

**Fabrício Moraes de Almeida**  
(Organizador)

# EXPLORANDO O UNIVERSO

**DAS CIÊNCIAS EXATAS:**

TEORIA E APLICAÇÕES

 **Atena**  
Editora  
Ano 2024

**Fabício Moraes de Almeida**  
(Organizador)

# EXPLORANDO O UNIVERSO

**DAS CIÊNCIAS EXATAS:**

TEORIA E APLICAÇÕES

  
Ano 2024

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Camila Alves de Cremo

Ellen Andressa Kubisty

Luiza Alves Batista

Nataly Evilin Gayde

Thamires Camili Gayde

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2024 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2024 Os autores

Copyright da edição © 2024 Atena

Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. 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.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial**

**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará

Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia

Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco

Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora

Profª Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas

Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas

Profª Dr Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



## Explorando o universo das ciências exatas: teoria e aplicações

**Diagramação:** Ellen Andressa Kubisty  
**Correção:** Yaiddy Paola Martinez  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizador:** Fabrício Moraes de Almeida

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
E96	<p>Explorando o universo das ciências exatas: teoria e aplicações / Organizador Fabrício Moraes de Almeida. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2024.</p> <p>Formato: PDF  Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader  Modo de acesso: World Wide Web  Inclui bibliografia  ISBN 978-65-258-2341-6  DOI: <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.416240703">https://doi.org/10.22533/at.ed.416240703</a></p> <p>1. Ciências exatas. I. Almeida, Fabrício Moraes de (Organizador). II. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD 509</p>
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166	

**Atena Editora**  
Ponta Grossa – Paraná – Brasil  
Telefone: +55 (42) 3323-5493  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

As ciências exatas, demonstram o espectro de conhecimento que desvenda os segredos do universo através da Matemática, da Física, da Química, da Computação e conexos. Um domínio onde a teoria e a prática se entrelaçam, no emaranhado que impulsiona o progresso tecnológico e industrial, por exemplo. E também tem conexão com a busca para teorizar o TODO, na medida do possível.

De forma geral, as ciências exatas podem ser a base para o desenvolvimento de novas tecnologias que transformam a forma como vivemos, trabalhamos e nos relacionamos. A internet, por exemplo, é um produto da Física, da Computação e da Telecomunicação, enquanto os smartphones são resultados da convergência de diversas áreas, como Física, Química, Engenharia e Computação.

Diante disso, o livro apresenta os conceitos teórico-práticos nos resultados obtidos pelos diversos autores e coautores no desenvolvimento de cada capítulo. Ademais, a Atena Editora oferece uma divulgação científica com qualidade e excelência, fundamental para garantir o destaque entre as melhores editoras do Brasil.

Fabício Moraes de Almeida  
Ciências Exatas, Computação e Engenharia.



**CAPÍTULO 1 ..... 1****PREVISÃO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO LÓGICA FUZZY E FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO ESTENDIDA**

Paulo de Tarso Carvalho de Oliveira

Fabrício Moraes de Almeida

Viviane Barrozo da Silva

Antonio Carlos Duarte Ricciotti

Júlio César Ribeiro

David Lopes Maciel

Geraldo de Magela Carvalho de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4162407031>**CAPÍTULO 2 ..... 16****APLICAÇÕES DO SATÉLITE ICESAT-2 PARA ESTIMATIVAS DE PROFUNDIDADE DE SUPERFÍCIE PARA A LAGOA DA CONCEIÇÃO**

Renato Ramos da Silva

Camila Rafaela Barg

Yoshiaki Sakagami


Reinaldo Haas

Wendell Rondonelli Gomes Farias

Vinícius José Dias

Natacha Pires Ramos

Gabriel Goulart Rosa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4162407032>**CAPÍTULO 3 .....28****APLICABILIDADE DE PROJETO DE CCS NA FORMAÇÃO POTI NA BACIA DO PARNAÍBA, MA, BRASIL**

Tallys Celso Mineiro

Diego Bezerra Alves

Manoela Nogueira dos Santos

Cauã Eller Martins Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4162407033>**CAPÍTULO 4 .....38****CONHECENDO A FLORESTA PETRIFICADA DE MISSÃO VELHA: UMA REVISÃO DE LITERATURA**

Luana de Jesus Felix de Sousa

Bernardo Hamuyela Luciano

Bruna Almeida de Oliveira

Yedda Maria Lobo Soares de Matos

Bruno Melo de Alcântara

Maria Aparecida Barbosa Ferreira Gonçalves


Jeovane Henrique de Souza

Dhenes Ferreira Antunes

Thiago Felix de Lima

José Weverton Almeida-Bezerra


Ademar Maia Filho  
Nathallia Correia da Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4162407034>

**CAPÍTULO 5 .....49**

**A RELAÇÃO ENTRE A REDUÇÃO DA ENERGIA CINÉTICA DOS VENTOS E O  
AQUECIMENTO DA TERRA**

Carlos Henrique Silva Dias  
Fernanda Christina Teotônio Dias Troysi  
Anna Leticia Teotônio Dias

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4162407035>

**SOBRE O ORGANIZADOR .....57**

**ÍNDICE REMISSIVO .....58**

## PREVISÃO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO LÓGICA FUZZY E FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO ESTENDIDA

---

*Data de aceite: 01/03/2024*

### **Paulo de Tarso Carvalho de Oliveira**

Professor do Departamento de  
Engenharia Elétrica - Fundação  
Universidade Federal de Rondônia  
Porto Velho – RO  
<http://lattes.cnpq.br/2255311473963948>

### **Fabício Moraes de Almeida**

Professor do Departamento de  
Engenharia Elétrica - Fundação  
Universidade Federal de Rondônia  
Porto Velho – RO  
<http://lattes.cnpq.br/5959143194142131>

### **Viviane Barrozo da Silva**

Professora do Departamento de  
Engenharia Elétrica - Fundação  
Universidade Federal de Rondônia  
Porto Velho – RO  
<http://lattes.cnpq.br/9428968456380501>

### **Antonio Carlos Duarte Ricciotti**

Professor do Departamento de  
Engenharia Elétrica - Fundação  
Universidade Federal de Rondônia  
Porto Velho – RO  
<http://lattes.cnpq.br/9613876404612535>

### **Júlio César Ribeiro**

Professor do Departamento de  
Engenharia Elétrica - Fundação  
Universidade Federal de Rondônia  
Porto Velho – RO  
<http://lattes.cnpq.br/9307581340965790>

### **David Lopes Maciel**

Doutorando PGDRA – UFRO. Porto Velho  
– RO  
<http://lattes.cnpq.br/8995688340143134>

### **Geraldo de Magela Carvalho de Oliveira**

Professor do Instituto Federal de  
Educação, Ciência e Tecnologia de  
Rondônia – IFRO  
Porto Velho – RO  
<http://lattes.cnpq.br/9808081723434805>

**RESUMO:** O capítulo de livro apresenta fundamentos do estudo da previsão de demanda correlato a séries temporais de energia elétrica, desenvolvendo um processo de otimização para o atendimento no consumo de energia elétrica, com o objetivo de aprimorar a rotina de previsão. Além disso, é apresentada uma comparação de três modelos autorregressivos utilizados para a otimização mencionada, com o modelo de lógica *fuzzy*, dimensionado por meio da função de autocorrelação estendida. Os dados de consumo de energia elétrica apresentam uma estrutura de série temporal sazonal, suscitando um recorte histórico com as características de consumo de energia elétrica do Estado de Rondônia, e neste objeto foi implementada

uma metodologia de previsão por meio de modelos já sedimentados e em comparativo a um novo modelo, apresentado em Métodos de Identificação *Fuzzy* Para os Modelos Autorregressivos Sazonais Mediante a Função de Autocorrelação Estendida. Analisa-se, então, as performances dos modelos e aplicação para previsão de demanda de energia elétrica a curto prazo, 5 (cinco) dias úteis da semana, para fins de contratação de pacotes de energia elétrica junto as concessionárias distribuidoras de energia elétrica, obedecendo a legislação vigente sobre leilões e contratos de compra. No decorrer do trabalho, foram analisados os resultados de previsão de energia elétrica, pelos modelos apresentados, o modelo proposto em Sistema *Fuzzy* relacionado a Autocorrelação Estendida, sendo o mais satisfatório confirmado por erros de previsão em relação a demanda de energia elétrica para o Estado de Rondônia, e atendendo legislação sobre previsão e demanda de energia elétrica no Brasil.

**PALAVRAS-CHAVE:** Previsão de demanda. Lógica Fuzzy. Função de Autocorrelação. Energia elétrica.

## ELECTRICITY DEMAND FORECAST USING FUZZY LOGIC AND EXTENDED AUTOCORRELATION FUNCTION

**ABSTRACT:** The study of demand forecast correlated to time series of electric energy develops an optimization process for the supply of electricity, with the objective of improving the forecasting routine. In this study, it is presented a comparison of three autoregressive models used for the mentioned optimization, with the *fuzzy* logic model, dimensioned through the extended autocorrelation function. The electric energy consumption data presents a seasonal time series structure, provoking a historical cut with the electric power consumption characteristics of the State of Rondônia, and in this object was implemented a methodology of prediction by means of already sedimented models and in comparison to a new model, presented in *Fuzzy* Identification Methods for Autoregressive Models Using the Extended Autocorrelation Function. The performance of the models and application for short-term electricity demand forecasting, 5 (five) five business days of the week, was analyzed for the purpose of contracting electric energy packages with the electricity distribution concessionaires, in compliance with the legislation current agreement on auctions and purchase agreements. In the course of the work, we analyzed the results of electric energy prediction, by the models presented, the proposed model in *Fuzzy* System related to Extended Autocorrelation, being the most satisfactory one confirmed by errors of forecast in relation to the demand of electric power for the State of Rondônia, and complying with legislation on forecasting and demand of electric energy in Brazil.

**KEYWORDS:** Demand prediction. Fuzzy Logic. Autocorrelation function. Electricity.

## INTRODUÇÃO

O trabalho sobre análise de séries temporais com predição de sinal de energia elétrica tem sua aplicação na contratação de energia elétrica para distribuição pelas empresas concessionárias de energia elétrica. O processo de contratação é definido no Plano Mensal de Operação (PMO) de cada concessionária, e deve obedecer à legislação



no contexto da faixa de contratação de energia elétrica de 100% a 103% da demanda conforme ONS/2017 (BRASIL, 2017). A lógica *fuzzy* representa esta condição de forma matemática e através de relação conhecimento profissional e modelo, as várias séries ao longo do tempo podem ter um sinal representante em séries temporais são representadas por modelos matemáticos utilizados na previsão de demanda em curto, médio e longo prazo. Neste trabalho os modelos apresentados para efeito comparativo são os Autorregressivos de Média Móvel (ARMA), o Autorregressivo Integrado de Média Móvel (ARIMA), o Sazonal Autorregressivo Integrado de Média Móvel (SARIMA) e, por fim, o modelo estudado, Fuzzy Sazonal Autorregressivo Integrado de Média Móvel (FSARIMA) definido por Função de Auto Correlação Estendida (FACE).

## A LÓGICA FUZZY

A Lógica Difusa ou Lógica *Fuzzy* é uma representação de um processo eurístico, na qual o conhecimento do especialista é utilizado para implementar melhorias e qualidade a um produto. A teoria de Conjuntos *Fuzzy* é definida como parte da fundamentação deste trabalho. A Figura 1 apresenta o sistema *fuzzy* de Mandani, definido como um processo no qual um sinal real ou *crisp* de entrada pertencente a um universo de discurso  $U$  é fuzzyficado, ocorrendo quando o número *crisp* é classificado em uma regra *fuzzy* através de um valor da função de pertinência.

Em seguida, uma máquina de inferência faz a análise das regras válidas no banco de regras *fuzzy*, gerenciando-as conforme o processo em andamento, gerando um sinal de saída *fuzzy*, o qual será defuzzyficado, apresentando, ao final, um valor *Crisp* na saída, conforme atesta (WANG, 1999). A Lógica *Fuzzy* aplicada a séries temporais e utilizadas como processo de predição através de algoritmos utilizando a função de autocorrelação estendida (Carvalho Jr.; Costa Jr., 2017). A definição de conjuntos *fuzzy* é baseado em um dimensionamento do Universo de Discurso, definido por  $U$ , e sendo este um conjunto não vazio, um subconjunto de  $U$ , que representa as regras a serem utilizadas é definido como  $A$ , uma função de pertinência  $\mu_A$ , que representa um valor no intervalo de  $U \rightarrow [0, 1]$ , como demonstrado na Equação (1), onde  $x$  é o valor da variável a ser utilizado, e a representação matemática do conjunto  $A = \{[x, \mu_A(x); x \in U]\}$ .



Figura 1 – configuração básica de um sistema Fuzzy.

Fonte: Adaptado de (WANG, 1999)

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 < x \leq 1, \text{ se } x \in A; \\ 0, \text{ se } x \notin A. \end{cases} \quad (1)$$

O processo de fuzzyficação acontece quando uma variável de entrada  $x^*$  *Crisp* sendo classificado em um conjunto *fuzzy*  $A_0$ , neste caso existe um valor de pertinência para  $x^*$ . Caso existam sinais de ruído de fundo ou erros, no processo de fuzzyficação estes sinais os quais são indesejáveis, devem estes ser suprimidos de forma eficiente no processo. A simplificação dos cálculos é um passo importante para que o esforço computacional seja o mais brando possível ao longo do processo *fuzzy*.

O fuzzyficador tipo triângulo define a relação de entrada do número *Crisp*  $x^*$  mapeado no universo de discurso  $U$  e sendo definido em uma regra  $A_0$  também relacionada a  $U$ , definindo uma função de pertinência conforme a Equação (2), onde  $b_i$  é definido como o parâmetro positivo no processo e “\*” é o operador *t – norma*, sendo utilizado como produto algébrico ou mínimo (Carvalho Jr.; Costa Jr., 2017), sendo definido o número fuzzificado.

$$\mu_{A_i}(x) = \begin{cases} \left(1 - \frac{x_1 - x_1^*}{b_1}\right) * \dots * \left(1 - \frac{x_n - x_n^*}{b_n}\right), & \text{se } |x_n - x_n^*| \leq b_i, i = 1; 2; \dots, n. \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

A descrição  $\text{supp}A$  é definida como o suporte do subconjunto  $A$ , conforme definido pela Equação (3) sendo um conjunto clássico, e sendo o processo de definição  $A$  como um subconjunto de  $U$ , e é definido por uma função de pertinência  $\mu_A(x)$  no domínio de  $U$  e como contradomínio do intervalo  $[0, 1]$ , conforme (WANG, 1999).

$$sppA = \{x \in U : \mu_A(x) > 0\} \quad (3)$$

Um conjunto *fuzzy* implementado sob uma restrição ou um limite estabelecido ao domínio, e considerando um valor  $\alpha$  que é definido como um nível a ser aplicado as regras  $A$  do conjunto *fuzzy*, com  $\alpha \in [0;1]$ , então o conjunto clássico  $A$  pode ser representado por  $[A]\alpha = \{x \in U, \mu_A \geq \alpha\}$ . Sendo  $\alpha > 0$  e definindo  $[A]0$  como fecho do suporte  $A$ , ou seja  $[A]0 = sppA$ , (BITAR et al., 2009). O  $\alpha$  nível, indica o mínimo valor da função de pertinência  $\mu_A(x)$ , e estes valores irão compor a saída do conjunto resultante *fuzzy*, conforme (CARVALHO JR., 2016).

