



**Franciele Braga Machado Túllio
Lucio Mauro Braga Machado
(Organizadores)**

A Aplicação do Conhecimento Científico nas Engenharias 3

Atena
Editora
Ano 2020





**Franciele Braga Machado Túllio
Lucio Mauro Braga Machado
(Organizadores)**

A Aplicação do Conhecimento Científico nas Engenharias 3

Atena
Editora
Ano 2020



2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação: Geraldo Alves

Edição de Arte: Lorena Prestes

Revisão: Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie di Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná

Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Msc. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Dr. Adailson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Profª Msc. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Msc. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Profª Msc. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
 Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
 Prof. Msc. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
 Prof. Msc. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
 Prof^a Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
 Prof. Msc. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco
 Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Prof^a Msc. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
 Prof^a Msc. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
 Prof^a Dr^a Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
 Prof. Msc. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
 Prof. Msc. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual de Maringá
 Prof. Msc. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
 Prof^a Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
 Prof^a Msc. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
 Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

A642 A aplicação do conhecimento científico nas engenharias 3 [recurso eletrônico] / Organizadores Franciele Braga Machado Túllio, Lucio Mauro Braga Machado. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2020. – (A Aplicação do Conhecimento Científico nas Engenharias; v. 3)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-7247-910-3

DOI 10.22533/at.ed.103201301

1. Engenharia – Pesquisa – Brasil. 2. Inovação. I. Túllio, Franciele Braga Machado. II. Machado, Lucio Mauro Braga. III. Série.

CDD 620.0072

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

Atena Editora
 Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A obra “Pesquisa Científica e Inovação Tecnológica nas Engenharias 3” apresenta dezessete capítulos em que os autores abordam pesquisas científicas e inovações tecnológicas aplicadas em diversas áreas de engenharia, priorizando as áreas de ecologia, saneamento e saúde.

Nestes capítulos os autores utilizam a pesquisa científica para produzir conhecimento e inovação visando contribuir para bom uso de nossos recursos ambientais, cuidando da saúde de nosso planeta e dos que nele habitam.

A engenharia sendo usada para manejo de nossos mananciais, priorizando a exploração salutar de um de nossos maiores recursos naturais: a água.

A saúde da população sendo analisada pelo viés científico, a fim de orientar as políticas públicas na área.

Esperamos que o leitor faça bom uso das pesquisas aqui expostas e que estas possam embasar novos estudos na área. Boa Leitura!

Franciele Braga Machado Túllio
Lucio Mauro Braga Machado

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
A RELEVÂNCIA DA DISTÂNCIA FÍSICA DA UNIDADE BÁSICA DE SAÚDE NA PREVENÇÃO E TRATAMENTO DE PATOLOGIAS NO SETOR JARDIM DAS PEROBEIRAS DE MINEIROS - GO	
Raffael de Carvalho Gonçalves Viviane Caldera Juliana Alves Burgo Godoi	
DOI 10.22533/at.ed.1032013011	
CAPÍTULO 2	5
ANÁLISE DOS REGISTROS DE ACIDENTES DE TRABALHO NA PREVIDÊNCIA SOCIAL EM JUAZEIRO DO NORTE NO PERÍODO DE 2008 A 2018	
Esdras Alex Freire de Oliveira Thays Lorranny da Silva Januário Correio José Gonçalves De Araújo Filho	
DOI 10.22533/at.ed.1032013012	
CAPÍTULO 3	27
CONTRIBUIÇÃO PARA O PROCESSO DE MONITORAMENTO DE IMPACTOS AMBIENTAIS NA FASE OPERACIONAL DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS	
Poliana Arruda Fajardo Nemésio Neves Batista Salvador	
DOI 10.22533/at.ed.1032013013	
CAPÍTULO 4	40
ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA AVALIAR A DISPONIBILIDADE DE UM RECURSO HÍDRICO SUBTERRÂNEO QUENTE NAS TERMAS DA AREOLA	
Pedro Jorge Coelho Ferreira Luis Manuel Ferreira Gomes Alcino Sousa Oliveira Rui Miguel Marques Moura José Martinho Lourenço	
DOI 10.22533/at.ed.1032013014	
CAPÍTULO 5	55
FERRAMENTAS DA GESTÃO NA QUALIDADE DA CADEIAPRODUTIVA DOS SUÍNOS SOB SERVIÇO DE INSPEÇÃO MUNICIPAL DO MUNICÍPIO DE SÃO LUIS – MA	
Herlane de Olinda Vieira Barros Célia Maria da Silva Costa Viviane Correa Silva Coimbra Larissa Jaynne Sameneses de Oliveira Zaira de Jesus Barros Nascimento Michelle Lemos Vargens Hugo Napoleão Pires da Fonseca Filho Nathana Rodrigues Lima	
DOI 10.22533/at.ed.1032013015	

CAPÍTULO 6	61
GESTÃO AMBIENTAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ESTRATIFICADA POR TERRITÓRIOS DE DESENVOLVIMENTO EM MINAS GERAIS	
Denise Marília Bruschi Juliana Oliveira de Miranda Pacheco	
DOI 10.22533/at.ed.1032013016	
CAPÍTULO 7	77
LICENCIAMENTO AMBIENTAL - SISTEMA DE COLETA, MONITORAMENTO E ANÁLISE DE DADOS AMBIENTAIS APLICADOS A FERROVIA	
Patricia Ruth Ribeiro Stefani Gabrieli Age Renata Twardowsky Ramalho	
DOI 10.22533/at.ed.1032013017	
CAPÍTULO 8	87
MODELAGEM COMPUTACIONAL DE PROCESSOS DE CONTAMINAÇÃO EM MEIOS POROSOS	
Marcelo Lemos da Silva Grazione de Souza Boy	
DOI 10.22533/at.ed.1032013018	
CAPÍTULO 9	101
MODELAGEM DE UM FERMENTADOR CILÍNDRICO PARA O CACAU	
Marcelo Bruno Chaves Franco Jorge Henrique de Oliveira Sales Rafaela Cristina Ferreira Brito	
DOI 10.22533/at.ed.1032013019	
CAPÍTULO 10	115
O NASCIMENTO DE UMA NOVA ÁGUA MINERAL PARA TERMALISMO E ASPETOS BÁSICOS PARA O ESTABELECIMENTO DE SUAS INDICAÇÕES TERAPÊUTICAS: O CASO DAS TERMAS DE SÃO MIGUEL EM PORTUGAL	
Luís Manuel Ferreira Gomes Luís José Andrade Pais Paulo Eduardo Maia de Carvalho	
DOI 10.22533/at.ed.10320130110	
CAPÍTULO 11	129
PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E CONSTITUINTES METÁLICOS NA AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE ECOSSISTEMA LÊNTICO	
Maria da Graça Vasconcelos Hugo Gomes Amaral Arthur Dias Freitas Angélica Pereira da Cunha Bruna Fernanda Faria Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.10320130111	

CAPÍTULO 12	140
PLANTIOS DE ESPÉCIES NATIVAS DO BIOMA CERRADO EM ÁREAS DEGRADADAS NA ESTAÇÃO ECOLÓGICA DE ÁGUAS EMENDADAS – ESECAE, DISTRITO FEDERAL	
<p>Maria Goreth Goncalves Nobrega Henrique Cruvinel Borges Filho Vladimir de Alcântara Puntel Ferreira</p>	
DOI 10.22533/at.ed.10320130112	
CAPÍTULO 13	154
PROPOSTA DE BANCO DE ÁREAS PARA RESTAURAÇÃO FLORESTAL DE MATA CILIAR EM TRECHO DO RIO RIBEIRA DE IGUAPE, ESTADO DE SÃO PAULO.	
<p>Marcelo Bento Nascimento da Silva Ives Simões Arnone Hugo Portocarrero</p>	
DOI 10.22533/at.ed.10320130113	
CAPÍTULO 14	167
PURIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE LACASES PRODUZIDAS POR <i>Pleurotus ostreatus</i> EM CULTIVO SÓLIDO	
<p>Juliana Cristina da Silveira Vieira Verônica Távilla Ferreira Silva Ezequiel Marcelino da Silva Adriane Maria Ferreira Milagres</p>	
DOI 10.22533/at.ed.10320130114	
CAPÍTULO 15	185
QUALIDADE MICROBIOLÓGICA DA ÁGUA DOS POÇOS DO BAIRRO DA CERÂMICA - CIDADE DA BEIRA, MOÇAMBIQUE	
<p>Albertina Amélia Alberto Nhavoto António Guerner Dias Daniel Agostinho Nivaldo Alfredo José Zandamela</p>	
DOI 10.22533/at.ed.10320130115	
CAPÍTULO 16	198
RECOMENDAÇÕES BIOCLIMÁTICAS PARA O MUNICÍPIO DE SINOP-MT	
<p>Emília Garcez da Luz Cristiane Rossato Candido Érika Fernanda Toledo Borges Leão</p>	
DOI 10.22533/at.ed.10320130116	
CAPÍTULO 17	212
RESÍDUOS DE SERVIÇOS DE SAÚDE: COLETA E TRATAMENTO E DESTINAÇÃO FINAL	
<p>Marcela Avelina Bataghin Costa Fernando Antonio Bataghin Tatiane Fernandes Zambrano Rita de Cássica Arruda Fajardo</p>	
DOI 10.22533/at.ed.10320130117	

CAPÍTULO 18	226
USO DE GEOCÉLULA PEAD E GABIÃO TIPO COLCHÃO COMO REVESTIMENTOS DE CANAIS PARA DESCARACTERIZAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO	
Rafael Freitas Rodrigues	
Michel Moreira Morandini Fontes	
João Augusto de Souza Pinto	
Luiz Henrique Resende de Pádua	
Luany Maria de Oliveira	
Cristian Chacon Quispe	
DOI 10.22533/at.ed.10320130118	
SOBRE OS ORGANIZADORES	237
ÍNDICE REMISSIVO	238

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE PROCESSOS DE CONTAMINAÇÃO EM MEIOS POROSOS

Data de aceite: 02/12/2019

Marcelo Lemos da Silva

Instituto Politécnico, Universidade do Estado
do Rio de Janeiro
Nova Friburgo, Rio de Janeiro

Grazione de Souza Boy

Instituto Politécnico, Universidade do Estado
do Rio de Janeiro
Nova Friburgo, Rio de Janeiro

RESUMO: A água é um recurso fundamental para a sobrevivência dos seres vivos, e no caso dos seres humanos a sua relação é ainda mais proeminente, devido às suas aplicações que envolvem, por exemplo, irrigação, processos industriais, transporte, energia e higiene. Infelizmente, também é verdade que os recursos hídricos são atingidos pela poluição. Nos aquíferos, formações rochosas subterrâneas onde há água armazenada, processos de contaminação podem inviabilizar a utilização e levar a necessidade de técnicas de remediação. Em tal contexto, a simulação numérica de escoamentos em meios porosos pode ser aplicada no entendimento da dinâmica dos processos de contaminação e na proposição de mecanismos de contenção e/ou remediação. Este capítulo é dedicado a aplicação de simulação numérica ao problema

de contaminação em um aquífero. O material possui caráter introdutório, de forma que o leitor que não conhece o tema seja apresentado aos fundamentos do assunto e possa posteriormente avançar em maiores detalhes.

PALAVRAS-CHAVE: aquíferos, contaminação, simulação numérica, Método de Diferenças Finitas.

