agrônômicas dos solos, principalmente em solos com baixa fertilidade [31,32,33].

O uso de fertilizantes recobertos com vários tipos de materiais ou encapsulados com liberação lenta ou de liberação controlada, têm sido estudados [34,35]. Dessa forma, a busca por matérias primas renováveis como a torrefação da biomassa, pode gerar baixas emissões de gases para a atmosfera, e os resíduos da bananicultura podem ser uma boa alternativa na geração de biocarvão, associado ao fato da redução do descarte de resíduos.

Nesse contexto, este trabalho abordará algumas características do uso da fibra de bananeira (FB) torrefada como biocarvão no solo, com enfoque na sua produção, características físicas e químicas e aspectos agrônômicos do seu uso no solo como substrato agrícola. A biomassa carbonizada como condicionador de solo e biofertilizante de liberação lenta nas culturas agrícolas, poderia representar uma parte significativa na redução da emissão de CO<sub>2</sub> e também contribuir nas variáveis da fertilidade do solo. Pensando em todas essas possibilidades de aplicação, nesta pesquisa foram utilizados os fertilizantes: ureia (CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O), fosfato de amônio bibásico ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>) e cloreto de potássio (KCl) e os mesmos foram incorporados ao biocarvão de forma individual (N, P e K).

Estudos sobre resíduos agroindustriais ainda são pouco conhecidos. Mas, mediante a preocupação em minimizar os problemas ambientais, este estudo determinou a produção de biomassa, o estado nutricional e disponibilidade de nutrientes para o solo, testando-se a concentração de 10 % dos macronutrientes com nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), incorporados à FB após o processo de torrefação a 240 °C, e avaliou o comportamento cinético do tratamento térmico nesse resíduo agroindustrial de forma a obter um produto torrefado com propriedades apropriadas para liberação de fertilizantes, e explorar de forma sustentável esse subproduto para produção do biocarvão.

As cinéticas de adsorção/dessorção foram determinadas para se avaliar a eficiência do biocarvão como fertilizante de liberação lenta. Nos estudos de equilíbrio, os dados experimentais foram avaliados com base nos modelos matemáticos Quociente e Exponencial, que são capazes de estimar o tempo de 95 % da liberação dos nutrientes incorporados à fibra de bananeira torrefada (FBT).

Apesar da diversidade de trabalhos utilizando biocarvões, poucos são os que apresentam um estudo detalhado do uso isolado (sozinho) e, sequencialmente incorporados com fertilizantes agrícolas. Logo, este trabalho surge como possibilidade de enriquecer o conhecimento da atuação isolada do biocarvão e também incorporado aos fertilizantes minerais em processos de condicionamento e recuperação dos solos.

**OBJETIVOS:****Objetivo Geral**

Produzir e caracterizar o pseudocaule da bananeira para seu uso como biocarvão e biofertilizante de liberação lenta.

**Objetivos Específicos**

- Avaliar o efeito da torrefação nas propriedades da biomassa;
- Verificar a capacidade de sorção do biocarvão;
- Caracterização por análise térmica da biomassa, biocarvão e do biocarvão com incorporação dos fertilizantes;
- Avaliar o comportamento cinético do biocarvão como biofertilizante de liberação lenta/controlada em meio aquoso e no solo.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Cultura da bananeira

A cultura da banana, pertencente à família *Musaceae*, gênero *Musa* spp., tem ampla participação na economia brasileira, com 491,6 mil ha de área plantada que correspondeu a uma produção de 15,6 mil kg.ha<sup>-1</sup> de cachos na Safra 2019 [5].

As principais cultivares produzidas no país são a nanica, nanicão, prata, maçã e ouro. A escolha da cultivar, varia de acordo com as condições da propriedade, clima e mercado [36].

A alta produtividade e consumo da banana deve-se aos seus valores nutricionais, sendo um alimento complementar na dieta da população, principalmente da parcela de famílias de classe baixa, além de propiciar a geração de emprego e renda para os agricultores, contribuindo positivamente com o aspecto socioeconômico da região produtora [4].

A bananeira é um vegetal herbáceo, sendo constituído basicamente por raiz, rizoma, pseudocaule, bainha foliar, folhas, cacho e o botão floral ou “coração” da bananeira [36].

### 2.2 Resíduos da bananicultura

A bananicultura gera em média 180 a 200 toneladas por hectare de resíduos. Para cada tonelada de banana colhida, são gerados aproximadamente 4 toneladas de resíduos lignocelulósicos, sendo 3 toneladas de pseudocaule e o restante são constituídos por engaços, folhas e cascas [37]. Esses restos culturais, geralmente, são descartados de forma inadequada, causando prejuízos ao meio ambiente.

Os resíduos lignocelulósicos da bananeira contém aproximadamente 70 % de umidade e são compostos por fibras vegetais constituídas principalmente pela celulose, hemicelulose e lignina, o que confere a esse material características importantes para serem utilizados em diversos fins.

O resíduo seco da cultura da banana consiste em 12-16 % de lignina, 31-43 % de celulose, 50-72 % como holocelulose (combinação de hemicelulose com celulose),

e 7-19 % de cinza. As cinzas consistem principalmente em potássio (cerca de 33 %), além de cálcio, magnésio, silício e fósforo [38,39].

Estudos direcionados ao aproveitamento desses resíduos são de suma importância para o desenvolvimento sustentável e geração de novos produtos, agregando valor comercial aos subprodutos dessa atividade agrícola.

### **2.3 Pseudocaule da bananeira**

O pseudocaule da bananeira apresenta elevada umidade (90-96 %) e uma grande quantidade de nutrientes, sendo muito utilizado pelos agricultores como matéria orgânica na superfície do solo após a colheita do cacho [40]. Porém, essa alta umidade do material em decomposição traz prejuízo, pelo aumento na liberação de gases do efeito estufa e pela contaminação da lavoura por meio da disseminação e proliferação de pragas e doenças, o que torna viável o desenvolvimento de novas técnicas de manejo para utilização dessa matéria prima. Nos termos da legislação ambiental vigente, todos os resíduos devem ser considerados matérias primas, se um procedimento de valorização for desenvolvido [41].

Muitos estudos tem sido realizados com o pseudocaule da bananeira, como a produção de etanol de segunda geração [42,43], produção de fibras têxteis [44,45] e de papel e celulose [46,47], fertilizante líquido [48], bebida energética [40,49], produção de energia [50,51], biofertilizante [8], etc.

### **2.4 Biocarvão**

Na década de 1870, pesquisadores que exploraram a Amazônia, observaram que em determinados locais, o solo era diferente da maioria do solo pobre existente em quase toda a região. O solo amazônico que em geral, é formado por solo arenoso ou argiloso, com uma fina camada de húmus na superfície produzida pela floresta, apresenta baixa fertilidade. Esses pesquisadores notaram que em alguns pontos, o solo era escuro e rico em carbono, que mais tarde descobriram a associação com a antiga ocupação dos povos indígenas, dando origem ao solo conhecido como 'terra preta de índio' [52].

Cientistas do mundo todo vêm estudando esse solo escuro, devido à sua fertilidade e à capacidade de reter carbono, evitando que seja liberado para a atmosfera. Estudos voltados para o desenvolvimento de materiais com características semelhantes as TPIs têm sido explorados e os produtos dessas pesquisas são chamados de biocarvão [53,54].

O biocarvão é produzido pelo aquecimento da biomassa sob baixa ou ausência de oxigênio, em temperaturas relativamente baixas (< 700 °C), processo conhecido como pirólise [55]. A pirólise retém em mais de 50 % a concentração de carbono na biomassa e promove a modificação na estrutura química, tornando esse material mais resistente à degradação. Assim, os resíduos que seriam decompostos rapidamente, liberando gases responsáveis pelo efeito estufa, tornam-se mais estáveis criando no solo um estoque de carbono de longo prazo [52].

Estudos da aplicação do biocarvão no solo são promissores, pois em doses adequadas pode melhorar a produtividade pelo aumento da fertilidade do solo, criar ambientes favoráveis para o crescimento da microbiota do solo além de reter umidade em períodos de estiagem e diminuir a emissão gases de efeito estufa pelo sequestro do carbono, podendo assim contribuir para a mitigação das mudanças climáticas [56,57,58,59], bem como na redução da biodisponibilidade de compostos tóxicos no solo [60,61].

## 2.5 Torrefação

A torrefação consiste de um tratamento térmico da biomassa, que permite a obtenção de um material intermediário entre o material in natura e o carvão vegetal, com altos rendimentos gravimétricos, pela remoção de oxigênio e fixação e enriquecimento do carbono no produto final, através de um processo que possui baixa demanda energética, com temperaturas entre 200-300 °C [7,8]. Neste processo ocorre a degradação da hemicelulose da biomassa, preservando-se os teores de celulose e lignina [62,63,64].

Embora existam diversos trabalhos sobre pirólise de materiais lignocelulósicos, poucos abordam a faixa de temperatura de torrefação estudada neste trabalho (240 °C), os mecanismos de reações aplicados e as condições de seleção das partículas. Dessa forma, a torrefação do pseudocaule de bananeira torna-se uma boa alternativa

como biomassa na geração de biocarvão, associado ao fato da redução do descarte desses resíduos no meio ambiente.

## 2.6 Termogravimetria (TG/DTG)

A Termogravimetria é uma técnica comumente usada para se estudar as reações de decomposição dos sólidos. A definição de Análise Térmica é: “Um grupo de técnicas nas quais uma propriedade física de uma substância e/ou seus produtos de reação é medida em função da temperatura, enquanto a substância é submetida a um programa controlado de temperatura” [65,66,67].

As técnicas termoanalíticas, em particular a Termogravimetria (TG) e a Termogravimetria Derivada (DTG), permitem a obtenção de informações da perda de massa em função da temperatura, de maneira simples e rápida [18;19;20].

O processo de pirólise dos materiais lignocelulósicos consiste em um conjunto de reações químicas complexas que ocorrem pela transferência de calor e massa, medidos por um sistema de termobalanças do equipamento analítico, em que são observados os estágios de decomposição da amostra [62]. Essas reações ocorrem devido às etapas de degradação dos principais componentes presentes na biomassa vegetal: hemicelulose, celulose e lignina. Alguns fatores, direcionam os resultados, pois depende da atmosfera utilizada se oxidante ou inerte, se o material está sob a forma in natura ou pré tratado termicamente, etc. O aspecto da curva TG, também depende de fatores ligados às características da amostra [68].

Embora existam diferenças significativas nas condições de operação, a termogravimetria fornece uma ferramenta poderosa para realizar estudos preliminares sobre a decomposição térmica de combustíveis sólidos [69].

As análises por TG e sua derivada DTG são as técnicas mais utilizadas para investigar e comparar os eventos térmicos durante a pirólise de pequenas amostras e medir as variações de massa durante o seu aquecimento. Esta técnica permite interpretar o comportamento dos pellets durante a sua decomposição, determinar a estabilidade térmica do material, além de fornecer informações de quais faixas de temperatura ela é mais pronunciada [70].

Na termogravimetria derivada (DTG), a derivada da variação de massa em relação ao tempo ( $dm/dt$ ) é registrada em função da temperatura ou do tempo. As curvas DTG indicam com exatidão, as temperaturas correspondentes ao início e ao

instante em que a velocidade de reação é máxima e as áreas dos picos correspondem exatamente à perda ou ganho de massa [68].

## 2.7 Cinética de liberação de fertilizantes

Os estudos de sorção são de grande importância para a otimização nos processos de cinética de liberação dos nutrientes, pois permitem prever a velocidade com que a liberação dos nutrientes atinge o equilíbrio e também, investigar os possíveis mecanismos envolvidos durante a reação [71].

O processo de sorção ocorre por meio de interações físico-químicas entre os íons e os grupos funcionais presentes na superfície da biomassa, quando estes possuem afinidade química pelo material estudado [72].

Os dados das isotermas são capazes de descrever as mudanças no estado físico e químico que podem ocorrer nos materiais durante o estudo cinético. Essas alterações estão frequentemente associadas à capacidade de higroscopicidade da biomassa [71].

As isotermas de dessorção são determinadas com o intuito de se conhecer a eficiência do adsorvente e também verificar a possível interação com os macronutrientes incorporados ao biocarvão, de modo que, compreendendo essa interação, seja possível melhorar a disponibilidade de nutrientes nos solos [72].

## 2.8 Modelos cinéticos não lineares

Modelos matemáticos não lineares são frequentemente utilizados em diversas áreas, como, agronomia, biologia, engenharia, química, etc. Esses modelos são deduzidos teoricamente e os parâmetros resultantes são interpretados a partir dos possíveis fenômenos (físico, químico, biológico) inerentes aos dados experimentais [71].

Estudos aplicados à avaliação da aproximação linear de modelos não lineares foram iniciados com o objetivo de estudar a influência da não linearidade sobre a região de confiança para as estimativas dos parâmetros [73].

As propriedades estatísticas de modelos não lineares, seu comportamento numérico no processo estimativo, bem como a validade de inferências assintóticas em

amostras finitas são funções da não linearidade dos modelos, ou seja, do quão adequado é a aproximação linear [74,75].

Processos de liberação de nutrientes que apresentam comportamento assintótico com taxas decrescentes ao longo do tempo até atingir o equilíbrio são adequadamente caracterizados por modelos de regressão não linear [71].

## 2.9 Fertilizantes agrícolas

A fertilidade tem sido conceituada como "a capacidade do solo de ceder elementos essenciais às plantas" [76,77]. Alguns autores acrescentam que esta capacidade, para não apresentar limitações, deva ser mantida durante todo o crescimento e desenvolvimento da planta, mesmo que esta deixe de absorver ou utilizar, numa determinada fase de seu ciclo. A produtividade encontra, portanto, na fertilidade do solo, variável determinante de seu dimensionamento, apenas por limitação quando ela é deficiente [78,73].

A adubação tem como objetivo primordial manter ou aumentar no solo a disponibilidade dos nutrientes e o teor de matéria orgânica, já que a incorporação de elementos restitui aqueles perdidos pelo solo em processos de lixiviação, erosão, complexação, imobilização, fixação, volatilização e, de absorção pelas plantas [79].

Os elementos minerais essenciais e que compõem a adubação dos solos são os macronutrientes, pois são requeridos em maiores quantidades pelas plantas. Já os micronutrientes, que são exigidos em quantidades inferiores, são compostos por: ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu), boro (B) molibdênio (Mo) e cloro (Cl).

Os macronutrientes dos solos são compostos por: nitrogênio (N), fósforo (P), enxofre (S), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), destes, os principais responsáveis pelo crescimento e desenvolvimento das plantas, também chamados de nutrientes primários, são o N, P e K, descritos a seguir [80].

### **Nitrogênio (N)**

Para a maioria das culturas, a absorção (e transporte) do nitrogênio ocorre geralmente na forma de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) ou amônio ( $\text{NH}_4^+$ ). Pode ocorrer alguma absorção direta de ureia pelas folhas. O nitrogênio é necessário para a síntese da clorofila. Na ausência desse elemento, o principal processo bioquímico afetado na

planta é, justamente, a síntese proteica, com conseqüências no seu crescimento. O amarelecimento ou clorose das folhas mais velhas, como sintoma de deficiência de N, decorre da inibição da síntese de clorofila [80].

### **Fósforo (P)**

As plantas absorvem a maior parte do fósforo como íon ortofosfato primário ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) e pequenas quantidades sob a forma aniônica ortofosfato secundário ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ). O fósforo atua na fotossíntese, respiração, armazenamento e transferência de energia, divisão célula, no crescimento das células e em vários outros processos vitais das plantas. A carência de fosfato causa distúrbios severos no metabolismo e desenvolvimento subnormal das plantas, levando a um menor perfilhamento em gramíneas, atraso na maturidade e redução no número de frutos e sementes. Inicialmente, em folhas mais velhas, a deficiência de P mostra-se sob a forma de clorose, ou redução no brilho e um tom púrpura (arroxeadado) [80].

### **Potássio (K)**

O potássio é retirado ou absorvido do solo pelas plantas na forma iônica ( $\text{K}^+$ ). Sua estrutura química não forma complexos de grande estabilidade. Sua função vital é a fotossíntese, é essencial para a síntese proteica, atua também como ativador enzimático, com participações no transporte de assimilados e aumenta a resistência das plantas às doenças. Junto com Ca e Mg participa do controle do equilíbrio iônico. Sua deficiência conduz a profundas alterações no metabolismo das plantas. Um dos sintomas mais comuns é a murcha ou queima ao longo das margens das folhas mais velhas, promove diminuição da dominância apical, internódios mais curtos e clorose seguida de necrose [80].

## **2.10 Propriedades físicas e químicas dos solos**

O conhecimento sobre as propriedades físicas dos solos, serve como base para a compreensão de muitos processos físico-químicos, como a interação com o biocarvão e biológicos [72].

A textura do solo refere-se à distribuição do tamanho das partículas primárias (areia, silte e argila) constituintes. O aumento da superfície específica com a diminuição do tamanho das partículas é de fundamental importância para as propriedades de retenção de água e nutrientes do solo [81].

As interações dos nutrientes (macro e micronutrientes) com o solo determinam suas disponibilidades para as plantas. A fração argila, é responsável por diversos fenômenos como adsorção, dessorção, capilaridade, difusão, dentre outros [81,82].

A capacidade de troca catiônica (CTC) indica a quantidade de cátions retidos na superfície do solo com possibilidade de permutação sem mudança estrutural. Os cátions trocáveis mais comuns são  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Li}^+$ . Maiores teores de argila e CTC tendem a reter mais nutrientes nos solos, enquanto a microporosidade diminui a velocidade de passagem de água que retira os íons livres por processos de lixiviação [83].

Em solos arenosos há predominância de macroporos, enquanto em solos argilosos a tendência é predominar microporos. Além disso, os solos arenosos apresentam menor CTC, maior capacidade de erosão e são mais lixiviáveis [84,85,86].

Solos arenosos, possuem os maiores valores de densidade global. Os solos argilosos, devido à baixa densidade global e elevada densidade das partículas (devido à presença de óxidos e hidróxidos de ferro) apresentam uma porosidade maior. Os valores normais de densidade para solos arenosos variam de 1,2 a 1,9  $\text{g cm}^{-3}$ , enquanto solos argilosos apresentam valores mais baixos, de 0,9 a 1,7  $\text{g cm}^{-3}$  [81,82].

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Amostra

Para realização dos ensaios experimentais, foram utilizadas fibras do pseudo-caule de bananeira variedade “Nanicão IAC-2001”, do subgrupo Cavendish, provenientes de uma plantação na cidade de Ribeira (Latitude 24°39'32"S e Longitude 49°00'32"O), São Paulo, Brasil.

#### 3.2 Preparação das amostras

Os pseudocaules de bananeira foram previamente secos a 80 °C por 48 h, em estufa, posteriormente triturados e peneirados em malha de 2 mm x 2 mm.

#### 3.3 Tratamento das amostras

Foram realizados vários pré testes antes do início dos experimentos, afim de se verificar as melhores condições de trabalho:

- ✓ Tamanho dos pellets ( $\Phi \times L$ ): pesou-se várias vezes as amostras da FBT até atingir o tamanho ideal, e as mesmas foram colocadas em solução aquosa de forma que as amostras não se desintegrassem antes dos tempos amostrais. Nesta etapa conclui-se que o peso ideal para a confecção dos pellets foi de 0,5 g.
- ✓ A partir dos dados já encontrados e publicado pelo grupo de pesquisa [8], de temperatura ideal de torrefação (260 °C) e % de incorporação de nitrogênio (10 % em relação à massa total do pellet), partiu-se dessas informações para o desenvolvimento de todas as etapas experimentais seguintes:

**Torrefação da biomassa:** A biomassa seca passou por processo de torrefação (Figura 1), aplicando-se uma razão de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup> até 240 °C, mantendo-se esse patamar por 60 minutos, em forno mufla (EDG, EDG3P-S

7000), com baixa ou nenhuma atmosfera de ar comprimido; A temperatura menor de torrefação garantiu a mesma qualidade do pellet e com menor gasto energético;

**Incorporação dos nutrientes:** Pesou-se 0,45 g da biomassa torrefada e 0,05 g dos reagentes contendo os fertilizantes agrícolas: ureia (N), fosfato de diamônio (P) e cloreto de potássio (K) de forma isolada, para enriquecimento do biocarvão;

**Peletização:** O material torrefado com os respectivos fertilizantes foram adicionados em molde de aço inox com cavidade de 10 mm de diâmetro, e prensados em uma prensa hidráulica com aplicação de 4 toneladas de pressão para produção dos pellets. Os pellets obtidos foram avaliados quanto a liberação dos fertilizantes, primeiramente em água e posteriormente no solo.

**Figura 1** Biomassa do pseudocaule de bananeira in natura e torrefada.



Fonte: Própria autora.

### 3.4 Fertilizantes minerais (NPK)

Os reagentes químicos utilizados para os ensaios de cinética de liberação em meio líquido e sólido foram: ureia, fosfato de diamônio e cloreto de potássio, cujas composições estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1** Composição dos reagentes

Reagentes Químicos	Fórmula	Massa Utilizada (g)
Ureia	CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O	0,050 g
Fosfato de Diamônio	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0,050 g
Cloreto de Potássio	KCl	0,050 g

### 3.5 Tipos de solos

Para a realização dos ensaios de liberação dos fertilizantes no solo, foram utilizados dois tipos de solos: arenoso e argiloso, provenientes da Fazenda Bela Aliança (latitude 21°58'48.4"S e longitude 47°30'29.5"O), na cidade de Pirassununga, São Paulo, Brasil [87].