Quando as condições de atendimento,  $[A]0 = 0$  para  $0 \leq \alpha \leq 1$ ,  $[A]\alpha$  o qual é um intervalo fechado em  $R$  para  $0 < \alpha \leq 1$  e o subconjunto *fuzzy*  $A$  ter um suporte limitado, o valor da função de pertinência  $\mu_A(x)$  será definido como um número *fuzzy*. Uns dos procedimentos mais importantes para a lógica *fuzzy* são a determinação da função de pertinência, as escolhas dos modelos que representação as funções a serem representadas, conforme o especialista, uma função triangular, trapezoidal, gaussiana etc, conforme (ZADEH, 1965). Para um modelo triangular isósceles como modelo para regra  $A$ , , definindo uma variável aleatória uma variável linguística  $Z_i$  sendo  $i = 1, 2, \dots, n$ , onde  $(n \leq T)$  e  $\mu_A(x)$  um número *fuzzy* que representa o conjunto *fuzzy* triangular representado ela variável linguística  $Z_i$ , conforme a Equação (4).

$$\mu_A(Z_i) = \begin{cases} 0, & \text{se } Z_i \leq a_j \\ \frac{Z_i - a_j}{b_j - a_j}, & \text{se } a_j < Z_i \leq b_j \\ \frac{c_j - Z_i}{c_j - b_j}, & \text{se } b_j < Z_i \leq c_j \\ 0, & \text{se } Z_i > c_j \end{cases} \quad (4)$$

Os parâmetros em sequência,  $a_j$ ,  $b_j$  e  $c_j$ , representam valores escalares indicando a posição dos vértices do triângulo isósceles e do ponto médio (valor de pertinência máxima). conforme a relação de  $Z_i$  com as regras estabelecidas têm em seu resultado o valor da função  $f(Z_i; a_j; b_j; c_j)$  definidas nas Equações (4) e (5), na qual os vértices do triângulo apresentam  $a_j < b_j < c_j$  sendo  $b_j$  o pico do triângulo conforme descrito em (LAGO NETO, 2011) .

$$f(Z_i; a_j; b_j; c_j) = \max \left[ \min \left( \frac{Z_i - a_j}{b_j - a_j}, \frac{c_j - Z_i}{c_j - b_j} \right), 0 \right] \quad (5)$$

As regras *fuzzy* que estão definidas como triangulares têm a anotação  $A = (a_j; b_j; c_j)$ , para a implementação do  $\alpha$ -nível, (BITAR et al., 2009) apresentam as regras conforme a Equação (4.6), na qual  $\alpha$  pode ser definido como demonstrado na Equação (7), a forma representativa do intervalo probabilístico ou de  $\alpha$  nível na Equação (8).

$$[A]^\alpha = [\alpha(b_j - a_j) + a_j; \alpha(c_j - b_j) + b_j] \quad (6)$$

$$\frac{[a_j]^\alpha - a_j}{b_j - a_j} = \alpha; \frac{c_j - [c_j]^\alpha}{c_j - b_j} = \alpha \quad (7)$$

$$[A]^\alpha = \{[a_j]^\alpha; [c_j]^\alpha\} = [\alpha(b_j - a_j) + a_j; \alpha(c_j - b_j) + b_j] \quad (8)$$

Além disso, a Lógica *Fuzzy* apresenta em sua álgebra conceitos como s-norma, que define as operações para união, e t-norma para operações de interseção, para a extensão do conjunto o operador complementar, conforme (WANG, 1999). A função de pertinência  $\mu_A(x)$  e seu complemento é a função de pertinência  $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$ , para a união de dois conjuntos do tipo  $A$  e  $B$  conforme a Figura 2 obtêm-se a seguinte Equação (9) e para a intersecção a Figura 3 esta relacionada a Equação (10).

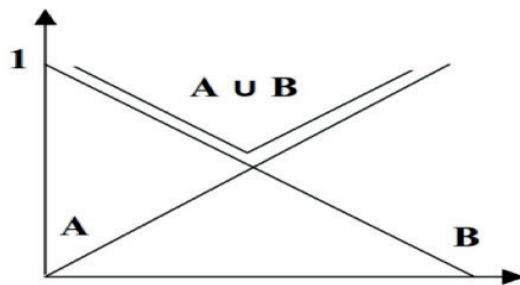


Figura 2 – Representação de União no sistema Fuzzy.

Fonte: Adaptado de (WANG, 1999).

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max [\mu_A(x); \mu_B(x)] \quad (9)$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min [\mu_A(x); \mu_B(x)] \quad (10)$$



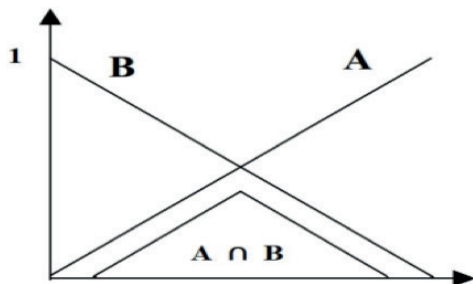


Figura 3 - Representação de Intersecção no sistema Fuzzy.

Fonte: Adaptado de (WANG, 1999)

Para cada regra  $A$  ou  $B$ , devem estar contidos valores que representam um conjunto, exemplo uma série temporal, de um universo de discurso  $U$ , relacionados a função de pertinência de cada regras, dos valores de conjunto  $X$  pertencentes a  $U$ , os valores de entrada de parte real é definida como número *Crisp*, ou conjunto *Crisp*, conforme na literatura clássica. Os conjuntos que representam os valores de entrada são definidas em intervalos de números *Crisp*. A variável linguística representa estas faixas de valores, que são rotulados para cada conjunto *fuzzy*, definidos pelos especialistas, e o valor da função de pertinência referente a cada Regra. A variável linguística tem por definição o  $(X, T, U, e M)$  na qual  $X$  representa um termo que caracteriza um fenômeno, conceito, etc. . . ,  $T$  o quanto é intenso ou pequeno com relação aos valores que  $X$  pode assumir,  $U$  descreve o universo que se enquadra o conceito de  $X$ , com valores *Crisp* de forma quantitativa tendo um valor mínimo e outro máximo, e  $M$  representa a semântica para a categoria de  $T$  dando valores linguísticos, como por exemplo “muito rápido”, “tensão baixa”, “alta potência”, relacionando  $X$  aos valores que assume em  $U$ , (WANG, 1999).

As regras  $A$ ,  $B$ , etc, que definem a Lógica *Fuzzy*, são compostas por termos como “SE” parte condicionante a uma faixa em referência, como “muito baixo”, “ângulo médio”; o termo “ENTÃO” representa o resultado do acontecimento definido, denominados de regras *fuzzy* “se - então”, conforme a Equação (11).

$$SE < \text{proposição fuzzy} > ENTÃO < \text{proposição fuzzy} >. \quad (11)$$

O processo de defuzzyficação é o mapeamento de um conjunto *fuzzy*  $B_0$  sobre o universo de discurso de saída  $V \subset R$  sendo a saída da máquina de inferência conforme a Figura 4.1, sendo que o valor de saída  $y^*$  é um número *Crisp*, e  $y^* \in V$  como apresenta (WANG, 1999), sendo o processo utilizado como defuzzyficador o Centro Médio ou centroide, conforme a Equação (2.12). O Defuzzyficador Centro Gravidade possui os critérios de plausibilidade o ponto  $y^*$  pode representar o conjunto *fuzzy*  $B_0$  do ponto de vista intuitivo, simplicidade computacional, por mais que seja um processo contínuo, a

representação é discreta em computação, não havendo problemas em continuidade com as variações pequenas no conjunto *fuzzy*  $B$  que não reflete em mudanças em  $y^*$ , abrange todos as regras *fuzzy*  $B$ , com chances baixas de erro no resultado de saída do sistema e a implementação computacional é facilitada devido à utilização de regras baseadas em triângulos como regras *fuzzy*; e muito comum sua aplicação em sistemas de controle e como contribuição neste trabalho a séries temporais de energia elétrica (CARVALHO JR., 2016). Segundo (WANG, 1999), sendo um processo computacional intuitivo e com uma entrada  $y\mu_{B0}(y)$  como uma relação do valor máximo em  $\mu_{B0}(y)$  sendo o valor da função de pertinência para a saída e como resultado o número *Crisp*  $y^*$ .

$$y^* = \int_v \frac{y\mu_{B'}(y)dy}{\mu_{B'}(y)dy} \quad (12)$$

A implementação do  $\alpha$  como corte para as regras *fuzzy*  $B0$  é devido o cálculo na qual valores muito pequeno de  $\mu_{B0}$  possam ser limitados, posto que os valores de  $y \in V$  apresentam irrelevância para o cálculo de  $y^*$ , sendo definida como uma saída defuzzificada de centro de gravidade indexada por  $\alpha$  conforme a Equação (2.13). Sendo que o universo de discurso indexado por  $\alpha$  é dado por  $V_\alpha = \{y \in V \mid \mu_{B0}(y) \geq \alpha\}$ .

$$y^* = \frac{\int_{v_\alpha} y\mu_{B'}(y)dy}{\int_{v_\alpha} \mu_{B'}(y)dy} \quad (13)$$

Para todo sistema implementado há um processo, o ponto de segurança é fundamental, para este modelo de implementação há um processo, no qual o ponto de segurança é fundamental. Para este modelo de implementação, devemos estudar o intervalo de confiança *fuzzy*, Segundo (CARVALHO JR., 2016) as variáveis aleatórias independentes apresentam suas variações mediante um intervalo aleatório  $[L(\mathbf{X}), U(\mathbf{X})]$ , onde estas variáveis são identicamente distribuídas, sob intervalos onde  $X_1, \dots, X_n$ , e representado pelo vetor  $\mathbf{X} = X_1, \dots, X_n$ ,  $L(\mathbf{X}) \geq U(\mathbf{X})$  e deve satisfazer a igualdade conforme a Equação (14), e consonante a  $\theta$  como intervalo de confiança, os valores estimados *fuzzy* são identicamente distribuídos a série real e na Figura 4.

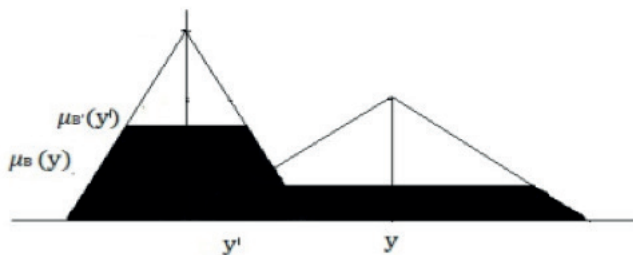


Figura 4 – Representação de uma saída no Sistema Fuzzy através do método do centro de gravidade, aplicado ao intervalo de resultante na fuzzyficação das séries temporais de Energia Elétrica do Estado de Rondônia.

Fonte: Adaptado de (WANG, 1999)

$$P_{\theta}\{L(\mathbf{X}) \geq \theta \geq U(\mathbf{X})\} = 1 - \alpha \quad (14)$$

Baseado no intervalo de confiança do sistema, em que  $Z\alpha$  representa o valor do grau de confiança onde o intervalo será indexado, o nível de significância  $\alpha$  delimita gerando um nível cortando os valores das funções de pertinência e os valores abaixo deste nível não são computados, sendo o intervalo  $[L(\mathbf{x}), U(\mathbf{x})]$ , o intervalo de confiança para a variável  $\theta = 1 - \alpha$ , onde os valores observados é definido por  $\mathbf{x}=(x_i)$ , pertencente a variável aleatória  $X_i$  onde  $i = 1, 2, \dots, n$ , e são variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas e com fuzzy  $\theta$ . A definição dos valores observados  $[x_i]L$  e  $[x_i]U$ , no qual  $h \in [0; 1]$ , por definição são sendo valores observados onde  $hX_i \tilde{L} \equiv X_i h L$  e  $hX_i \tilde{U} \equiv X_i h U$   $i = 1, 2, \dots, n$ , e são variáveis independentes e identicamente distribuídas conforme apresentado em (CARVALHO JR., 2016).

As Equações (15) e (16) representam o intervalos de confiança aproximados a (I.C) do modelo fuzzy, sendo os elementos  $shL = shU$ , que representam o desvio padrão para valores dos vértices do triângulo, e as termos  $x_i \tilde{L}$  e  $x_i \tilde{U}$ , são definidos como a média entre os valores da base inferior e superior do triângulo  $A$ , que define as regras do sistema fuzzy, com relação ao nível de significância  $\alpha = 0, 05$  e  $Z\alpha = 1, 96$  para um intervalo de confiança de 95%, valores implementados em (CARVALHO JR., 2016).

$$I.C \left( \mu_h^L; 95\% \right) = \left[ \overline{x_h^L} - Z_{\alpha} \cdot \left( \frac{s_{hL}}{\sqrt{n}} \right); \overline{x_h^L} + Z_{\alpha} \cdot \left( \frac{s_{hL}}{\sqrt{n}} \right) \right] \equiv \left[ L \left( \tilde{x}_h^L \right); U \left( \tilde{x}_h^L \right) \right]. \quad (15)$$

$$I.C \left( \mu_h^U; 95\% \right) = \left[ \overline{x_h^U} - Z_{\alpha} \cdot \left( \frac{s_{hU}}{\sqrt{n}} \right); \overline{x_h^U} + Z_{\alpha} \cdot \left( \frac{s_{hU}}{\sqrt{n}} \right) \right] \equiv \left[ L \left( \tilde{x}_h^U \right); U \left( \tilde{x}_h^U \right) \right]. \quad (16)$$

## OS MODELOS APLICADOS A SÉRIES TEMPORAIS

A série sazonal consiste em um conjunto de dados que em um período de tempo com início, meio e fim, suas características, repetem-se continuamente. A sazonalidade de um evento representa que este costuma ocorrer sempre num momento temporal específico, a aplicação as séries de energia elétrica é um exemplo quanto ao consumo de energia, apresentando um padrão que se repete de forma semelhante em um período de tempo. Quando há sazonalidade determinística,  $t$  é uma função determinística, e  $N$  é um processo estacionário, na Equação (4.44) obtêm-se o modelo sazonal determinístico com a aplicação da diferença sazonal. Quando há *lags* sazonais de múltiplos períodos, considera-se que exista uma sazonalidade estocástica, sendo este modelo dimensionado com os parâmetros  $p, d, q$  e  $P, D, Q$  conforme a Equação (4.45), com o número de períodos sazonais  $s = 12$ , SARIMA ( $p, d, q$ ) ( $P, D, Q$ )<sub>12</sub>.

Os dados observados ou minerados que definem um fenômeno físico e que produz um comportamento sazonal determinístico com período  $s=12$ , pode ser representado pela Equação (16), onde  $\mu_t$  é uma função periódica que satisfaz o comportamento de  $\mu_t = \mu_{t-12}$ , onde outra relação é dada na Equação (17).

$$Z_t = \mu_t + N_t \quad (16)$$

$$(1 - B^{12}) \mu_t = 0 \quad (17)$$

Onde  $N_t$ , sendo um processo estacionário e modelado por ARMA( $p, q$ ), apresenta-se como uma componente do sinal original, definindo a igualdade na Equação (18), sendo  $a_t$  uma função de ruído branco de média zero; porém a Equação (4.39) apresenta o ruído branco com sequência de senos e cossenos, onde constantes como  $\mu, \alpha_j, \beta_j$ , onde  $j=1,2,\dots,6$ , não são definidas ou simplesmente não se tem conhecimento de seus valores, como solução é aplicado uma diferença sazonal conforme a Equação (20), e aplicando-se a Equação (17), conforme (MORETTIN; TOLOI, 2006).

$$\phi(B)N_t = \theta(B)a_t \quad (18)$$

$$\mu_t = \mu + \sum_{j=1}^6 \left[ \alpha_j \cos\left(\frac{12\pi jt}{12}\right) + \beta_j \sin\left(\frac{12\pi jt}{12}\right) \right] \quad (19)$$

$$(1 - B^{12}) Z_t = (1 - B^{12}) \mu_t + (1 - B^{12}) N_t \quad (20)$$

Em sequência de relacionamento aplicando-se (18) em (20), obtêm-se a Equação (22), e por adequação a Equação (23), onde :

$$W_t = (1 - B^{12})Z_t \quad (21)$$

$$(1 - B^{12})Z_t = (1 - B^{12})Nt \quad (22)$$

$$\phi(B)(1 - B^{12})Z_t = \theta(B)(1 - B^{12})\alpha_t \quad (23)$$

$$\phi(B)W_t = \theta(B)(1 - B^{12})\alpha_t \quad (24)$$

A representação da série de energia elétrica de números convencionais reais (*crisp*) para um referente *fuzzy* e com saída novamente *crisp*, é a implementação do modelo de série temporal FSARIMA, (WANG, 1999).