COMPUTATIONAL MODELING OF CONTAMINATION PROCESS IN POROUS MEDIA

ABSTRACT: Water is a fundamental resource for the survival of living beings, and in the case of human beings its relationship is even more prominent due to its applications involving, for example, irrigation, industrial processes, transport, energy and hygiene. Unfortunately, it is also true that water resources are affected by the pollution. In the case of aquifers, underground rock formations where there is stored water, contamination processes can make their use unfeasible and lead to the need for remediation techniques. In this context, numerical simulation of porous media flow can be applied to understand the dynamics of contamination processes and to propose containment and/or remediation mechanisms. This chapter is dedicated to the application of numerical simulation to the problem of

contamination in an aquifer. The text has an introductory character, so that the reader who does not know the theme is presented to fundamental concepts and can later advance in more detail.

KEYWORDS: aquifers, contamination, numerical simulation, Finite Difference Method.

1 | INTRODUÇÃO

Um aquífero é uma formação rochosa subterrânea onde há água armazenada. Trata-se de um meio poroso, ou seja, formado por uma matriz sólida constituída de rocha e de poros, que formam os espaços preenchidos por fluido, sendo uma fonte de água doce para os seres humanos. Eles são responsáveis por estocar aproximadamente 10,5 milhões de km³ de água doce em estado líquido, o que representa 30,1% da água doce disponível na Terra (PERLMAN, 2016). Diferentemente do que ocorre com as águas superficiais, a poluição de aquíferos é um processo silencioso e difícil de monitorar, já que não é possível fazer uso de uma inspeção visual direta. O controle do nível dos aquíferos e da poluição dos mesmos é custoso, sendo muitas vezes o resultado da poluição despercebido, fazendo com que atividades industriais e agrícolas usem reservas contaminadas. Isto acarreta em prejuízos às populações que fazem uso de aquíferos, muitas vezes surpreendidas pela contaminação. Na virada dos século XX para XXI, os aquíferos forneciam 33% do consumo humano e eram a fonte principal de água doce para o consumo de cerca de dois bilhões de pessoas (SAMPAT, 2000). De fato, os aquíferos são muito utilizados pelo agronegócio, sendo que cerca de 43% da água utilizada para irrigação anualmente vem dos aquíferos (SIEBERT et al., 2010).

Denomina-se a porosidade como a relação entre o volume de poros dividido pelo volume total do meio poroso (BEAR, 1972). Chama-se de porosidade efetiva àquela que contabiliza apenas os poros conectados, que contribuem para o transporte de fluido. Neste texto daqui em diante ao se falar de porosidade estará se considerando a efetiva. Outra propriedade do meio poroso é permeabilidade absoluta, definida como a capacidade do meio transportar fluidos. A permeabilidade absoluta é medida para meio poroso totalmente saturado e com uma única fase líquida. Em geral, aquíferos são heterogêneos em termos de permeabilidade e de porosidade (LIN et al., 2010).

A modelagem do escoamento em meios porosos baseia-se na solução de equações diferenciais parciais (EDPs) para a conservação de magnitudes físicas e no uso de correlações para as propriedades de fluido e de rocha (BEAR, 1972). Como exemplo de EDPs, tem-se a da conservação da massa e a de conservação da quantidade de movimento como equações utilizadas no estudo do escoamento monofásico isotérmico em meio poroso. Em geral, no escoamento em meios porosos,

na equação da conservação da massa há uma velocidade aparente de escoamento. Esta é dada pela equação para o balanço da quantidade de movimento, sendo a lei de Darcy a mais conhecida. Tal lei foi obtida primeiro empiricamente e depois derivada matematicamente, e é válida para um conjunto de hipóteses, dentre as quais o escoamento a baixas velocidades (BEAR, 1972; WANG; ANDERSON, 1982).

A substituição da lei de Darcy na equação da conservação da massa, para a fase fluida considerada, permite a obtenção de uma EDP para a variável pressão. Para um caso de escoamento monofásico isotérmico, correlações para a determinação das propriedades de rocha e de fluido e condições inicial e de contorno completam o modelo de escoamento. Contudo, considerando a contaminação de um aquífero, é necessária a equação da conservação da massa em termos da concentração do contaminante, levando assim a um sistema de EDPs não-lineares acopladas. Isto ocorre pois a velocidade está presente na conservação da massa para o componente, sendo ela dependente da pressão. Assim, tem-se um caso de solução de EDPs para a pressão da água e da concentração do contaminante.

2 | CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFEROS

A contaminação de cursos de água e de aquíferos traz impactos tais como a redução no abastecimento de comunidades, proliferação de doenças e prejuízos para as indústrias. Mesmo quando possível o tratamento para se obter água potável, existem custos envolvidos proporcionais a má qualidade da água captada. No caso dos aquíferos tem-se intensificado nas últimas décadas o empenho de pesquisadores tendo em vista elaborar soluções para evitar a contaminação dos recursos hídricos (KONIKOW, 1981; BENNER; MOHTAR; LEE, 2002; DATTA; CHAKRA-BARTY; DHAR, 2009). Trabalha-se, também, para que uma vez iniciado o processo de poluição, tenha-se medidas para contê-la e/ou remediá-la (WANG; BOOKER; CARTER, 1999; ZHONG et al., 2008; MCLAREN R.G.; ILLMAN, 2012).

Em um aquífero real, as propriedades da rocha podem variar com a posição (LIN et al., 2010) e a geometria é irregular, o que torna difícil a obtenção de soluções analíticas de EDPs, sendo possível obtê-las apenas em casos específicos (ZHAN et al., 2009). Tal cenário leva ao uso de soluções numéricas para a dinâmica do escoamento em aquíferos. Tal metodologia também é necessária pelo fato das EDPs, utilizadas na modelagem de escoamentos em meios porosos, em geral serem não-lineares.

Em função da porosidade e da permeabilidade, os aquíferos são classificados em porosos ou fraturados (fissurados). De acordo com a classificação quanto à pressão da água, há os não confinados, chamados também de freáticos ou livres. Este tipo é o que mais apresenta problemas de poluição e contaminação, pois é amplamente

usado pela população civil, indústrias e agricultura (BEAR, 1972). Infelizmente a contaminação de aquíferos é um problema muito frequente, existindo muitas áreas habitadas sem que haja um planejamento prévio de saneamento básico, indústrias que depositam dejetos sem fiscalização ou até mesmo contaminação por acidentes naturais. Na Figura 1 observa-se uma ilustração do processo de contaminação de um aquífero. Muitas vezes, mesmo que a fonte de contaminação seja eliminada, os contaminantes presentes no aquífero continuam a migrar e a se espalhar pelo mesmo. Para evitar maiores danos, o contaminante deve ser imobilizado, neutralizado ou removido. A contaminação pode começar em uma pequena área e se espalhar por uma grande extensão, dependendo da natureza do aquífero (KONIKOW, 1981).

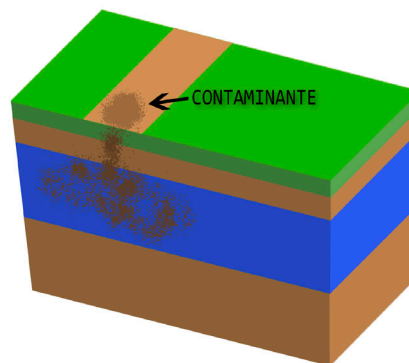


Figura 1: Ilustração de um processo de contaminação (em azul tem-se o aquífero).

Quando tem-se uma contaminação por resíduos nucleares ou do tipo biológico, tem-se a disseminação de doenças. Resíduos nucleares são altamente prejudiciais à saúde, trazendo muitos riscos para a área afetada e arredores (BREITENECKER et al., 2014). O mesmo ocorre para contaminações biológicas, que apresentam comportamentos distintos e de difícil estudo dependendo do elemento contaminante. Neste contexto, as substâncias orgânicas são decompostas por microrganismos (principalmente bactérias aeróbicas) em substâncias mais simples, como CO_2 , H_2O e NH_4 , por exemplo, devido a biodegradação (ZHENG; WANG, 1999). Por outro lado, muitos componentes líquidos ou gasosos tendem a se acumular aderidos em superfícies sólidas, fenômeno chamado de adsorção (CLASS, 2007). Na modelagem da contaminação de aquíferos é possível incorporar o decaimento/biodegradação para os contaminantes dissolvido e adsorvido.

3 | MODELAGEM FÍSICO-MATEMÁTICA

Para a discussão de um problema modelo, simplificado, as seguintes hipóteses são adotadas: escoamento unidimensional na direção x , sem efeitos gravitacionais; fluido incompressível; escoamento monofásico; regime transiente; meio poroso homogêneo quanto à permeabilidade; viscosidade constante; validade

da lei de Darcy; efeitos de advecção e de difusão no transporte do poluente e rocha ligeiramente compressível. De posse das hipóteses e das relações que determinam as propriedades físicas de fluido e rocha, obtém-se as EDPs para as variáveis pressão da água e concentração do contaminante. A substituição da lei de Darcy (WANG; ANDERSON, 1982) na conservação da massa para a fase fluida leva a uma EDP para a variável pressão, reescrevendo-se também o termo de acúmulo. Para o caso de escoamento monofásico em meios porosos, a lei de Darcy é expressa, por

$$\mathbf{v} = -(\mathbf{k} / \mu)(\nabla p - \rho g \nabla Z) \quad (1)$$

onde \mathbf{v} é a velocidade de Darcy, uma velocidade aparente de escoamento, \mathbf{k} é o tensor de permeabilidade absoluta, μ é a viscosidade, p é a pressão, ρ é a massa específica da água, g a magnitude da aceleração da gravidade e Z representa a profundidade. Simplificando para o escoamento unidimensional na direção x , desconsiderando efeitos hidrostáticos,

$$v_x = -(k / \mu)(\partial p / \partial x) \quad (2)$$

Para a equação de conservação da massa da fase fluida, tem-se

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho) = -\nabla \cdot [\rho \mathbf{v}] + q \quad (3)$$

onde ϕ é a porosidade e q é um termo fonte. Substituindo a Eq. (2) na Eq. (3) para o caso unidimensional em x , desconsiderando o termo fonte,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (4)$$

e, se a massa específica, a viscosidade e a permeabilidade forem consideradas constantes,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi) = \frac{k}{\mu} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (5)$$

sendo ainda é possível escrever,

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{d\phi}{dp} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (6)$$

e, para a compressibilidade da rocha pequena e constante, é possível utilizar

$$\phi = \phi_0 \left[1 + c_\phi (p - p_0) \right] \quad (7)$$

onde c_ϕ é a compressibilidade da rocha e ϕ_0 é a porosidade de referência medida na pressão de referência p_0 . Reescreve-se, então, a Eq. (5) como

$$c_{\phi}\phi^0 \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k}{\mu} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (8)$$

ou ainda,

$$\frac{c_{\phi}\phi^0 \mu}{k} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (9)$$

Para a equação de transporte do contaminante, no caso unidimensional, na direção x , considerando-se apenas um poluente (ZHENG; WANG, 1999),

$$\frac{\partial(\phi C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (\phi v C) + q C_s + R \quad (10)$$

onde C é a concentração da espécie química dissolvida, D o coeficiente de dispersão hidrodinâmica, C_s é a concentração relacionada à fonte q e R é a fonte associada a reações químicas. A partir do lado esquerdo da Eq. (10),

$$(\partial(\phi C) / \partial t) = \phi(\partial C / \partial t) + C(\partial \phi / \partial t) \quad (11)$$