### 3.6 Determinações Analíticas

#### 3.6.1 Caracterização Térmica

A caracterização térmica foi realizada por meio da Termogravimetria (TG) e Termogravimétrica Derivada (DTG), onde as amostras foram colocadas no suporte de amostra do equipamento de análise térmica simultâneo SDT-2960, Simultaneous DTA-TGA da TA Instruments, capaz de operar da temperatura ambiente até 1500 °C. O módulo apresenta sensibilidade da balança de 0,1 µg, com precisão de ± 1 %. A massa da amostra analisada foi de 12,3053 mg, utilizando-se atmosfera de ar comprimido, com vazão de 100 mL min<sup>-1</sup> e razão de aquecimento a 10 °C min<sup>-1</sup> de temperatura ambiente até 600 °C [8].

#### 3.6.2 Análise imediata

Umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas do material torrefado e in natura foram avaliados por Termogravimetria. O teor de umidade da amostra, foi determinado aplicando-se temperatura de 110 °C durante 15 minutos. Para os voláteis, a temperatura foi aumentada para 600 °C, com razão de aquecimento de 50 °C min<sup>-1</sup>, e aplicado isoterma durante 30 minutos, ambas análises utilizaram CO<sub>2</sub> como gás transportador

(130 mL min<sup>-1</sup>). Após a estabilização da massa, foi trocado o gás para ar comprimido (100 mL min<sup>-1</sup>) por 30 minutos, obtendo-se o conteúdo de carbono fixo e cinzas da amostra [20].

### 3.6.3 Análise do Nitrogênio por Termogravimetria

Para a determinação dos parâmetros cinéticos do fertilizante nitrogenado, foi utilizado a razão de aquecimento de 20 °C min<sup>-1</sup> até 300 °C. As medidas foram efetuadas a cada amostragem dos ensaios em equipamento TA Instruments, fornecendo as curvas TG e DTG das amostras avaliadas, obtidas em um módulo de análise térmica simultâneo SDT-2960, conforme trabalho publicado pelo grupo [8].

### 3.6.4 Análise do Fósforo por Espectrofotometria na região do UV-Vis

A concentração do fósforo foi determinada em Espectrofotômetro B-582 (Micronal) pelo método colorimétrico, que consiste na conversão do fósforo presente na amostra em ortofosfato. A reação produz um complexo misto molibdato/fosfato que, na presença do íon vanadato, forma o ácido molibdovanadofosfórico, de cor amarela. A intensidade da cor amarela é proporcional à concentração de íons fosfato na amostra, a partir da medida de absorvância, sendo quantificada espectrofotometricamente a 400 nm [92]. A composição da solução vanadomolibdica estão apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2** Composição dos reagentes da solução vanadomolibdica

Reagentes Químicos	Fórmula	Massa (g) e Volume (mL) Utilizados
Metavanadato de amônio	(NH <sub>4</sub> VO <sub>3</sub> )	1,0 g
Molibdato de amônio	((NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> .4H <sub>2</sub> O)	20,0 g
Ácido nítrico	(HNO <sub>3</sub> )	140,0 mL
Água deionizada	Milli-Q	Completar para 1000 mL

As soluções padrão de fósforo utilizadas para a curva analítica, foram preparadas a partir de uma solução concentrada de fosfato de potássio monobásico (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) 100 mg L<sup>-1</sup>, para preparar as soluções padrão de 1,0; 2,5; 5,0; 7,5 e 10,0 mg L<sup>-1</sup>.

### 3.6.5 Análise do Potássio por Fotometria de Chama

A concentração de potássio das amostras, foi determinado utilizando-se a técnica de fotometria de chama, obtendo-se resultados em triplicata para cada amostra.

Foi utilizado um Fotômetro de chama, modelo B-262, Micronal, com filtros de Li, Na e K, onde utilizou-se apenas o filtro de K.

As amostras aspiradas pelo tubo capilar do fotômetro são transformadas em gotas pequenas (nebulizadas) através de uma chama, onde os metais alcalinos, como o K em solução, são atomizados e excitados pela temperatura da chama, que ao retornarem ao estado fundamental, emitem a energia na forma de radiação, em comprimentos de onda característicos de cada elemento [88].

As soluções padrão de potássio utilizadas para a curva analítica, foram preparadas a partir de uma solução concentrada de fosfato de potássio monobásico ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )  $1000 \text{ mg L}^{-1}$ , para preparar as soluções padrão de 0,5; 1,0; 2,5; 5,0; 10,0; 15,0 e  $20,0 \text{ mg L}^{-1}$ .

O teor de potássio, bem como a preparação das amostras, foi determinado de acordo com um método previamente validado para a quantificação [93].

### 3.7 Análise das amostras estudadas por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

As amostras da FB in natura, torrefada, torrefada com incorporação de fertilizantes minerais e os fertilizantes isolados, foram analisados em equipamento de FTIR, VERTEX 70, Bruker, com 64 scans na região infravermelha de  $4000 \text{ a } 400 \text{ cm}^{-1}$  e resolução de  $4 \text{ cm}^{-1}$  [8].

### 3.8 Análise Termomecânica (TMA)

Para medição do intumescimento aparente da amostra da FBT, na placa de quartzo do equipamento TMA 2940 da TA Instruments, foi colocada uma cápsula de vidro  $10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  ( $\text{Ø} \times \text{L}$ ). Um pellet do biocarvão ( $\text{Ø} = 5 \text{ mm}$  e  $\text{L} = 0,92 \text{ mm}$ ), foi depositado dentro da cápsula, onde utilizou-se uma sonda de expansão no pellet (diâmetro da base de  $4 \text{ mm}$ ) com uma carga de  $0,05 \text{ N}$ . Foi colocada água deionizada

sobre a amostra, e a medida do intumescimento foi realizada em temperatura ambiente [89].

### 3.9 Ensaios de Umidade

#### 3.9.1 Umidade absorvida pelos pellets

Os pellets da FBT com incorporação dos fertilizantes NPK foram submetidos a ensaios de absorção de umidade por gravimetria, onde pellets de 0,5 g, foram armazenados em potes plásticos de 80 mL, mantidos em câmara climática (CC-500, TERRONI), considerando a Zona climática IV (zona quente e úmida/tropical), pelo Guia de Estabilidade ICH [90], com temperatura de  $30 \pm 2$  °C e  $65 \% \pm 5$  de umidade relativa (UR). Tal ensaio consistiu na pesagem sucessiva dos pellets nos tempos: 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0 e 10,0 h. Ao final, calculou-se a média da porcentagem de umidade absorvida de cada amostra.

O estudo de adsorção de umidade das amostras foi ajustado pelo modelo Exponencial, conforme a Equação 1, que pressupõe a taxa de equilíbrio do material em um instante  $t$ .

$$M_t = \frac{k_1}{k_2} - \left( \frac{k_1}{k_2} - M_0 \right) \cdot e^{-k_2 t} \quad (1)$$

onde:  $M_t$  = teor de umidade do material em um instante  $t$ ;  $t$  = tempo;  $k_1$  é a taxa de absorção de umidade a uma taxa constante e  $k_2$  é proporcional a perda de umidade naquele momento.

#### 3.9.2 Umidade dos solos

##### 3.9.2.1 Umidade residual

Determinou-se a umidade contida na amostra dos solos, a partir da metodologia de umidade dos solos [91]. Após preparada a Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), pesou-se em triplicata, aproximadamente 20 g de solo em béquer de massa conhecida. Posteriormente, colocou-se em estufa a 105 °C por 24 h. Retirou-se as amostras da

estufa e transferiu-as para dessecador. Após esfriar, pesou-se novamente as amostras, para determinação de sua umidade residual, utilizando-se a Equação 2:

$$U = \frac{A-B}{B} \times 100 \quad (2)$$

onde:  $U$  = teor da umidade (%);  $A$  = massa da amostra antes da secagem (g) e  $B$  = massa da amostra após a secagem a 105 °C (g).

### 3.9.2.2 Umidade atual

Determinou-se o teor de umidade presente nas amostras dos solos nas condições de campo <sup>[91]</sup>, para isso utilizou-se o mesmo cálculo descrito no item 3.9.2.1.

## 3.10 Ensaio Cinéticos no Meio líquido

Para padronização do tempo amostral de 10 horas, foram realizados pré testes, onde verificou-se que após esse tempo, a liberação dos nutrientes atinge o equilíbrio, tornando a cinética de liberação constante pelo tempo. A quantidade de líquido aplicado nos béqueres e a análise do nitrogênio por termogravimetria foi seguido do artigo publicado pelo grupo de pesquisa <sup>[8]</sup>.

Nos ensaios de cinética de liberação dos fertilizantes em meio líquido (Figura 2), foram utilizados béqueres de 250 mL, contendo 100 mL de água Milli-Q (deionizada) e um pellet por béquer, nos tempos amostrais de: 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 6,0; 8,0 e 10,0 horas. A cada tempo retirou-se, em triplicata, amostras analisadas de acordo com o elemento incorporado ao biocarvão.

**3.10.1 Análise do Nitrogênio (N):** Os pellets foram coletados nos tempos pré estabelecidos e secos em estufa por 0,5 hora em temperatura de 60 °C ± 5 °C. Posteriormente, foram analisados por Termogravimetria.

**3.10.2 Análise do Fósforo (P):** Ao final de cada tempo experimental, coletou-se as amostras líquidas e as mesmas foram posteriormente analisadas em espectrofotômetro pelo método do molibdato-vanadato <sup>[92]</sup>.

**3.10.3 Análise do Potássio (K):** A cada tempo amostral, retirou-se 1 mL da solução e transferiu-se para balão volumétrico de 25 mL, completando-se o volume final com água Milli-Q. A cada 1 mL retirado do béquer, foi adicionado 1 mL de água Milli-Q para que não ocorresse mudança do volume total nos béqueres avaliados. Posteriormente, as amostras foram analisadas em fotômetro de chamas [93].

**Figura 2** Amostras dos pellets em meio aquoso



Fonte: Própria autora.

### 3.11 Ensaios Cinéticos no Meio Sólido

Para padronização do tempo amostral de 15 dias, foram realizados pré testes, onde verificou-se que após 12 dias a liberação dos nutrientes atingiu o equilíbrio, tornando a cinética de liberação constante pelo tempo. Para os ensaios cinéticos de liberação dos fertilizantes no solo (Figura 3), foi empregado delineamento experimental de blocos ao acaso em esquema fatorial 1 x 2 (um tratamento e dois tipos de solos) e 3 repetições cada, sendo a parcela experimental (repetição) constituída por um vaso (pote plástico de 250 mL, Copaza) contendo um pellet de 0,5 g (0,45 g de biocarvão e 0,05 g de NPK). Os pellets foram colocados em uma bolsa de náilon e dispostos a 2,5 cm de profundidade em cada vaso, contendo 5 cm de solo.

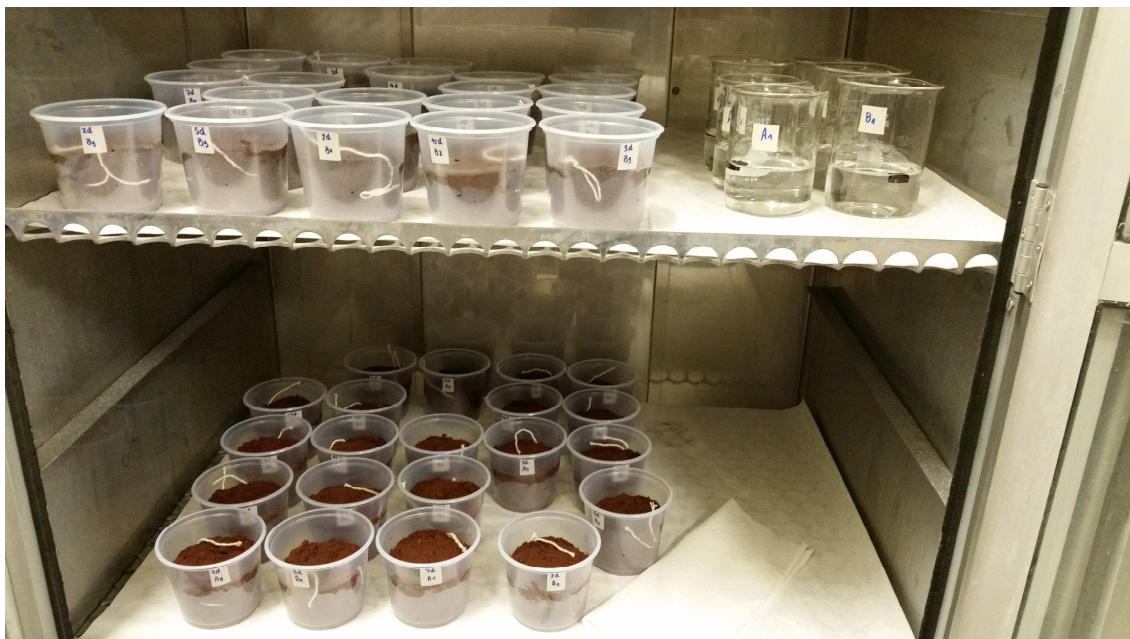
Os vasos foram mantidos em câmara de crescimento (CC-500, TERRONI) regulada com temperatura de  $30 \pm 2$  °C e  $65 \% \pm 5$  de umidade relativa (UR), Figura 4.

**Figura 3** Amostras dos pellets em meio sólido contendo: solo A (argiloso) e solo B (arenoso) na parte superior da foto e na inferior, metade da camada do solo (A), disposição do pellet sobre o solo (B) e cobertura do pellet com a outra camada de solo (C)



Fonte: Própria autora.

**Figura 4** Câmara de crescimento contendo os vasos estudados em cada experimento.



Fonte: Própria autora.

As amostragens foram realizadas após 12, 24, 36 e 48 h e aos 3, 5, 7, 9, 12, e 15 dias. Ao final de cada tempo experimental, os pellets foram retirados dos solos, colocados em béqueres de 250 mL, contendo 100 mL de água Milli-Q e analisados de acordo com o tipo de fertilizante incorporado. O total de fertilizantes liberado nos solos foi equivalente a diferença da massa inicial incorporada ao pellet, mais a quantidade de elementos presentes na própria fibra pelo valor encontrado em cada análise.

Os tratamentos foram:

- 1) Pellets com fertilizante incorporados no solo A + aplicação de água no dia;
- 2) Pellets com fertilizante incorporados no solo B + aplicação de água no dia;

Os solos utilizados no experimento foram caracterizados quanto à classificação textural em argiloso (solo A) e arenoso (solo B). Tanto no solo A, quanto no solo B foram aplicados 10 mL de água no dia do experimento, e a cada 4 dias foi realizada rega.

**3.11.1 Análise do Nitrogênio (N):** Ao final de cada tempo experimental, as bolsas de nylon foram coletadas dos solos, os pellets foram retirados das bolsas e os mesmos foram analisados conforme descrito no item 3.10.1.

**3.11.2 Análise do Fósforo (P) e do Potássio (K):** Ao final de cada tempo experimental, os pellets foram retirados dos solos, colocados em béqueres de 250 mL, contendo 100 mL de água Milli-Q e analisados conforme descrito nos itens 3.10.2 e 3.10.3 respectivamente.

### 3.12 Ajustes cinéticos da liberação dos fertilizantes

Neste trabalho foram considerados modelos cinéticos baseados na relação entre a taxa instantânea e o conteúdo a ser liberado (primeira e segunda ordem), incorporando também etapas como dissolução e difusão (modelo Korsmeyer-Peppas). Os valores das medidas experimentais foram associados aos parâmetros estimados para os modelos Exponencial [71] e Quociente [94] já descritos em literatura.

A partir de pesquisas sobre liberação de fertilizantes e para a validação do estudo cinético dos macronutrientes incorporados ao biocarvão estudado neste trabalho, foram desenvolvidos e propostos novos modelos matemáticos Exponencial e Quociente, a partir dos descritos em literatura, pelo Prof. Dr. Jorge Manuel Vieira Capela, colaborador e membro do nosso grupo de pesquisa. Aplicou-se o parâmetro tempo de meia vida na parte determinística do modelo estatístico. Ambos os modelos foram capazes de prever o tempo em que a liberação dos nutrientes alcançam o equilíbrio. Dos resultados obtidos com a aplicação dos modelos propostos, foi elaborado e enviado para publicação o artigo desta pesquisa [95]. Os modelos estão descritos nas equações a seguir.

#### **Modelo Exponencial (Pseudo primeira ordem)**

Seja  $C = C(t)$  a concentração ( $\text{mg L}^{-1}$ ) do nutriente presente no pellet em um instante  $t$  (h) e seja  $k_1$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ) o valor limite da concentração de nutriente liberado. É razoável supor que a taxa instantânea de variação da concentração seja proporcional ao conteúdo a ser liberado e ao tempo gasto durante as etapas de dissolução e de difusão.

Portanto, propõe-se a seguinte equação cinética:

$$\frac{dC}{dt} = -k_2(C - k_1)t^{n-1}, \quad (3)$$

sendo  $k_1$ ,  $k_2$  ( $\text{h}^{-n}$ ) e  $n > 0$  (adimensional) são parâmetros estimados com base em um conjunto de dados experimentais.

A integração da Equação 3, resulta em:

$$C(t) = (C_0 - A) + Ae^{-\frac{\ln 2}{V}t^n}, \quad (4)$$

onde  $C_0 = C(0)$  é a concentração inicial,  $A = C_0 - k_1$  e  $V = \ln 2/k_2$ .

Em cada instante, a concentração  $C_r(t)$  de nutriente retido no meio é dada pela diferença entre a concentração inicial  $C_0$  e a concentração  $C(t)$ , isto é

$$C_r(t) = A \left(1 - e^{-\frac{\ln 2}{V}t^n}\right), \quad (5)$$

onde o parâmetro  $A$  representa o valor limite da concentração de equilíbrio de nutriente retido a longo prazo.

Se  $\alpha$  for a razão definida por:

$$\alpha = \frac{C_r(t)}{A}, \quad (6)$$

então o tempo  $t_\alpha$  necessário para atingir qualquer nível  $\alpha$  de retenção do nutriente é dado por:

$$t_\alpha = \left(-V \frac{\ln(1 - \alpha)}{\ln 2}\right)^{\frac{1}{n}}, \quad (7)$$

de onde obtém-se o parâmetro  $V$  como potência do tempo de meia-vida, isto é

$$V = (t_{0.5})^n \quad (8)$$

### **Modelo Quociente (Pseudo segunda ordem)**

Neste caso, supõe-se que taxa instantânea de variação da concentração do nutriente em um instante  $t$  seja dada segundo a equação:

$$\frac{dC}{dt} = -k_2(C - k_1)^2 n t^{n-1}, \quad (9)$$

sendo  $k_1$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $k_2$  ( $(\text{mg L}^{-1})^{-1}\text{h}^{-n}$ ) e  $n > 0$  (adimensional) parâmetros a serem ajustados com base em um conjunto de dados experimentais.

A integração da Equação (9) resulta em:

$$C(t) = C_0 - \frac{At^n}{V + t^n}, \quad (10)$$

onde  $C_0 = C(0)$  é a concentração inicial,  $A = C_0 - k_1$  e  $V = 1/[(C_0 - k_1)k_2]$ .

Em cada instante  $t$  a concentração de  $C_r(t)$  de nutriente retido no meio no qual o pellet se encontra é dada por:

$$C_r(t) = \frac{At^n}{V + t^n}, \quad (11)$$

onde o parâmetro  $A$  representa o valor limite da concentração de equilíbrio de nutriente a longo prazo.

O tempo  $t_\alpha$  necessário para atingir qualquer nível  $\alpha$  (Equação 4) de retenção do nutriente é dado por:

$$t_\alpha = \left( \frac{\alpha V}{1 - \alpha} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (12)$$

Da Equação (10), obtém-se o parâmetro  $V$  como sendo uma potência do tempo de meia vida:

$$V = (t_{0,5})^n$$

A equação semi-empírica, chamada de lei da potência foi formulada para descrever a liberação de drogas de sistemas poliméricos [96,97,98,99]. Neste trabalho, associou-se o significado do expoente de liberação,  $n$ , da lei da potência, com o expoente  $n$  do modelo exponencial, admitido em sua proposição como adimensional. O expoente  $n$  está associado ao mecanismo de liberação como caso I (difusão de Fickian), em que o coeficiente de difusão descreve o transporte; e o caso II (controle de intumescimento), no qual o processo de relaxamento da estrutura polimérica após a adsorção de água é o mecanismo determinante. Considerando a geometria cilíndrica, para liberação controlada por difusão (Fickian)  $n = 0,45$ ; para liberação controlada por intumescimento (caso II)  $n = 0,89$ ; e para valores de  $0,45 < n < 0,89$  (transporte anômalo ou não-fickiano), temos a sobreposição de ambos os fenômenos [99].

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Caracterização das Amostras**

#### **4.1.1 Espessura do pellet do pseudocaule de bananeira torrefado**

A espessura da amostra foi determinada, em triplicata, pela média dos pellets produzidos com massa de 0,50 g, em micrômetro digital da marca ZAAS (0 – 25 mm, resolução de 0,001 mm). Os pellets apresentam dimensões média de  $3,70 \pm 0,06$  mm de espessura por 10 mm de diâmetro.