As séries *fuzzy* são implementadas neste processo analítico, com as entradas de números *Crisp*, o qual está contido no universo de discurso  $U$ . Seus valores são definidos sob regras, fuzzyficação; nestes casos representadas por triângulos, e saída, defuzzyficação, pelo método centroide, para uma resposta *crisp*, (ZADEH, 1965). As variáveis linguísticas que definem as regras geram, na função de pertinência  $\phi Ai$ , valores definidos no intervalo  $[0,1]$ , (WANG, 1999).

De acordo com (SADAEI et al., 2014), o desenvolvimento da série temporal  $F(t, t-1) = F(t-1, t-2)$  é definida como invariante em  $t$ , caso contrário a entrada  $F(t)$  será uma série de tempo variante distorcido, sendo  $F(t-1)$  definida por  $Ai$  e  $F(t)$  por  $Aj$  sendo definido uma Relação Lógica *Fuzzy* (RLF), onde  $Ai$  relaciona  $Aj$  para  $i, j = 1, 2, 3, \dots, p$ , sendo  $p$  um subintervalo, definindo  $Ai$  o lado direito e  $Aj$  o lado esquerdo da RLF, as relações entre regras podem ser agrupamento em um grupo Difuso Lógico Ordenado (FLG), colocando todos juntos no RHS da FLG, e de acordo com (EFENDI; ISMAIL; DERIS, 2015), podem ser escrito como  $Ai \rightarrow Aj, Ai \rightarrow Ak, \dots, Ai \rightarrow Ap; i, j, k, p, \dots, n$  onde  $n \leq T$ , para todo  $T$  igual a trajetória temporal de acordo com (CARVALHO JR., 2016). A serie temporal difusa  $F(t)$ , que apresentam sazonalidade (FSARIMA) são des critos como uma relação de regras como deslocamento  $m$ , sendo  $F(t+m) \rightarrow F(t)$ , ou,  $F(t) = f(t+m)$ , sendo  $t$  um período sazonal, (TSENG; TZENG, 2002).

O valor que define o máximo valor da função de pertinência  $\mu Ai(x)$ , relacionado a regra  $Ai$ , é um subconjunto do universo de discurso  $U$ , sendo definido por  $Supp(A) = \{X \subset L : \mu Ai(x) > 0\}$ , sendo  $L$  um subconjunto difuso e  $X$  um conjunto compacto convexo, (BITAR et al., 2009).

O sistema de referência  $\alpha - cut$  é um conjunto variante no intervalo  $[0, 1]$  onde  $\alpha$  representa o nível de referência para as regras  $[A] = \{x \in L : \mu A(x) \geq \alpha\}$ , sendo  $\alpha > 0$ , e  $[A]0$  o encerramento do valor  $Supp(A)$ , (WANG, 1999).

A implementação da Função de Autocorrelação Estendida Fuzzy (AECF) com  $\alpha$  como conjunto de corte, é aplicado a função sazonal  $W_{i,p,q} \alpha\text{-cut}$ , sendo  $i$  o grau do integrador,  $p$  do regressivo e  $q$  da média móvel, (CARVALHO JR., 2016). A ativação dos conjuntos contidos no universo de discurso  $L$ , serão relacionados a cada intervalo fuzzy, sendo os valores desta função os elementos da série temporal fuzzy com  $\alpha\text{-cut}$  gerados pela a série original  $Z(t)$ , onde  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq i \leq T$ , sendo  $m$  e  $T$  valores finais de cada regra fuzzy na Equação (4.61), onde  $p = 0, 1, 2, \dots$ ,  $q = 0, 1, 2, \dots$ ,  $h = 0, 1, 2, \dots$ ,  $r = 0, 1, 2, \dots$ , para  $\phi ap\text{-cut}(\alpha, b)$  indica o operador com corte em especificado em  $\alpha$ , (CARVALHO JR., 2016).

$$\begin{aligned} W_{i,p,q}^{\alpha\text{-cut}}(h, \alpha, b) &= Z_1^{\alpha\text{-cut}}(\alpha, b) - \dots \\ &\phi_1^{\alpha\text{-cut}}(\alpha, b) Z_{i-1}^{\alpha\text{-cut}}(\alpha, b) - \dots \\ &\phi_p^{\alpha\text{-cut}}(\alpha, b) Z_{i-p}^{\alpha\text{-cut}}(\alpha, b) - \dots \end{aligned} \quad (25)$$

## A FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO ESTENDIDA.

A função de autocorrelação estendida (face) foi proposta por (TSAY; TIAO, 1984) para definir de forma única os valores de  $p$  e  $q$  para dimensionamento do modelo ARMA( $p, q$ ) estacionário ou não. Conforme (MORETTIN; TOLOI, 2006), as funções de autocorrelação e autocorrelação parcial não são bons mecanismos para uma determinação precisa e com eficiência para definir os mesmos parâmetros  $p$  e  $q$ ; em (CARVALHO JR., 2016) ela é utilizada para definir  $p$  e  $q$  em um sistema FSARIMA ( $p, d, q$ )( $P, D, Q$ )<sup>12</sup>. Para a Equação (26) esta define como modelo ARMA estacionário para ser dimensionado pela face.

$$\begin{aligned} \rho_j &= \phi_1 \rho_{j-1} + \dots + \phi_k \rho_{j-k} + \\ &+ \gamma_{za}(j) - \dots - \theta_1 \gamma_{za}(j-1) \end{aligned} \quad (26)$$

Como o índice  $j$  do processo  $pj$  é definido como  $j \geq 2$ , é definida uma matriz que determina os coeficientes  $\phi_j(1)$ ,  $\phi_j(2)$ ,  $\phi_j(3)$  como no exemplo para 3 coeficientes da Equação (27).

$$\begin{vmatrix} \rho_j & \rho_{j-1} & \rho_{j-2} \\ \rho_{j+1} & \rho_j & \rho_{j-1} \\ \rho_{j+2} & \rho_{j+1} & \rho_j \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \phi_1^{(j)} \\ \phi_2^{(j)} \\ \phi_3^{(j)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \rho_{j+1} \\ \rho_{j+2} \\ \rho_{j+3} \end{vmatrix} \quad (27)$$

Define-se que para em qualquer posição de  $j$  na Equação (28), modelo sazonal, onde este deve ser maior ou igual ao regresso que possa zerar seu índice na Equação matricial conforme em a Equação (4.65), (CRYER; CHAN, 2008).

$$W_{k,t}^{(j)} = (1 - \phi_1^{(j)}B - \dots - \phi_k^{(j)}B^k)Z_t \quad (28)$$

A Equação é redefinida para a Equação (29),

$$G_{(k)}^j \phi_{(k)}^{(j)} = P_{(k)}^j \quad (29)$$

Sendo definido  $G_j, (k), P(jk)$  na forma de matriz e os coeficientes  $\phi(jk)$  devem ser transpostos conforme a Equação (29), o número de elementos  $\rho_{k,j}$ , na Equação (30), é definida como a função de autocorrelação estendida.

$$\rho_{k,j} = \frac{\phi_{(k)}^{*(j)} G_{(k+1)}^j \phi_{(k)}^{*(j)}}{\phi_{(k)}^{*(j)} G_{(k+1)}^j \phi_{(k)}^{*(j)}} \quad (30)$$

Primeira análise, em 12,  $k = p$ , o processo  $W_{k,t}(j)$ , é um processo de média móvel MA ( $q$ ).

$$\rho_{k,t} = \begin{cases} -\theta_q (1 + \theta_1^2 + \dots + \theta_q^2)^{-1} & , j = q \\ 0 & , j > p \end{cases} \quad (31)$$

Quando  $k \geq p$ , é um processo estacionário ARMA ( $p, q$ ), demonstrados nas Equações (31) e (32), (CRYER; CHAN, 2008).

$$\rho_{k,t} = \begin{cases} c & , j = q + k - p \\ 0 & , j > q + k - p \end{cases} \quad (32)$$

Onde  $-1 < c < 1$ .

Para identificação de  $p$  e  $q$  no resultado gráfico do FACE é definido como a primeira sequência de zeros horizontal sem quebra de sequência e a diagonal em sequência de zeros sem interrupção, quando identificado o primeiro zero define  $p_0$  e  $q_0$  definindo estes valores conforme Tabela 1, conforme definida por (CRYER; CHAN, 2008).

p	q							
	0	1	2	...	$q_0-1$	$q_0$	$q_0+1$	$q_0+2$ ...
0	x	x	x	...	x	x	x	x ...
1	x	x	x	...	x	x	x	x ...
2	x	x	x	...	x	x	x	x ...
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$p_0$	x	x	x	...	x	0	0	0 ...
$p_0+1$	x	x	x	...	x	x	0	0 ...
$p_0+2$	x	x	x	...	x	x	x	0 ...
$p_0+3$	x	x	x	...	x	x	x	x ...
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$ ...

Tabela 1 – Função de Autocorrelação Estendida simplificada, para dimensionamento do preditor de uma série temporal Fuzzy de energia elétrica aplicada a demanda no Estado de Rondônia.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Portanto, para os dados de consumo de energia elétrica apresentam uma estrutura de série temporal sazonal, suscitando um recorte histórico com as características de consumo de energia elétrica do Estado de Rondônia, e neste objeto foi implementada uma metodologia de previsão por meio de modelos já sedimentados e em comparativo a um novo modelo, apresentado em Métodos de Identificação Fuzzy Para os Modelos Autorregressivos Sazonais Mediante a Função de Autocorrelação Estendida.

Dessa foma, é possível uma análise das performances dos modelos e aplicação para previsão de demanda de energia elétrica a curto prazo, 5 (cinco) dias úteis da semana, para fins de contratação de pacotes de energia elétrica junto as concessionárias distribuidoras de energia elétrica, obedecendo a legislação vigente sobre leilões e contratos de compra. No decorrer do trabalho, foram analisados os resultados de previsão de energia elétrica, pelos modelos apresentados, o modelo proposto em Sistema Fuzzy relacionado a Autocorrelação Estendida, sendo o mais satisfatório confirmado por erros de previsão em relação a demanda de energia elétrica para o Estado de Rondônia, além disso, atende a legislação sobre previsão e demanda de energia elétrica no Brasil, podendo ser aplicado em outros tipos de demandas.



## REFERÊNCIAS

BITAR, S. D. et al. Expansion of isolated electrical systems in the amazon: An approach using fuzzy multi-objective mathematical programming. **Energy Policy**, Elsevier, v. 37, n. 10, p. 3899–3905, 2009.

BRASIL. **Acesso ao site em 16 de junho de 2017**. 2017. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/integracao\\_sin/acesso\\_conexao\\_rede.aspx](http://www.ons.org.br/integracao_sin/acesso_conexao_rede.aspx)>.

CARVALHO JR., J. **Métodos de identificação fuzzy para modelos autoregressivos sazonais mediante a função de autocorrelação estendida**. Tese (Doutorado)— UFPA - Universidade Federal do Pará, 2016.

Carvalho Jr., J.; Costa Jr., C. Identification method for fuzzy forecasting models of time series. **Applied Soft Computing**, Elsevier, v. 50, p. 166–182, 2017.

CRYER, J. D.; CHAN, K. S. **Time Series Analysis, With Applications in R**. [S.I.]: Springer, 2008.

LAGO NETO, J. C. **Modelo de Previsão Fuzzy: Uma Alternativa Metodológica Para Sistemas Eletricamente Isolados na Amazônia**. Tese (Doutorado), 2011.

MORETTIN, P.; TOLOI, C. **Análise de Séries Temporais**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

WANG, L.-X. **A course in fuzzy systems**. [S.I.]: Prentice-Hall press, USA, 1999.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and control**, Elsevier, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.

# APLICAÇÕES DO SATÉLITE ICESAT-2 PARA ESTIMATIVAS DE PROFUNDIDADE DE SUPERFÍCIE PARA A LAGOA DA CONCEIÇÃO

---

*Data de submissão: 10/01/2024*

*Data de aceite: 01/03/2024*

### **Renato Ramos da Silva**

Universidade Federal de Santa Catarina  
(UFSC), Departamento de Física  
Florianópolis – SC  
<http://lattes.cnpq.br/9733821952821123>  
<https://orcid.org/0000-0002-3714-0870>

### **Camila Rafaela Barg**

Universidade Federal de Santa Catarina  
(UFSC), Departamento de Física  
Florianópolis – SC  
<http://lattes.cnpq.br/2330224914444497>

### **Yoshiaki Sakagami**

Instituto Federal de Santa Catarina  
(UFSC), Florianópolis – SC  
<http://lattes.cnpq.br/0110697228360120>

### **Reinaldo Haas**

Universidade Federal de Santa Catarina  
(UFSC), Departamento de Física  
Florianópolis – SC  
<http://lattes.cnpq.br/0514296503573709>

### **Wendell Rondinelli Gomes Farias**

Universidade Federal de Santa Catarina  
(UFSC), Departamento de Física  
Florianópolis – SC  
<http://lattes.cnpq.br/6987580244748088>

### **Vinícius José Dias**

Universidade Federal de Santa Catarina  
(UFSC), Departamento de Física  
Florianópolis – SC  
<http://lattes.cnpq.br/8996461911902151>

### **Natacha Pires Ramos**

Universidade Federal de Santa Catarina  
(UFSC), Departamento de Física  
Florianópolis – SC  
<http://lattes.cnpq.br/2877857558976701>

### **Gabriel Goulart Rosa**

Universidade Federal de Santa Catarina  
(UFSC), Departamento de Física  
Florianópolis – SC  
<http://lattes.cnpq.br/9291758676797054>

**RESUMO:** O satélite ICESAT-2 possui um sistema altimétrico que permite estimativas de superfícies. Este sistema possui um LIDAR na banda de 532 nanômetros que permite estimar altura de superfícies como icebergs, vegetação e também altura de superfícies aquáticas. Enquanto fótons emitidos com baixa energia permitem estimativas da altura de uma superfície aquática, fótons de maior energia permitem estimativas da batimetria destas superfícies. Dados do ICESAT-2 foram aplicados à região da Lagoa da Conceição, localizada na Ilha de Santa Catarina. Os resultados mostraram que estes dados permitem estimar estas alturas de superfície e batimetria para os dias particulares onde o

satélite teve sua órbita sobre a região de estudo. Em particular, permitiu avaliar as regiões de maior e menor profundidades da lagoa. Os resultados mostraram que esta ferramenta pode ser uma importante opção para monitoramento da lagoa e suas possíveis mudanças em função de eventos meteorológicos extremos e tendências.

**PALAVRAS-CHAVE:** ICESAT-2; Batimetria; Lagoa da Conceição

## APPLICATIONS OF THE ICESAT-2 SATELLITE FOR ESTIMATES OF SURFACE DEPTH FOR LAGOA DA CONCEIÇÃO

**ABSTRACT:** The ICESAT-2 satellite has an altimetric system that allows surface estimations. This system has a LIDAR in the 532 nanometer band that allows estimating the height of surfaces such as icebergs, vegetation and also the height of water surfaces. While photons emitted with low energy allow estimates of the height of a water surface, higher energy photons allow estimates of the bathymetry of these surfaces. In this study, the ICESAT-2 data were applied to the Lagoa da Conceição region, located on Santa Catarina Island. The results showed that these data allow estimating these surface heights and bathymetry for the particular days where the satellite had its orbit over the study region. In particular, it allowed the evaluation of regions having deeper and lower levels of the lagoon. The results show that this tool can be an important option for monitoring the lagoon and its possible changes due to extreme meteorological events and trends.