O termo de reação na Eq. (10) pode ser usado para incluir efeitos bioquímicas e geoquímicas. Considerando-se apenas dois tipos básicos de reações químicas, o sólido aquoso em reação superficial (adsorção) e a reação de taxa de primeira ordem (ZHENG; WANG, 1999), tem-se

$$R = -\rho_b(\partial \bar{C} / \partial t) - \lambda_1 \phi C - \lambda_2 \rho_b \bar{C} \quad (12)$$

onde ρ_b é a massa específica da rocha, C é a concentração da espécie química adsorvida na superfície sólida, λ_1 é a taxa de reação de primeira ordem para a fase dissolvida e λ_2 é a taxa de reação de primeira ordem para a fase adsorvida no sólido. Substituindo as Eqs. (11) e (12) na Eq. (10), desconsiderando a existência do termo fonte q , é possível escrever

$$\phi \frac{\partial C}{\partial t} + C \frac{\partial \phi}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (\phi v C) - \lambda_1 \phi C - \lambda_2 \rho_b \bar{C} \quad (13)$$

onde considera-se aqui o equilíbrio local para todos os processos de adsorção, de forma que ele é suficientemente rápido em comparação com a escala de tempo de transporte do contaminante (advecção e difusão). No contexto dos resíduos nucleares e biológicos λ_1 e λ_2 são, nesta ordem, a taxa de reação de primeira ordem para a fase dissolvida e a taxa de reação de primeira ordem para a fase sólida. Eles representam as perdas de massa, e em geral, ao se considerar a meia-vida de elementos químicos (ZHENG; WANG, 1999),

$$\lambda = (\ln 2) / t_{1/2} \quad (14)$$

onde $t_{1/2}$ é o tempo de meia-vida dos materiais radioativos. No caso de agentes biológicos, o tempo de meia-vida é o necessário para a concentração diminuir para a metade do seu valor original.

A dispersão em meios porosos representa o espalhamento dos contaminantes ao longo de uma região (WANG; ANDERSON, 1982). A difusão molecular é, em geral, secundária e desprezível, se comparada aos efeitos da dispersão mecânica, e só se torna importante quando a velocidade da água for muito baixa. A soma da dispersão mecânica e da difusão molecular é denominada dispersão hidrodinâmica, ou dispersão. No caso bidimensional xy , por ilustração, as componentes do tensor diagonal de dispersão hidrodinâmico \mathbf{D} , para um meio poroso isotrópico, são dadas por (BEAR, 1972)

$$D_{xx} = \alpha_L (v_x^2 / |v|) + \alpha_T (v_y^2 / |v|) + D^* \quad (15)$$

e

$$D_{yy} = \alpha_L (v_y^2 / |v|) + \alpha_T (v_x^2 / |v|) + D^* \quad (16)$$

onde D_{xx} e D_{yy} são as componentes principais do tensor dispersão, α_L é a dispersividade longitudinal, α_T é a dispersividade transversal, D^* é o coeficiente de difusão molecular efetivo, v_x e v_y são as componentes do vetor velocidade ao longo dos eixos x e y , respectivamente, e $|v| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ é a magnitude do vetor velocidade. No caso unidimensional em x ,

$$D_{xx} = D = \alpha_L (v_x^2 / |v|) + D^* \quad (17)$$

No caso da adsorção, em geral é assumido que as condições de equilíbrio existem entre as concentrações das fases aquosa e sólida e que a reação de adsorção ocorre em uma escala de tempo suficiente mais rápida que a escala associada ao transporte advectivo da água no aquífero, de modo que a adsorção pode ser considerada como instantânea. As isotermas de adsorção são geralmente incorporadas ao modelo de transporte. Por exemplo, para uma isoterma linear, assume-se que a concentração adsorvida é diretamente proporcional à concentração dissolvida (ZHENG; WANG, 1999), ou seja,

$$\bar{C} = K_d C \quad (18)$$

onde K_d é o coeficiente de distribuição. Outros modelos de isotermas podem ser encontrados em Zheng e Wang (1999).

Para completar o modelo resta a definição das condições iniciais e de contorno. Como condição inicial tem-se os valores iniciais da pressão e da concentração em todo o domínio. Quanto às pressões nas fronteiras, impõe-se pressões prescritas. Para as concentrações, adota-se uma concentração prescrita em $x = 0$ e a sua

derivada em relação a x nula em $x = Lx$, onde Lx é o comprimento total do meio.

4 | MÉTODOS NUMÉRICOS

O método de diferenças finitas (*Finite Difference Method*) pode ser adotado para a discretização do domínio de solução e das EDPs governantes, considerando-se uma malha numérica. Na configuração adotada, o subscrito inteiro i indica o centro da célula onde são calculadas pressão e concentração, enquanto os índices fracionários $i \pm 1/2$ indicam as faces das células, onde calcula-se as velocidades. Em geral as células podem ter espaçamentos Δx_i não uniformes. Para células uniformes

$$\Delta x = L_x / n_x \quad (19)$$

onde Lx é o comprimento do aquífero e nx é o número de células da malha computacional. Com relação ao tempo, um passo de tempo Δt é adotado na forma

$$\Delta t = t_{\max} / n_t \quad (20)$$

onde t_{\max} é o tempo máximo e nt é o número de passos de tempo. Baseando se, então, nas ideias apresentadas, passa-se à discretização das EDPs. Devido às hipóteses adotadas, a discretização para a EDP da pressão será muito favorecida, pois tem-se uma EDP linear.

Considera-se como referência para a aproximação da EDP a posição i e o tempo $n + 1$, onde se desconhece a pressão. Escreve-se, a partir da Eq.(9),

$$\left\{ \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right\}_i^{n+1} = \left\{ \frac{c_\phi \phi^0 \mu}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \right\}_i^{n+1} \quad (21)$$

e levando em conta o fato de o coeficiente da derivada no tempo ser constante,

$$\left\{ \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right\}_i^{n+1} = \Gamma \left\{ \frac{\partial p}{\partial t} \right\}_i^{n+1} \quad (22)$$

onde

$$\Gamma = (c_\phi \phi^0 \mu) / k \quad (23)$$

Aproxima-se a derivada espacial utilizando-se um esquema do tipo diferença centrada

$$\left\{ \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right\}_i^{n+1} \approx \frac{p_{i+1}^{n+1} - 2p_i^{n+1} + p_{i-1}^{n+1}}{\Delta x^2} \quad (24)$$

enquanto que para a derivada temporal utiliza-se uma diferença recuada (ERTEKIN; ABOU-KASSEM; KING, 2001),

$$\left\{ \frac{\partial p}{\partial t} \right\}_i^{n+1} \approx \frac{p_i^{n+1} - p_i^n}{\Delta t} \quad (25)$$

Substituindo-se as aproximações dadas pelas Eqs.(24) e (25) na Eq. (23),

$$(p_{i+1}^{n+1} - 2p_i^{n+1} + p_{i-1}^{n+1})\Delta x^2 = \Gamma((p_i^{n+1} - p_i^n) / \Delta t) \quad (26)$$

utilizando-se o sinal de igualdade tendo-se devido a implementação computacional. Na Eq. (26) tem-se uma formulação totalmente implícita, que pode ser reescrita como

$$-p_{i-1}^{n+1} + (\alpha + 2)p_i^{n+1} - p_{i+1}^{n+1} = \alpha p_i^n \quad (27)$$

onde

$$\alpha = \Gamma(\Delta x^2 / \Delta t) \quad (28)$$

A Eq. (27), escrita para todas as células da malha, leva a um sistema de equações algébricas, que quando resolvido, conduz as pressões nos pontos i e no tempo $n + 1$. Da lei da Darcy calcula-se as velocidades em $i \pm 1/2$, necessárias na solução da equação da concentração.

No caso da equação da concentração, considera-se a sua discretização a determinação da solução nos pontos i e no tempo $n + 1$, de forma que

$$\left\{ \phi \frac{\partial C}{\partial t} + C \frac{\partial \phi}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} \right\}_i^{n+1} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (\phi v C) - \lambda_1 \phi C - \lambda_2 \rho_b \bar{C} \right\}_i^{n+1} \quad (29)$$

ou, aplicando-se o modelo linear para adsorção,

$$\left\{ \phi \frac{\partial C}{\partial t} + C \frac{\partial \phi}{\partial t} + \rho_b K_d \frac{\partial C}{\partial t} \right\}_i^{n+1} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (\phi v C) - \lambda_1 \phi C - \lambda_2 \rho_b K_d C \right\}_i^{n+1} \quad (30)$$

Para as derivadas temporais utiliza-se aproximações recuadas,

$$\left\{ \frac{\partial C}{\partial t} \right\}_i^{n+1} \approx \frac{C_i^{n+1} - C_i^n}{\Delta t} \quad (31)$$

enquanto que para aproximações do tipo diferenças centradas são empregadas para o termo de difusão

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right\}_i^{n+1} \approx \frac{1}{\Delta x} \left\{ \left(\phi D \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{i+1/2}^{n+1} - \left(\phi D \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{i-1/2}^{n+1} \right\} \quad (32)$$

$$\left(\phi D \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{i+1/2}^{n+1} \approx \frac{1}{\Delta x} (\phi D)_{i+1/2}^{n+1} \frac{C_{i+1}^{n+1} - C_i^{n+1}}{\Delta x} \quad (33)$$

e

$$\left(\phi D \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{i-1/2}^{n+1} \approx \frac{1}{\Delta x} (\phi D)_{i-1/2}^{n+1} \frac{C_i^{n+1} - C_{i-1}^{n+1}}{\Delta x} \quad (34)$$

No caso do termo com derivada de ϕ em relação ao tempo ela é aproximada utilizando-se diferenças recuadas,

$$\left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\}_i^{n+1} \approx c_\phi \phi^0 \frac{P_i^{n+1} - P_i^n}{\Delta t} \quad (35)$$

Diferenças centradas também são empregadas no caso do termo de advecção,

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial x} (\phi v C) \right\}_i^{n+1} \approx \frac{1}{\Delta x} \left\{ (\phi v C)_{i+1/2}^{n+1} - (\phi v C)_{i-1/2}^{n+1} \right\} \quad (36)$$

de forma que para as velocidades, elas devem ser conhecidas nas fronteiras das células. Contudo, o valor de concentração é conhecido nos centros das células. Para contornar tal situação, usa-se um esquema do tipo *upwind* de primeira ordem (ERTEKIN; ABOU-KASSEM; KING, 2001). Considera-se aqui que a velocidade é sempre positiva,

$$C_{i+1/2}^{n+1} \approx C_i^{n+1} \quad (37)$$

e

$$C_{i-1/2}^{n+1} \approx C_{i-1}^{n+1} \quad (38)$$

A forma final discretizada da equação da concentração é dada por

$$\begin{aligned} & -\left(D'_{i-1/2}{}^{n+1} + V'_{i-1/2}{}^{n+1} \right) C_{i-1}^{n+1} + \left\{ c_\phi \phi^0 \frac{P_i^{n+1} - P_i^n}{\Delta t} + \lambda_1 \phi_i^{n+1} + \lambda_2 \rho_b K_d \right. \\ & \left. + \frac{\phi_i^n + \rho_b K_d}{\Delta t} + D'_{i-1/2}{}^{n+1} + V'_{i-1/2}{}^{n+1} + V'_{i+1/2}{}^{n+1} \right\} - D'_{i+1/2}{}^{n+1} C_{i+1}^{n+1} = \left\{ \frac{\phi_i^n + \rho_b K_d}{\Delta t} \right\} C_i^n \end{aligned} \quad (39)$$

onde os termos com ' contém a porosidade (ϕ) e o espaçamento da malha espacial (Δx). Obtém-se, assim, uma formulação totalmente implícita para a concentração. Assim, é possível utilizar a Eq. (20), pois não há restrições devido a estabilidade relacionadas a critérios CFL (ZHENG; WANG, 1999), mas com passos de tempo que não sejam altos o bastante para comprometer a a estratégia de decomposição de operadores (VENNEMO, 2016) aplicada. Após a obtenção das pressões a partir da solução da Eq. (27), as velocidades são calculadas e usadas quando da determinação da concentração via Eq. (39). No caso geral de dois subsistemas não lineares, ocorreria um processo iterativo de níveis: dois internos

para a solução dos subsistemas de equações algébricas e um externo para a atualização dos coeficientes.