#### **4.1.2 Torrefação do pseudocaule de bananeira**

Estudos realizados pelo nosso grupo de pesquisa encontraram um faixa ideal de temperatura de torrefação de 220 a 300 °C para os resíduos da cultura da bananeira, que proporcionam uma melhor agregação das partículas do biocarvão na formação dos pellets [8]. O forno mufla utilizado para torrefação das amostras foi programado com razão de 10 °C min<sup>-1</sup> e patamar de 240 °C por 60 minutos, temperatura inferior aplicada em estudos anteriores (260 °C), que deve-se provavelmente, ao tamanho da mufla utilizada para a produção do biocarvão neste trabalho. Os experimentos conduzidos nesta temperatura apresentaram boa agregação de partículas do biocarvão com menor consumo de energia.

#### **4.1.3 Características físicas e químicas dos solos estudados**

Os solos utilizados nos experimentos foram coletados e analisados no Laboratório de Ciências Agrárias/Solos (ZAZ), da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (USP), Pirassununga - SP, sob responsabilidade do Prof. Dr. Pedro Henrique de Cerqueira Luz.

Nas Tabelas 3, 4 e 5, têm-se os resultados da análise dos solos utilizados neste trabalho. Os resultados obtidos foram: análise química, análise dos micronutrientes e análise física dos solos, respectivamente, utilizados nos experimentos de cinética de liberação dos fertilizantes agrícolas.

**Tabela 3** Resultado da análise química dos solos estudados

Resultados da Análise Química dos Solos																	
Solos	pH	P <sub>(res)</sub>	K <sub>(res)</sub>	Ca	S	Mg	Al	H+Al	Zn	Mn	Cu	B	Fe	SB	CTC	V%	M.O.
Arenoso	5,8	23	0,4	40	10	8	0	15	0,6	2,6	0,7	0,15	37	48	63	77	15
Argiloso	6,1	40	1,2	56	11	21	0	13	1	8,7	5,1	0,06	16	78	92	85	22

M.O.=Matéria Orgânica (g kg<sup>-1</sup>); P, S, Zn, Mn, Cu, B e Fe (mg dm<sup>-3</sup>); K, Ca, Mg, Al, H+Al, SB=Soma de Bases; CTC= Capacidade de Troca Catiônica (mmolc dm<sup>-3</sup>); V=Saturação por Bases (%).

**Tabela 4** Resultado dos micronutrientes dos solos estudados

Micronutrientes dos Solos (mg dm <sup>-3</sup> )					
Solos	B	Fe	Mn	Zn	Cu
Arenoso	0,15	37	2,6	0,6	0,7
Argiloso	0,06	16	8,7	1,0	5,1

**Tabela 5** Resultados da análise física dos solos estudados

Resultados da Análise Física dos Solos (g g <sup>-1</sup> )				
Solos	Areia Total	Argila	Silte	Classificação Textural
1	849	126	25	Arenosa
2	522	388	90	Argilosa

Pela quantidade de areia, silte e argila apresentados na análise dos solos é possível observar que trata-se de uma areia franca e uma argila arenosa, conforme descrito pelo triângulo de classes texturais <sup>[100]</sup>.

Estudos mostram que a aplicação do biocarvão em solos com baixa fertilidade aumenta a microbiota do solo o que significa que há melhora dos processos biogeoquímicos, agronômicas e ambientais <sup>[31]</sup>. Pela classificação dos solos utilizados neste trabalho nota-se que ambos os solos seriam altamente beneficiados com a aplicação do biocarvão do pseudocaule de bananeira torrefada, principalmente o solo arenoso pela quantidade muito baixa de potássio (0,4 mmolc dm<sup>-3</sup>), visto que o biocarvão do pseudocaule da bananeira apresenta elevada concentração deste elemento.

#### 4.1.4 Análise imediata

Os resultados de umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas do material torrefado e in natura foram avaliados por Termogravimetria e os resultados obtidos da TG estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6** Análise imediata da FB in natura e torrefada a 240 °C

Temperatura de Torrefação (°C)	Umidade (%)	Voláteis (%)	Carbono Fixo (%)	Cinzas (%)
Fibra in natura	5,09	64,73	18,05	12,13
240	3,84	33,04	45,22	18,09

#### 4.1.5 TG/DTG

A Figura 5 apresenta as curvas TG e DTG da FBT a 240 °C contendo 10 % de ureia (FBT-N), fosfato de amônio (FBT-P) e cloreto de potássio (FBT-K).

A FBT apresenta quatro eventos térmicos com perda de massa equivalente a 4 %, em temperatura de 30 a 100 °C devido a umidade absorvida após a torrefação. Entre 200 e 350 °C deve-se a decomposição dos compostos voláteis não combustíveis e entre 350 e 450 °C ocorre perda de massa brusca, indicativo de combustão. Entre 430 e 500 °C ocorre a decomposição do carbono fixo residual, restando 18 % de cinzas no material estudado.

Nas curvas TG/DTG (A e B) da Figura 5, correspondente a ureia, são observados dois picos (DTG) de perda de massa entre 133-242 °C correspondente a decomposição da ureia e 266-500 °C são devidos a derivados da decomposição da ureia. Os resultados foram comparados com a curva padrão do trabalho publicado pelo grupo [8].

As curvas TG/DTG (C e D) da Figura 5, correspondente ao fosfato de diamônio, apresenta perda de massa de 36 % entre 130 e 350 °C. As curvas TG/DTG não apresentam decomposição da amostra até 600 °C, restando ainda 55 % de resíduos. Entre 120 e 270°C ocorre a decomposição de uma molécula de amônia originada do  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ , decompondo-se na sequência em  $(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$  e depois para  $\text{NH}_4\text{PO}_3$  até 280 °C. Está decomposição não é observada na amostra de FBT-P. O resíduo observado acima de 600 °C é de  $\text{P}_2\text{O}_5$  [101]. Parte da perda de massa do fosfato de

amônio ocorre concomitantemente com a decomposição térmica do carbono volátil e fixo da FBT e da FBT-P, evitando a combustão, apresentando um pico intermediário entre 420 e 460°C, o que evidencia uma interação tanto física quanto química da molécula do fosfato de amônio com a biomassa torrefada, como constado pela análise de FTIR, Figura 7 (D).

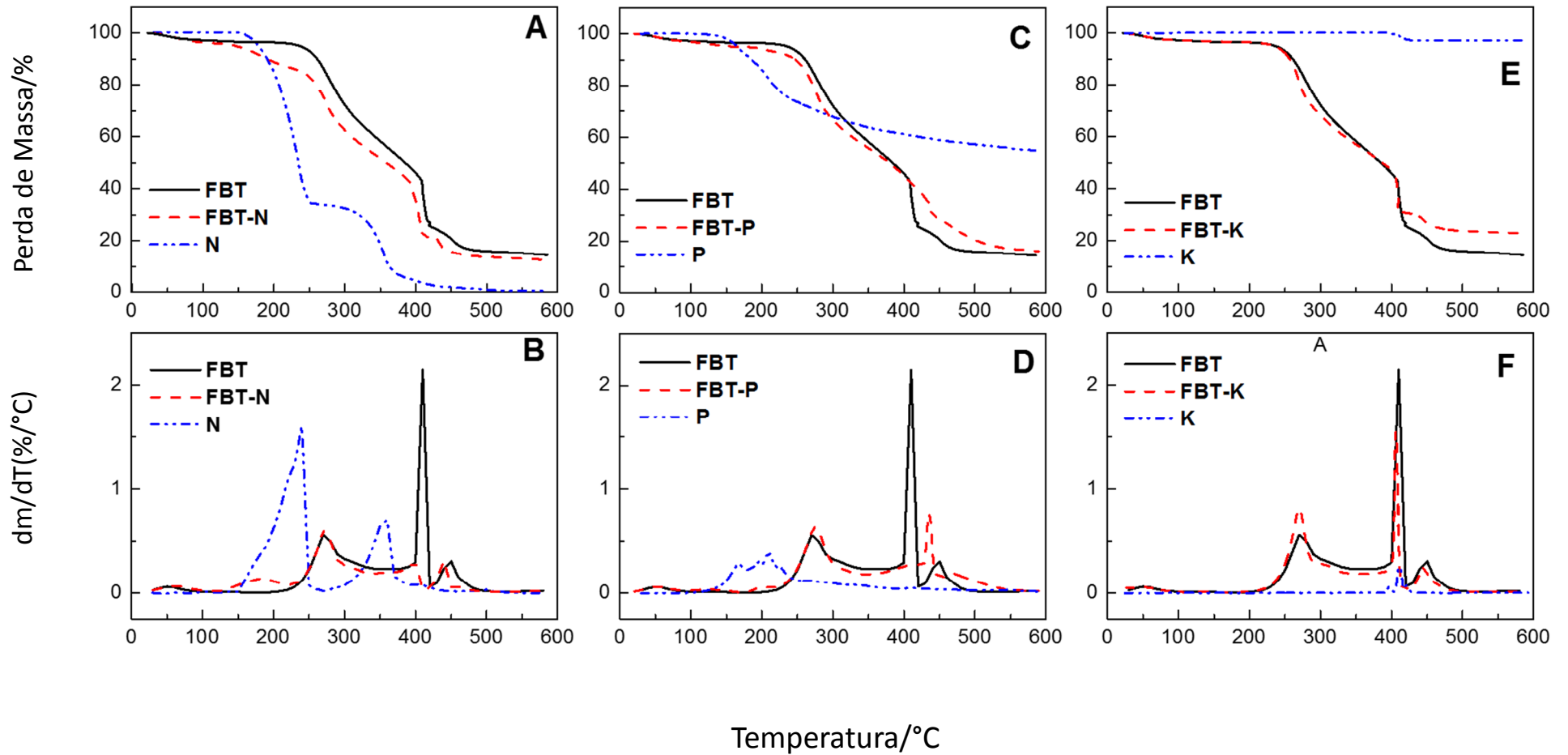
As curvas TG/DTG (E e F) da Figura 5, corresponde ao cloreto de potássio, onde não apresenta picos de decomposição térmica aparente, pois sua temperatura de fusão é maior que 600 °C, nota-se somente uma crepitação em 400 °C, o que se constata que não há relação da molécula com a biomassa torrefada.

A Tabela 7 apresenta os eventos da decomposição térmica das amostras estudadas com as respectivas temperaturas dos fenômenos observados nas curvas da TG/DTG, da Figura 5.

**Tabela 7** Decomposição térmica das amostras estudadas

<b>Amostras</b>	<b>T °C</b>	<b>Decomposição térmica</b>
FBT	30-100	Umidade
	200-350	Voláteis
	430-500	Carbono fixo
Ureia	133-242	T °C de decomposição da Ureia
	266-500	Derivados da ureia
Fosfato de diamônio	130-350	Carbono volátil e fixo da FBT e da FBT-P
	120-270	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$
	280	$(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$ para $\text{NH}_4\text{PO}_3$
	420-260	Interação física e química do fosfato com o biocarvão estudado
	> 600	$\text{P}_2\text{O}_5$
Cloreto de potássio	400	Crepitação
	> 600	T °C de fusão da amostra

**Figura 5** Curvas TG e DTG: (A e B) da ureia (N), FBT e FBT com a incorporação da ureia (FBT-N); (C e D) do fósforo (P), FBT e FBT com a incorporação do fósforo (FBT-P) e (E e F) do potássio (K), FBT e FBT com a incorporação do potássio (FBT-K), a 240 °C, em atmosfera de oxigênio (100 mL.min<sup>-1</sup>) e razão de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup> até 600 °C.



## 4.2 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

As análises por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier foram realizadas com o objetivo de complementar as informações obtidas por Termogravimetria.

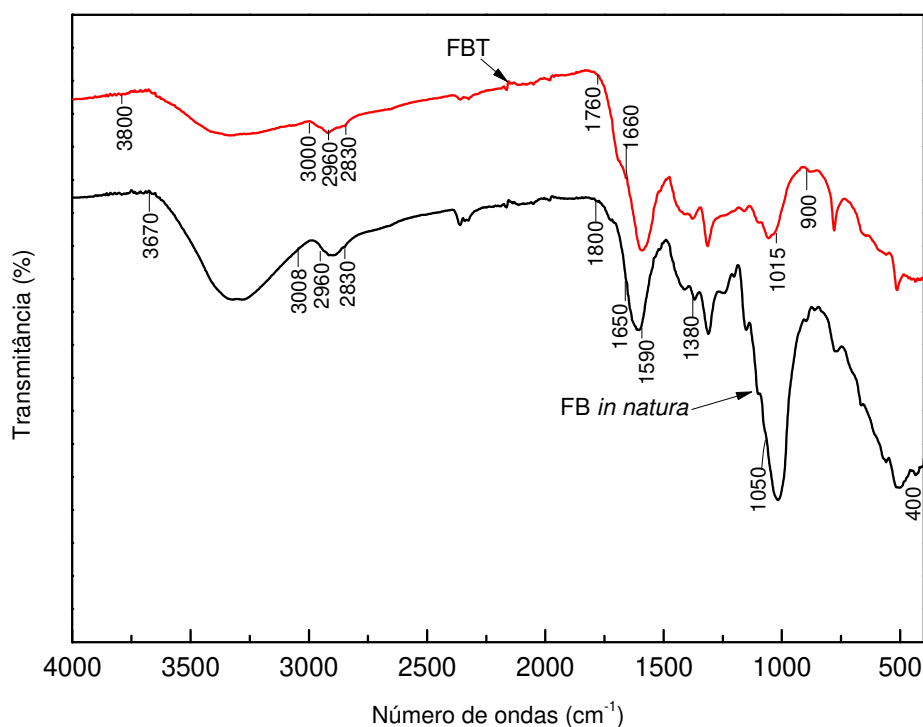
A FB in natura (Figura 6) apresenta bandas características na região de 3670-3008  $\text{cm}^{-1}$  que são atribuídas as vibrações intramolecular e intermolecular das ligações -OH <sup>[71]</sup>; entre 2960-2830  $\text{cm}^{-1}$  é devido ao estiramento assimétrico e simétrico do metil e metileno, respectivamente. Esse estiramento está presente principalmente na lignina. A região entre 1800-1590  $\text{cm}^{-1}$  indica a presença de grupos carbonila, essa região exibe os estiramentos da ligação C=O, presente na biomassa. Na região entre 1380-1050  $\text{cm}^{-1}$  são bandas características de celulose e lignina, como alongamento da cadeia alifática C-H do CH<sub>3</sub>, alongamento C-O, C-C e alongamento do anel C-O, entre outros, são observados <sup>[71]</sup>. A região entre 1650-400  $\text{cm}^{-1}$  é bastante complexa, contendo uma grande quantidade de bandas relativas aos principais componentes lignocelulósicos como mostra a Tabela 8 <sup>[102,103,104]</sup>.

**Tabela 8** Bandas no infravermelho dos principais componentes do pseudocaule da bananeira.

Número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Grupo funcional	Componente
3800-3000	Estiramentos intermoleculares e intramoleculares do grupo -OH	Lignina <sup>102</sup>
2960-2830	Estiramento assimétrico e simétrico do metil e metileno	Lignina <sup>102</sup>
1770-1683	Estiramentos C=O de carbonilas em sistemas conjugados e não conjugados.	Lignina, Hemicelulose e celulose <sup>102</sup>
1632	Alongamentos de grupos H-O-H	Celulose, Hemicelulose e Lignina. <sup>102,103,104</sup>
1600 e 1510	Vibrações de ligação aromática de lignina C=C e vibrações C=O da ligação de lignina	Lignina <sup>102</sup>
1480-1290	Deformações C-H	Lignina, Hemicelulose e Celulose <sup>102,103,104</sup>
1242	Alongamentos da ligação éter C-O-C	Hemicelulose <sup>103</sup>
1161	Alongamentos das ligações C-O-C, C-OH	Hemicelulose e Celulose <sup>102,103</sup>
1033-1031	Vibrações C-O, C-C, e C-C-O	Lignina, Hemicelulose e Celulose <sup>102,103,104</sup>
897 e 833	Ligações glicosídicas nos anéis de glicose	Celulose e Hemicelulose <sup>103</sup>
720-580	Alongamentos de grupos O-H fora do plano	Hemicelulose e Celulose <sup>102</sup>

Na FBT da Figura 6, observa-se uma diminuição na banda de 3800-3000  $\text{cm}^{-1}$  que deve-se a perda de umidade e dos compostos voláteis pelo processo de torrefação. Observa-se também diminuição da banda entre 2960-2830  $\text{cm}^{-1}$  característicos dos componentes lignocelulósicos. Ocorre o aparecimento de estruturas geradas pela desidratação da celulose e hemicelulose, isto é, ligações C=O. As bandas relacionadas aos estiramentos C=O de carbonilas estão na região de 1760-1660  $\text{cm}^{-1}$ . A banda forte por volta de 1015  $\text{cm}^{-1}$  no espectro in natura sofre diminuição devido à degradação dos componentes lignocelulósicos. Há também uma diminuição no sinal da banda próxima de 900  $\text{cm}^{-1}$  devido à quebra das ligações glicosídicas durante a torrefação [102].

**Figura 6** Espectroscopia no infravermelho da FB in natura e torrefada a 240 °C



A Figura 7 (A) apresenta bandas na região do infravermelho da ureia, fosfato de diamônio e cloreto de potássio, onde a ureia apresenta bandas características entre 3436, 3328, 3248, 1585 e 1157  $\text{cm}^{-1}$  relacionadas com o alongamento das ligações N-H, a banda em 1680  $\text{cm}^{-1}$  é relativa ao alongamento das ligações C=O. Em 1587  $\text{cm}^{-1}$  encontra-se o sinal do desdobramento da ligação N-H. As bandas entre

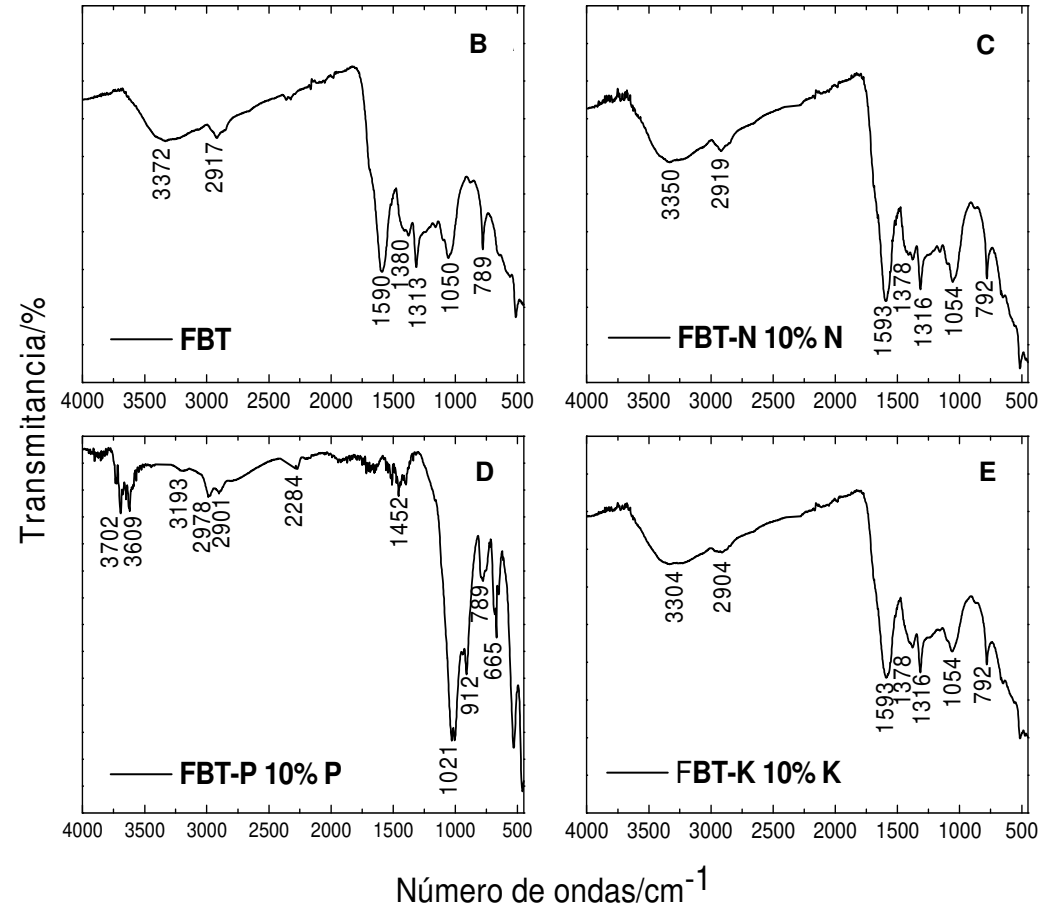
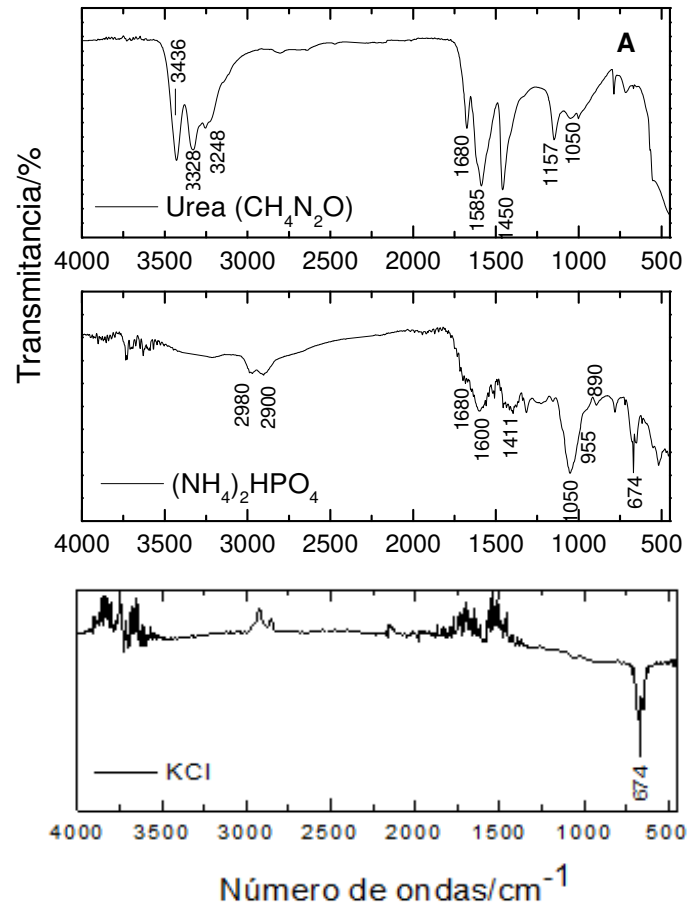
1456 e 1058  $\text{cm}^{-1}$  são associadas com bandas intensa de ligações C-N e a banda de 787  $\text{cm}^{-1}$  é característica de ligações O-C-N [71,105,106]. O fosfato de diamônio apresenta bandas largas de vibração entre 3500 e 2900  $\text{cm}^{-1}$ , que são atribuídas a deformação N-H e alongamento das ligações  $\text{NH}_4^+$  e P-NH. Na região de 1680  $\text{cm}^{-1}$  são observadas bandas que deve-se as vibrações do alongamento de  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{NH}_2$ . As bandas abaixo de 1050 deve-se ao alongamento simétrico e assimétrico da ligação P-O [107,108,109,110]. O KCl é transparente para 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ .

A Figura 7 (C) e (E), referentes as amostras da FBT-N e FBT-K, não mostram diferenças significativas nas bandas em relação à amostra FBT. Isso significa que não houve interação significativa entre ureia e KCl com o biocarvão.

A Figura 7 (D) FBT-P apresentou uma importante interação com a FBT em bandas de 3500 a 3000  $\text{cm}^{-1}$  e na região de entre 1800 a 1300, as banda são características do biocarvão e são atribuídas a grupos OH e alongamento C-H e C-O no anel alifático. As bandas em 3900 a 3410  $\text{cm}^{-1}$  devem-se ao estiramento externo da ligação O-H; a banda entre 2978 e 2901  $\text{cm}^{-1}$  deve-se ao estiramento da ligação C-H; bandas entre 1027 a 774  $\text{cm}^{-1}$  ao grupamento  $\text{PO}_4$  (ligação P-O); bandas entre 667 a 423  $\text{cm}^{-1}$  pode ser atribuídas a vibração do grupo  $\text{PO}_4$  (ligação O-P-O) [111,112,113]. Pela análise de FTIR observa-se que o fertilizante FBT-P utilizado neste estudo apresentou interação com o biocarvão. Como os solos apresentam baixo aproveitamento dos fertilizantes fosfatados, pelo presente trabalho é possível deduzir que a incorporação do fósforo ao biocarvão seria uma maneira eficaz de melhorar a eficiência e aproveitamento desse macronutriente no solo, pela sua interação tanto física como química com a matriz do material torrefado.

O KCl é transparente, Figura 7 (A), para banda de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ , indicando que a interação do fertilizante com o biocarvão ocorre somente de forma física, como pode ser observado na Figura 7 (E).

**Figura 7** Espectros no infravermelho da ureia, fosfato de diamônio e cloreto de potássio (A); FBT (B); FBT-N com a incorporação de 10 % de ureia (C); FBT-P com a incorporação de 10 % de fosfato de diamônio (D) e FBT-K com a incorporação de 10 % de cloreto de potássio.



### 4.3 Análise Termomecânica

A Figura 8, mostra a curva de intumescimento da FBT no TMA em água deionizada.

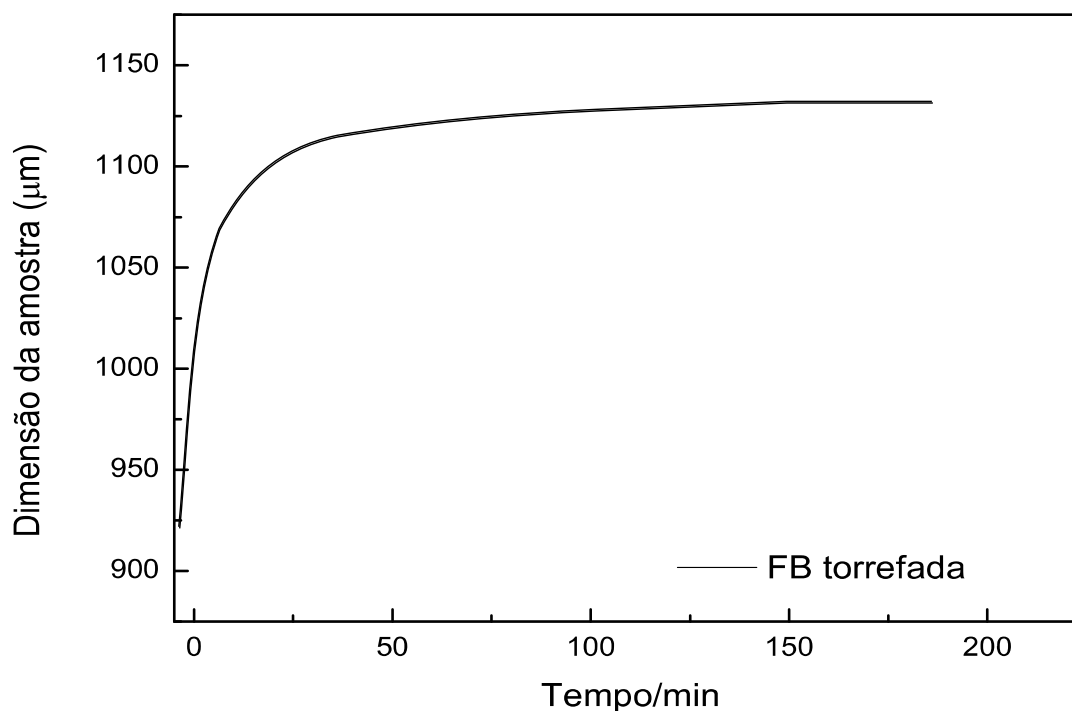
A partir da análise termomecânica verificou-se que o coeficiente de expansão ( $\varepsilon$ ) da amostra começa quase imediatamente após a água entrar em contato com a amostra e aumenta rapidamente até 50 minutos, atingindo o máximo,  $\varepsilon = 22,8 \%$ , em cerca de 180 minutos desde o início da medição, o que infere que a cinética da biomassa torrefada está diretamente relacionada à absorção de água das amostras.

A curva sigmoidal é obtida no período inicial de intumescimento. O grau de intumescimento foi definido como:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\varepsilon}{\%} = \frac{(L_t - L_0)}{L_0} \times 100 \quad (13)$$

onde  $\varepsilon/\%$  é o grau de intumescimento em porcentagem,  $L_t$  a deformação da amostra no tempo  $t$ ,  $L_0$  no tempo 0.

**Figura 8** Coeficiente de expansão da FBT pelo tempo



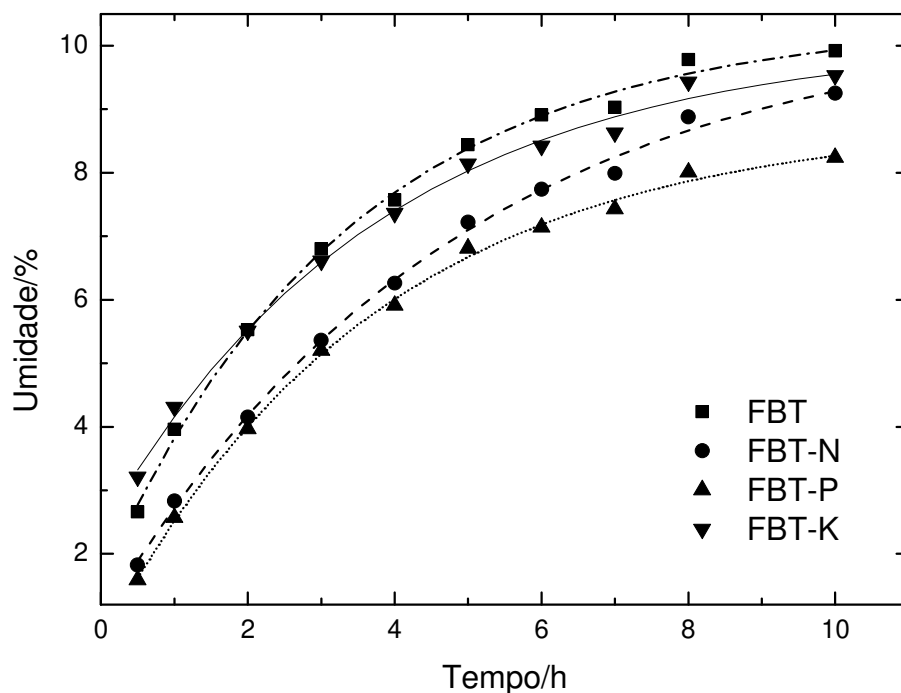
O biocarvão, devido à sua alta porosidade, pode absorver de 4 a 16 % de sua massa em água. Moléculas de água estão ligadas ao biocarvão através das ligações polares de hidrogênio O-H e C-O-H. No entanto, o biocarvão obtido do pseudocaule da bananeira por torrefação de até 400 °C mostra significante níveis de oxalatos, principalmente de potássio. Oxalato de potássio apresenta higroscopicidade significativa e é um dos responsáveis pela absorção substancial de umidade pelos biochars <sup>[71]</sup>. Essa sorção é considerada uma das respostas para o intumescimento significativo do biocarvão em estudo.

## **4.4 Ensaios de Umidade**

### **4.4.1 Umidade absorvida pelos pellets**

A avaliação da umidade absorvida pelos pellets realizada em câmara climática com umidade relativa (%U) e temperatura controlada, verificou-se que as amostras que apresentaram maior absorção de umidade foram: FBT > FBT-K > FBT-N > FBT-P, respectivamente.

Observa-se pela Figura 9, que o modelo Exponencial apresentou um bom ajuste aos dados experimentais de absorção de umidade nas amostras estudadas.

**Figura 9** Umidade absorvida dos pellets da FBT e incorporados com fertilizantes NPK

Pelo dados de umidade encontrados, nota-se que a FBT apresenta características higroscópicas, isso significa que o biocarvão pode ser aplicado ao solo de forma isolada, melhorando a disponibilidade de água em solos com baixa capacidade de campo e em períodos de estiagem e também incorporado à fertilizantes, viabilizando seu uso como biofertilizante de liberação lenta, principalmente em solos arenosos de baixa fertilidade.

Estudos anteriores relataram a capacidade do biocarvão do pseudocaule de bananeira para adsorver água pela presença principalmente de oxalato de potássio, posteriormente convertido termicamente em carbonato, em sua estrutura <sup>[7171]</sup>.

A Tabela 9, apresenta os tempos de equilíbrio determinado pelo ajuste exponencial para meia vida (tempo necessário para que a amostra alcance 50 % da sua capacidade de adsorção de umidade) e 95 % da taxa de adsorção de umidade dos pellets. A cinética relativa a sorção de água pelo tempo foi avaliada com uma sorção máxima de 10,5 % (m/m) para a amostra FBT-N e um tempo máximo de adsorção (95 %) de 22,25 h. A absorção de umidade foi ligeiramente superior a 10 % para as amostras, exceto para FBT-P (8,829 %). O distinto comportamento da FBT-P, provavelmente, deve-se à interação do fosfato por alguns locais de ligação no

biocarvão que seria ocupado pela água, como observado pela análise do FTIR, Figura 7 (D). O tempo para sorção de 95 % da água para os biocarvões contendo fertilizantes foi superior ao da amostra de FBT e esse comportamento foi mais acentuado para a amostra FBT-N, que pode ser explicado pela fraca interação da molécula de ureia com o biocarvão.

**Tabela 9** Estimativas dos parâmetros e tempos  $t$  (horas) para atingir a umidade de equilíbrio  $\alpha$  0,5; 0,90 e 0,95

Amostras	k1	k2	$M_E = k1/k2$	$R^2$	$t_\alpha$ (horas)		
					0,5	0,90	0,95
FBT	10,380	0,297	34,937	0,997	2,333	10,083	15,500
FBT-N	10,489	0,207	50,684	0,997	2,579	14,476	22,253
FBT-P	8,829	0,269	32,854	0,998	2,579	11,148	17,137
FBT-K	10,113	0,263	38,497	0,995	2,639	11,404	17,531

$k_1$  é a taxa de absorção de umidade a uma taxa constante;  $k_2$  é proporcional a perda de umidade naquele momento;  $M_E$  = teor de umidade do material em um instante  $t$ ;  $t$  = tempo.

#### 4.4.2 Umidade residual dos solos

O monitoramento da umidade do solo é uma das técnicas mais utilizada para manejo da irrigação o qual visa à determinação de quando e quanto irrigar. A determinação da umidade do solo é essencial para estudos de movimento e disponibilidade d'água no solo, erosão, manejo da irrigação e muitos outros problemas [114].

O teor de umidade residual contido nos solos estudados mostra que ainda restaram 0,5 e 3,0 % de umidade nos solos arenoso e argiloso, respectivamente.

A Tabela 10, apresenta os valores médios da umidade residual dos solos utilizados nos ensaios experimentais.

**Tabela 10** Valores médios da umidade residual dos solos estudados

Solos	T+TFSA* (g)	T+TFSE** (g)	H <sub>2</sub> O	U (g g <sup>-1</sup> )
Arenoso	20,006	19,899	0,107	0,005
Argiloso	20,005	19,451	0,554	0,03

\*T+TFSA=Tara+Terra Fina Seca ao Ar; \*\*T+TFSE= Tara+Terra Fina Seca em Estufa, onde a Tara é igual ao peso dos béqueres.

### 4.4.3 Umidade atual dos solos

Após coleta e transporte em sacos adequadamente lacrados, o teor de umidade encontrado nas condições de campo foram de 11 e 26 % para os solos arenoso e argiloso, respectivamente.

A Tabela 11, apresenta os valores médios da umidade atual dos solos utilizados nos ensaios experimentais.

**Tabela 11** Valores médios da umidade atual dos solos estudados

Solos	T+SU* (g)	T+SS** (g)	H <sub>2</sub> O	U (g g <sup>-1</sup> )
Arenoso	20,220	18,222	1,998	0,11
Argiloso	20,123	16,012	4,111	0,26

\*T+SU=Tara+Solo Úmido; \*\*T+SS= Tara+Solo Seco; onde a Tara é igual ao peso dos béqueres.

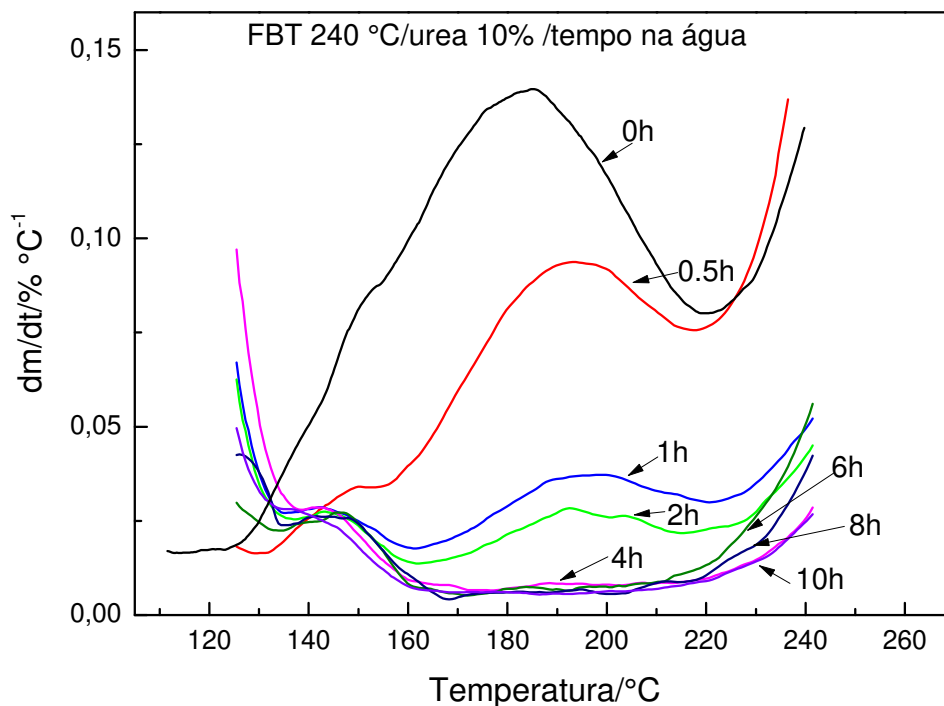
A determinação da umidade dos solos serviu de parâmetro para estimar a quantidade de água a ser aplicada pelo sistema de irrigação. Neste estudo, foram realizadas regas a cada 4 dias com aplicação de 10 mL de água deionizada.

## 4.5 Ensaios de Liberação dos Fertilizantes em Meio Líquido

### 4.5.1 Nitrogênio

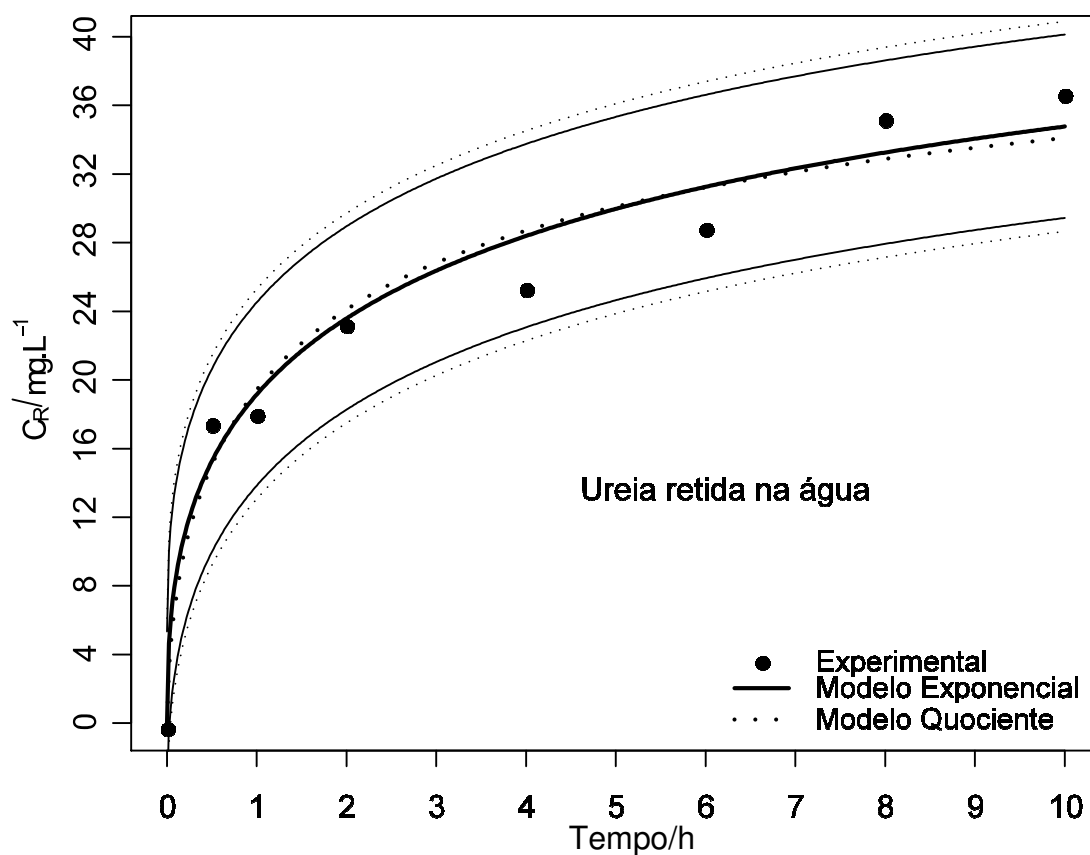
A Figura 10, representa a curva da DTG obtida da análise do pellet da FBT com a incorporação da ureia em meio líquido. As curvas foram obtidas por meio de cálculos da perda de massa (mg) nos tempos amostrais, em relação a massa de 100 % da curva padrão de decomposição de ureia, que corresponde ao valor da perda de massa encontrada no intervalo de 123-220 °C da fibra torrefada com 10 % de incorporação de ureia, seguindo a metodologia utilizada pelo grupo de pesquisa [8]. Nota-se que após 10 h de análise não é mais observado o pico de decomposição da ureia, indicando que em meio aquoso a liberação do fertilizante ocorre em um curto período de tempo.

**Figura 10** DTG da FBT a 240 °C com 10 % de incorporação de ureia, em atmosfera de ar comprimido ( $100 \text{ mL min}^{-1}$ ) e razão de aquecimento de  $20 \text{ °C min}^{-1}$  até 300 °C.



A Figura 11, apresenta o comportamento cinético do fertilizante nitrogenado após 10 h de liberação em água, determinado por TG e ajustado pelos modelos matemáticos descritos. Observa-se que os modelos Quociente e Exponencial apresentaram bons ajustes, onde o modelo Exponencial foi superior e ambos foram capazes de prever o tempo em que ocorrerá 95 % de liberação do fertilizante nitrogenado.