**KEYWORDS:** ICESAT-2; Bathymetry; Lagoa da Conceição.

## INTRODUÇÃO

A Lagoa da Conceição é uma lagoa tropical que está localizada na Ilha de Santa Catarina a leste do continente sul americano. A lagoa possui uma área aproximada de 24 km<sup>2</sup> e um volume estimado de 66,6 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (AEROCONSULT, 2000). A lagoa possui um canal de ligação com o Oceano Atlântico que permite trocas de águas entre os dois sistemas.

Medidas de batimetria da Lagoa da Conceição têm sido feitas no passado (Rudorff et al., 2005) e sua profundidade média estimada é de aproximadamente 1,7m a 8,9m (Godoy & Franco, 2007). No entanto, devido ao aporte constante de sedimentos, sua profundidade pode ser alterada periodicamente (Barbosa & José, 1998).

A região costeira do sul do Brasil é constantemente afetada por marés de tempestade e marés meteorológicas (Melo Filho, 2017). A maré de tempestade pode ser definida como a provocada por ventos perpendiculares à costa que empilham as águas na interface com o continente (*storm surges*). Por outro lado, marés meteorológicas são variações do nível da água do oceano sobre a plataforma continental causadas por fenômenos meteorológicos. Estes fenômenos podem induzir tensões na superfície associadas à pressão atmosférica e ventos ao nível do mar que provocam variações no nível da água oceânica.

Estudos recentes mostram que a interação do nível da água da lagoa com a do Oceano Atlântico funciona como um filtro de alta frequência, onde a maré astronômica

é filtrada pelo canal de ligação (Godoy et al., 2008; Bier, 2018). Portanto, estes estudos mostram que a maré meteorológica tem importante impacto na variabilidade da superfície da lagoa. Como as projeções climáticas apontam para uma maior frequência e intensidade dos fenômenos meteorológicos extremos (IPCC, 2021), torna-se de grande importância entender os mecanismos de interação e impacto dos fenômenos atmosféricos.

O novo satélite Ice, Cloud and land Elevation Satellite-2 (ICESAT-2) colocado em órbita no final do ano de 2018, tem sido usado em várias análises, inclusive de altura de superfície e batimetria de lagos (Jasinski et al., 2024; Parrish et al., 2019; Markus et al., 2017). Este satélite possui um laser a bordo que permite avaliar a altura de superfícies, como relevo, prédios, vegetação, e superfícies aquáticas. O satélite estima estas alturas a partir do tempo de ida e retorno dos fótons emitidos por seu laser. Além de superfície de águas continentais como lagos e rios, os dados do sensor permitem também estimativas de nível da água e da batimetria de águas oceânicas costeiras (Xu et al., 2022). Portanto, este sensor pode ser usado como uma importante ferramenta para monitoramento de níveis de superfícies aquáticas, como é o caso da Lagoa da Conceição.

Este estudo teve como objetivo aplicar estas novas técnicas de análise por sensoriamento remoto para estimar a profundidade da superfície da água e da batimetria da Lagoa da Conceição por uso de dados do satélite ICESAT-2.

## **METODOLOGIA**

### **Área de estudo**

A área geográfica abrangida por esse estudo consiste na região sobre a Lagoa da Conceição, localizada na região leste da Ilha de Santa Catarina do município de Florianópolis (Figura 01).

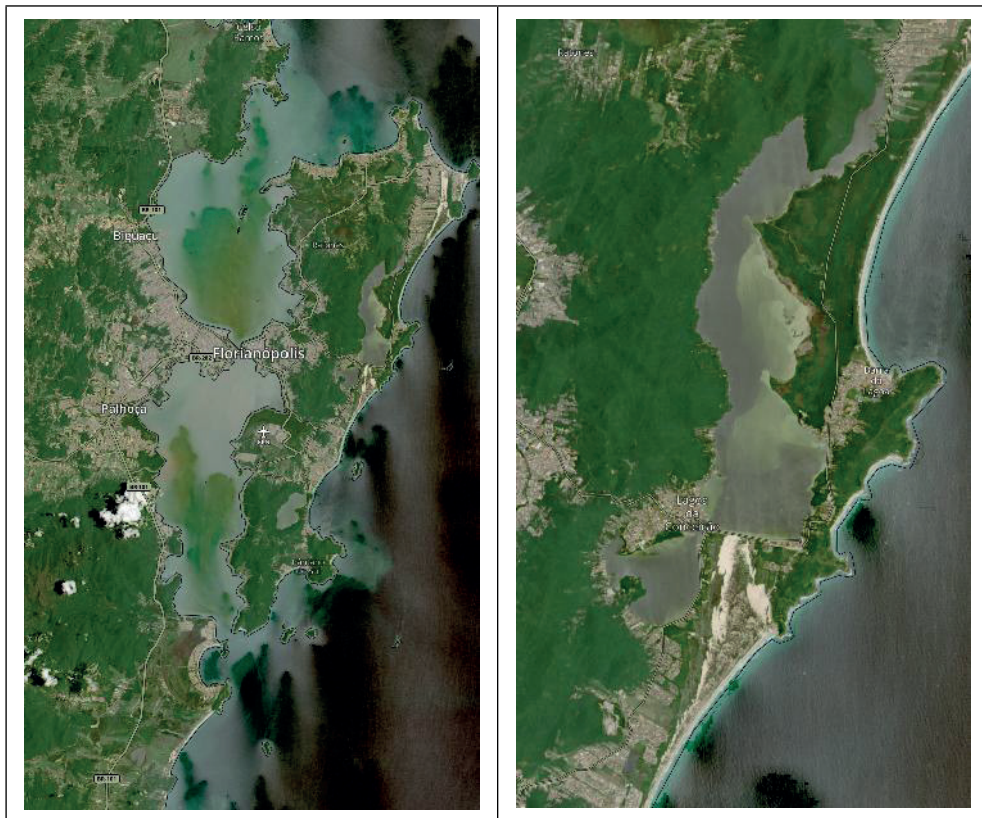


Figura 01 - Região de estudo, Ilha de Santa Catarina, Florianópolis e Lagoa da Conceição. Fonte: NASA, worldview, satélite sentinel-2.

## Satélite IceSat-2

O satélite ICESat-2 possui um lidar a bordo que envia fótons para a superfície da Terra e assim estima as alturas da superfície a partir do tempo de viagem desses fótons de volta ao seu receptor (Newmann et al., 2019). Em suas aplicações, o satélite estima altura de superfícies como de relevo, vegetação florestal, gelo, ondas oceânicas, nuvens, camadas de aerossóis e superfícies aquáticas (Neuenschwander et al., 2020; Ramos-da-Silva et al., 2017). Além de superfície de águas continentais como lagos e rios, os dados do sensor permitem também estimativas de nível da água e da batimetria de águas oceânicas costeiras (Xu et al., 2022).

O satélite ICESAT-2 possui uma órbita polar a 500 km de altura. Os dados de altura da superfície e batimetria são obtidos através do sensor ATLAS (*Advanced Topographic Laser Altimeter System*) a bordo do satélite. Este sistema de altímetro a laser usa um lidar na banda de 532 nm para medir o tempo de voo dos fótons e, portanto, a altura da superfície amostrada por seus seis feixes de laser (Neumann et al., 2019). Seus feixes de

fótons emitidos estão distantes 30 m dos três pares, que por sua vez estão espaçados de 3 km (Fig. 2). O laser envia cerca de 20 trilhões de fótons por pulso e apenas cerca de uma dúzia retorna ao seu telescópio. Estimativas da altura podem ser obtidas comparando o dado com o elipsóide WGS84 (Neuenschwander et al., 2020).

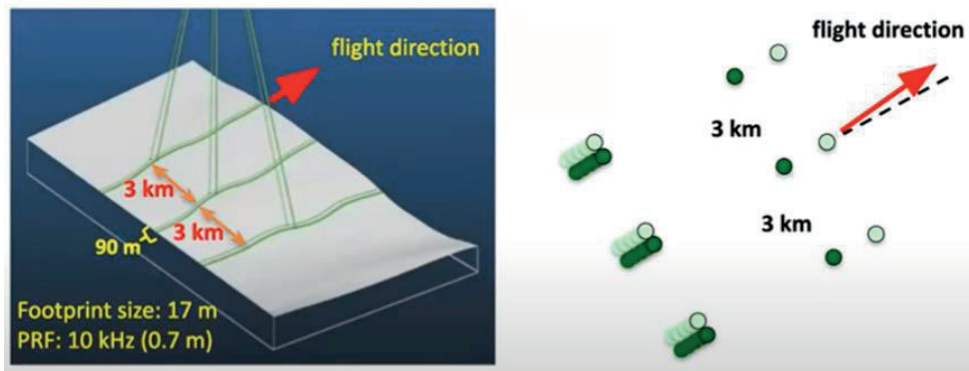


Figura 02 - Características dos feixes de fótons do satélite IceSat-2. Três pares de feixes são emitidos que possuem distância aproximada de 3 km. Fonte: NASA.

## Dados ICESAT-2

Dados do satélite ICESAT-2 foram usados para estimar a profundidade do nível da água e da batimetria da Lagoa da Conceição. As passagens deste satélite de órbita polar pela região da lagoa ocorrem aproximadamente a cada 16 dias permitindo assim estimativas periódicas das alturas de superfície e batimetria. Os dados disponíveis foram usados para avaliar a variabilidade destas alturas. Estes dados de satélite são de livre acesso e podem ser obtidos do portal da NASA ou em <https://nsidc.org/data/>.

O portal da NASA <https://openaltimetry.earthdatacloud.nasa.gov/data/icesat2/> foi usado para acessar os dados e verificar a possível passagem sobre a região da Lagoa da Conceição. A Figura 03 apresenta um exemplo de estimativa da passagem do satélite com uso deste portal.

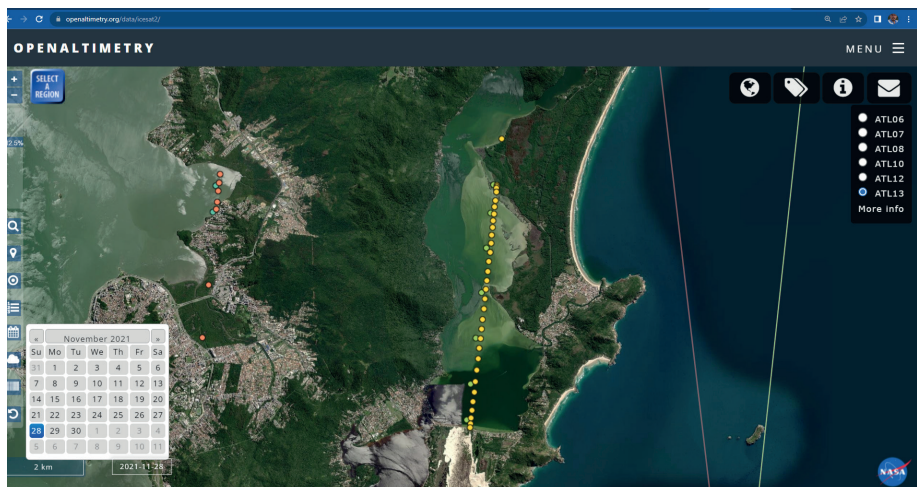


Figura 03 - Exemplo de análise do portal openaltimetry para download dos dados de altura da superfície com foco na Lagoa da Conceição. Fonte: NASA.

A Tabela 01 apresenta as datas em que o satélite sobrevoou a região da superfície da Lagoa da Conceição. Estas datas correspondem apenas aos dias em que foi possível estimativas pelo satélite, pois em caso de cobertura de nuvens fica impossível aos fótons chegarem até a superfície.

Data - passagem ICESAT-2			
17/01/2019	15/04/2020	13/07/2021	11/01/2022
18/04/2019	14/10/2020	28/11/2021	

Tabela 01 - Datas de passagem do satélite ICESAT-2 sobre a região da Lagoa da Conceição.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados resultados de estimativas de altimetria da superfície da Lagoa da Conceição para vários casos em que houve a passagem do satélite.

### Altura de superfície e batimetria

Inicialmente, após a pré-seleção dos casos através do portal *openaltimetry* foram feitas análises de algumas regiões sobre a Lagoa da Conceição. São apresentados vários casos baseados na Tabela 01. As figuras 4 a 11 apresentam os locais de passagem do satélite e estimativas amostradas nas regiões destacadas. Os resultados mostram que o satélite permite estimar as alturas superficiais da lagoa quando comparados com o elipsóide de referência. As várias regiões amostradas apresentam grande diversidade de alturas. Em várias ocasiões é possível também verificar a profundidade da batimetria da região.



Na passagem do dia 17/01/2019, que ocorreu mais próximo da interface a leste da lagoa, é possível notar alturas de profundidade da ordem de 1 metro (Fig. 4). Esta profundidade é mais rasa nestes locais. No entanto, nas passagens que ocorreram mais no centro da lagoa (e.g. dias 18/04/2019, 15/04/2020, 13/07/2021), as profundidades são da ordem de 2 metros (Figs. 5, 6, 8). Na passagem do dia 28/11/2021 é possível notar a transição das regiões de águas mais profundas para as mais rasas (Fig. 9).

Na passagem do dia 11/01/2022 não foi possível avaliar a batimetria (Fig. 10). No entanto, uma amostragem para a região oceânica próxima mostra importantes aspectos da natureza ondulatória da superfície (Fig. 11). Este tipo de avaliação marítima pode ser importante, pois variações do nível oceânico próximo, pode afetar os fluxos de água entre a lagoa e o oceano.

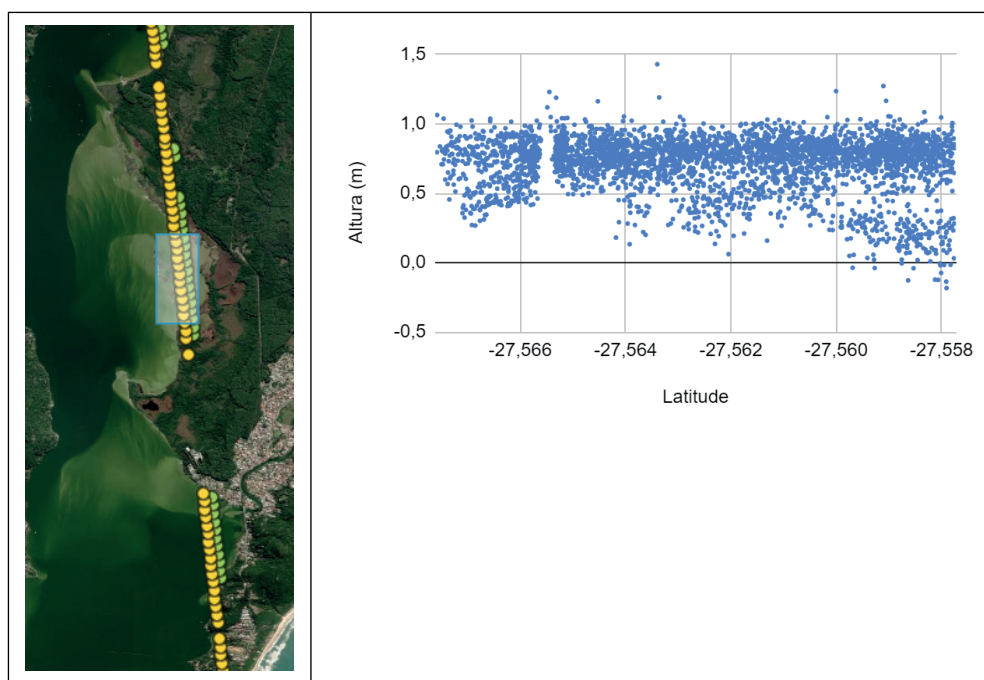


Figura 4 - Local de passagem do satélite ICESAT-2 e profundidades estimadas para o dia 17/01/2019.