O conjunto de equações algébricas para a pressão e a concentração podem ser escritos em uma forma compacta $\mathbf{Ax}=\mathbf{b}$, onde \mathbf{A} representa a matriz dos coeficientes, \mathbf{x} é o vetor de incógnitas, no caso a pressão da água e a concentração do contaminante (avaliadas no tempo $n+1$), e \mathbf{b} é o vetor que contém os termos conhecidos (pressões e concentrações no tempo n , para cada subsistema). Em geral, métodos iterativos são aplicados nestes casos, sendo que eles necessitam de uma estimativa do valor inicial da solução no início das iterações, que prosseguem até que ocorra a convergência dos valores para a solução do sistema de equações. As iterações são interrompidas e considera-se obtida a solução do sistema, quando um critério de interrupção adotado é alcançado (SAAD, 2003). Dentre as opções disponíveis na literatura, para problemas simples há o método de Gauss-Seidel, devido a sua facilidade de implementação quando comparada a de outros métodos mais robustos, tais como o método dos gradientes conjugados ou o do gradiente biconjugado (SAAD, 2003). Ele pode ser aplicado tanto para matrizes de coeficientes simétricas (caso do subsistema para a pressão) e para não simétricas (caso do subsistema para a concentração). Casos mais realísticos, tais como na presença de heterogeneidades fortes, podem exigir outros métodos.

Finalmente, cabe comentar que para medir a importância relativa dos efeitos de advecção e difusão, o número de Péclet é usado,

$$P_e = (|v| L) / D \quad (40)$$

onde L é um comprimento característico, considerado geralmente como sendo a dimensão da célula e D é o coeficiente de dispersão (ZHENG; WANG, 1999).

5 | ALGUMAS APLICAÇÕES

Para encerrar, apresenta-se aqui, em caráter ilustrativo, alguns resultados obtidos por Silva (2019) para problemas de escoamento em aquíferos nos quais há contaminação, nas Figuras 2-5. No caso da aplicação da aproximação *upwind* de primeira ordem, como esperado, houve observação de difusão numérica, a qual foi reduzida via refinamento de malha. Esta questão é relevante, pois apesar de se amenizar a difusão numérica isso foi alcançado como maior esforço computacional. Isto justifica a busca, na prática das simulações numéricas de escoamentos, por estratégias de *software* e/ou *hardware* que reduzam os custos de processamento e de memória. Na escala dos problemas aqui reproduzidos as simulações mais demoradas levaram alguns minutos, no entanto em problemas mais realísticos e de maior escala espacial, dimensional e temporal, reduzir difusão numérica via

refinamento de malha poderia ser proibitivo.

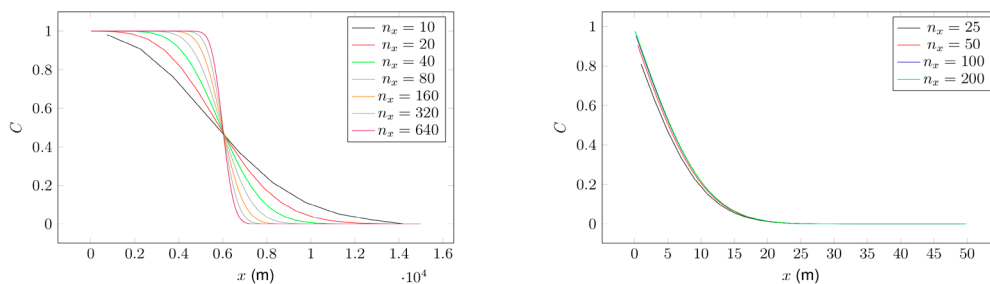


Figura 2: Refinamento de malha para caso de velocidade constante: (a) apenas advecção e (b) apenas difusão.

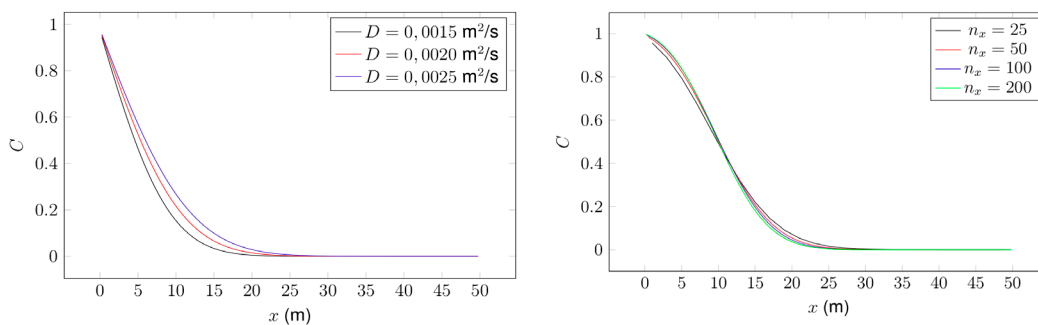


Figura 3: Caso de velocidade constante: (a) variação do coeficiente D para o caso difusivo e (b) refinamento de malha para o caso advectivo-difusivo.

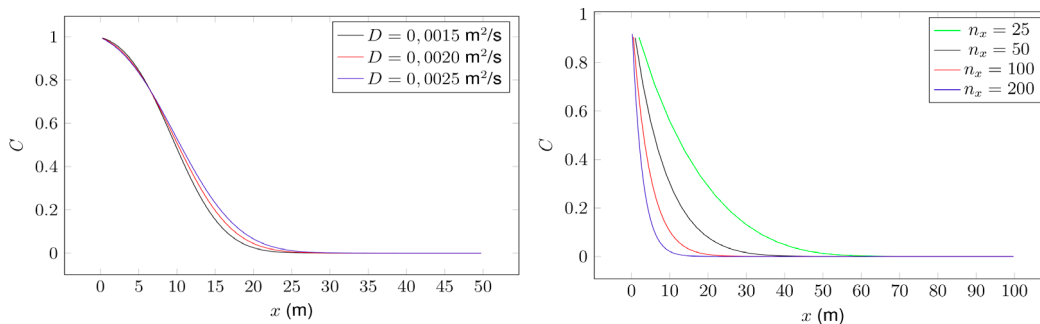


Figura 4: (a) Variação do coeficiente D para o caso advectivo-difusivo, velocidade constante e (b) refinamento de malha para o caso advectivo-difusivo com adsorção e decaimento (velocidade calculada).

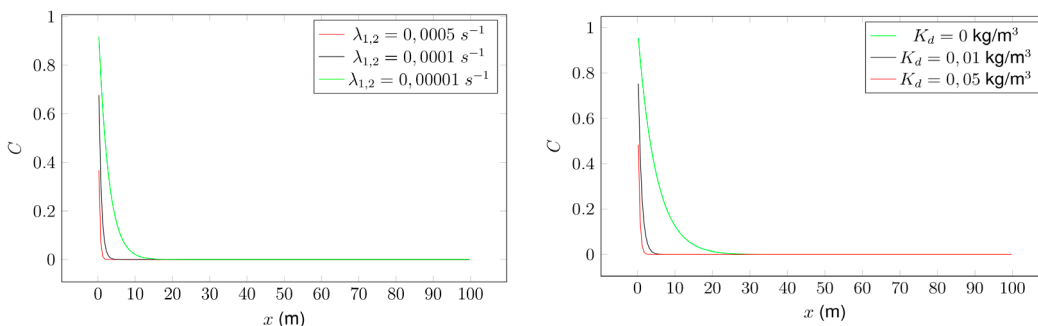


Figura 5: Caso advectivo-difusivo com adsorção e decaimento e velocidade calculada: (a) variação do coeficiente de decaimento e (b) variação do coeficiente de distribuição.

REFERÊNCIAS

- BEAR, J. Dynamics of Fluids in Porous Media. New York, USA: American Elsevier Company, 1972.
- BENNER, M.; MOHTAR, R.; LEE, L. Factors affecting air sparging remediation systems using field data and numerical simulations. *Journal of Hazardous Materials*, v. 95, p. 305–329, 2002.
- BREITENECKER, F. et al. Comparative mathematical modelling of groundwater pollution. In: . [S.l.: s.n.], 2014.
- CLASS, H. Models for Non-Isothermal Compositional Gas-Liquid Flow and Transport in Porous Media. Stuttgart, Germany: Fakultat fur Bauund Umweltingenieurwissenschaften der Universitat Stuttgart, 2007.
- SILVA, M. L. Simulação numérica de processos de adsorção em processos de contaminação de aquíferos. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, Brasil, 2019.
- DATTA, B.; CHAKRABARTY, D.; DHAR, A. Simultaneous identification of unknown groundwater pollution sources and estimation of aquifer parameters. *Journal of Hydrology*, v. 376, p. 48-57, 2009.
- ERTEKIN, T.; ABOU-KASSEM, J.; KING, G. Basic Applied Reservoir Simulation. Richardson, USA: Society of Petroleum Engineers, 2001.
- KONIKOW, L. Role of numerical simulation in analysis of ground-water quality problems. *Science of the Total Environment*, v. 398, p. 299-312, 1981.
- LIN, H.-T. et al. Estimation of effective hydrogeological parameters in heterogeneous and anisotropic aquifers. *Journal of Hydrology*, v. 389, p. 57-68, 2010.
- MCLAREN R.G., S. E. P. Y.-J.; ILLMAN, W. Numerical simulation of dnapi emissions and remediation in a fractured dolomitic aquifer. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 136-137, p. 56-71, 2012.
- MILLER, C. et al. Numerical simulation of water resources problems: Models, methods, and trends, advances in water resources. *Advances in Water Resources*, v. 51, p. 405-437, 2013.
- NEUKUM, C.; AZZAM, R. Quantitative assessment of intrinsic groundwater vulnerability to contamination using numerical simulations. *Science of the Total Environment*, v. 408, p. 245–254, 2009.
- NICK, H. M. et al. Reactive dispersive contaminant transport in coastal aquifers: Numerical simulation of a reactive Henry problem. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 145, p. 90-104, 2013.
- PERLMAN, H. The World's Water: "Water, Water, Everywhere....". 2016. Disponível em: <<https://water.usgs.gov/edu/earthwherewater.html>>.
- SAAD, Y. Iterative Methods for Sparse Linear Systems. 2. ed. Philadelphia: SIAM, 2003.
- SAMPAT, P. Deep trouble: the hidden threat of groundwater pollution. Washington D.C., USA: Worldwatch Institute, 2000.
- SCHIJVEN, J.; HASSANIZADEH S.M., d. A. Vulnerability of unconfined aquifers to virus contamination. *Water Research*, v. 44, p. 1170-1181, 2010.
- SIEBERT, S. et al. Groundwater use for irrigation - a global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 14, n. 10, p. 1863-1880, 2010.