**Figura 11** Cinética da liberação do nitrogênio na FBT pelo tempo, em água

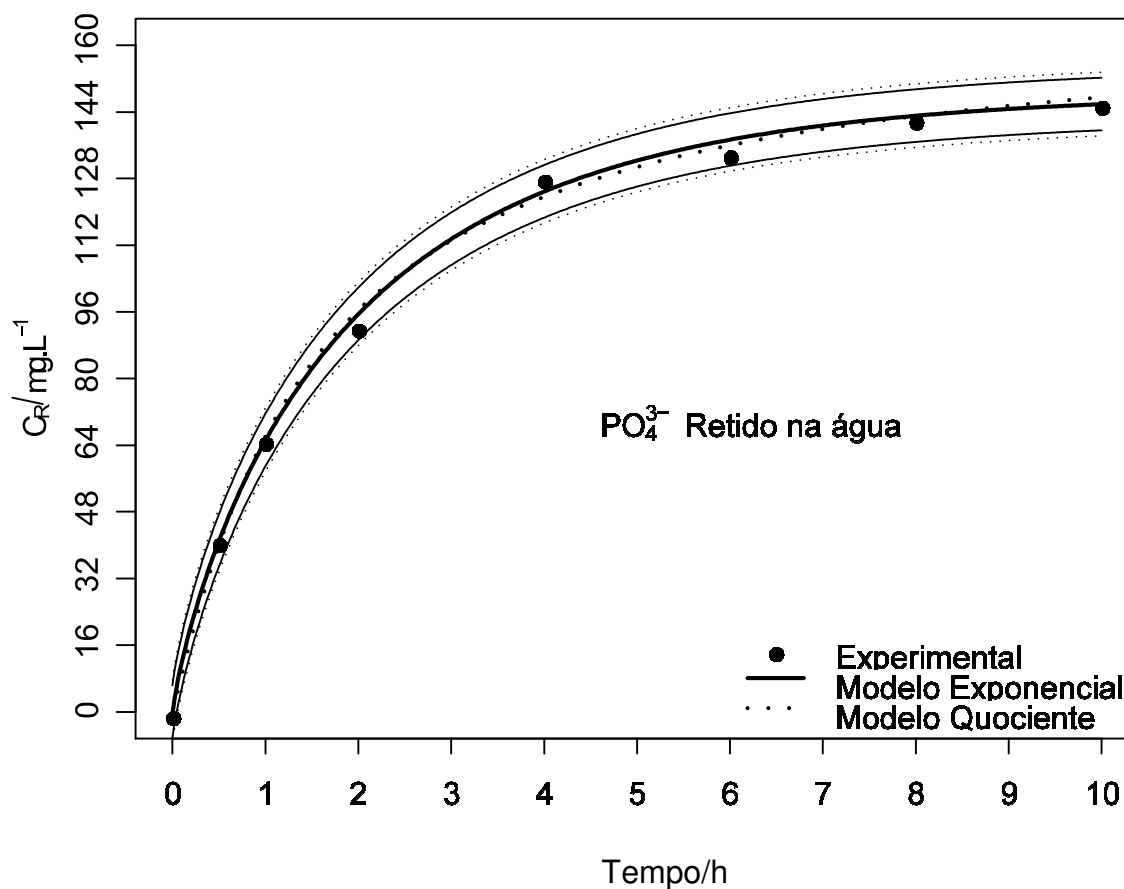


Na água, 50 % da liberação da ureia da amostra de FBT-N ocorreu 1,88 horas, com 95 % dessa liberação em 64,37 horas (Tabela 12). O expoente  $n = 0,41 \pm 0,06$  do modelo exponencial, nesse caso, pode ser indicativo de que a liberação de ureia do biocarvão ocorreu por difusão de Fickian.

#### 4.5.2 Fósforo

A cinética de liberação do fósforo foi determinada por espectrofotometria e ajustada pelos modelos matemáticos já descritos, onde é possível observar pela Figura 12, que os modelos Exponencial e Quociente apresentaram bons ajustes aos dados experimentais.

**Figura 12** Cinética de liberação do fósforo na FBT pelo tempo, em água



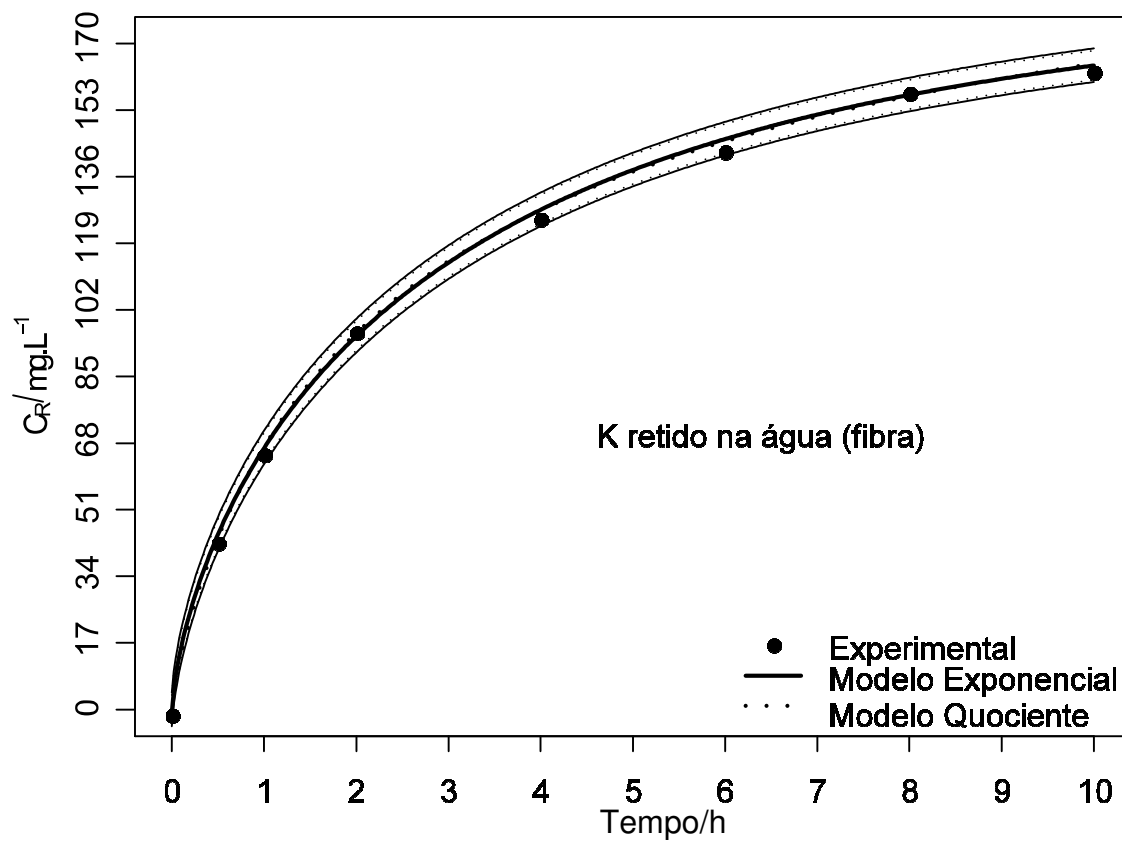
O tempo de liberação do fosfato (FBT-P) na água foi menor que o da ureia (FBT-N), Tabela 12. Para a liberação de 50 %, o tempo foi de 1,25 h, 33,5 % menor que a liberação de ureia; no entanto, o mais significativo foi a liberação de fosfato a 95 %, na qual o tempo foi quase 89 % menor que o da liberação de ureia. Avaliando o expoente  $n = 1,06 \pm 0,05$ , descobrimos que o mecanismo de liberação está mais próximo do caso II, controlado por processo de intumescimento.

#### 4.5.3 Potássio

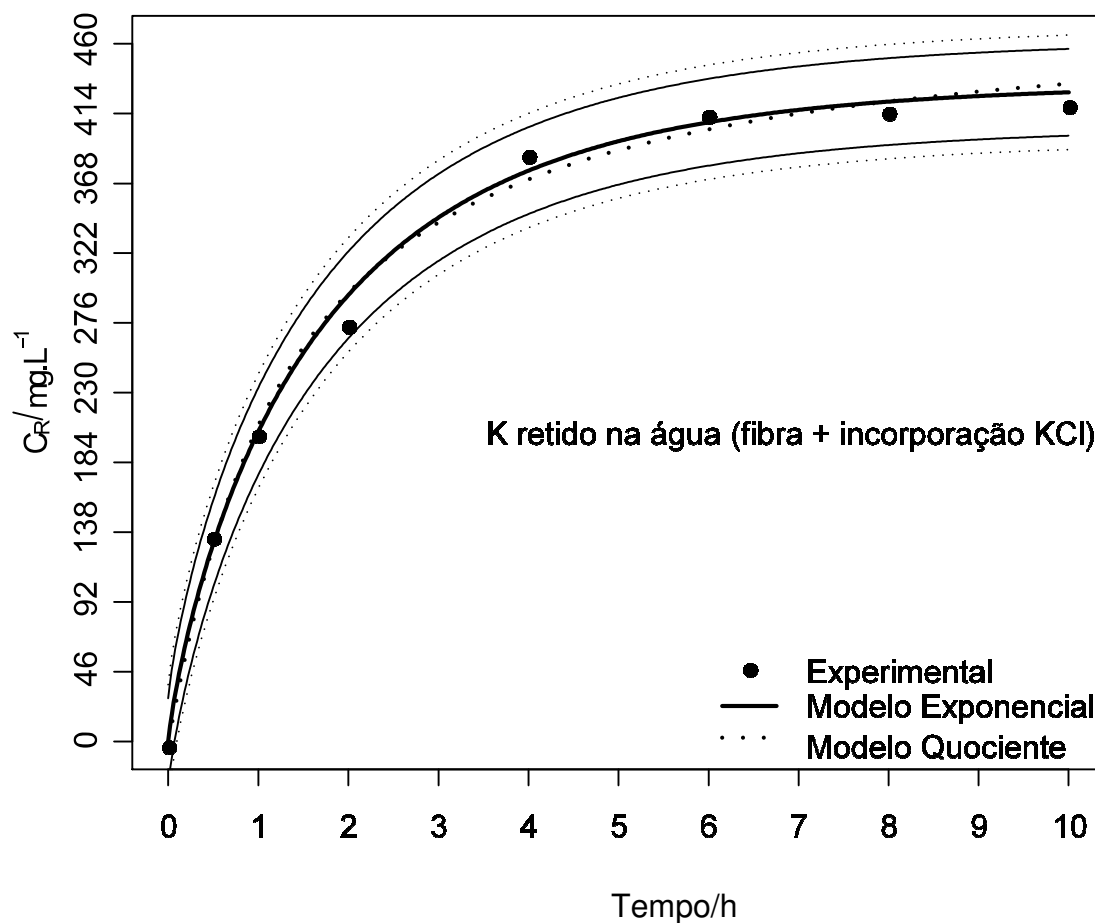
Os parâmetros cinéticos de liberação do potássio em meio aquoso foram ajustados pelos modelos matemáticos Exponencial e Quociente, que apresentaram bons ajustes na cinética do potássio presente na FBT com incorporação do macronutriente KCl, como observado nas Figuras 13 e 14. Nota-se uma liberação de quase 100 % do potássio na água. Ao final do tempo de liberação, foi determinado uma concentração média de 430 mg L<sup>-1</sup> de potássio na solução, correspondente aos

260 mg L<sup>-1</sup> incorporado + 170 mg L<sup>-1</sup> de potássio presente na própria FB. A Figura 13, mostra que o potássio presente na FBT, apresenta comportamento cinético diferente quando ocorre a incorporação desse nutriente no biocarvão.

**Figura 13** Cinética da liberação do potássio presente na FBT pelo tempo, em água



**Figura 14** Cinética da liberação do potássio com incorporação do KCl pelo tempo, em água



O tempo para liberar 50 % do potássio adicionado ao biocarvão (FBT-K), é mais curto que nas outras amostras; Contudo, o tempo para liberar 50 % do K da amostra FBT é semelhante ao verificado para FBT-N, Tabela 10. Para 95 % da liberação de potássio na água, o tempo foi de 15,33 h para a FBT e 6,40 h para FBT-K. Pode significar que, a adição de potássio na FBT para constituir a amostra FBT-K desestabiliza a estrutura do biocarvão levando a um tempo menor de liberação.

Em relação a cinética de liberação do potássio na água, encontramos o expoente  $n = 0,69 \pm 0,03$  para amostras de FBT e  $n = 0,83 \pm 0,07$  para amostras de FBT-K (Tabela 12). Apesar dos valores ligeiramente diferentes, nas duas situações, temos indicativo de transporte anômalo, ou seja, sobreposição da liberação controlada por difusão e liberação controlada por intumescimento.

Neste trabalho, além da determinação do potássio presente na FBT, também realizou-se análises da resina presente na FB in natura, cuja finalidade era descobrir se o potássio presente no pseudocaule da bananeira encontra-se na fibra ou na

resina. Após o cozimento da fibra in natura e separação da resina e da fibra lavada, bem como a transformação da fibra em cinzas, analisou-se as amostras nessas três formas da biomassa (fibra lavada, resina e cinzas) em fotômetro de chamas, onde foi possível concluir que a fibra lavada não contém potássio e que este encontra-se na resina e nas cinzas da bananeira, com valores da concentração média de potássio encontrados de 940,0 mg L<sup>-1</sup> na resina e nas cinzas de 156,2 mg L<sup>-1</sup>.

A Tabela 12 apresenta os valores dos parâmetros cinéticos dos fertilizantes em meio líquido, ajustados pelos dois modelos matemáticos.

**Tabela 12** Parâmetros cinéticos dos modelos matemáticos em meio aquoso

Amostras	Modelos	$R^2$	Parâmetros			$t\alpha$ (horas)		
			$n \pm \Delta E$	$A \pm \Delta E$	$SQR$	0,5	0,9	0,95
FBT-N	Quociente	0,96	0,58±0,09	44,16 (fixo)	37,53	1,75	74,86	268,68
	Exponencial	0,97	0,41±0,06	44,16 (fixo)	28,63	1,88	34,11	64,37
FBT-P	Quociente	1,0	1,06±0,10	167,32±7,75	43,92	1,49	11,96	24,27
	Exponencial	1,0	1,06±0,05	148,86±3,03	29,9	1,25	5,28	7,24
FBT-K	Quociente	0,99	1,05±0,17	484,55±34,96	1076,5	1,31	10,48	21,29
	Exponencial	1,0	0,83±0,07	433,71±11,88	620,4	1,11	4,67	6,40
FBT	Quociente	1,0	0,81±0,04	224,98±10,29	10,40	2,87	43,30	108,98
	Exponencial	1,0	0,69±0,03	184,33±6,14	13,93	1,86	10,49	15,33

FBT= Fibra de Bananeira Torrefada; FBT-N= Fibra de Bananeira Torrefada com Nitrogênio; FBT-P = Fibra de Bananeira Torrefada com Fósforo; FBT-K = Fibra de Bananeira Torrefada com Potássio;  $n$  e  $A$ = parâmetros das fórmulas;  $\Delta E$ =Variação do Erro;  $SQR$ = Soma dos Quadrados dos Resíduos.

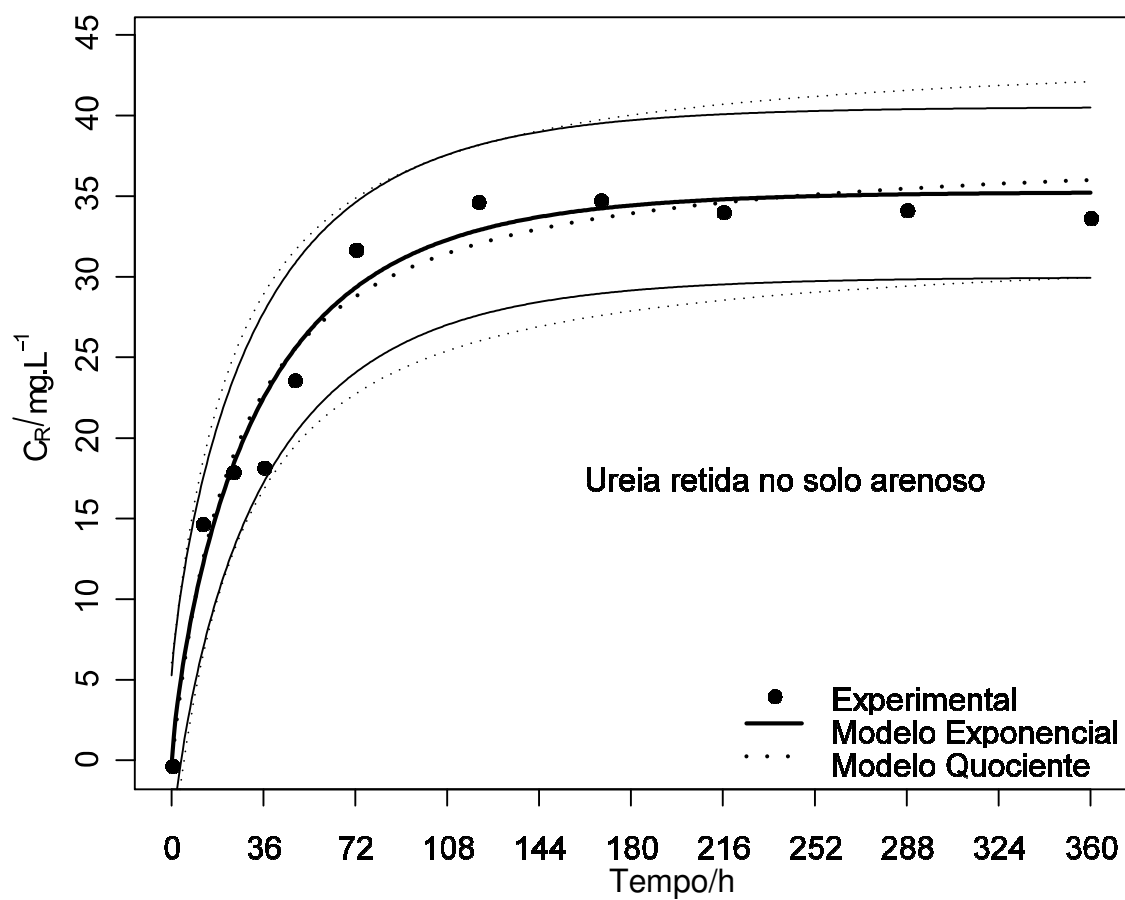
## **4.6 Ensaio de Liberação dos Fertilizantes em Meio Sólido**

O solo atua naturalmente como suporte e reserva de água e de nutrientes para as plantas. Os modelos de isotermas de sorção são fundamentais para descrever como os macronutrientes interagem com o adsorvente (biocarvão), de modo que, compreendendo essa interação, seja possível melhorar a disponibilidade de nutrientes nos solos.

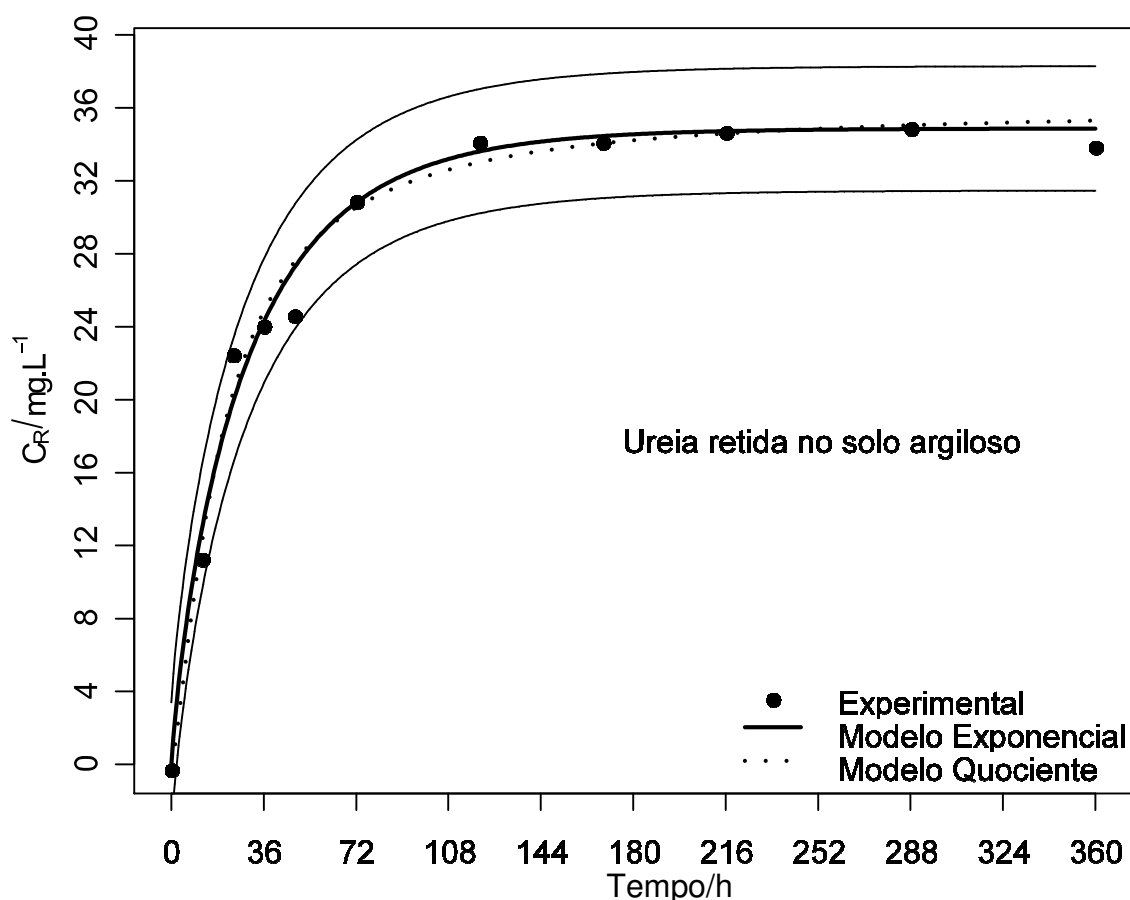
A cinética da liberação dos macronutrientes nos solos arenoso e argiloso após 15 dias de experimento, foram analisados estatisticamente pelo método dos mínimos quadrados, onde a distribuição dos erros, permite determinar os limites do intervalo de confiança, como apresentados nos gráficos de cada elemento estudado.