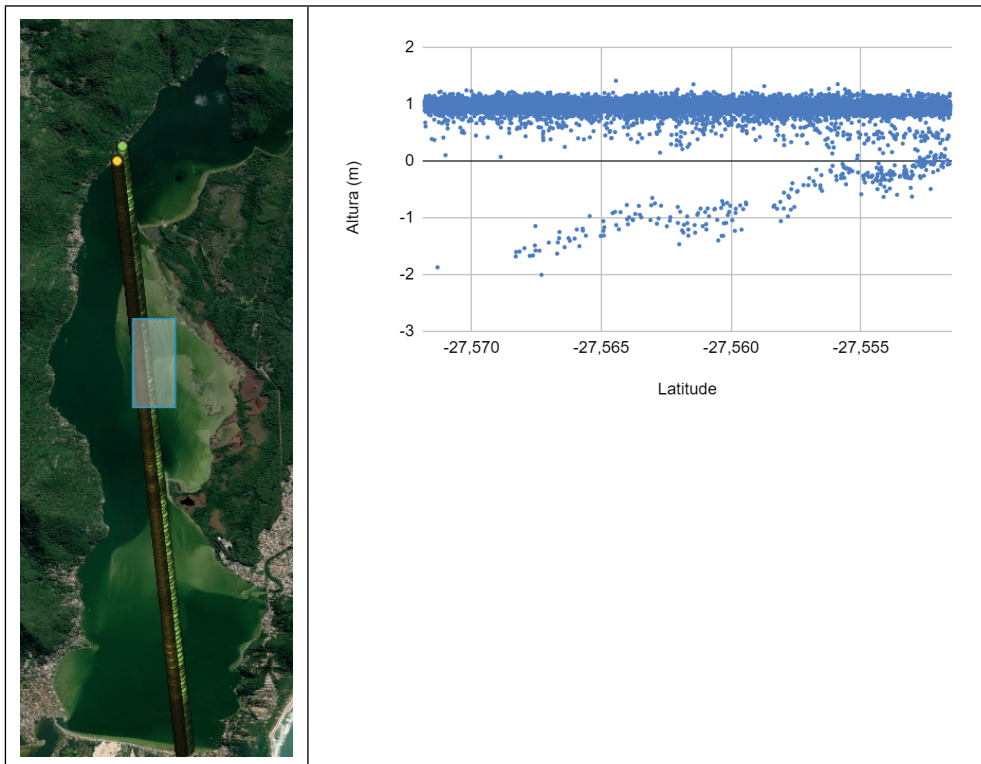


Figura 5 - Local de passagem do satélite ICESAT-2 e profundidades estimadas para o dia 18/04/2019.

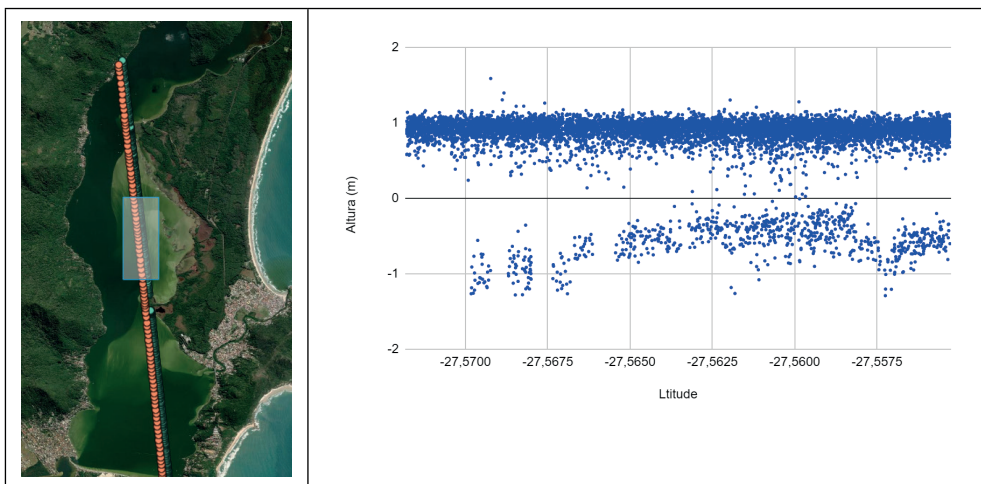


Figura 6 - Local de passagem do satélite ICESAT-2 e profundidades estimadas para o dia 15/04/2020.

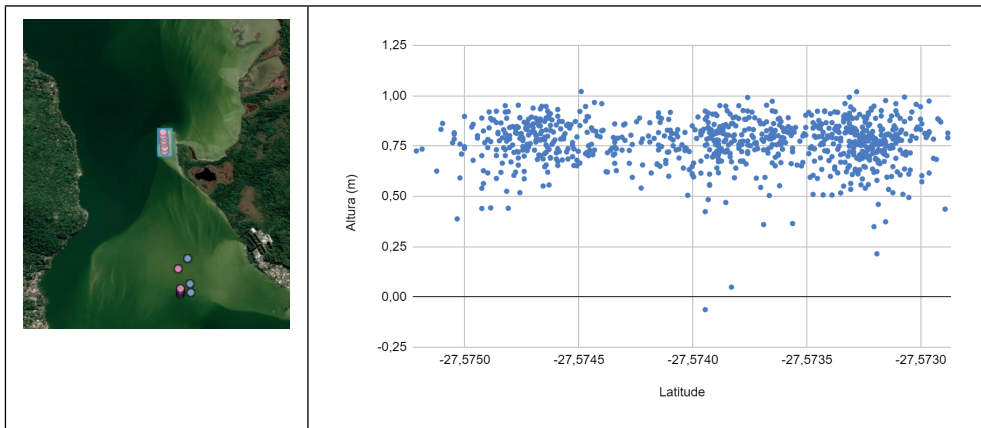


Figura 7 - Local de passagem do satélite ICESAT-2 e profundidades estimadas para o dia 14/10/2020.

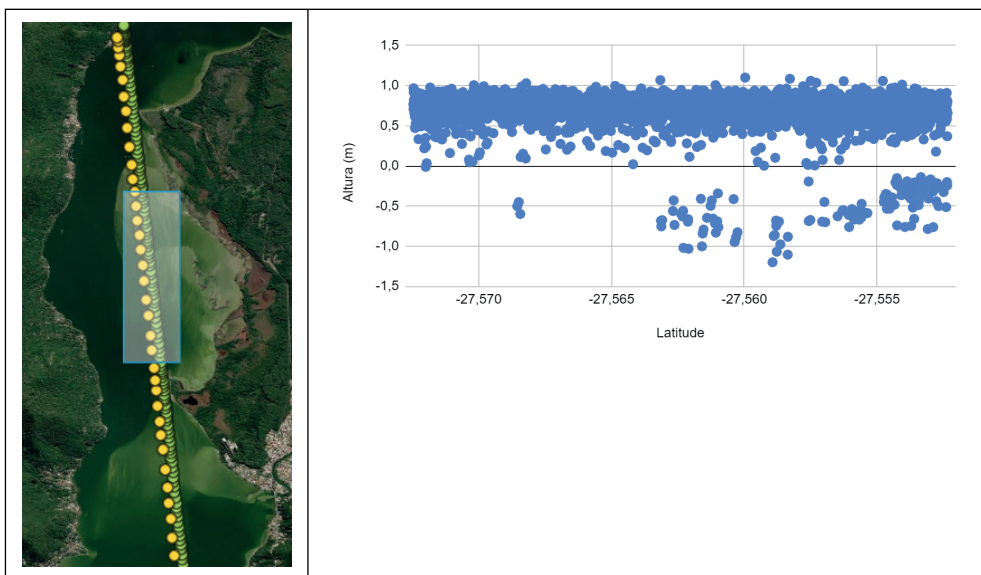


Figura 8 - Local de passagem do satélite ICESAT-2 e profundidades estimadas para o dia 13/07/2021.

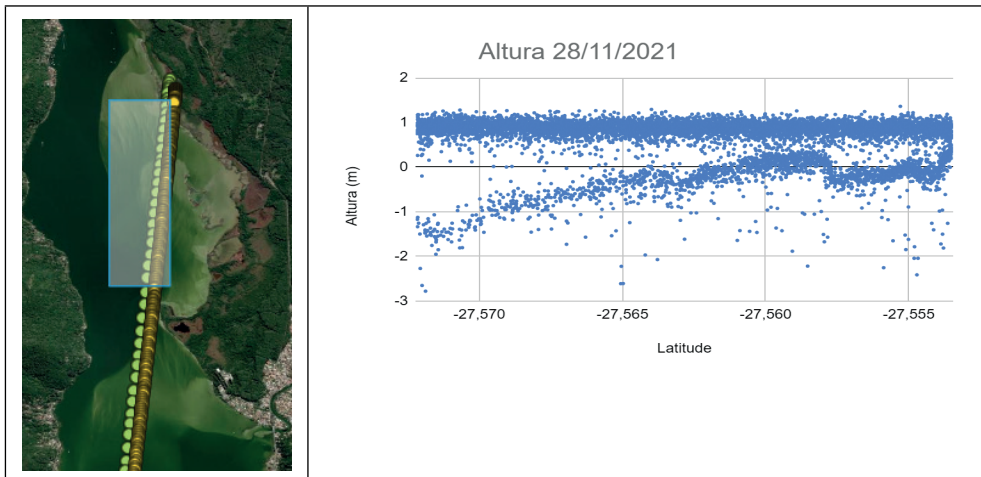


Figura 9 - Local de passagem do satélite ICESAT-2 e profundidades estimadas para o dia 28/11/2021.

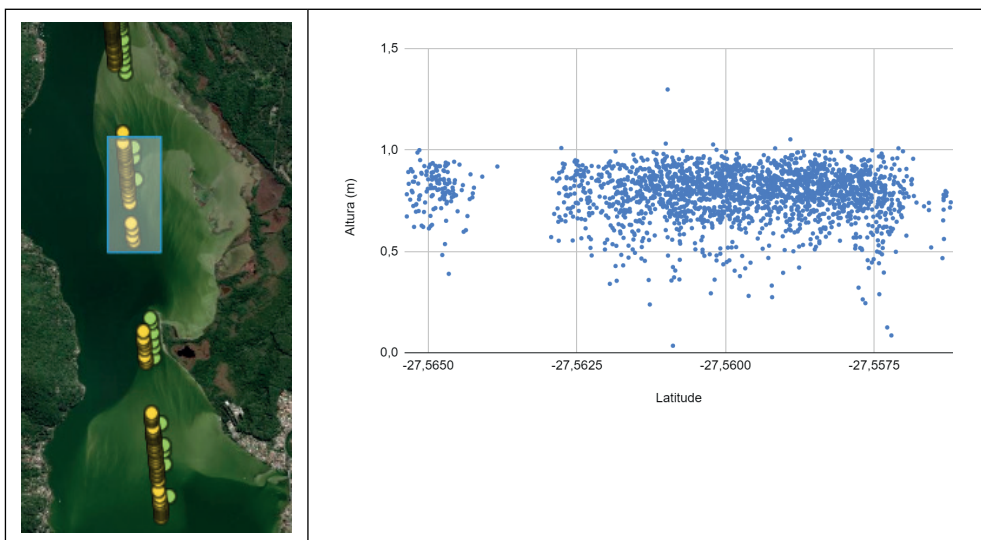


Figura 10 - Local de passagem do satélite ICESAT-2 e profundidades estimadas para o dia 11/01/2022.

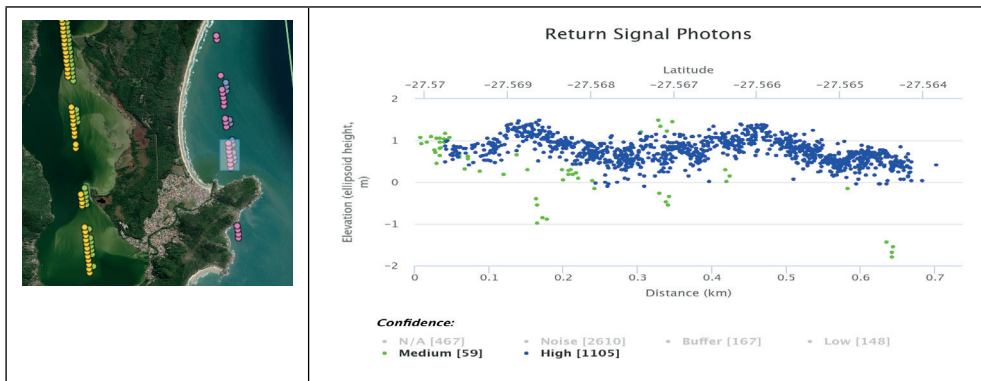


Figura 11 - Local de passagem do satélite ICESAT-2 e profundidades estimadas para o dia 11/01/2022, sobre o oceano próximo.

## CONCLUSÕES E DISCUSSÃO

Estimativas da profundidade da superfície e batimetria da região da Lagoa da Conceição foram estimadas com dados do altímetro do satélite ICESAT-2. Os resultados mostraram que estes dados permitem estimativas da altura da superfície da lagoa nos momentos da passagem do satélite. Regionalmente, os dados permitem avaliar a profundidade da superfície aquática e assim monitorar suas possíveis mudanças. No futuro, sugere-se que sejam feitas medidas in situ para assim ter uma melhor comparação com estes dados. Esta nova ferramenta pode tornar-se um importante instrumento de monitoramento desta lagoa, pois é de grande interesse da sociedade.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), à Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN) e à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pelo suporte ao projeto.

## REFERÊNCIAS

- AEROCONSULT. Relatório final da batimetria do distrito administrativo da Lagoa da Conceição e Barra da Lagoa. Florianópolis, 2001.
- BARBOSA, T. C. & JOSÉ A. C. Lagoa da Conceição: um ecossistema lagunar. Usos e legislação ambiental. Revista de Ciências Humanas, v. 16, 23, 145-156, 1998. <https://periodicos.ufsc.br/index.php/revistacfh/article/view/23580>.
- BIER, F. B. Aspectos hidrodinâmicos e sedimentológicos em um canal de maré: estudo de caso do Canal da Barra da Lagoa, Florianópolis-SC, Dissertação de mestrado, 2018. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/198623>

GODOY, F. B.; FRANCO, D. Análise Batimétrica por Imagens Landsat-5 na Lagoa da Conceição Florianópolis - SC. In: VII OMARSAT, 2007, Arraial do Cabo-RJ, 2007.

GODOY, F. B.; FRANCO, D.; MARIO, H. F. S. . O Canal da Barra da Lagoa Florianópolis, SC. In: III SEMENGO, Seminário de Engenharia Oceânica, 2008, Rio Grande, RS. ANAIS III SEMENGO, 2008.

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. Climate Chang. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, L. Masson-Delmotte, e co-autores, Eds., Cambridge University Press, 2021.

JASINSKI, S., & co-autores. ICESat-2 Inland Water ATBD, [https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/page\\_files/ICESat2ATL13ATBD002mj12202019.pdf](https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/page_files/ICESat2ATL13ATBD002mj12202019.pdf) , 2024, visitado em 08/Janeiro/2024.

MARKUS, T. et al. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation. *Remote Sensing of Environment*, 190, 260–273, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.029>.

MELO FILHO, E. Maré meteorológica na costa brasileira, Tese Professor Titular, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Rio Grande, 328 p, 2017. <http://repositorio.furg.br/handle/1/7212?show=full> ,

NEUMANN, T. A. and co-authors. The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite – 2 mission: A global geolocated photon product derived from the Advanced Topographic Laser Altimeter System. *Remote Sensing of Environment*, v. 233, 111325, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111325>.

PARRISH, C.E. and co-authors. Validation of ICESat-2 ATLAS Bathymetry and Analysis of ATLAS's Bathymetric Mapping Performance. *Remote Sens*, 11, 1634, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11141634>

RAMOS DA SILVA, R., SAKAGAMI, Y., & HAAS, R. ICESAT-2 Lidar retrievals for a smoke and and clouds case estimates for the South America Region. *Holos Environment*, 21(4), 445–456, 2022 . <https://doi.org/10.14295/holos.v21i4.12458>.

RUDORFF, F. M. e co-autores. Sectorization of the Conceição Lagoon´s southern sector. *Braz. J. Aquat. Sci. Technol.* 9(2):49-56. ISSN 1808-7035, 2005.