VENNEMO, S. B. Multiscale Simulation of Thermal Flow in Porous Media. Dissertação (Mestrado). Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2016.

WANG, H.; ANDERSON, M. Introduction to Groundwater Modeling, Finite Difference and Finite Element Methods. San Diego, USA: Academic Press, 1982.

WANG, J.; BOOKER, J.; CARTER, J. Analysis of the remediation of a contaminated aquifer by a multi-well system. Computers and Geotechnics, v. 25, p. 171-189, 1999.

ZHAN, H. et al. Analytical solution of two-dimensional solute transport in an aquifer-aquitard system. Journal of Contaminant Hydrology, v. 107, p. 162-174, 2009.

ZHENG, C.; WANG, P. MT3DMS: A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater Systems; Documentation and User's Guide. [S.I.], 1999.

ZHONG, L. et al. Enhanced remedial amendment delivery through fluid viscosity modifications: experiments and numerical simulations. Journal of Contaminant Hydrology, v. 101, p. 29-41, 2008.

MODELAGEM DE UM FERMENTADOR CILÍNDRICO PARA O CACAU

Data de aceite: 02/12/2019

Marcelo Bruno Chaves Franco

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia

Jorge Henrique de Oliveira Sales

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia

Rafaela Cristina Ferreira Brito

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia

RESUMO: O processo de fermentação das sementes de cacau ocorre a partir da sua deposição em cochos de madeira, que se localizam nas Casas de Fermentação. Assim, são necessários em média, 6 dias para o término deste processo, cujo o manuseio da massa de cacau é efetuado por trabalhadores rurais em tempos predeterminados. Este processo tradicional, é ineficiente devido à distribuição de temperatura não uniforme na massa de cacau, necessitando, assim, de intervenção externa para uniformizar a temperatura. Conseqüentemente, estas ações externas podem possibilitar possíveis contaminações. Desta forma, o objetivo deste artigo é apresentar um método mais eficiente quanto a uniformização da temperatura gerada no processo de fermentação do cacau. As principais ferramentas

para execução do trabalho são, softwares de Computer Assisted Design (CAD) e Computer Assisted Engineering (CAE). A partir das simulações executadas em um software CAE, investigaram-se as respectivas distribuições de temperatura no interior de cada três modelos de fermentadores, averiguando a ocorrência ou não de uniformidade da temperatura na massa de cacau. Assim, os resultados das simulações indicam o fermentador rotativo como o mais eficiente, com relação aos outros modelos analisados, pois apresentou uma melhor dispersão do calor contido inicialmente na fonte localizada no centro da massa de cacau, o que implica em um aumento da probabilidade de ocorrer uma distribuição uniforme neste processo fermentativo.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Computacional. Transferência de Calor. Fermentador. Cacau.

MODELING A CYLINDRICAL FERMENTER FOR COCOA

ABSTRACT: The fermentation process of cocoa beans occurs from their deposition in wooden troughs, which are located in Fermentation Houses. Thus, it takes an average of 6 days to complete this process, whose handling of cocoa mass is performed by rural workers at predetermined times. This traditional process

is inefficient due to the non-uniform temperature distribution in the cocoa mass, thus requiring external intervention to standardize the temperature. Consequently, these external actions may enable possible contamination. Thus, the aim of this paper is to present a more efficient method regarding the uniformity of the temperature generated in the cocoa fermentation process. The main tools to perform the work are Computer Assisted Design (CAD) and Computer Assisted Engineering (CAE) software. From the simulations performed in a CAE software, the respective temperature distributions within each three fermenter models were investigated, investigating the occurrence or not of temperature uniformity in the cocoa mass. Thus, the results of the simulations indicate that the rotary fermenter is the most efficient in relation to the other models analyzed, since it presented a better dispersion of heat initially contained in the source located in the center of the cocoa mass, which implies an increased probability of even distribution occurs in this fermentation process.

KEYWORDS: Computational modeling. Heat transfer. Fermenter. Cocoa.

1 | INTRODUÇÃO

O processo de beneficiamento do cacau é subdividido em 5 etapas, sendo: colheita, quebra, fermentação, secagem e armazenamento, assim estas etapas podem ser responsáveis por até 50% das características organolépticas (principalmente sobre o sabor e o aroma) dos produtos derivados do cacau. Assim, o diferencial em cada uma dessas etapas que fornece as características do cacau fino em relação aos demais tipos de cacau presentes no mercado, por ser um produto que exige um processamento diferenciado, seja pelo componente ambiental, por meio do “sistema cabruca”, ou pelo componente “tecnológico local”, já que muitas empresas adaptaram e desenvolveram seus próprios métodos, equipamentos e controles específicos de temperatura que desencadearam aprimoramentos no processo de fermentação e secagem, e conseqüentemente, na obtenção de amêndoas de qualidade (LIMA e SALES, 2015). A fermentação é umas das etapas mais importantes, devido a inicialização da formação dos precursores do sabor, cor e aroma, sendo desenvolvido por meio de reações bioquímicas envolvendo polifenóis, proteínas e açúcares. Assim, o tempo médio de fermentação varia entre 5 a 7 dias, não sendo recomendável que o tempo de fermentação esteja fora desta faixa de variação. O primeiro revolvimento da massa de cacau é feito após 48 horas com relação à configuração inicial da etapa, com auxílio de intervenção humana (trabalhador rural), promovendo assim, uma aeração e uniformização da massa. Desta forma, os demais revolvimentos são efetuados em sequência para os seguintes tempos: 72, 96, 120, 144 e 168 horas, até que a etapa de fermentação seja concluída (SALES e CANDIDA, 2016).

Tendo isto vista, este artigo apresenta 3 possíveis modelos alternativos para a etapa de fermentação, cujo o controle é automatizado, visando o mínimo de

intervenção humana e uma maior eficiência com relação a distribuição de temperatura no interior da massa de cacau, já que a temperatura influencia diretamente nas reações bioquímicas e, conseqüentemente, nas características organolépticas da massa do cacau.

2 | METODOLOGIA

Com base nas teorias atuais, a condução de calor em materiais ocorre basicamente por meio de dois mecanismos: migração dos elétrons livres e vibração dos átomos livres no retículo cristalino. Sendo que a taxa de transferência de calor por condução devido aos efeitos da movimentação dos elétrons é mais significativa do que com relação à vibração dos átomos livres (KREITH e BOHN, 2003). Assim, o fenômeno de transferência de calor por condução pode ser analisado apenas como a migração de energia de partículas com maior nível de energia para partículas menos energizadas (INCROPERA et al., 2008).

Assim, a partir da Equação da difusão de calor, obtida com base em conceitos interligados ao volume de controle, conservação de energia e lei de Fourier, é largamente utilizada para a obtenção de campos de temperaturas considerando este fenômeno térmico. Com isso, utilizou-se basicamente a Eq. (1), configurada para coordenadas cilíndricas, com os seguintes parâmetros (r , ϕ , z), pois esta é a geometria do sistema adotada para os 3 modelos de fermentadores.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

onde T é o campo de temperatura, q a taxa de geração de energia, ρ a massa específica, c_p é o calor específico a pressão constante e t o tempo. Além das variáveis independentes r , z e ϕ .

Inicialmente, por meio de um software CAD, efetuou-se esboços por meio de modelos 3D dos três tipos de fermentadores, sendo eles denominados Estático, Rotativo e com Hélices, no qual estão apresentados a seguir por meio das Figuras 1 e 2.

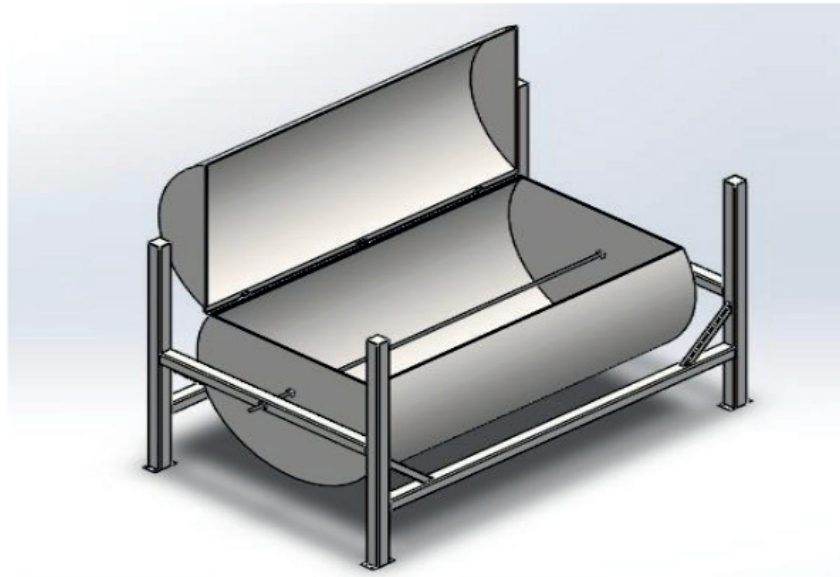


Figura 1. Vista Isométrica do Fermentador Estático e Rotativo.

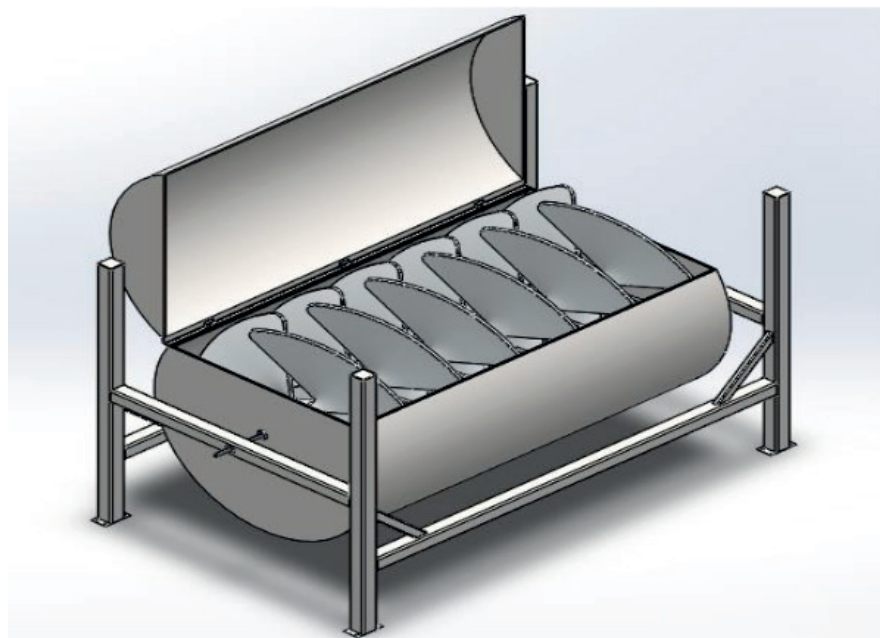


Figura 2. Vista Isométrica do Fermentador com Hélices.