### **4.6.1 Nitrogênio**

As Figuras 15 e 16, apresentam comportamento cinético do nitrogênio entre os dois solos, onde observa-se que os modelos Exponencial e Quociente apresentaram bons ajustes aos dados experimentais. Observa-se também, uma rápida liberação nas primeiras horas até os quatro primeiros dias, após esse período o sistema foi liberando lentamente o macronutriente tendendo a um equilíbrio. Ao final do experimento constatou-se que mais de 88 % do nutriente havia sido liberado nos solos.

**Figura 15** Cinética da liberação do nitrogênio em FBT pelo tempo, em solo arenoso

**Figura 16** Cinética da liberação do nitrogênio em FBT pelo tempo, em solo argiloso



O mecanismo de liberação da ureia foi semelhante nos dois solos, com valores de  $n = 0,81 \pm 0,16$  e  $0,85 \pm 0,11$  para os solos arenoso e argiloso, respectivamente, Tabela 13. O expoente  $n$ , no entanto, é indicativo de transporte anômalo ou não-fickiano. Entretanto, a liberação de ureia no tempo, passou de horas (água) para dias no solo. Para o solo arenoso, foram 22,45 e 136,75 h para 50 % e 95 % de liberação de ureia, respectivamente, enquanto no solo argiloso, os tempos foram de 19,05 e 106,24 h, nas condições experimentais.

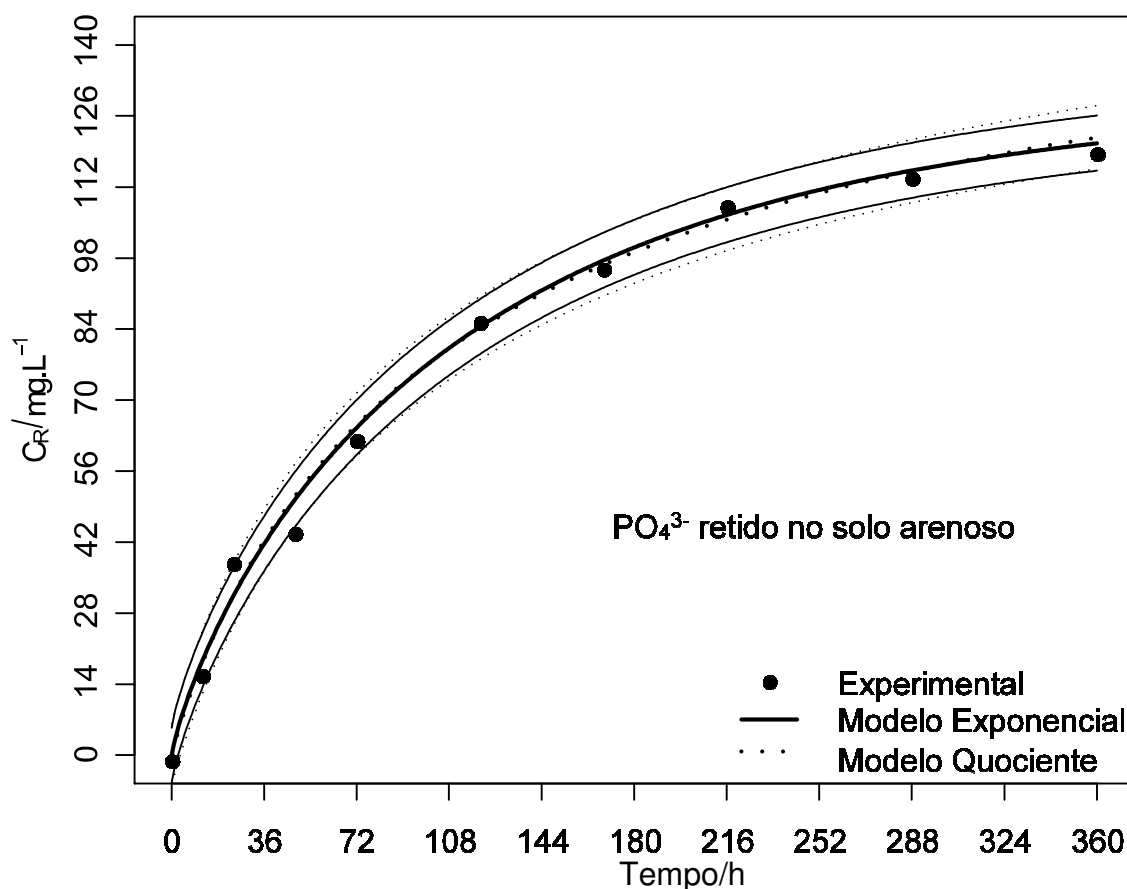
#### 4.6.2 Fósforo

O comportamento cinético da liberação do fósforo nos solos arenoso e argiloso respectivamente, estão apresentadas nas Figuras 17 e 18. Nota-se uma liberação inicial rápida e entre 24 e 48 horas de análise ocorre um pico da liberação do nutriente, que pode ser explicado pela entrada de água no material. Em seguida o sistema tende ao equilíbrio. Os modelos Exponencial e o Quociente apresentaram bons ajustes

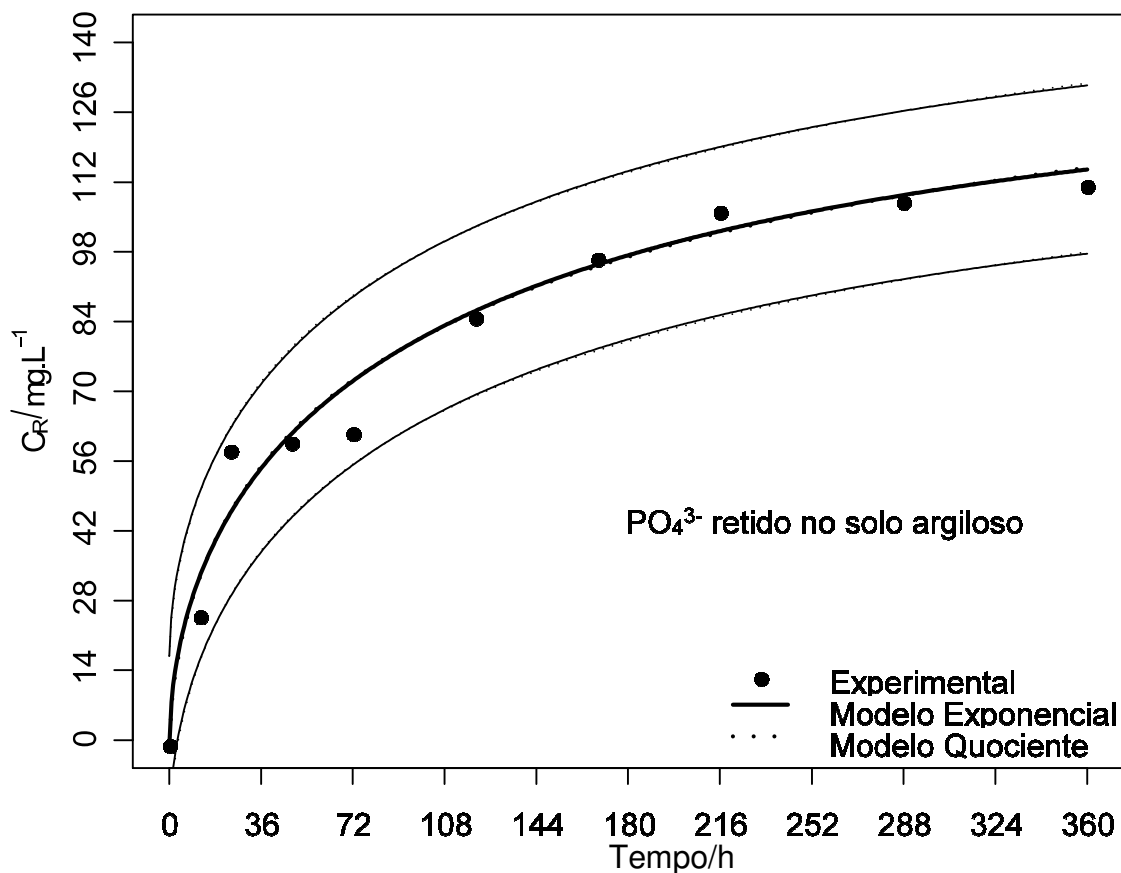
cinéticos nos solos estudados. Ao final dos 15 dias do experimento constatou-se que havia sido liberado 82 e 77 % do nutriente nos solos arenoso e argiloso, respectivamente.

Analisando os resultados do fosfato liberado nos solos, Tabelas 13, a situação é invertida quando comparada à liberação de ureia sob as mesmas condições experimentais. O tempo para liberar 50 % de fosfato da FBT-P foi de 73,18 h em solo argiloso e 61,12 h em solo arenoso, correspondendo a um tempo de 68-69 % maior do que o observado para a liberação de ureia. Os resultados da liberação a 95 % de fosfato da FBT-P nos solos, indicam sua influência no equilíbrio de liberação, ou seja, a composição química dos solos, em especial o solo argiloso, mostra que há interação química da molécula de fosfato com o biocarvão e também com os constituintes dos solos e que por isso houve diferença no tempo de liberação do fósforo no tempo de liberação de 95 %.

**Figura 17** Cinética da liberação de fósforo em FBT pelo tempo, em solo arenoso



**Figura 18** Cinética da liberação do fósforo em FBT pelo tempo, em solo argiloso



A mineralogia dos solos pode ser utilizada para caracterizar um solo como drenos ou fonte de fósforo, em que, solos pouco intemperizados (ricos em minerais primários silicatados) apresentam-se como fontes, enquanto os solos muito intemperizados (oxídicos) e com altos teores de argila, apresentam-se como drenos.

A textura do solo tem influência na capacidade de sorção do fósforo, assim, a presença de altos teores de óxidos nos solos, bem como os teores de argila e matéria orgânica apresentam correlação positiva com a sorção de fosfatos [115], como pôde ser observado na curva cinética de liberação do P no solo argiloso (Figura 18). As características do solo argiloso pode promover efeitos mais significativos na interação com o granulado FBT-P, promovendo o intercâmbio entre o fosfato presente neste tipo de solo, além de outros cátions presentes que possam originar algum fosfato insolúvel dentro do pellet, atrasando sua solubilização. Neste estudo observou-se que houve interação química do íon fosfato com o adsorvente (biocarvão). Esta interação, juntamente com o solo, pode promover a formação de outros elementos como fosfatos

de ferro, alumínio e cálcio, cuja estrutura está relacionada com a disponibilidade dos cátions, que normalmente é influenciada pelo pH do solo, ou seja, em pH ácido ocorre o predomínio das formas de fósforo (P) ligadas ao ferro (Fe). A diminuição da acidez promove a redução destas formas e o surgimento de maiores teores de P ligado ao alumínio (Al). Com aumento do pH, começando a apresentar o caráter básico, ocorre a ligação do P ao cálcio (Ca) <sup>[116]</sup>.

Em relação à cinética de liberação de fosfato, na Tabelas 13, encontramos o expoente  $n = 0,83 \pm 0,08$  para o solo arenoso e  $0,56 \pm 0,06$  para solo argiloso. Apesar de valores ligeiramente diferentes, nas duas situações, temos indicativo de transporte anômalo, ou seja, sobreposição de liberação controlada por processos de difusão e de intumescimento.

Os fenômenos de sorção do P sejam por adsorção ou precipitação ocorrem inicialmente com alta velocidade, tendendo à estabilidade com o passar do tempo e aumentando a quantidade de P sorvido <sup>[117]</sup>.

Estudos têm sugerido que a adsorção de P pelo biochar depende da concentração e disponibilidade de cátions na fração de cinzas do biocarvão <sup>[118]</sup>. E ainda, que a matéria orgânica pode competir com o íon fosfato pelos sítios de adsorção <sup>[119;120]</sup>.

O fósforo (P) é um dos nutrientes mais limitantes à produção agrícola em solos brasileiros, e sua grande demanda faz com que a dependência por fertilizações em quantidade e frequência sejam elevadas.

Além do elevado custo dos fertilizantes fosfatados, é necessário otimizar a aplicação do P na agricultura, devido à alta concentração desse elemento nos solos, promovendo a contaminação do lençol freático e rios por processos de eutrofização. Uma dessas estratégias é a utilização de novas fontes de P, como o reaproveitamento de subprodutos agrícolas descartados no meio ambiente.

A extração contínua do fósforo associado a escassez desse elemento no futuro <sup>[121]</sup>, têm impulsionado os setores de pesquisa a desenvolverem novas técnicas de recuperação e reciclagem do P como fertilizante agrícola.

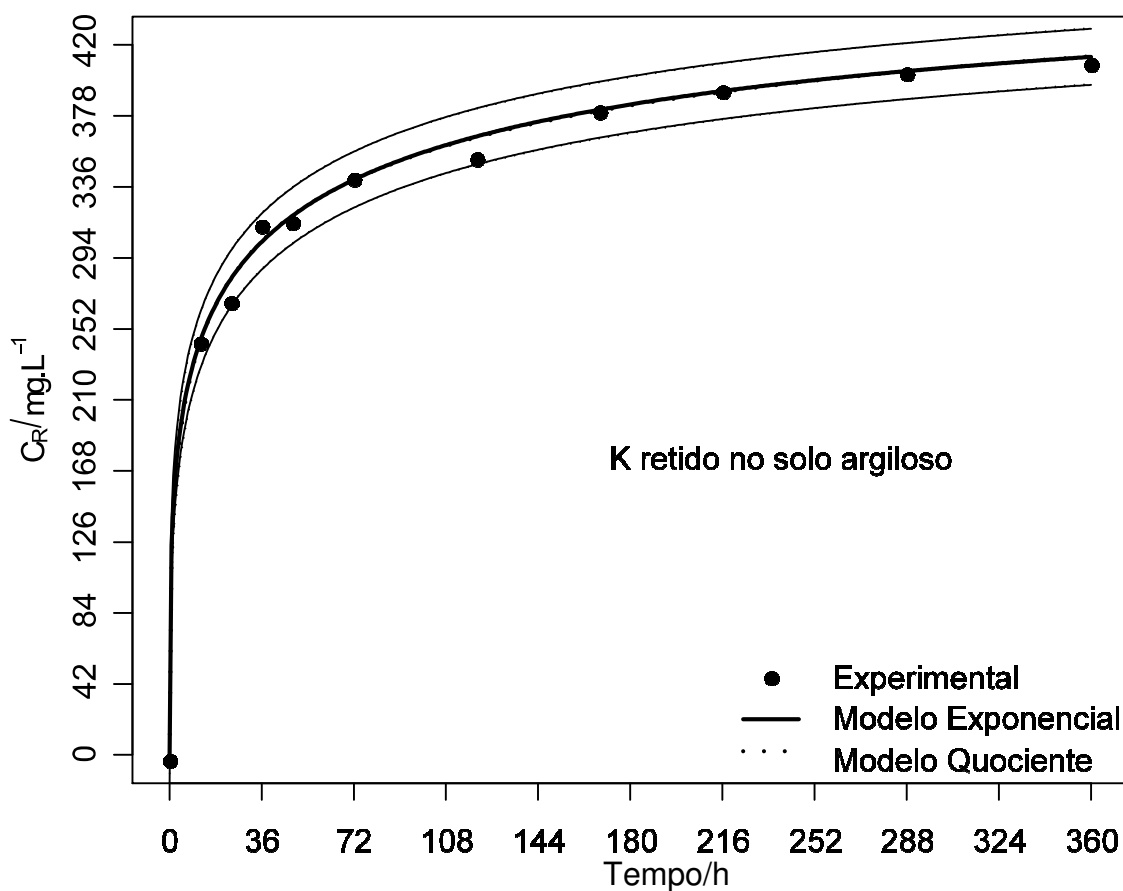
Embora existam estudos sobre sorção de P na literatura, ainda não há nenhum trabalho que descreva sucintamente a interação do biocarvão com o fosfato. Nesse contexto, estudos que avaliam a aplicação do biocarvão estão cada vez mais em destaque, dados os benefícios da sua aplicação. Logo, este trabalho possui uma grande relevância científica por mostrar que há interação física e química do biocarvão

da biomassa de bananeira com a molécula do fosfato, podendo promover maiores concentrações do fertilizante fosfatado nos solos suprimindo as necessidades das culturas.

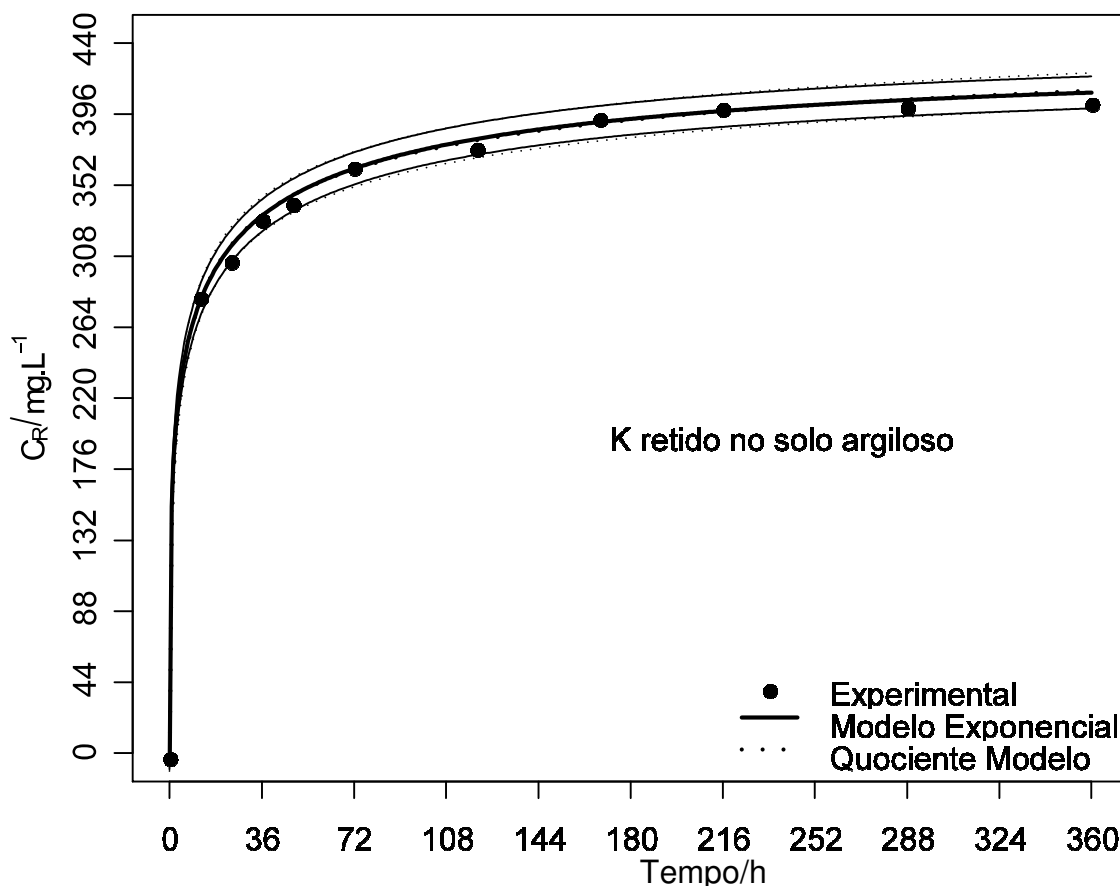
#### 4.6.3 Potássio

O comportamento cinético de liberação do potássio não difere nos dois solos como mostra as Figuras 19 e 20, onde observa-se que o modelo Quociente e Exponencial apresentaram bons ajustes e que o modelo Exponencial apresenta parâmetros mais precisos para atingir o equilíbrio aos dados experimentais no tempo de liberação dos solos arenoso e argiloso. Ao final dos 15 dias do experimento, mais de 94 % do nutriente havia sido liberado nos solos.