XU e co-autores, Deriving Tidal Flat Topography Using ICESat-2 Laser Altimetry and Sentinel-2 Imagery, *Geophysical Research Letters*, 2022, <https://doi.org/10.1029/2021GL096813> .

# APLICABILIDADE DE PROJETO DE CCS NA FORMAÇÃO POTI NA BACIA DO PARNAÍBA, MA, BRASIL

*Data de aceite: 01/03/2024*

### **Tallys Celso Mineiro**

Programa de Pós Graduação em  
Engenharia Civil - PPGEC, UFPE  
Graduação em Geologia - DGEO, UFP

### **Diego Bezerra Alves**

Graduação em Geologia - DGEO, UFP

### **Manoela Nogueira dos Santos**

Graduação em Geologia - DGEO, UFP

### **Cauã Eller Martins Oliveira**

Graduação em Geologia - DGEO, UFPE

**RESUMO:** Com o avanço das emissões antropogênicas de gases de efeito estufa na atmosfera ocasionou um desbalanço na concentração de gases como o  $\text{CO}_2$ . Logo, necessita-se de tecnologias que visem a redução destas emissões. Para tal, projetos de captura e armazenamento de  $\text{CO}_2$  (CCS) em meio geológico são soluções fundamentais, proporcionando uma matriz energética sustentável. O Brasil é um potencial contribuinte neste tipo de projeto devido a suas vastas bacias sedimentares, sendo uma delas a Bacia do Parnaíba, localizada no Nordeste brasileiro, e que contém campos de gás como no Parque dos Gaviões. Assim sendo, o presente estudo

visa avaliar o potencial de aplicabilidade de implementação de tecnologias de CCS na Formação Poti através da comparação de parâmetros petrográficos como porosidade, permeabilidade e profundidade do reservatório. Adicionalmente, condições de seguridade também devem ser analisadas como o afeito selantes das rochas. Os resultados obtidos definem a Formação Poti como um potencial reservatório de armazenamento de  $\text{CO}_2$  com os parâmetros comparados sendo contundentemente satisfatórios. Concernente a rocha capeadora, os reservatórios da formação estudada são capeados por intrusões ígneas que impedem estruturalmente o vazamento de  $\text{CO}_2$  e possuem potencial para aprisionamento por mineralização, devido a reatividade com o  $\text{CO}_2$ .

**PALAVRAS-CHAVE:** CCS; Formação Poti; Armazenamento de  $\text{CO}_2$ ; Parque dos Gaviões

**ABSTRACT:** The advancement of anthropogenic emissions of greenhouse gases into the atmosphere has caused an imbalance in the concentration of gases such as  $\text{CO}_2$ . Therefore, technologies are needed to reduce these emissions. To this end, Carbon Capture and Storage (CCS)

projects in geological environments are fundamental solutions, providing a sustainable energy matrix. Brazil is a potential contributor to this type of project due to its vast sedimentary basins, one of which is the Parnaíba Basin, located in the Brazilian Northeast, and which contains gas fields such as Parque dos Gaviões. Therefore, the present study aims to evaluate the potential applicability of implementing CCS technologies in the Poti Formation through the comparison of petrographic parameters such as porosity, permeability, and reservoir depth. Additionally, safety conditions must also be analyzed, such as the effect of rock sealants. The results obtained define the Poti Formation as a potential CO<sub>2</sub> storage reservoir with the compared parameters being overwhelmingly satisfactory. Concerning the capping rock, the reservoirs of the studied formation are capped by igneous intrusions that structurally prevent the leakage of CO<sub>2</sub> and have the potential for trapping by mineralization, due to reactivity with CO<sub>2</sub>.

**KEYWORDS:** CCS; Poti Foramtion; CO2 storage; Parque dos Gaviões.

## INTRODUÇÃO

Com o avanço da atividade humana, o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera tornou-se uma problemática importante ao longo dos anos, devido ao impacto ambiental decorrentes de gases de efeito estufa (Moreno, 2013). Essas emissões provêm principalmente da energia de consumo e do fato que 85% da energia primária é fornecida por combustíveis fósseis (Orr, 2004), fazendo com que a redução das emissões de CO<sub>2</sub> constitui um grande desafio a ser solucionado.

Com isso, uma das medidas para reduzir as consequências ocasionadas pelas as alterações climáticas e limitar os potenciais efeitos do aquecimento global, é redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE), com ênfase no dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Nema et al., 2012; Leung et al., 2014; Papadis e Tsatsonis, 2020).

Dentre os possíveis meios para mitigar as emissões de GEE, o sequestro geológico de CO<sub>2</sub> se torna um candidato cada vez mais bem visto como uma alternativa viável para reduzir a liberação de gases com efeito de estufa na atmosfera. Com isso, a Captura e Armazenamento de Carbono (CCS, sigla em inglês) apresenta-se como uma ferramenta com potencial significativo para reduzir as quantidades de dióxido de carbono numa perspectiva da utilização prolongada de combustíveis fósseis nas próximas décadas (IPCC, 2005).

Para remover esse gás da atmosfera, realiza-se um projeto CCS, onde é realizada a captura de CO<sub>2</sub> de indústrias com elevadas emissões e a sua injeção em formações geológicas, tais como aquíferos e reservatórios de hidrocarbonetos esgotados. Porém, um dos principais obstáculos para o armazenamento de CO<sub>2</sub> a longo prazo e em grande volume em formações geológicas é a garantia de um armazenamento seguro e confiável desse gás (Moreno, 2013).



Nas últimas décadas, métodos para o armazenamento de  $\text{CO}_2$  em larga escala foram identificados e amplamente utilizados. Dentre eles, os reservatórios de petróleo e gás esgotados são atualmente o tipo de reservatório mais utilizado no mundo, funcionando na estratégia de recuperação avançada de petróleo enquanto os reservatórios de carvão não minerável, que podem ter o  $\text{CO}_2$  adsorvido na matriz de carvão e produzir metano. Além disso, outros tipos possíveis de reservatórios são os armazenamentos em cavernas de sal minadas e armazenamento oceânico e formações salinas profundas (Bachu, 2000). Outrossim, os aquíferos profundos também são utilizados para injeção de resíduos líquidos perigosos e não perigosos, pois contêm água conata fóssil e de alta salinidade que não é adequada para uso industrial e agrícola ou para consumo humano. Com isso, as altas pressões encontradas em aquíferos profundos indicam que estes podem suportar a injeção de  $\text{CO}_2$  (Moreno, 2013).

Entretanto, para que os projetos de CCS sejam instaurados para que se obtenha a notável redução destas emissões de  $\text{CO}_2$  atmosférico, bilhões de toneladas ou mais devem ser anualmente estocadas com um aumento significativo de injeção deste gás em regiões que haja o aumento das emissões (Benson & Cole, 2008).

Com isso, os projetos de CCS constituem em duas formas de aprisionamento, os quais são classificados na forma estrutural e na forma química (IPCC, 2005); com relação ao estrutural (estratigráfico ou residual), esta forma é responsável por grande parte da retenção do composto químico injetado de maneira similar a formação das reservas de hidrocarbonetos, enquanto que a forma química (solubilizada ou mineralizante) de certa forma é a mais desejável, devido a sua credibilidade em retenção por períodos geológicos sem efeitos danosos ao comportamento geomecânico do meio poroso (Rackley, 2010; Tao e Bryant, 2012).

No entanto, estudos realizados no Brasil sobre a capacidade de armazenamento de  $\text{CO}_2$  revelam o alto potencial de retenção deste gás nas bacias sedimentares do país, sobretudo na área de offshore (Ketzer et al., 2015; Goulart et al., 2020). A seleção das regiões brasileiras com elevados potenciais para aplicação da CCS é um aspecto decisivo em relação às emissões globais (Brasil, 2015). Com relação às tecnologias CCS no Brasil, o governo possui um retrospecto favorável na aplicação de tecnologias CCS pelo setor privado na implementação e uso (Camara, 2003); porém, existe uma desproporcionalidade de produção nas bacias do sudeste em comparação com o Nordeste, em parte devido à proximidade com o polo econômico mais importante do país e a falta de projetos de ação e em parte porque detém as maiores reservas nacionais de petróleo. Entretanto, pode-se utilizar campos em bacias menos visadas para lidar com emissões locais em outras regiões e implementar projetos-piloto nestes locais (Ciotta, 2021).

Desta forma, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo avaliando o potencial de aplicação de projetos CCS na formação sedimentar Poti, na bacia do Parnaíba, através da comparação entre parâmetros admissíveis para projetos de injeção de  $\text{CO}_2$ , visando a estrutura porosa e a seguridade do reservatório.



## GEOLOGIA LOCAL

A Bacia do Parnaíba, antes denominada Bacia do Maranhão ou Maranhão-Piauí, fica localizada na Região Nordeste do Brasil e abrange uma área de mais de 600.000 km (Cordani et al., 1984). Localizada nos estados do Maranhão e Piauí (Figura 1), os seus sedimentos cobrem embasamento maciços do período do pré-cambriano que seriam produtos da fissão do supercontinente Rodínia (Cordani et al 2009). A litologia da bacia é bem diversificada, varia de folhelhos, evaporitos, arenitos, diamictitos, etc. A deposição da Bacia se deu no final do Ordoviciano até o cretáceo, com variados ambientes de deposição, como glacio-fluvial, com possível diamictitos de origem glacial na Formação Ipu (Caputo, 1984), desértico na Formação Samambaia, fluviolacustre da Formação Pasto bom, entre outros ambientes (Vaz et al, 2007).

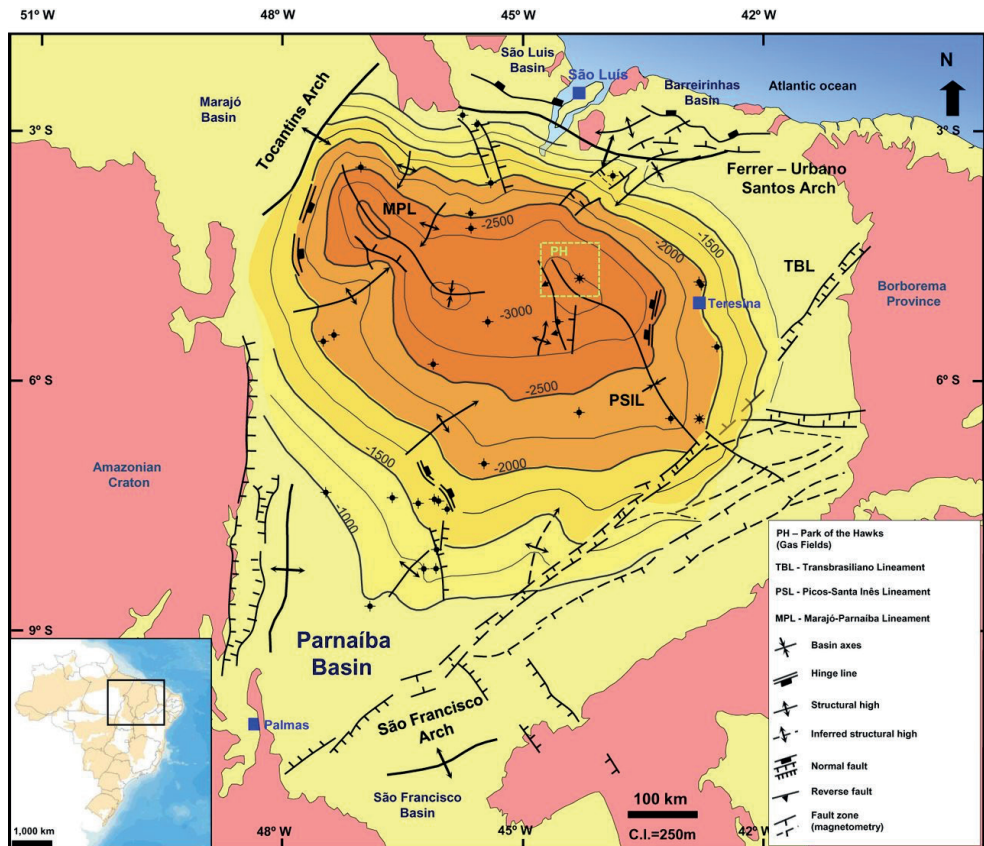


Figura 1. Mapa de profundidade da base da Bacia Parnaíba.

Fonte: Miranda et al. (2018)

Os reservatórios analisados neste estudo estão localizados no Parque dos Gaviões, uma região no estado do Maranhão que abriga 7 campos de gás natural. O Parque dos Gaviões possui um sistema petrolífero atípico. O Parnaíba passou por importantes eventos magmáticos ao longo de sua história, que foram responsáveis pela formação de diques e soleiras na bacia. Os dois principais eventos magmáticos toleíticos do Parnaíba são: Mosquito e o Sardinha (Trosdorf et al, 2016).

Os eventos de magmatismo descritos acima influenciaram diretamente na formação de hidrocarbonetos na Bacia do Parnaíba. Aplicado ao caso das rochas geradoras da Formação Pimenteiras, a espessura da Bacia não é o suficiente para que as rochas dessa formação sofram maturação e forme hidrocarbonetos, porém as intrusões magmáticas fizeram com que essas rochas sofressem maturação e começasse a formar hidrocarbonetos. Assim, como essas intrusões influenciaram a geração de hidrocarbonetos na bacia, as mesmas provocaram a formação de um sistema de diques e soleiras que servem como armadilhas para a cumulação de hidrocarbonetos (Figura 2) (Miranda et al, 2018).

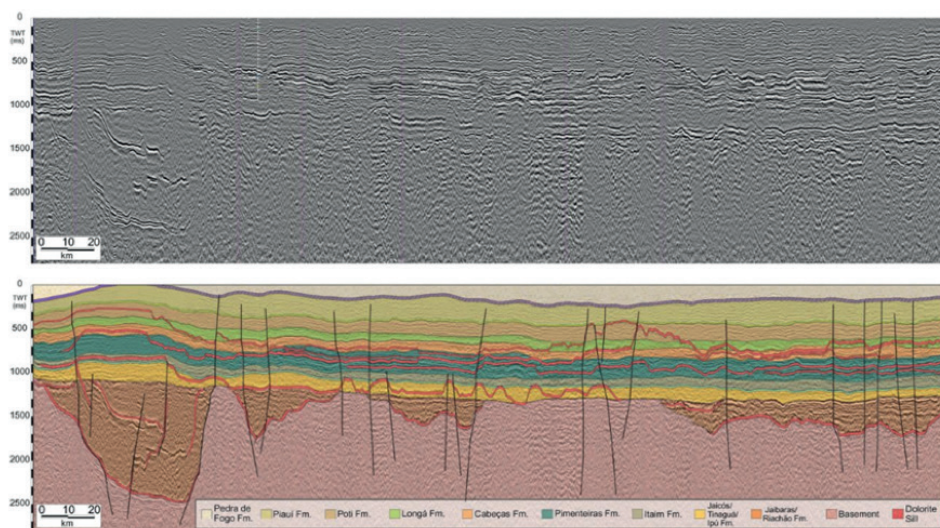


Figura 2. Seção 2D aleatória com as principais formações que fazem parte da bacia, juntamente com o sistema de diques e soleiras (em vermelho). É possível observar essas intrusões dentro de formações de rochas geradoras, como os folhelhos da Formação Pimenteiras (azul) e na Formação Cabeças (laranja) e Poti (bege) consideradas como formações reservatórios, na qual serve como armadilha de hidrocarbonetos.

Fonte: Miranda et al, 2018.

Os reservatórios estudados pertencem à Formação Poti, que é composta por arenitos cinzas esbranquiçados com lâmina de siltito e folhelho (Pimentel, 2020), a qual possui uma profundidade de aproximadamente 1100 m e sua espessura compreende aproximadamente 300 m. A formação é dividida em três zonas, utilizando a qualidade do reservatório como parâmetro: (1) zona superior apresenta uma boa qualidade de reservatório, com maior homogeneidade em sua litologia, (2) Zona intermediária apresenta uma média qualidade de reservatório e (3) Zona inferior que apresenta uma má qualidade de reservatório (Miranda et al, 2018).