Em seguida, foi desenhado a geometria de 3 modelos diferentes de fermentador, sendo criado apenas em duas dimensões e com dimensões 100 vezes menores com relação ao modelo real, assim essas adaptações têm a finalidade de otimizar o sistema, a fim de minimizar a capacidade computacional exigida pelo computador utilizado. Sendo assim, uma circunferência de raio igual à 0,6 mm, foi dividida em dois domínios iguais, domínio superior e inferior, representando 50% de massa de ar e 50% de massa de cacau, respectivamente. No domínio da massa de cacau há uma outra circunferência localizada em seu centro, com raio de 0,2 mm, que representa uma região que possui uma concentração de calor, no qual é responsável pelo aquecimento da massa de cacau no processo de fermentação, sendo denominada

fonte. O primeiro modelo chamado de Fermentador Estático (Fig. 3), aplicou-se para o caso em que a massa de cacau se encontra estática no interior do fermentador. Já o segundo modelo possui as mesmas configurações do fermentados estático, exceto por haver uma frequência rotacional de 1/1800 Hz, no sentido horário, que equivale a um revolvimento de 360° em um período de 30 minutos, desta forma, por apresentar esta característica este modelo foi denominado de Fermentador Rotativo, e por fim, o terceiro modelo, que possui uma configuração distinta, por conter centralizado no sentido do seu eixo axial um conjunto de hélices, que desta vez serão responsáveis por realizar o revolvimento da massa de cacau para a mesma frequência de rotação citada anteriormente, sendo chamado de fermentador com hélices rotativas (Fig. 4).

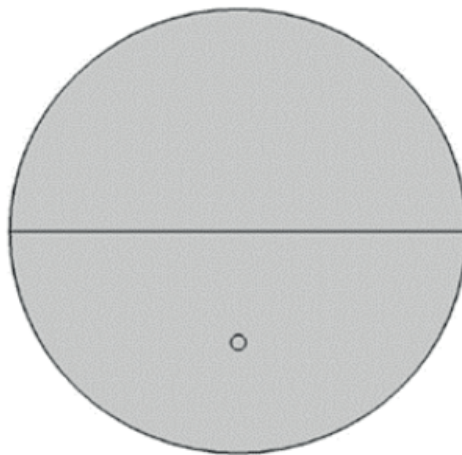


Figura 3. Modelo do Fermentador Estático e Rotativo (Próprio Autor)

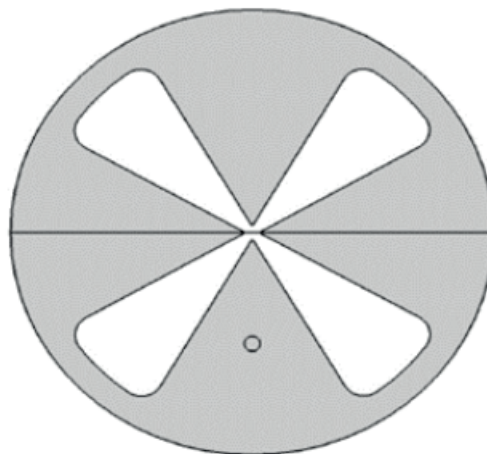


Figura 4. Modelo do Fermentador com Hélices (Próprio Autor)

Em seguida, a malha para cada modelo foi gerada, no qual o Fermentador Estático e Rotativo possui 1308 elementos com geometria triangular, possuindo 680 nós, já o fermentador com hélices possui 2381 elementos, com as mesmas geometrias, contendo 1347 nós. Cujo os modelos com a malha definida são apresentados na Fig. 5 e 6, respectivamente.

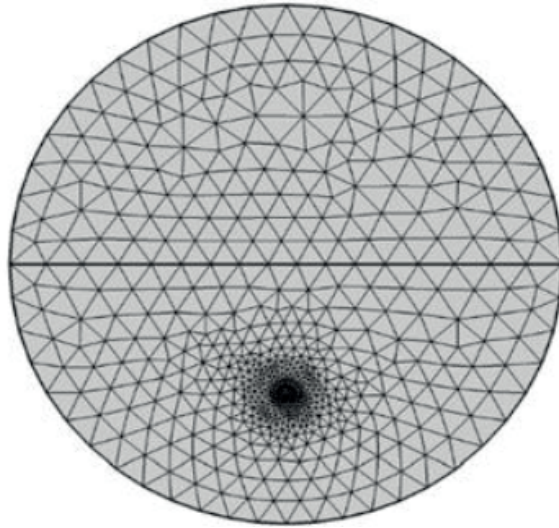


Figura 5. Malha para o Fermentador Estático e Rotativo (Próprio Autor)

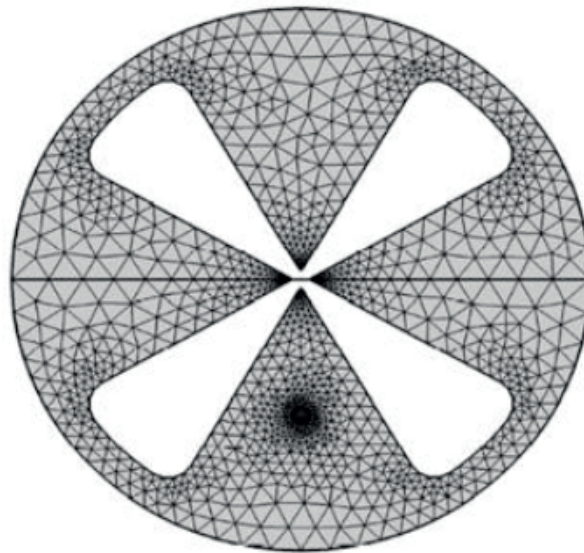


Figura 6. Malha para o Fermentador com Hélices (Próprio Autor)

Em seguida, o software CAE foi alimentado com os dados relacionados as propriedades físicas e as condições iniciais, de massa de ar e de cacau. No qual os valores estão apresentados na tabela a seguir:

Material	ρ (kg/m ³)	η (Pa.s)	k (W/m.K)	C_p (KJ/kg.K)	T (°C)	α (mm ² /s)
Ar	1,3	$18,5 \cdot 10^{-6}$	0,03	1,01	25	16
Cacau	1106,4	0,096	0,535	3,6	25	0,14

Tabela 1. Propriedades e Condições Iniciais para a massa de Ar e de Cacau (Próprio Autor)

onde ρ é a massa específica, η é a viscosidade dinâmica, k é a condutividade térmica, C_p é o calor específico a pressão constante, T é a temperatura inicial na massa de ar e de cacau e α é a difusividade térmica. Vale ressaltar que os dados

apresentados para o ar são tabelados, já os valores para o cacau foram obtidos a partir de trabalho de Sales (SALES e LIMA, 2018) e (AMIGO et al. 2017).

Para a fonte centralizada na massa de cacau foi atribuído uma temperatura inicial de 32 °C, no qual tem o intuito de representar o início do processo de fermentação, que ocorre por meio da concentração de temperatura de forma pontual em diversos locais contidos na massa de cacau. Após a definição de todos estes parâmetros e condições, a simulação foi executada, onde analisou-se a distribuição de temperatura nos 3 modelos em um período de 30 minutos.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

As configurações dos 3 modelos de fermentadores foram analisados nos seguintes tempos: 0,10 e 30 minutos. Assim, por questões de organização, os resultados para o fermentador estático, rotativo e com hélices rotativas serão apresentados em sequência.

3.1 Fermentador Estático

A Figura 7 mostra a distribuição das curvas isotérmicas no interior do fermentador, no instante inicial $t = 0$ minutos. Assim, observa-se que há uma concentração de calor localizada no centro da massa de cacau, exatamente na posição em que a fonte se encontra, que foi escolhida neste determinado local por conveniência, para os três modelos de fermentador.

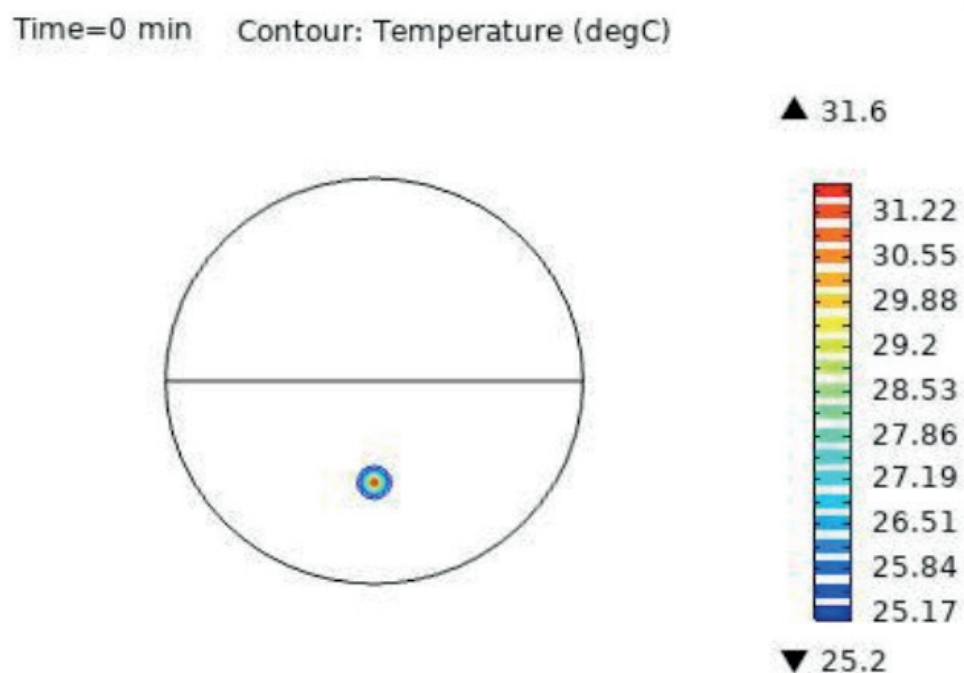


Figura 7. Fermentador Estático no instante inicial da fermentação (Próprio Autor)

Observando a Fig. 7 pode-se averiguar que o processo de transferências de

calor da fonte para o restante da massa de cacau ao seu redor está começando, assim as regiões que apresentam coloração mais próxima do vermelho estão com uma temperatura mais elevada com relação às regiões com coloração mais próximas do azul. Os valores de máximo e mínimo presentes neste instante de tempo são 31,6 °C e 25,2 °C.

A Figura 8 mostra as curvas isotérmicas de temperatura após um período de tempo de 10 minutos de fermentação. Assim, é evidente que o processo de propagação de calor da fonte para as regiões circunvizinhas não está ocorrendo de forma homogênea.