**Figura 19** Cinética da liberação do potássio em FBT pelo tempo, em solo arenoso



**Figura 20** Cinética da liberação do potássio em FBT pelo tempo, em solo argiloso



A avaliação da liberação de potássio no solo foi realizada apenas para a amostra FBT-K, e mostrou que o comportamento de liberação cinética do potássio em ambos os solos foram semelhantes. Os valores de  $n = 0,32 \pm 0,05$  para o solo arenoso e  $0,31 \pm 0,03$  para solo argiloso. O valor de  $n$  é menor que 0,45, atribuído à difusão de Fickian. No entanto, o tempo para liberar 50 % de potássio foi bastante curto, 9,50 e 3,08 horas para os solos arenoso e argiloso, respectivamente, Tabela 13. Observe comportamento diferente considerando o tempo de liberação do potássio até o nível de 95 %. O FBT-K em solo arenoso levou 1010,68 h (42 dias) para liberar 95 % do potássio. Desta vez foi significativamente menor quando em solo argiloso, 331,68 h.

A Tabela 13 mostra os valores dos parâmetros cinéticos dos fertilizantes em meio sólido, ajustados pelos dois modelos matemáticos.

**Tabela 13** Parâmetros cinéticos dos modelos matemáticos em meio sólido

Solos	Amostras	Modelos	$R^2$	Parâmetros			$t\alpha$ (horas)		
				$n \pm \Delta E$	$A \pm \Delta E$	$SQE$	0,5	0,9	0,95
Arenoso	FBT-N	Quociente	0,96	1,04±0,32	38,24±3,61	55,53	24,64	204,31	419,44
		Exponencial	0,97	0,81±0,16	35,27±1,45	41,96	22,45	98,82	136,75
	FBT-P	Quociente	0,99	0,93±0,13	163,01±21,69	121,25	111,67	1197,04	2681,89
		Exponencial	0,99	0,83±0,08	130,47±9,04	105,62	73,18	312,63	429,79
	FBT-K	Quociente	1,0	0,40±0,09	541,45±72,91	410,51	19,45	4598,63	29500,7
		Exponencial	1,0	0,32±0,05	66,33±39,61	411,81	9,5	436,71	1010,68
Argiloso	FBT-N	Quociente	0,99	1,32±0,20	36,07±1,20	17,54	19,71	104,10	183,35
		Exponencial	0,99	0,85±0,11	34,87±0,80	17,47	19,05	78,0	106,24
	FBT-P	Quociente	0,97	0,62±0,06	174,67±73,77	358,75	125,96	4300,8	14288,2
		Exponencial	0,97	0,56±0,006	135,50±35,69	356,13	61,12	525,02	841,19
	FBT-K	Quociente	1,0	0,46±0,08	469,44±24,94	180,74	5,01	626,93	3240
		Exponencial	1,0	0,31±0,03	429,35±11,50	150,01	3,08	143,0	331,68

FBT= Fibra de Bananeira Torrefada; FBT-N= Fibra de Bananeira Torrefada com Nitrogênio; FBT-P = Fibra de Bananeira Torrefada com Fósforo; FBT-K = Fibra de Bananeira Torrefada com Potássio;  $n$  e  $A$ = parâmetros das fórmulas;  $\Delta E$ =Variação do Erro;  $SQR$ = Soma dos Quadrados dos Resíduos.

A dessorção em meio sólido dos macronutrientes incorporados a FBT a 240 °C ocorreram de forma mais lenta que em meio líquido. Esse comportamento tem sido atribuído, principalmente, a um mecanismo de transferência de massa difusivo. A difusão é um processo aleatório que ocorre quando existe um gradiente de concentração no solo [122].

Diferenças no processo de sorção bem como a complexidade das reações envolvidas nesse processo deve-se aos diversos componentes do solo, que se comportam de diferentes formas dependendo da sua composição. Os solos utilizados nos experimentos apresentam grande variabilidade quanto a algumas características que afetam a adsorção dos elementos, como o pH, os teores de argila, matéria orgânica e a capacidade de troca catiônica.

O pH tem importância como fator chave em controlar a adsorção dos nutrientes nos solos [123]. Considerando-se os valores médios obtidos na análise química dos solos, o pH determinado em solução de  $\text{CaCl}_2$  variou de 5,8 a 6,1, sendo classificados, como solos de acidez baixa (5,6 – 6,0) e muito baixa ( $> 6,0$ ) [124], o que significa que os solos estudados apresentam maior capacidade de adsorver ânions ( $\text{pH} < 7,0$ ), pois a carga líquida predominante será positiva [125].

Além do pH, outras características importantes que podem ser observadas da análise física dos solos, é a diferença da fração argila, que variou de 12,6 a 38,8 %. A argila é responsável pelo aumento na retenção de nutrientes, se comparados com os de textura média e arenosa, como observado neste trabalho, os solos se diferem em suas capacidades de adsorção em relação aos macronutrientes incorporados, mais visivelmente para o fósforo.

Cada ponto de dados da cinética de liberação representa a média de três determinações. Em alguns casos o valor de  $n$  pode ser menor que 0,45. Nestes casos a velocidade de penetração da água é menor que a velocidade de relaxação das cadeias poliméricas, esta situação ainda é considerada uma difusão Fickiana, mas é nomeada de *less Fickian* [126,127]. É importante salientar que a quantidade de água absorvida pelo pellet é função de sua hidrofília, da estrutura de rede formada e do número de grupos ionizáveis presentes no material, como observado em outros trabalhos [128]. Logo, o comportamento de intumescimento das amostras pode indicar diferenças na cinética de liberação. Como pôde ser observado na cinética em meio sólido uma rápida liberação dos nutrientes no início do experimento seguido de uma liberação lenta, mostrando que o sistema acontece em duas fases, indicando que

pode estar ocorrendo uma cinética caso II, atribuída à associação dos mecanismos de difusão, erosão, relaxação das cadeias e intumescimento [129,130]. Na região II (liberação lenta), sugere-se que o principal mecanismo de liberação seja uma associação de difusão parcial através de uma matriz intumescida e de poros hidrofílicos [99].

Foi possível observar também, que nesse sistema de duas fases, o tempo de liberação dos nutrientes difere entre os solos e entre os modelos testados, onde modelo Quociente se ajustou melhor na primeira fase do experimento, que corresponde a liberação rápida e o modelo Exponencial se ajustou melhor na segunda fase, de liberação lenta dos nutrientes. O modelo Quociente, embora tenha apresentado valores de  $R^2$  próximos de 1, ele não se ajustou bem aos dados experimentais na segunda fase de liberação, necessitando de um tempo muito maior para alcançar o equilíbrio, o mesmo não se observa no modelo Exponencial, onde o ajuste atinge o equilíbrio mais rápido dentro do intervalo amostral. Portanto, é possível concluir que o melhor ajuste é para o modelo Exponencial, que fornece os parâmetros estimados e tempos mais precisos para atingir o equilíbrio, mais consistente com os dados experimentais, por isso foi escolhido para discussão dos valores do expoente  $n$ , neste estudo.

Pelos resultados cinéticos obtidos, conclui-se que os pellets de FBT liberam os macronutrientes por meio de mecanismo de difusão para matrizes de formato cilíndrico. Entretanto, através da análise termomecânica em TMA-2940, verificou-se que o coeficiente de expansão da FBT, sugere que o sistema de liberação de nutrientes nos solos, além do processo difusivo, ocorrem também por outros mecanismos complexos, como interações moleculares entre os elementos presentes no material lignocelulósico (oxalato de potássio) e também àqueles presentes no próprio solo. Essa capacidade de retenção de água é uma característica importante, considerando sua aplicação como biofertilizante.

Os experimentos realizados na areia apresentaram maior tempo de meia vida, seguido do solo argiloso. Tal resultado pode estar relacionado ao teor de argila, à capacidade de troca catiônica (CTC), à microporosidade e ao pH do solo argiloso.

O tempo de 95 % de liberação dos nutrientes diferiram entre os solos estudados. No solo arenoso, o tempo de liberação do N e do K foi maior, que pode ser explicado pelas características texturais e granulométrica deste solo, que promoveu uma infiltração rápida da água pela passagem direta através de fissuras

observadas na superfície do solo, ficando a água retida no fundo do recipiente, o que pôde ser constatado através das pesagens dos vasos e reposição de água. O P apresentou tempo de liberação menor em relação aos outros elementos, que pode ser explicado pela interação química da molécula com o biocarvão e também com elementos do próprio solo.

O resultado dos experimentos foi satisfatório. Os modelos matemáticos, Exponencial e Quociente, propostos neste trabalho apresentaram ajustes eficiente aos dados experimentais, com valores de  $R^2$  próximos de 1,0 e os parâmetros cinéticos dos ajustes foram coerentes com os valores amostrais encontrados. A análise estatística para os dois modelos foi realizada através do método dos mínimos quadrados, visando minimizar a soma dos quadrados dos resíduos (erros) entre o valor estimado e os dados observados experimentalmente, resultando assim em um bom ajuste.

A obtenção das estimativas e todos os procedimentos numéricos e gráficos foram desenvolvidos no programa R. Os intervalos de confiança para resposta esperada foram obtidos a partir das estatísticas fornecidas pelo procedimento de estimativas.

A eficiência agrônômica do biocarvão do pseudocaule da bananeira estimada pelo estudo cinético, demonstrou ser eficaz a utilização da fibra torrefada sem incorporação de nutrientes, em termos de adubação em culturas pobres em potássio, pois a biomassa apresenta alta concentração desse nutriente e também pela possibilidade de incorporação dos macronutrientes ao biocarvão, melhorando a disponibilidade de nutrientes para as culturas.

Nesse contexto, unir a necessidade de adubação dos solos com a aplicação de uma fonte alternativa proveniente do resíduo da produção agrícola, tem forte apelo social, econômico, ambiental e de inovação tecnológica na produção de um biofertilizante de liberação lenta.

Levando-se em consideração o tamanho do recipiente utilizado no experimento, deduz-se que pesquisas futuras em casa de vegetação e à campo apresentariam resultados ainda mais satisfatórios em estudos de cinética de liberação de nutrientes, utilizando-se da biomassa do pseudocaule da bananeira torrefada.

## 5 CONCLUSÃO

A partir da avaliação da sorção relativa de água, observa-se que os biocarvões FBT apresentam capacidade de sorção de 8,8 a 10,4 % em água, dependendo do fertilizante adicionado, e 22,8 % de intumescimento. Essa capacidade de retenção de água é um recurso importante considerando sua aplicação como biofertilizante. Os parâmetros de monitoramento para avaliar as cinéticas de liberação dos fertilizantes NPK, mostraram-se eficazes tanto em meio líquido quanto em meio sólido, pois apresentaram bons ajustes. O modelo Exponencial foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de liberação dos macronutrientes incorporados ao biocarvão de fibras do pseudocaule de bananeira, seguido do modelo Quociente, sendo capazes de prever o tempo em que 95 % dos nutrientes serão liberados no solo. A liberação dos nutrientes ocorreram de forma mais lenta em meio sólido que em meio líquido, e o mecanismo de liberação é influenciado por processos difusivos e outros processos polidiversos, o que significa que o material é promissor para ser utilizado como biofertilizante de liberação lenta e na retenção de umidade, beneficiando o meio ambiente através da redução do descarte de resíduos agrícolas e da emissão dos gases de efeito estufa e também pela possibilidade de melhorias nas condições agronômicas do solo, o que conseqüentemente traria vantagens pela redução de custos com adubação e irrigação e, no aumento da disponibilidade de nutrientes de forma controlada pelas raízes das plantas, principalmente em solos arenosos e com baixa fertilidade.

## REFERÊNCIAS

- <sup>1</sup> PETTER, F. A., DE LIMA, L. B., MORALES, M. M., JÚNIOR, B. H. M., & ALVES, L. **BIOCARVÃO NO SOLO: Aspectos Agronômicos e Ambientais**. Embrapa Florestas, 2016.
- <sup>2</sup> AGRIANUAL 2016: Anuário da Agricultura Brasileira. São Paulo: **FNP Consultoria & Agroinformativo**, 2016. 456 p.
- <sup>3</sup> ABRAFRUTAS. Associação Brasileira dos Produtores Exportadores de Frutas e Derivados. Disponível em: <<https://abrafrutas.org/2019/03/07/brasil-e-o-terceiro-maior-produtor-de-frutas-do-mundo-diz-abrafrutas/>>. Acesso em 11 de Dezembro de 2019.
- <sup>4</sup> BORGES, M. T. M. R. **Potencial vitamínico de banana verde e produtos derivados**, 2003, 123 folhas. Tese. (Doutorado em Ciência de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- <sup>5</sup> IBGE – Pesquisa Agrícola Municipal. \***Levantamento Sistemático da Produção Agrícola** (nov. 2019). Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil>>. Acesso em 16 de Dezembro de 2019.
- <sup>6</sup> ROJA, M. L. B.; NEVES, J. M. **Caracterização de fibras de bananeira nanicão (*Musa grupo AAA, Giant cavendish*) como possível matéria-prima para produção de pasta celulósica para fabricação de papel**. Congresso Iberoamericano de investigación en celulosa y papel, 2002.
- <sup>7</sup> FELFLI, F. **Torrefação de biomassa: viabilidade técnica e potencial de mercado**. 2003. 143 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- <sup>8</sup> DIAS, D. S.; CRESPI, M. S.; TORQUATO, L. D. M.; KOBELNIK, M.; RIBEIRO, C. A. Torrefied banana tree fiber pellets having embedded urea for agricultural use. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, p. 1-8, 2017.
- <sup>9</sup> VIEIRA, A. P.; SANTANA, S. A. A.; BEZERRA, C. W. B.; SILVA, H. A. S.; CHAVES, J. A. P.; MELO, J. C. P.; SILVA FILHO, E. C.; AIROLDI, C. Epicarp and Mesocarpo of Babassu (*Orbignya speciosa*): Characterization and Application in Copper Phtalocyanine Dye removal. **Brazilian Chemical Society**, v. 22, n. 1, p. 21-29, 2011.
- <sup>10</sup> LEHMANN, J., KERN, D.C., GLASER, B., WOODS, W.I. **Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management**, Amsterdam, 2003. 523 p.
- <sup>11</sup> NOVOTNY, E.H., AZEVEDO, E.R., SOUZA, A.A., SONG, G., NOGUEIRA, C.M., MANGRICH, A.S., HAYES, M.H.B., MADARI, B.E., BONAGAMBA, T. Lessons from the Terra Preta de Indios of the Amazon Region for the Utilization of Charcoal for Soil Amendment. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 20, n. 6, p.1003-1010, 2009.
- <sup>12</sup> CUNHA, T. J.F.; MARADI, B. E.; CANELLAS, L.P.; RIBEIRO, L.P.; BENITES, V. M.; SANTOS, G. A. Soil organic matter and fertility of anthropogenic dark earths (Terra Preta de Índio) in the Brazilian amazon basin. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 33, p.85-93, 2009.
- <sup>13</sup> TROMPOWSKY, P. M.; BENITES, V. M.; MADARI, B. E.; PIMENTA, A. S.; HOCKADAY, W. C.; HATCHER, P.G. Characterization of humic like substances

---

obtained by chemical oxidation of eucalyptus charcoal. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 36, n. 11, p. 1480-1489, 2005.

<sup>14</sup> DOWNIE, A.; CROSKY, A.; MUNROE, P. **Physical Properties of Biochar**. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S (ed). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. 1. Ed. Londres: earthscan, 2009. 416 p.

<sup>15</sup> BROWN, R. A.; KERCHER, A. K.; NGUYEN, T. H.; NAGLE, D. C.; BALL, W. P. Production and characterization of synthetic wood chars for use as surrogates for natural sorbents. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 37, n. 3, p. 321-333, 2006.

<sup>16</sup> CARVALHO, M. T. M, MAIA, A. H. N., MADARI, B. E., BASTIAANS, L., VAN OORT, L. P. A., HEINEMANN, A. B., SILVA, M. A. S., PETTER, F. A., MARIMON JR., B. H. AND MEINKE, H. Biochar increases plant-available water in a sandy loam soil under an aerobic rice crop system. **Solid Earth**. v. 5, p. 939-952, 2014.

<sup>17</sup> SANTOS, L. B.; STREBECK, M. V.; CRESPI, M. S.; CAPELA, J. M. V.; RIBEIRO, C. A.; JULIO, M. de. Energy evaluation of biochar obtained from the pyrolysis of pine pellets. **Therm. Anal. Calorim.**, v. 126, p. 1879-1887, 2016.

<sup>18</sup> CASTELLO, M. L.; DWECK, JO.; ARANDA, D. A. G. Kinetic study of thermal processing of glycerol by thermogravimetry. **Therm. Anal. Calorim.**, v. 105, p. 737-746, 2011.

<sup>19</sup> SANTOS, L. B.; STREBECK, M. V.; CRESPI, M. S.; RIBEIRO, C. A.; JULIO, M. de. Characterization of biochar of pine pellets. **Therm. Anal. Calorim.**, v. 122, p. 21-32, 2015.

<sup>20</sup> TORQUATO, L. D. M.; CRNKOVIC, P. M.; RIBEIRO, C. A.; CRESPI, M. S. New approach for proximate analysis by thermogravimetry using CO<sub>2</sub> atmosphere. Validation and application to different biomasses. **Therm. Anal. Calorim.**, p. 1-14, 2016.

<sup>21</sup> MORAIS, L. C.; ROSA, A. H.; FRACETO, L. F.; TOLEDO, A. C. T.; CAMPOS, V. Ceramic material from sewage sludge as support material supply water filtration. **Materials Science Forum**, v. 727-728, p. 1398-1401, 2012.

<sup>22</sup> SANTOS, V. C. G.; TARLEY, C. R. T.; CAETANO, J.; DRAGUNSKI, D. C. Copper ions adsorption from aqueous medium using the biosorbent sugarcane bagasse in natura and chemically modified. **Water, Air, and Soil Pollution**, Dordrecht, v. 216, n. 1-4, p. 351-359, 2011.

<sup>23</sup> MADARI, B. E.; COSTA, A. R.; CASTRO, L. M.; SANTOS, J. L.; BENITES, V. M.; ROCHA, A. O.; MACHADO, P. L. O. A. Comunicado Técnico 125. Goiânia, GO. EMBRAPA. **Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão**. 2006. 4 p.

<sup>24</sup> LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for Environmental Management: An Introduction**. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (ed). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. 1. Ed. earthscan, Londres, 2009. p. 4-18.

<sup>25</sup> YANAI, Y., TOYOTA, K., OKAZAKI, M. Effects of charcoal addition on N<sub>2</sub>O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 53, n. 2, p.181-188, 2007.

<sup>26</sup> STEINER, C.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; NEHLS, T.; de MACÊDO, J. J. V.; BLUM, W. E. H.; ZECH, W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 291, n. 1-2, p. 275-290, 2007.

- <sup>27</sup> KIMETU, J. M.; LEHMANN, J.; NGOZE, S.; MUGENDI, D. N.; KINYANGI, J.; RIHA, S., VERCHOT, L.; RECHA, J. W.; PELL, A. Reversibility of productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient. **Ecosystems**, New York, v. 11, n. 5, p. 726-739, 2008.
- <sup>28</sup> ZHANG, A.; BIAN, R.; PAN, G. X.; CUI, L. Q.; HUSSAIN, Q.; LI, L. Q.; ZHENG, J. W.; ZHENG, J. F.; ZHANG, X. H.; HAN, X. J.; YU, X. Y. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: a field study of 2 consecutive rice growing cycles. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 127, n. 2, p. 153-160, 2012.
- <sup>29</sup> PETTER, F. A. **Biomassa carbonizada como condicionador de solo: aspectos agrônômicos e ambientais do seu uso em solos de cerrado**. 2010. 130 p. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Goiás - UFG, Goiânia, 2010.
- <sup>30</sup> PETTER, F. A.; MADARI, B. E.; CARNEIRO, M. A. C.; MARIMON JR., B. H.; CARVALHO, M. T. M. AND PACHECO, L.P. Soil fertility and agronomic response of rice to biochar application in the Brazilian savannah. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 699-706, 2012.
- <sup>31</sup> YU, J.; DEEM, L. M.; CROW, S. E.; DEENIK, J. L.; PENTON, C. R. Biochar application influences microbial assemblage complexity and composition due to soil and bio-energy crop type interactions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 117, p. 97-107, 2018.
- <sup>32</sup> ABUJABHAH, I. S.; BOUND, S. A.; DOYLE, R.; BOWMAN, J. P. Effects of biochar and compost amendments on soil physico-chemical properties and the total community within a temperate agricultural soil. **Applied Soil Ecology**, v. 98, p. 243-253, 2016.
- <sup>33</sup> KUPPUSAMY, S.; THAVAMANI, P.; MEGHARAJ, M.; VENKATESWARLU, K.; NAIDU, R. Agronomic and remedial benefits and risks of applying biochar to soil: Current knowledge and future research directions. **Environment International**, v. 87, p. 1-12, 2016.
- <sup>34</sup> LATEEF, A.; NAZIR, R.; JAMIL, N.; SHAHZAD, A.; RAZA, S., MUHAMMAD, N. K.; MURTAZA, S. Synthesis and characterization of zeolite based nano-composite: An environment friendly slow release fertilizer. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 232, p. 174-183, 2016.
- <sup>35</sup> MESSA, L. L.; FROES, J. D.; SOUZA, C. F.; FAEZ, R. Híbridos de quitosana-Argila para encapsulamento e liberação sustentada do fertilizante nitrato de potássio. **Quim. Nova**, v. 39, p. 1215-1220, 2016.
- <sup>36</sup> LIMA, M. B.; SILVA, S. O.; FERREIRA, C. F. **Banana: o produtor pergunta, a Embrapa responde**, 2 ed. rev. e ampl. – Brasília, DF:Embrapa, 2012. 214 p.
- <sup>37</sup> SOUZA, O.; FEDERIZZI, M.; COELHO, B.; WAGNER, T. M.; WISBECK, E. Biodegradação de resíduos lignocelulósicos gerados na bananicultura e sua valorização para a produção de biogás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n. 4, p. 438-443, 2010.
- <sup>38</sup> CORDEIRO, N.; BELGACEM, M. N.; TORRES, I. C.; MOURA, J. C. V. P. Chemical composition and pulping of banana pseudo-stems. **Industrial Crops and Products**. v. 19, n. 2, p. 147–154, 2004.
- <sup>39</sup> RAHMAN, M. M.; ISLAM, T.; NAYEEM, J.; JAHAN, M. S. Variation of chemical and morphological properties of different parts of banana plant (*Musa paradisiaca*) and their effects on pulping. **International Journal of Lignocellulosic Products**. v. 1, n. 2, p. 93–103, 2014.