As propriedades dos reservatórios de arenitos da Formação Poti dos campos de gás encontrados na Bacia do Parnaíba, possuem porosidade média de 18%, podendo variar de 5% a 27%, com uma permeabilidade de 240 mD, (Miranda et al, 2018).

Entretanto, Pimentel (2020) fez interpretação litológica do poço 4-OGX-49-MA, a qual apontou que a porosidade varia de 9% à 21%. A ocorrência da unidade é no intervalo 1163/1659m, e nesse local há uma intrusão de diabásio de aproximadamente 170m de espessura e a ocorrência de rochas metassedimentares em contato com o topo e base da intrusão.

Algumas regiões da Formação Poti se encontram seladas pelos diques e soleiras resultantes das intrusões magmáticas. Um exemplo é um esquema da seção geológica feita por (Cunha et al., 2012) (Figura 3).

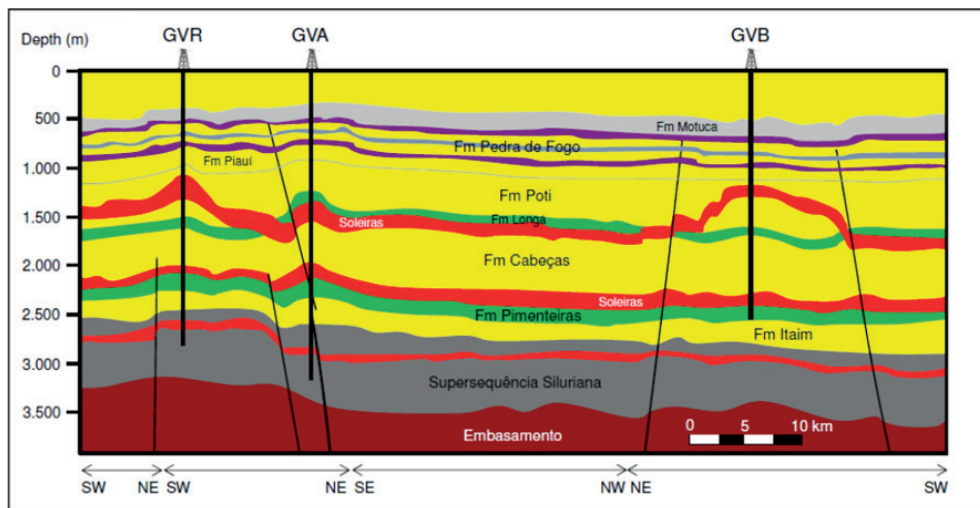


Figura 2. Esquema estratigráfico do Parque dos Gaviões.

Fonte: Cunha et al., 2012.

**METODOLOGIA**

O processo metodológico deste trabalho consiste em uma revisão acerca do arcabouço geológico a fim de detalhar os parâmetros petrofísicos da Formação Poti, pertencente a Bacia do Parnaíba, bem como a estruturação geológica das formações sedimentares e intrusões ígneas. A revisão é baseada em trabalhos mais recentes voltados para a área mencionada da bacia e, além disso, trabalhos tais que trazem vertentes geofísicas que mostram a capacidade de seguridade no armazenamento do CO<sub>2</sub> injetado.

Para avaliar a aplicabilidade da implementação de um projeto de CCS na formação estudada serão comparados os dados obtidos para a Formação Poti com as condicionantes de seguridades comentadas por Ketzer (2012), Mineiro et al. (2022) e Silva et al. (2022), bem como com os parâmetros descritos como imprescindíveis para a aplicação determinados por Callas et al. (2022) e que podem ser observados na Tabela 1 a seguir.

Descrição	Critério
Profundidade até o topo da formação	1000 - 2000 m
Porosidade	> 10 %
Permeabilidade	> 10 mD
Espessura do reservatório	> 10 m

Tabela 1 - Parâmetros mínimos para aplicabilidade de um projeto de CCS em reservatórios de meio poroso

Fonte: Adaptado de Callas et al. (2022)

Por fim, após a comparação com os referidos parâmetros e condicionantes, comentar-se-á sobre a viabilidade e potencialidade da implementação dos projetos de acordo com as evidências observadas.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A importância da profundidade do reservatório para a aplicação de projetos de armazenamento de CO<sub>2</sub> torna-se um fator criterioso, pois abaixo de 800 m de profundidade o CO<sub>2</sub> encontra-se em se estado supercrítico, o qual o gás comporta-se como fluido devido a densidade típica, apresentando, portanto, um menor volume (Bachu et al., 2000; IPCC, 2005; Ketzer et al., 2016).

Além disso, os reservatórios devem atender critérios de segurança e integridade para armazenamento eficiente de fluidos e com menores riscos ao meio ambiente. Portanto o reservatório deve apresentar capacidade economicamente viável, ter taxa de injetividade razoável e boa capacidade de retenção pela rocha capeadora para evitar escape de CO<sub>2</sub>. Não obstante, espera-se um ambiente geoquimicamente e geomecanicamente estável (Ketzer et al., 2016; Mineiro et al., 2022).

Logo, observando os parâmetros da Formação Poti, de forma geral, os valores se ajustam muito bem aos valores de referência aceitáveis para potencial implantação e desenvolvimento de um projeto de armazenamento de CO<sub>2</sub>, salvo a pouca representatividade de porosidade no conjunto da formação que atingem porosidade de 9% (Tabela 2), a qual limita-se pela inferioridade do valor ótimo estipulado por Callas et al. (2022) para reservatórios maduros.

Tabela 2 - Parâmetros da Formação Poti para aplicabilidade de projeto CCS

Descrição	Formação Poti
Profundidade até o topo da formação	1100 m
Porosidade	9-21%
Permeabilidade	240 mD
Espessura do reservatório	300 m

Concernente a permeabilidade e espessura do reservatório, por serem parâmetros de valores consideráveis, o potencial de aplicabilidade aumenta impactando até na capacidade de armazenamento, uma vez que proporciona uma taxa de injetividade maior. Porém, não implicando em maior seguridade, pois de acordo com Pawar et al. (2022), maiores plumas de CO<sub>2</sub> podem evidenciar maior potencial de vazamento de fluido armazenado, devido ao espalhamento e maior área de contato do CO<sub>2</sub> no reservatório.

Adicionalmente, sobre a seguridade no armazenamento, de maneira positiva destaca-se que estratigraficamente a camada a ser submetida para injeção de CO<sub>2</sub> tem camadas selantes tanto acima do reservatório quanto a abaixo. A parte superior é limitada por intrusões ígneas na bacia sedimentar, o que pode ser benéfico, pois o CO<sub>2</sub> por reatividade pode mineralizar na região de contato. Ao passo que, na parte inferior uma camada fina de folhelho da Formação Longá, que sela a mobilidade descendente do CO<sub>2</sub> por convecção.

## CONCLUSÃO

A avaliação preliminar do potencial de aplicabilidade para operação de um futuro projeto de armazenamento de CO<sub>2</sub> por meio de levantamentos geofísicos e petrofísica de certa forma é um balizador determinante para o gerenciamento e futuras tomadas de decisões em projetos deste tipo.

Logo, a Formação Poti atende às exigências mínimas interpostas para a implementação de um projeto de CCS, uma vez que, como comentado anteriormente, comparativamente seus parâmetros se enquadram perfeitamente além de já possuir instalações físicas como poços, proximidade de fontes emissoras e excepcionalmente possuir boa capacidade capeadora superior e inferior demarcadas pela soleira e pelo folhelho da formação Longá.

Deve-se, portanto, avaliar futuramente por meio de simulações de fluxo de fluidos a Formação aqui estudada com o intuito de averiguar a capacidade de armazenamento, o potencial de retenção, os efeitos geoquímicos de trapeamento ocasionados pela capeadora ser uma rocha basáltica.

## REFERÊNCIAS

Bachu, S., Sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change. *Energy Convers. Manag.* 41, 2000.

Brazil, 2015. Intended nationally determined contribution.

Benson, S. M.; Cole, D. R. CO<sub>2</sub> sequestration in deep sedimentary formations. *Elements* 2; 4(5): 325e31, 2008.

Callas, C., Saltzer, S. D., Steve Davis, J., Hashemi, S.S., Kavscek, A.R., Okoroafor, E.R., Wen, G., Zoback, M.D., Benson, S.M. Criteria and workflow for selecting depleted hydrocarbon reservoirs for carbon storage, *Applied Energy*. vol. 324, 2022.

Câmara, G., Fatores condicionantes para o uso em larga escala das Tecnologias de Captura e Armazenamento Geológico de Dióxido de Carbono no Brasil e sua aplicação no estado da Bahia. State University of Bahia, 2003.

Ciotto M, Peyerl D, Zacharias LGL, Fontenelle AL, Tassinari C, Moretto EM. CO<sub>2</sub> storage potential of offshore oil and gas fields in Brazil. *Int J Greenh Gas Control* ,2021.

Cordani, U.G; Brito Neves, B.B.; Fuck, R.A.; Porto, R.; Thomaz Filho, A.; CUNHA, F.M.B. Estudo preliminar de integração do pré-Cambriano com os eventos tectônicos das Bacias Sedimentares brasileiras. *Bol. Petrobrás — Exploração de Petróleo*, n. 15, 70 p., 1984.

Cordani, U. G; Neves, B. B. B.; Thomaz Filho, A. Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras (Atualização). *B. Geoci. Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 17, n. 1, p. 205-219, nov. 2008/maio 2009.

Cunha, P.R.C.; Bianchini, A. R.; Caldeira, J. L.; Martins, C.C. Parnaíba Basin The Awakening of a Giant. In: 11th Simposio Bolivariano Exploracion Petrolera en las Cuencas Subandinas, 2012, Cartagena de indias. Extended abstract. Cartagena de Indias: Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, 2012.

Goulart, M. B. R., Costa da, P. V. M., Costa da, A. M., Miranda, A. C. O., Mendes, A. B., Ebecken, N. F. F., Meneghini, J. R., Nishimoto, K., Assi, G. R. S. Technology readiness assessment of ultra-deep salt caverns for carbon capture and storage in Brazil. *Int. J. Greenh. Gas Control* 99, 2020.

IPCC, 2005. Special report on carbon dioxide capture and storage. Karayannis, V., Charalampides, G., Lakioti, E., 2014. Socio-economic aspects of CCS technologies. *Procedia Econ. Financ.* 14, 2015.

Ketzer, J., Machado, C., Rockett, G., Iglesias, R. Brazilian Atlas of CO<sub>2</sub> capture and geological storage center of excellence in research and innovation in petroleum, mineral resources and carbon storage, 2015.



Ketzer, J. M. M., Machado, C. X., Rochett, G. C., Iglesias, R. S. Brazilian Atlas of CO<sub>2</sub> Capture and Geological Storage. Porto Alegre. EDIPUCRS, 2016.

Ketzer, J. M., Iglesias, R., Einloft, S. Reducing greenhouse gas emissions with CO<sub>2</sub> capture and geological storage. In: Chen, W.-Y., Seiner, J., Suzuki, T., Lackner, M. (Eds.), Handbook of Climate Change Mitigation. Springer, US, pp. 1405-1440, 2012.

Leung, D. Y. C., Caramanna, G., Maroto-Valer, M. M. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 39, 2014.

Moreno, D. A. Comprehensive Analysis of an Ongoing CO<sub>2</sub> Storage Project. Morgantown, WV, USA: West Virginia University, 2013.

Nema, P., Nema, S., Roy, P. An overview of global climate changing in current scenario and mitigation action. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 2012.

Orr, F. Storage of Carbon Dioxide in Geologic Formations. *Journal of Petroleum Technology*, 90-97, 2004.

Papadis, E., Tsatsaronis, G. Challenges in the decarbonization of the energy sector. *Energy* 205, 2020.

Pawar, R. J.; Chu, S.; Makedonska, N.; Onishi, T.; Harp, D. Assessment of relationship between post-injection plume migration and leakage risks at geologic CO<sub>2</sub> storage sites. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 101, 103138, 2020.

Pimentel, R. Correlação rocha-perfil-sísmica e avaliação de reservatórios na área do parque dos gaviões, bacia do Parnaíba. Tese de mestrado, 2020.

Rackley, S.A. Geological storage. In: *Carbon Capture and Storage*, pp. 227–266, 2010.

Ruprecht, C.; Falta, R. Comparison of supercritical and dissolved CO<sub>2</sub> injection schemes. *Proceedings, TOUGH Symposium*, 2012.

Silva, W. M. P., Barbosa, J. A., Coutinho, A. P., Mineiro, T. C., Gomes, I. F., Assis, D. C. A. Potencial para armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> no campo de Pilar - Alagoas. 11º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 2022.

Mineiro, T. C., Gomes, I. F., Silva, W. M. P., Barbosa, J. A., Assis, D. C. A., Guimarães, L. J. N., Coutinho, A. P. Aspectos técnicos e legais para o desenvolvimento de projetos de captura e armazenamento de carbono no Brasil. 11º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 2022.

Miranda, F.S., Vettorazzi, A.L., Cunha, P.R.C., Aragão, F.B., Michelin, D., Caldeira, J.L., Porsche, E., Martins, C., Ribeiro, R.B., Vilela, A.F., Corrêa, J.R., Silveira, L.S., Andreola, K. Atypical igneous-sedimentary petroleum systems of the Parnaíba Basin, Brazil: seismic, well logs and cores. *Geological Society, London, Special Publications* 472 (1), 341–360, 2018.

Tao, Q. & Bryant, S. L. Optimal Control of Injection/Extraction Wells for the Surface Dissolution CO<sub>2</sub> Storage Strategy, *Carbon Management Technology Conference*, 2012.

Trosdorf Jr., I.; Morais Neto, J.M.; Santos, S.F.; Portela Filho, C.V.; Dall'Oglio, T.A.; Silva, A.M.; Galves, A.C.M. Diques e soleiras na Bacia do Parnaíba: geometria e mecanismo de alojamento. *PETROBRAS/E&P-EXP/GEXP-TERRA*, Rio de Janeiro, 2016.