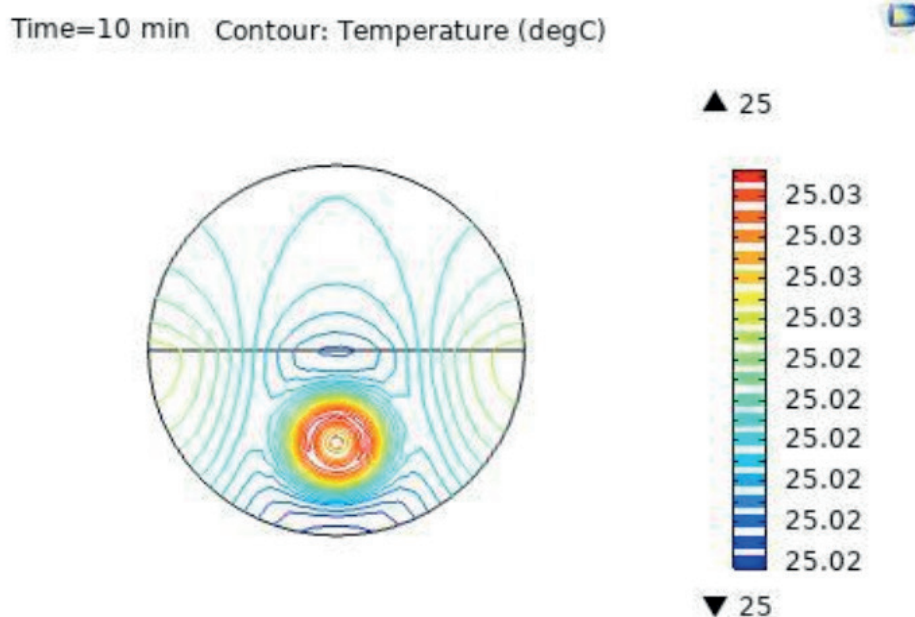


Figura 8. Fermentador Estático nos instantes de tempo de 10 min (Próprio Autor)

Assim, com base na Fig.8, observa-se que a temperatura das curvas isotérmicas abaixou consideravelmente, fato que é explicado pela diferença de massa entre a fonte e o restante da massa de cacau em que ela se encontra, com isso a diferença de temperatura entre as curvas de temperaturas mais elevadas com relação às de menores temperaturas é ínfima, variando na escala dos centésimos. Mas mesmo assim, verifica-se que o calor é transferido da fonte para as regiões circunvizinhas de forma não uniforme, ainda havendo uma concentração de calor contida na fonte.

A Figura 9 apresenta a distribuição das curvas isotérmicas no interior do fermentador, no instante inicial $t = 30$ minutos. Ainda assim, nota-se a não uniformização da distribuição de temperatura no interior do fermentados, além de observar o processo de resfriamento da fonte, que dissipou todo o calor contido nela para as outras regiões do fermentador.

Time=30 min Contour: Temperature (degC)

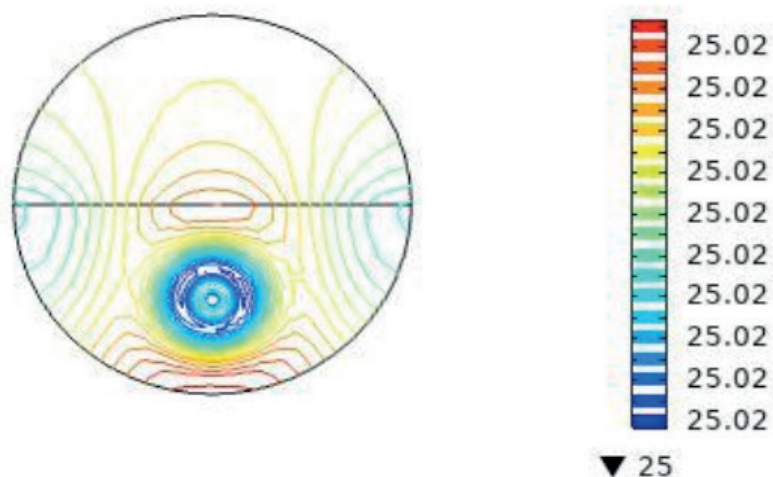


Figura 9. Fermentador Estático no instante de tempo $t = 30$ minutos (Próprio autor)

3.2 Fermentador Rotativo

A Figura 10 apresenta os resultados para a distribuição das curvas isotérmicas no interior do fermentador rotativo no instante de tempo inicial, sendo que foram adotadas as mesmas configurações do fermentador estático, com exceção da presença de uma frequência de rotação constante de 1/1800 Hz, ou seja, após 30 minutos a massa de cacau é totalmente revolvida.

Time=0 min Contour: Temperature (degC)

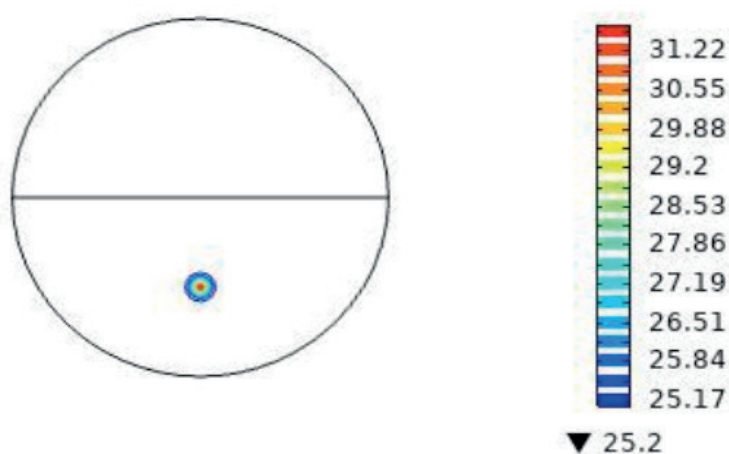


Figura 10. Fermentador Rotativo no instante de tempo $t = 0$ min (Próprio Autor)

Pode-se observar que os resultados para o fermentador rotativo são iguais aos do fermentador estático no início do processo, já que no momento inicial não há a rotação do cilindro.

Em seguida, temos a Fig. 11, que apresenta o comportamento da distribuição das curvas isotérmicas no interior do fermentador rotativo no instante de tempo $t = 10$ min.

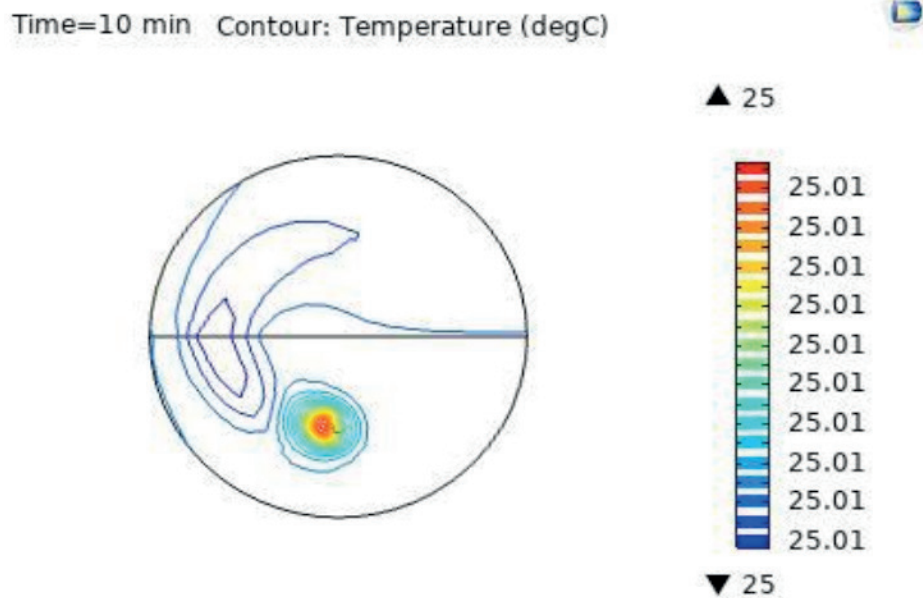


Figura 11. Fermentador Rotativo para um período de tempo de $t = 10$ min (Próprio Autor)

Neste instante de tempo, o processo de transferência de calor entre a fonte e a região circunvizinha tende para a extremidade esquerda do cilindro. Esta movimentação é favorecida pela rotação do cilindro no sentido horário, que para $t = 10$ min se encontra há um terço de completar o revolvimento (360°), ou seja, o fermentador se encontra com uma angulação de 120° com relação ao posicionamento inicial. Assim, as curvas isotérmicas estão tendendo a acompanhar a movimentação do fermentador.

Já a Fig. 12 apresenta a distribuição das curvas isotérmicas após 30 minutos do processo de fermentação, exatamente no momento em que a massa é totalmente revolvida, devido à finalização do movimento rotacional de 360° , em um período de tempo de 30 minutos.

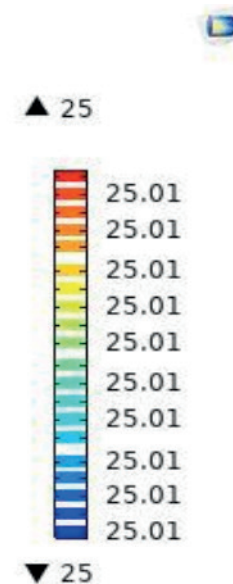


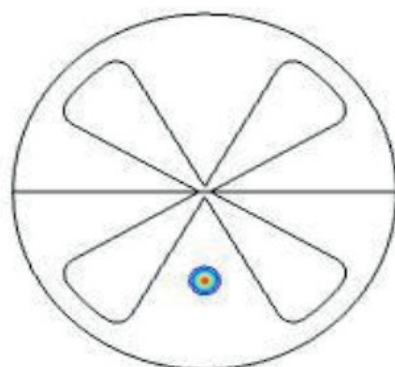
Figura 12. Fermentador Rotativo para o instante de tempo de $t = 30$ min (Próprio Autor)

No instante final do processo de revolvimento para este modelo de fermentador, pode-se analisar que ocorreu um decréscimo significativo da temperatura, devido aos processos físicos convectivos e condutivos de transferência de calor no interior do fermentador. Nota-se também que apesar das diferenças de temperaturas serem pequenas, de modo que a escala em graus Celsius a direita não consegue captar, exibindo apenas uma temperatura constante de 25,01 °C nas curvas isotérmicas, há uma distribuição de temperaturas relativamente homogênea, não apresentando regiões isoladas com temperaturas mais elevadas. Também se observa que há uma dispersão significativa no calor concentrado inicialmente na fonte, o que equivale a uma multiplicação da fonte, com isso a probabilidade de uma distribuição uniforme de temperatura aumenta significativamente, pois há mais regiões pontuais com concentrações de temperatura, favorecendo assim, a troca de calor. Implicando na obtenção de um equilíbrio térmico de forma mais rápida.

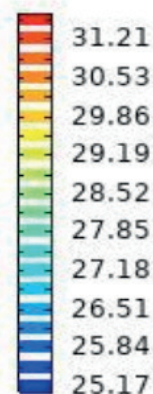
3.3 Fermentador com Hélices Rotativas

A Figura 13 contém os resultados relacionados ao comportamento da distribuição das curvas isotérmicas no interior do fermentador com hélices rotativas no início do processo fermentativo, possuindo as mesmas configurações do fermentador rotativo, exceto pela presença de 4 hélices que serão responsáveis por revolver a massa de cacau.

Time=0 min Contour: Temperature (degC)



▲ 31.5



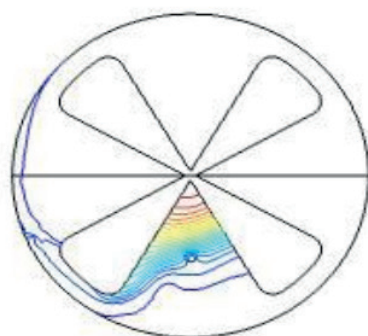
▼ 25.2

Figura 13. Fermentador com Hélices Rotativas no instante de tempo $t = 0$ min (Próprio Autor)

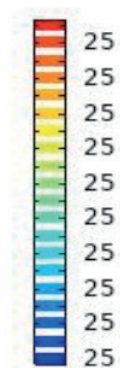
Nota-se a partir da figura acima, que o comportamento das curvas isotérmicas para o início do processo neste modelo de fermentador é semelhante aos outros dois apresentados anteriormente, já que neste instante o fermentador está estático.