- <sup>40</sup> FERIOTTI, D. G. **Proposta de aproveitamento do pseudocaule da bananeira (*Musa cavendish*)**. 2010. 59 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos). Escola de Engenharia Mauá, São Caetano do Sul, SP, 2010.
- <sup>41</sup> MÖLLER, M.; SCHMITZ, P. M.; THIELE, H.; WRONKA, T. Economically and ecologically integrated valuation of land-use in less favored areas. **Ber. Landwirtschaft**, v. 79, n. 1, p. 19–48, 2001.
- <sup>42</sup> BELLO, R. H.; LINZMEYER, P.; FRANCO, C. M. B.; SOUZA, O.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S. H. W.; MARANGONI, C. Pervaporation of ethanol produced from banana waste, **Waste Management**, v. 34, n. 8, p. 1501-1509, 2014.
- <sup>43</sup> SOUZA, E. L. D.; LIEBL, G. F.; MARANGONI, C.; SELLIN, N.; MONTAGNOLI, M. D. S.; SOUZA, O. Bioethanol from fresh and dried banana plant pseudostem, **Chemical Engineering Transactions**, v. 38, p. 271-276, 2014.
- <sup>44</sup> LUNA, S. V. S.; JUSTO, J. L. Experimentos utilizando a fibra de bananeira para fins têxteis, **Projética**, Londrina, v. 7, n. 2, p. 37 - 52, 2016.
- <sup>45</sup> VIGNESWARAN, C.; PAVITHRA, V.; GAYATHRI, V.; MYTHILI, K. Banana Fiber: Scope and value added product development. **Journal of Textile and Apparel, Technology and Management**, v. 9, n. 2, 2015.
- <sup>46</sup> MUKHOPADHYAY, S.; FANGUEIRO, R.; ARPAÇ, Y.; ŞENTÜRK, Ü. Banana Fibers – Variability and Fracture Behaviour, **Journal of Engineered Fibers and Fabrics**, v. 3, n. 2, 2008.
- <sup>47</sup> JAYAPRABHA, J. S.; BRAHMAKUMAR, M.; MANILAL, V. B. Banana Pseudostem Characterization and Its Fiber Property Evaluation on Physical and Bioextraction, **Journal of Natural Fibers**, v. 8, n. 3, p. 149-160, 2011.
- <sup>48</sup> SALUNKHE, J. R.; PATEL, A. M.; PATIL, R. G.; PISAL, R. Effect of banana pseudostem sap as liquid fertilizer in onion, **Indian Journal of Agricultural Research**, v. 4, n. 3, p. 258-262, 2013.
- <sup>49</sup> SHARMA, M.; PATEL, S.; SANGWAN, R.; SINGH, S. Biotransformation of banana pseudostem extract into a functional juice containing value added biomolecules of potential health benefits, **Indian journal of experimental biology**, v. 55, p. 453-462, 2017.
- <sup>50</sup> TOCK, J. Y.; LAI, C. L.; LEE, K. T.; TAN, K. T.; BHATIA, S. “Banana biomass as potential renewable energy resource: A Malaysian case study,” **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 2, p. 798-805, 2010.
- <sup>51</sup> FERNANDES, E. R. K; MARANGONI, C.; SOUZA, O.; SELLIN, N. Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source. **Energy Conversion and Management**, v. 75, p. 603–608, 2013.
- <sup>52</sup> MANGRICH, A. S.; MAIA, C. M. B. F.; NOVOTNY, E. H. Biocarvão: As terras pretas de índios e o sequestro de carbono, **Ciência Hoje**, v. 47, n. 281, p. 48-52, 2011.
- <sup>53</sup> KUPPUSAMY, S.; THAVAMANI, P.; MEGHARAJ, M.; VENKATESWARLU, K.; NAIDU, R. Agronomic and remedial benefits and risks of applying biochar to soil: Current knowledge and future research directions. **Environ Int.**, 2016.
- <sup>54</sup> LIANG, B.; LEHMANN, J.; SOHI, S. P.; THIES, J. E.; O'NEILL, B.; TRUJILLO, L.; GAUNT, J.; SOLOMON, D.; GROSSMAN, J.; NEVES, E. G. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil. **Org. Geochem**, v. 41, p. 206–213, 2010.
- <sup>55</sup> LEHMANN, J. Bio-energy in the black. **Frontiers in Ecology and the Environment**, Washington, v. 5, n. 7, p. 381-387, 2007.
- <sup>56</sup> MATOVIC, D. Biochar as a viable carbon sequestration option: global and Canadian perspective. **Energy**, v. 36, p. 2011–2016, 2011.

- <sup>57</sup> LEHMANN, J.; RILLIG, M. C.; THIES, J.; MASIELLO, C. A.; HOCKADAY, W. C.; CROWLEY, D. Biochar effects on soil biota — a review. **Soil Biol. Biochem.**, v. 43, p. 1812–1836, 2011.
- <sup>58</sup> NOVAK, J. M.; LIMA, I.; XING, B.; GASKIN, J. W.; STEINER, C.; DAS, K.; AHMEDNA, M.; REHRAH, D.; WATTS, D. W.; BUSSCHER, W. J. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. **Ann. Environ. Sci.**, v. 3, p. 195–206, 2009.
- <sup>59</sup> BRASSARD, P.; GODBOUT, S.; RAGHAVAN, V. Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: Key parameters and mechanisms involved. **Journal of Environmental Management**, v. 181, p. 484-497, 2016.
- <sup>60</sup> SPOKAS, K. A. ; KOSKINEN, W. C. ; BAKER, J. M. ; REICOSKY, D. C. Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil, **Chemosphere**, v. 77, n. 4, p. 574-581, 2009.
- <sup>61</sup> JANG, X. B. Influence of biochar on plant uptake and dissipation of two pesticides in an agricultural soil. **J. Agri. FoodChem.**, v. 58, p. 7915-7921, 2010.
- <sup>62</sup> PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. Torrefaction of wood: Part 1. Weight loss kinetics, **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 77, n. 1, p. 28-34, 2006.
- <sup>63</sup> BOURGEOIS, J. P.; DOAT, J.; EGNE´US, H.; ELLEGARD, A. Biomass Conversion, v. 3, Elsevier Applied Sciences, London, **Bioenergy**, v. 84, p. 153-159, 1984.
- <sup>64</sup> GIRARD, P.; SHAH, N. Recent developments on torrefied wood, an alternative to charcoal for reducing deforestation, **REUR Tech. Ser.**, v. 20, p. 101– 114, 1991.
- <sup>65</sup> MACKENZIE, R. C. **Thermochim. Acta**, v. 28, p. 1, 1979.
- <sup>66</sup> IONASHIRO, M.; GIOLITO, I. **Cerâmica**, v. 26, n. 121, p. 17, 1980.
- <sup>67</sup> GIOLITO, I.; IONASHIRO, M. **Cerâmica**, v. 34, n. 225, p. 163, 1988.
- <sup>68</sup> IONASHIRO, M. **GIOLITO: Fundamentos da Termogravimetria, Análise Térmica Diferencial e Calorimetria Exploratória Diferencial**, Giz Editorial: São Paulo, 2004. 96 p.
- <sup>69</sup> LÓPEZ-GONZÁLEZ, D.; FERNANDEZ-LOPEZ, M.; VALVERDE, J. L.; SANCHEZ-SILVA, L. Thermogravimetric-mass spectrometric analysis on combustion of lignocellulosic. **Bioresource Technology**, v. 143, p. 562-574, 2013.
- <sup>70</sup> SANTOS, R. C. et al. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. **Revista Cerne**, v. 18, n.1, p. 143-151, 2012.
- <sup>71</sup> DIAS, D. S.; FARIA, F. A.; MATTIOLLI, L.; CAPELA, M. V.; CAPELA, J. M. V.; CRESPI, M. S.; RIBEIRO, C. A. Moisture adsorption of biochar from banana tree fiber according to the pyrolysis temperature. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2019.
- <sup>72</sup> GUNARATHNE, V.; MAYAKADUWA, S.; VITHANAGE, M. Biochar's Influence as a Soil Amendment for Essential Plant Nutrient Uptake, **Essential Plant Nutrients**, p. 47-67, 2017.
- <sup>73</sup> BEALE, E. M. Confidence regions in non-linear estimation. *Journal of the royal statistical society. Serie B. Methodological*, London, v. 22, n. 1, p. 41–76, Jan. 1960.
- <sup>74</sup> RATKOWSKY, D. A. **Nonlinear regression modeling**. New York: M. Dekker, 1983.
- <sup>75</sup> RATKOWSKY, D. A. **Handbook of nonlinear regression models**. New York: M. Dekker, 1990.
- <sup>76</sup> RAIJ, B. VAN. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba, Instituto de Potassa & Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, 1981. 142 p.
- <sup>77</sup> BRAGA, J. M. **Avaliação da fertilidade do solo (ensaios de campo)**. Viçosa, Impr. Univ., UFV, 1983. 101 p.

- <sup>78</sup> MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: Nutrição de plantas e fertilizantes do solo**. São Paulo, Editora Agronômica Ceres, 1976. 528 p.
- <sup>79</sup> TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizer**. 3<sup>a</sup> ed. New York, Collier Mc Millan International editions, 1975. 694 p.
- <sup>80</sup> LOPES, A. S. **Manual internacional de fertilidade do solo**. Tradução e Adaptação. 2.ed. Piracicaba, Potafos, 1998. 177 p.
- <sup>81</sup> RAIJ, B. van. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba, Instituto da Potassa & Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, 1981. 142 p.
- <sup>82</sup> KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262 p.
- <sup>83</sup> McBride MB. **Environmental chemistry of soils**. Oxford university press, 1994. 406 p.
- <sup>84</sup> BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics**. New York: J. Wiley, 1972. 498 p.
- <sup>85</sup> HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic, 1980. 413 p.
- <sup>86</sup> REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades Físicas do Solo**. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, 2006. 18 p.
- <sup>87</sup> SANTOS, H. G.; JOCOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBREARAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; FILHO, J. C. A; OLIVEIRA, J. B; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa, 5 ed. rev. ampli., 2018, 531 p.
- <sup>88</sup> OKUMURA, F.; CAVALHEIRO, E. T. G.; NÓBREGA, J. A. Experimentos simples usando fotometria de chama para ensino de princípios de espectrometria atômica em cursos de Química Analítica. **Química Nova**, v. 27, n. 5, p. 832-836, 2004.
- <sup>89</sup> NAKAMURA, K.; KINOSHITA, E.; HATAKEYAMA, T.; HATAKEYAMA, H. TMA measurement of swelling behavior of polysaccharide hydrogels. **Thermochimica Acta**, v. 352–353, p. 171–176, 2000.
- <sup>90</sup> Services USDoH, Human, Administration F, Drug. **Q1A(R2) Stability Testing of New Drug Substances and Products**, 2003. Disponível em: [http://www.gmp-compliance.org/guidemgr/files/Q1A\(R2\).PDF](http://www.gmp-compliance.org/guidemgr/files/Q1A(R2).PDF).
- <sup>91</sup> TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa. 2017, 574 p.
- <sup>92</sup> AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 20th ed. Washington, 1998.
- <sup>93</sup> AOAC – Association of Analytical Communities. **AOAC official method. Sodium and potassium in seafood**. Flame photometric method. Método 969.23. AOAC, 2005.
- <sup>94</sup> HO, Y. S.; McKAY, G. A comparison of chemisorption kinetic models applied to pollutant removal on various sorbents. **Trans. IChemE**, v. 76, 1998.
- <sup>95</sup> FARIA, FLAVIANA A.; FARIA, FLÁVIO A.; MATTIOLLI, L.; DIAS, D. S.; CAPELA, J. M. V.; CRESPI, M. S.; CAPELA, M. V.; RIBEIRO, C. A. Fertilizer release kinetics incorporated to torrefied banana-crop residues. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2020. (Enviado para publicação).
- <sup>96</sup> RITGER, P. L.; PEPPAS, N. A. A simple equation for description of solute release I. Fickian and non-fickian release from non-swellable devices in the form of slabs, spheres, cylinders or discs. **Journal of Controlled Release**, v. 5, n. 1, p. 23-36, 1987.
- <sup>97</sup> RITGER, P. L.; PEPPAS, N. A. A simple equation for description of solute release II. Fickian and anomalous release from swellable devices. **Journal of Controlled Release**, v. 5, n. 1, p. 37-42, 1987.

- <sup>98</sup> SIEPMANN, J.; PEPPAS, N. A. Modeling of drug release from delivery systems based on hydroxypropyl methylcellulose (HPMC). **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 48, n. (2-3), p. 139-157, 2001.
- <sup>99</sup> PEPPAS, N. A. Analysis of fickian and non-fickian drug release from polymers, **Pharm. Acta Helvetic**, v. 60, p. 110-111, 1985.
- <sup>100</sup> SANTOS, R. D.; SANOTS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS; SHIMIZU, S. H. **Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo**. 7 ed ver. Ampl. – viçosa, MG: sociedade Brasileira de ciência do Solo, 2015. 101p.
- <sup>101</sup> ERDEY, L.; GÁL, S.; LIPTAY, G. Thermoanalytical properties of analytical-grade reagents: Ammonium salts, **Talanta**, v. 11, n. 6, p. 913-940, 1964.
- <sup>102</sup> GRANADOS, D. A.; RUIZ, R. A.; VEGA, L. Y.; CHEJNE, F. Study of reactivity reduction in sugarcane bagasse as consequence of a torrefaction process. **Energy**, v. 139, p. 818-827, 2017.
- <sup>103</sup> XU, F.; YU, J.; TESSO, T.; DOWELL, F.; WANG, D. Qualitative and quantitative analysis of lignocellulosic biomass using infrared techniques: A mini-review. **Applied Energy**, v. 104, p. 801–809, 2013.
- <sup>104</sup> LI, X.; SUN, C.; ZHOU, B.; HE, Y. Determination of Hemicellulose, Cellulose and Lignin in Moso Bamboo by Near Infrared Spectroscopy. **Scientific Reports**, v. 5, n. 17210, 2015.
- <sup>105</sup> KEULEERS, R.; DESSEYN, HO; ROUSSEAU, B; VAN ALSENOY, C. Vibrational analysis of Urea. **J. Phys. Chem. A.**, v. 103, p. 4621–30, 1999.
- <sup>106</sup> PIASEK, Z.; URBANSKI, T. The Infra-red Absorption Spectrum and Structure of Urea. **Bull Acad Pol Sci. Ser. Sci. Chim.**, v. 3, p. 113-20, 1962.
- <sup>107</sup> FROST, R.L.; XI, Y.; SCHOLZ, R.; LÓPEZ, A.; BELOTTI, F. M. Vibrational spectroscopic characterization of the phosphate mineral hureaulite – (Mn, Fe)<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(HPO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·4(H<sub>2</sub>O). **Vibrational Spectroscopy**, v. 66, p. 69–75, 2013.
- <sup>108</sup> GARGOURI, M.; CHTARA, C.; SHARROCK, P.; NZIHOU, A.; EL FEKI, H. Purification of an Industrial Fertilizer (Diammonium Phosphate) Using Design of Experiments. **International Journal of Materials Engineering**, v. 4, n. 6, p.185–191, 2014.
- <sup>109</sup> SHAO, Z. B.; DENG, C.; TAN, Y.; YU, L.; CHEN, M. J.; CHEN, L.; WANG, Y. Z. Ammonium polyphosphate chemically-modified with ethanolamine as an efficient intumescent flame retardant for polypropylene. **Journal of Materials Chemistry A.**, v. 2, n. 34, p. 13955–13965, 2014.
- <sup>110</sup> JIANG, Z.; LIU, G. Microencapsulation of ammonium polyphosphate with melamine-formaldehyde-tris(2-hydroxyethyl)isocyanurate resin and its flame retardancy in polypropylene. **RSC Advances**, v. 5, n. 107, p. 88445–88455, 2015.
- <sup>111</sup> KIM, T. W.; LEE, H-S.; KIM, D-H.; JIN, H-H.; HWANG, K-H.; LEE, J. K.; PARK, H-C.; YOON, S-Y. In situ synthesis of magnesium-substituted biphasic calcium phosphate and in vitro biodegradation. **Materials Research Bulletin**, v. 47, n. 9, p. 2506-2512, 2012.
- <sup>112</sup> KUBAREV, O. L.; BARINOV, S. M.; KOMLEV, V. S. Magnesium distribution in the synthesis of biphasic calcium phosphates. **Doklady Chemistry**, v. 418, p. 44-46, 2008.
- <sup>113</sup> WEBLER, G. D.; ZAPATA, M. J. M.; AGRA, L. C. ; BARRETO, E.; SILVA, A. O. S.; HICKMANN, J.; FONSECA, E. J. S. Characterization and evaluation of cytotoxicity of biphasic calcium phosphate synthesized by a solid state reaction route. **Current Applied Physics**, v. 14, n. 6, p. 876-880, 2014.
- <sup>114</sup> BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. Viçosa: UFV, Impr. Univ., 1989, 596 p.
- <sup>115</sup> NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.

- <sup>116</sup> SHARPLEY, A. N. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus. **Journal of Environmental Quality**, v. 24, p. 920-926, 1995.
- <sup>117</sup> SAMPLE, E. C.; SOPER, R. J.; RACZ, G. J. **Reactions of phosphate fertilizers in soils**. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J., eds. The role of phosphorus in agriculture. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p. 263-310.
- <sup>118</sup> STREUBEL, J. D.; COLLINS, H. P.; TARARA, J. M.; COCHRAN, R. L. Biochar produced from anaerobically digested fiber reduces phosphorus in Dairy Lagoons. **J. Environ. Qual.**, v. 41, p. 1166, 2012. <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2011.0131>
- <sup>119</sup> MESQUITA FILHO, M. V.; TORRENT, J. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from Cerrado Region (Brazil). **Geoderma**, v. 58, p. 107-123, 1993.
- <sup>120</sup> HEREDIA, O. S.; CIRELLI, A. F. Environmental risks of increasing phosphorus addition in relation to soil sorption capacity. **Geoderma**, v. 137, p. 426-431, 2007.
- <sup>121</sup> REIJNDERS, L. Phosphorus resources, their depletion and conservation, a review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 93, p. 32-49, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.09.006>
- <sup>122</sup> PIGNATELLO, J. J.; XING, B. Mechanisms of slow sorption of organic chemicals to natural particles. **Environ. Sci. Technol.**, v. 30, p. 1-11, 1996.
- <sup>123</sup> GOMES, P. C.; FONTES, M. P. F.; SILVA, A. G.; MENDONÇA, E. S.; NETTO, A. R. Selectivity sequence and competitive adsorption of heavy metals by Brazilian soils. Soil Science Society. **America Journal**, v. 65, p. 1115-1121, 2001.
- <sup>124</sup> RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1996. (IAC. Boletim Técnico, 100).
- <sup>125</sup> ALLEONI, L. R. F., MELLO, J. W. V. de, ROCHA, W. S. D. da, "Eletroquímica, Adsorção e Troca Iônica no Solo". In: Melo, V.F.de, Alleoni, L.R.F. (eds), **Química e Mineralogia do Solo. Parte II – Aplicações**, 1 ed., capítulo XII, Viçosa, BR, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009.
- <sup>126</sup> GANJI, F.; VASHEGHANI-FARAHANI, S.; VASHEGHANI-FARAHANI, E. Theoretical description of hydrogel swelling. A review. **Iran Polym. J.**, v. 19, p. 375–398, 2010.
- <sup>127</sup> WANG, J.; WU, W.; LIN, Z. Kinetics and thermodynamics of the water sorption of 2-hydroxyethyl methacrylate/styrene copolymer hydrogels. **J. Appl. Polym. Sci.**, v. 109, p. 3018–3023, 2008.
- <sup>128</sup> GEHRKE, S. H.; LEE, P. I. Hidrogels for drug delivery systems. In: TYLE, P. Specialized drug Delivery Systems. Manufacturing and production technology. New York: Marcel Dekker, **Drug Development and Industry Pharmacy**, v. 41, p. 333-392, 1990.
- <sup>129</sup> RAO, P. R.; DIWAN, V. P. Formulation and In Vitro Evaluation of Polymeric Films of Diltiazem Hydrochloride and Indomethacin for Transdermal Administration. Marcel Dekker, **Drug Development and Industry Pharmacy**, v. 4, n. 24, p. 327-336, 1998.
- <sup>130</sup> LLABOT, J. M.; MANZO, R. H.; ALLEMANDI, D. A. Drug release from carbomer: carbomer sodium salt matrices with potential use as mucoadhesive drug delivery system, Elsevier, **International Journal of Pharmaceutics**, v. 276, n. 1-2, p. 59-66, 2004.