Posteriormente, encontra-se a Fig. 14, que possui os resultados para a distribuição das curvas isotérmicas no interior do fermentador com hélices rotativas no instante de tempo $t = 10$ min.

Time=10 min Contour: Temperature (degC)



▲ 25



▼ 25

Figura 14. Fermentador com Hélices Rotativas em um instante de tempo $t = 10$ min (Próprio Autor)

Com base na análise da Figura exposta acima, pode-se notar que a distribuição das curvas isotérmicas tende a acompanhar o movimento de rotação no sentido horário das hélices, além de haver um declínio gradual da temperatura de acordo com a aproximação das extremidades das hélices. Vale ressaltar que a escala de

temperatura exposta a direita do modelo apresenta uma temperatura constante de $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, porém ocorre uma variação na coloração, onde o vermelho equivale as curvas mais quente e o azul as curvas mais frias. Assim, como a diferença destas temperaturas é muito pequena não se consegue expressar por meio da escala, já que o modelo foi reduzido com relação ao seu tamanho original.

A Figura 15 expõe os resultados do comportamento da distribuição das curvas isotérmicas após 30 minutos do processo de fermentação, no momento em que a massa é totalmente revolvida, devido à finalização do movimento rotacional das hélices que realizam um giro de 360° , em um de tempo de 30 minutos.

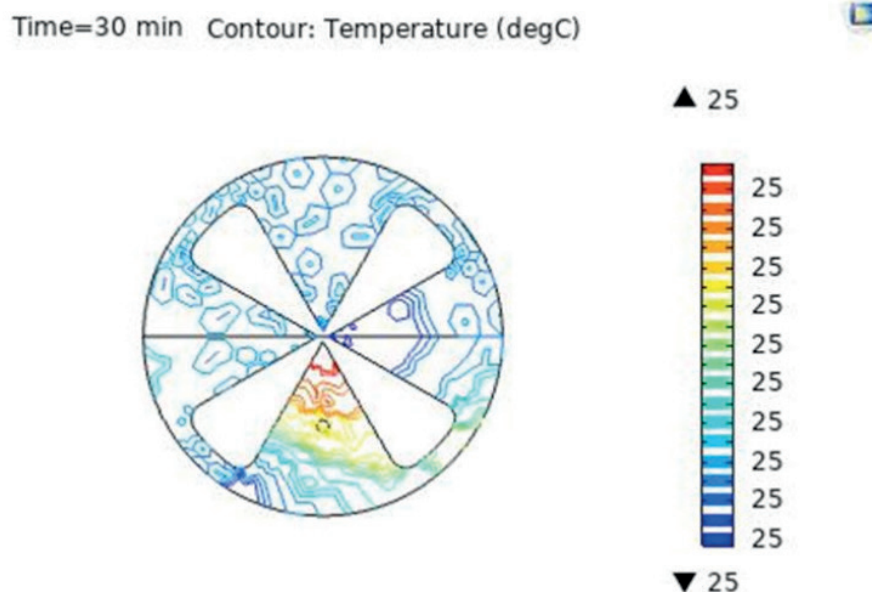


Figura 15. Fermentador com Hélices Rotativas no instante de tempo $t = 30$ min (Próprio Autor)

Analisando a Figura apresentada acima, pode-se observar que ainda há uma região de concentração de temperatura localizada entre as duas hélices inferiores, cuja a temperatura aumenta de acordo com a aproximação do centro do eixo axial das hélices. Além disso, avalia-se que ocorreu uma dissipação do calor da fonte para o restante da massa de cacau de maneira relativamente uniforme.

4 | CONCLUSÕES

A partir dos três modelos de fermentador apresentados neste artigo, evidenciou-se que o fermentador rotativo é o mais eficiente, pois a distribuição do calor concentrado na fonte ocorre de forma mais dispersa do que com relação aos outros dois tipos de fermentador analisados, assim essa dispersão implica em um aumento da probabilidade da massa de cacau atingir uma distribuição de temperatura uniforme já que ocorre uma “multiplicação” dos pontos com concentração de temperatura,

consequentemente mais regiões estarão predispostas a troca de calor e isto implicará em uma obtenção de um equilíbrio térmico de forma mais rápida. Com isso, não ocorrerá concentrações de temperatura em determinadas regiões por um tempo suficiente para que possa ocorrer uma modificação nas propriedades físicas da amêndoa, assim ao finalizar o processo fermentativo as chances de amêndoas com propriedades semelhantes aumenta drasticamente, quando comparamos com os outros dois tipos de fermentadores que não apresentam estas características na distribuição de calor em seu interior.

5 | AGRADECIMENTOS

J.H.S agradece a Fapesb-PIE0013-2016, CAPES e ao CNPq-315519/2018-5.
M.B.C.F. agradece ao CNPq- 800339/2018-5.

REFERÊNCIAS

- AMIGO, Fernanda Vargas; LIMA, Geovana Pires; SALES, Jorge Henrique; ESTIVAL, Katiannny Gomes. **Inovação Tecnológica na Secagem do Cacau: Um Estudo de Viabilidade Econômica e Barreira de Entrada**. Caderno de Prospecção, v. 10, p. 706, 2017.
- EFRAIM, P. et al. **Influência da fermentação e secagem de amêndoas de cacau no teor de compostos fenólicos e na aceitação sensorial**. Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, v.30 ,supl.1, p 142-150, 2010.
- INCROPERA, DeWitt, Berganan, Lavine; **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 2008.
- LIMA, G. P. A.; SALES, J. H.. **Sistema alternativo para secagem de cacau e geração de energia**. Revista GEINTEC: gestão, inovação e tecnologias, v. 5, p. 1703-1715, 2015.
- SALES, J. H.; CANDIDA, T.. **Efeito da Temperatura Sobre a Amêndoa de Cacau: Secador Vertical**. Revista GEINTEC, v. 6, p. 3437-3446, 2016.
- KREITH, F. BOHN, M. **Princípio de Transferência de Calor**. 6ed. São Paulo: Thomson, 2003.

SOBRE OS ORGANIZADORES

Franciele Braga Machado Tullio - Engenheira Civil (Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG/2006), Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho (Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/2009, Mestre em Ensino de Ciências e Tecnologia (Universidade Tecnológica federal do Paraná – UTFPR/2016). Trabalha como Engenheira Civil na administração pública, atuando na fiscalização e orçamento de obras públicas. Atua também como Perita Judicial em perícias de engenharia. E-mail para contato: francielebmachado@gmail.com

Lucio Mauro Braga Machado - Bacharel em Informática (Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG/1995), Licenciado em Matemática para a Educação Básica (Faculdade Educacional da Lapa – FAEL/2017), Especialista em Desenvolvimento de Aplicações utilizando Tecnologias de Orientação a Objetos (Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/ 2008). É coordenador do Curso Técnico em Informática no Colégio Sant’Ana de Ponta Grossa/PR onde atua também como professor desde 1992, também é professor na Faculdade Sant’Ana atuando na área de Metodologia Científica, Metodologia da Pesquisa e Fundamentos da Pesquisa Científica e atua como coordenador dos Sistemas de Informação e do Núcleo de Trabalho de Conclusão de Curso da instituição. E-mail para contato: machado.lucio@gmail.com

ÍNDICE REMISSIVO

A

Acidentes de trabalho 5, 6, 7, 10, 12, 13, 14, 16, 17, 25, 26

Água 33, 34, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 51, 52, 54, 58, 87, 88, 89, 91, 93, 97, 115, 116, 117, 118, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 146, 150, 156, 157, 170, 171, 173, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 209, 210, 217, 218, 222, 228, 229, 231, 236

Águas sulfúreas quentes 40

Água subterrânea 115, 123, 186, 188, 194, 197

Aquíferos 45, 47, 48, 49, 87, 88, 89, 90, 97, 99, 185, 196

Áreas de preservação permanente 155, 158

Arquitetura bioclimática 198, 209

Arquivos climáticos 198, 202, 210, 211

Avaliação de impacto ambiental 27, 28, 38, 39

B

Barragem de rejeito 226, 228

C

Cacau 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 111, 113, 114

Canais 226, 227, 228, 230, 231, 232, 233, 234, 235

Casca de arroz 167, 170, 173, 174, 182

Clandestino 55, 58

Coleta 1, 4, 7, 14, 15, 27, 29, 36, 77, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 132, 134, 135, 138, 212, 214, 215, 220, 221, 224

Contaminação 29, 58, 87, 88, 89, 90, 97, 99, 137, 185, 186, 187, 188, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 224

Contaminação por coliformes 186, 193, 195

D

Dados meteorológicos 198, 199, 202

Descaracterização 226, 227, 228, 229, 230, 235

Destinação de resíduos 61

Drenagem 48, 79, 85, 129, 226, 227, 228, 229, 230, 232

E

Ecossistema aquático 130

Enzimas lignolíticas 167

Estação de tratamento de esgotos sanitários 27, 39

Estresse hídrico 140, 150, 151

F

Farelo de cereais 167

Fermentador 101, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113

G

Gabião 226, 227, 233, 234

Geocélula 226, 230, 231, 232, 233, 235, 236

Gestão de resíduos sólidos urbanos 61, 75

I

Impactos ambientais 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 77, 78

Inspeção 55, 57, 58, 59, 88

L

Licenciamento ambiental 27, 28, 29, 30, 33, 66, 74, 76, 77, 78, 215

M

Matas ciliares 147, 155, 156

Meda 40, 41, 42, 43, 44, 54

Metais dissolvidos 129, 130, 131, 135

Método de diferenças finitas 87, 94

Minas gerais 61, 62, 63, 64, 65, 68, 69, 70, 74, 75, 76, 226

Modelagem computacional 87, 101

Monitoramento ambiental 27, 29, 36, 37, 38

Mudas 140, 142, 144, 145, 148, 149, 150, 151, 160, 164, 165

O

Origem da contaminação 186

P

Poços de captação 186

Política de resíduos sólidos 61

Previdência social 5, 6, 7, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 19, 20, 24, 25

R

Recuperação de áreas degradadas 140, 141, 142, 144, 145, 148, 152, 153, 155, 165

Resíduos de serviços de saúde 212, 213, 214, 215, 219, 223, 224, 225

Restauração ecológica 140, 142

Restauração florestal 154, 155, 159, 160, 161, 163, 164

S

Saúde do trabalhador 5, 7, 8, 9, 11, 12, 17, 21, 24, 25

Sedimentos 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 156, 226, 227, 228, 229, 236

Simulação numérica 87, 99
Sistema aquífero profundo 40
Sistema de informações geográficas 77, 155
Suíno 55, 56, 58

T

Taxa de sobrevivência 140, 151
Termas da areola 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 50, 51, 54
Territórios de desenvolvimento 61, 63, 64, 65, 66, 74
Transferência de calor 101, 103, 110, 111, 114
Tratamento 1, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 36, 38, 39, 58, 62, 75, 81, 84, 89, 125, 126, 135, 137, 143, 170, 188, 194, 197, 201, 210, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 223, 224

U

Unidade de conservação 140, 143