# CONHECENDO A FLORESTA PETRIFICADA DE MISSÃO VELHA: UMA REVISÃO DE LITERATURA

---

*Data de submissão: 19/01/2024*

*Data de aceite: 01/03/2024*

### **Luana de Jesus Felix de Sousa**

Universidade Regional do Cariri,  
Departamento de Ciências Biológicas,  
Missão Velha, CE  
<http://lattes.cnpq.br/9970241868889977>

### **Bernardo Hamuyela Luciano**

Universidade Federal do Paraná, Curitiba,  
PR  
<https://lattes.cnpq.br/3860063013924300>

### **Bruna Almeida de Oliveira**

Universidade Regional do Cariri,  
Departamento de Geografia, Crato, CE  
<http://lattes.cnpq.br/9417060320960605>

### **Yedda Maria Lobo Soares de Matos**

Universidade Regional do Cariri,  
Departamento de Ciências Biológicas,  
Crato, CE  
<http://lattes.cnpq.br/4524095481519342>

### **Bruno Melo de Alcântara**

Universidade Regional do Cariri,  
Departamento de Ciências Biológicas,  
Crato, CE  
<http://lattes.cnpq.br/8604223319950019>

### **Maria Aparecida Barbosa Ferreira Gonçalo**

Universidade Regional do Cariri,  
Departamento de Ciências Biológicas,  
Crato, CE  
<http://lattes.cnpq.br/5782987886301211>

### **Jeovane Henrique de Souza**

Universidade Regional do Cariri – URCA,  
Crato – CE  
<http://lattes.cnpq.br/2731579996944249>

### **Dhenes Ferreira Antunes**

Universidade Regional do Cariri,  
Departamento de Ciências Biológicas,  
Crato, CE  
<http://lattes.cnpq.br/3922373252537278>

### **Thiago Felix de Lima**

Universidade Federal do Cariri, Crato, CE  
<http://lattes.cnpq.br/0086589050758395>

### **José Weverton Almeida-Bezerra**

Universidade Regional do Cariri,  
Departamento de Química Biológica,  
Crato, CE  
<http://lattes.cnpq.br/5570296179611652>

### **Ademar Maia Filho**

Universidade Regional do Cariri,  
Departamento de Ciências Biológicas,  
Crato, CE  
<http://lattes.cnpq.br/9570480278376163>

### **Nathallia Correia da Silva**

Universidade Regional do Cariri,  
Departamento de Ciências Biológicas,  
Missão Velha, CE  
<http://lattes.cnpq.br/9202918580320342>



**RESUMO:** O primeiro Geopark do Continente Americano, foi criado em 2006 - Geopark Araripe, que abrange uma área de 3.441 km<sup>2</sup> em torno de algumas cidades do Ceará, como Crato, Juazeiro do Norte, Barbalha, Nova Olinda, Santana e Missão Velha. O Geossítio Floresta Petrificada do Cariri, distante de Missão Velha 6 km, cujo acesso é por uma rodovia, trata-se de uma área privada cercada e sua entrada é controlada por cadeado. Possui uma carência de infraestrutura de apoio, pois possui grande potencialidade para o turismo. Nesta perspectiva, o objetivo geral deste estudo é compreender as formações dos troncos fósseis silicificados da formação Missão Velha e relatar as vantagens para o turismo e as dificuldades de implantação no Geossítio Floresta Petrificada. Adotou-se como metodologia uma Revisão Bibliográfica, desenvolvida a partir da junção dos trabalhos já publicados. Utilizou-se como plataformas de buscas: SCIELO, Google acadêmico, EDU e Periódicos da CAPES. Na busca por estudos relevantes, foi adotado “AND” como operador booleanos, fazendo uso dos seguintes descritores: Troncos fósseis “AND” Coníferas, Formação Missão Velha “AND” Jurássico. Os resultados foram desenvolvidos com base em 33 trabalhos, após adoção dos critérios de inclusão e exclusão. Os estudos nos mostraram que este geossítio possui uma exuberância acentuada em virtude da presença dos troncos fósseis, bem como um amplo potencial didático, associado à sua relevância para Formação Missão Velha. Portanto, este trabalho foi de total relevância para produção de conhecimentos acerca desta temática, no entanto, apresentou como principais limitações a restrição quanto os acessos de artigos publicados de forma não pública.

**PALAVRAS-CHAVE:** Troncos Fósseis, Sedimentação, Fossilização, Fragmentos.

## GETTING TO KNOW THE PETRIFIED FOREST OF MISSÃO VELHA: A LITERATURE REVIEW

**ABSTRACT:** The first Geopark on the American Continent was created in 2006 - Geopark Araripe, which covers an area of 3,441 km<sup>2</sup> around some cities in Ceará, such as Crato, Juazeiro do Norte, Barbalha, Nova Olinda, Santana and Missão Velha. The Petrified Forest of Cariri Geosite, 6 km away from Missão Velha, which access is via a road, is a private fenced area and its entrance is controlled by a padlock. It has a lack of support infrastructure, as it has great potential for tourism. In this perspective, the general objective of this study is to understand the formations of the silicified fossil trunks of the Missão Velha formation and to report the advantages for tourism and the difficulties of implantation in the Petrified Forest Geosite. A Bibliographic Review was adopted as a methodology, developed from the junction of already published works. It was used as search platforms: SCIELO, Google academic, EDU and Periodicals of CAPES. In the search for relevant studies, “AND” was adopted as a Boolean operator, making use of the following descriptors: Fossil trunks “AND” Conifers, Missão Velha Formation “AND” Jurassic. The results were developed based on 33 studies, after adopting the inclusion and exclusion criteria. The studies showed us that this geosite has an accentuated exuberance due to the presence of fossil trunks, as well as a wide didactic potential, associated with its relevance for the Missão Velha Formation. Therefore, this work was of total relevance for the production of knowledge about this theme, however, it presented as main limitations the restriction regarding the access of articles published in a non-public way.

**KEYWORDS:** Fossil trunks, Sedimentation, Fossilization, Fragments.

## INTRODUÇÃO

Os Geoparques possuem condutas indispensáveis para conservação da natureza e aspectos abióticos, pelo universo, totalizam 161 geoparques em 44 países, na qual constituem o programa global de Geoparques da Unesco (Unesco Global Geoparks, UGG), o que identificou um aumento de medidas sustentáveis do meio ambiente, com notável cautela as comunidades que abrangem a área (NASCIMENTO et al., 2020).

Segundo Brilha (2009), o Geoparque é um território com delimitações para a unidade, e toda esta área está voltada para fomentar o turismo e aumentar a produtividade, gerando uma forma de renda para os habitantes locais, fundamentado na preservação das riquezas paleontológicas, agregadas com os bens natural e cultural que formam o patrimônio. Macedo e Pinheiro (2014) enfatizam que o Geopark é uma área de grande relevância geológica, comprovado pelo seu encanto.

O Geopark Araripe, abrange parte territorial de 3.441 km<sup>2</sup> em torno de algumas cidades do estado do Ceará, incluindo o Crato, Juazeiro do Norte, Barbalha, Missão Velha, Nova Olinda e Santana do Cariri (MOCHIUTTI et al., 2012). A Bacia do Araripe, é uma Bacia no interior do Nordeste, que está localizada no Sul do estado do Ceará, sendo a maior e mais completa, e com extensões que se limitam pelo estado do Piauí e Pernambuco (FREITAS et al., 2008). Abrange uma área de 12.000 km<sup>2</sup> (SARAIVA et al., 2007). A Bacia do Araripe ocupa um espaço em torno de 9000 km<sup>2</sup>, compreendendo os estados do Ceará, Piauí e Pernambuco (CHAGAS, 2006).

O Sítio Ribeirão na cidade de Brejo Santo - CE, abriga fragmentos de madeira fóssil de grandes dimensões, possuindo de 160 a 220 cm de comprimento por 90 a 110 cm de diâmetro (FREITAS et al., 2008). Outros locais aonde houveram pesquisas das quais descreveram fragmentos com mais de 1 m de comprimento, foram os sítios Várzea Grande e Pau Branco, na cidade de Mauriti – CE. Nestas descrições estudadas, as toras fossilizadas exibem somente o xilema secundário preservado, não existindo o córtex nem a medula.

Na cidade de Missão Velha temos o Geossítio Floresta Petrificada, situado em um local chamado de Grota funda. Neste local é possível encontrar a melhor exposição natural da Formação Missão Velha, em toda a Bacia do Araripe, podendo servir de base para compreensão de toda a sequência sedimentar constituída (FREITAS et al., 2008). Este Geossítio abriga grandes paredões rochosos, onde a estratigrafia do terreno pode ser bem observada, bem como a formação Missão Velha (FAMBRINI et al., 2011).

Mesmo diante da infinidade de trabalhos que discorrem sobre a geologia da Bacia do Araripe, percebido, nas últimas décadas, a ausência de argumentos mais precisos que definam a formação Missão Velha (FREITAS et al., 2008). Compreendendo que a falta de uniformidade de opiniões quando citam a estratigrafia da formação Missão Velha, faz surgir várias propostas argumentando sobre a proposição estratigráfica e conteúdo litológico sobre o que seria a formação Missão Velha. Neste sentido, a falta de uma explicação mais

proveitosa, está no fato da ausência de fósseis que orientem nesta discussão (FAMBRINI et al., 2011).

Freitas et al. (2008) enfatiza que há 45 anos já havia informações sobre estas madeiras fósseis silicificadas, no entanto, existe uma carência de respostas envolvendo a identificação de sua tafonomia e adequando em um contexto geológico, que intensifique a necessidade de um aprofundamento desta área fossilífera.

Desde o século XX, já se tinha conhecimentos sobre as madeiras fossilizadas, porém essas informações foram insuficientes, apresentando sua visibilidade somente após a criação do Geopark Araripe, reconhecido em 2006 pela UNESCO (BARRETO JUNIOR et al., 2021).

Apesar de sua relevância, falta investimentos e um olhar mais preciso, pelo número de pessoas que visitam e fazem suas pesquisas, e precisam de uma estrutura de apoio. Faz-se necessário a preservação desta área por parte dos órgãos competentes, buscando aumentar as fiscalizações, por ter uma ótima localização, próximo à rodovia aumenta radicalmente o contrabando destes itens de um valor inestimável para os pesquisadores (FREITAS, 2019). Em decorrência da exuberância visível de fósseis, criaram o Geossítio Floresta Petrificada do Cariri, reconhecida pela sua dimensão de madeiras fossilizadas e pela sua seção tipo, formação Missão Velha (FREITAS et al., 2008; SILVEIRA et al., 2012).

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### **Tipo de estudo**

Esta pesquisa foi desenvolvida por meio de um estudo bibliográfico, com abordagem qualitativa e objetivo exploratório. De acordo com Gil (2008), o objetivo de uma pesquisa exploratória é estar por dentro de todo o assunto sempre buscando mais estudo sobre o conteúdo como também ser, mas explorado sempre buscando informações para aprimorar o conhecimento.

Já a revisão bibliográfica, é desenvolvido por meio da junção de todo material diversificado, já elaborado por autores que através de suas pesquisas contribuem para elaboração de posteriores estudos, as fontes de dados podem ser livros, artigos científicos, periódicos de revistas, teses, dissertações entre outros (GIL, 2002).

### **Instrumento e procedimento**

Foram selecionados 33 trabalhos científicos, com dados dos anos de 1983 a 2022. Utilizou-se como plataforma de estudo e buscas o Google acadêmico, o SCIELO, periódicos da CAPES e EDU. Para tanto, utilizou-se dos seguintes descritores: Troncos fósseis “AND” Coníferas, Formação Missão Velha “AND” Jurássico.

## **CrITÉRIOS de inclusão e exclusão**

Adotou-se como critérios de inclusão, arquivos disponíveis de forma gratuita e integral nas plataformas supracitadas, que compreendessem os anos de 1983 a 2022, em língua portuguesa e que atendessem aos descritores de pesquisas. Os critérios de exclusão se voltaram para arquivos disponíveis de forma parcial, pago, e que não abordassem os descritores da pesquisa, e que estivesse faixa temporal definida.

## **Análise de dados**

Os dados são discutidos e expressos de forma dissertativa, onde são expostas as principais informações que somam ao desenvolvimento deste estudo.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A Bacia do Araripe foi construída através de ocorrências tectônicas, determinante da fragmentação do Gondwana, ligada a abertura do Oceano Atlântico Sul, e o riftamento, gerado através do afastamento das placas continentais da América do Sul e da África, que motivaram para a ocorrência da sedimentação e progressão desta bacia. No entanto, é mencionado um desentendimento quando é comentado a cronologia das rochas sedimentares basais da Bacia no que se refere a Formação Mauriti ou Tacaratu, que foram alvos de muita polêmica, assim como a formação Missão Velha (KELLNER, 2002).

A formação Missão Velha fecha e inicia o clímax de Rifti e tem uma discordância interna. Próximo a Abaiara temos o Moro do Cruzeiro, não possui um nível de paleosolo, possui uma discordância erosiva apontado pela presença de fragmentos de arenitos inferior dentro do arenito superior. De modo que arenitos grossos com estratificações cruzadas acanaladas que são a passagem da sequência 1 para a sequência 2, isso seria o significado tectônico da Formação Missão Velha, isso acontece por que ela marca a passagem do Rifti, para o nosso entendimento. A grande discussão envolve este ponto. Em suma, o que acontece é uma Formação, mas, ela tem uma tecno sequência interna (FAMBRINI et al., 2019).

A sequência clímax de Rifti neocomiano, compreende o item superior a formação Missão Velha e a formação Abaiara. Esta sequência evidencia uma desconformidade intraformacional onde é possível diagnosticar na formação Missão Velha, conglomerados de seixos areníticos com estratificação cruzada e acanalada e tabular, sabendo que podem se situar dispostos justamente por contato erosivo (FAMBRINI et al., 2011).

Estes conglomerados partem literalmente e verticalmente para arenitos conglomeráticos amalgamados grosseiros, com estratificação cruzada acanalada e tabular de média escala, da qual podemos comprovar diversos fragmentos de madeira silicificada do gênero *Dadoxylum benderii* da qual chegaram a uma altura de 1,60 m na parte mais grossa da Formação Missão Velha (FAMBRINI et al., 2019).

Percebe-se uma ausência de conformidade quando se fala sobre as proposições estratigráficas da Bacia do Araripe, o que torna a coluna estratigráfica desta Bacia algo controverso, um exemplo disso é a unidade Missão Velha que expõe inúmeras sugestões estratigráficas que se divergem, quanto a posição, espessura, abrangência e conteúdo litológico.

Estes conceitos que foram surgindo de vários autores acerca da Formação Missão Velha, não chegavam a um consenso definido para a unidade, devido à ausência de fósseis, que contribuam para uma idade confiável (FAMBRINI et al., 2011). A Bacia do Araripe exhibe uma sucessão estratigráfica muito complexa, compostas pelas Formações Cariri, Brejo Santo, Missão Velha, Abaiara, Barbalha, Santana e Exu (CHAGAS, 2006).

Assine (2007) e Fambrini et al. (2017) chegaram a um consenso sobre a coluna estratigráfica da Bacia do Araripe quando fazem a seguinte descrição: fracionaram em 5 segmentos sendo, a sequência Paleozóica representada diante a Formação Cariri, onde a sua composição tem arenitos médios a grossos fluviais de idade neordoviciano e eossiluriano. Sequência início de Rifti, neojurássica formada pelos pelitos da Formação Brejo Santo e também os arenitos da parte inferior da Formação Missão Velha. Sequência clímax de Rifti composta pelos arenitos grosseiros da parte superior da Formação Missão Velha e acrescentando os pelitos e arenitos da Formação Abaiara Neocomiana. Sequência pós-Rifti fracionada em duas, pós-Rifti I, Aptiano-Albiano, possuindo a seguinte composição as Formações Barbalha, Crato, Ipubi e Romualdo, e pós-Rifti II, Albiana-Cenomaniana, que se entende que a sua descrição é de sedimentos aluviais da Formação Araripina.

Atualmente, sabe-se que existem deficiências de informações sobre a Formação Missão Velha, e isso requer, mais estudos comprobatórios desta formação, ressaltando a relevância na análise de fácies, reconhecendo a importância de novas pesquisas e profissionais interessados na busca por explicação para as seções colunares.

Sabendo que a Bacia necessita de estudos estratigráficos com ênfase na observação de fácies de cada uma dessas unidades (CHAGAS, 2006). Pode-se afirmar, que a Formação Missão Velha foi sinônimo de muita polêmica por motivos de uma indefinição da unidade (ARAI, 2006).

Como já frisado, a Formação Missão Velha está sobreposta em concordância com a Formação Brejo Santo, possuindo dimensão que não ultrapassa o seu limite de 200m, havendo composição arenitos quartzosos ocasionalmente feldspático, as vezes conglomeráticos dispondo de uma copiosa abundância de madeira silicificada designada de uma floresta de coníferas a *Dadoxylon benderi* (ASSINE, 2007). É uma unidade, composta por arenitos finos, a grossos até conglomeráticos e isso evidencia pela presença de troncos fossilizados (FAMBRINI et al., 2017; ASSINE, 2007).

Braun (1966) fundamentou a funcionalidade do termo, Formação Aliança. Diante dos atributos litológicos e as toras que se fossilizaram pertencente a Formação Missão Velha que podem ser encontradas com frequência a unidade, foi conferida como a Formação

Sergi, Dom João (BRITO, 1987). Fambrini et al. (2017) explica que a Formação Missão Velha foi diagnosticada com uma discordância erosiva interna, diferenciada pela existência notada dos arenitos conglomeráticos e conglomerados, bem significativos e atuantes em clastos de arenitos médios a finos, com procedência das rochas justamente oriundas abaixo da superfície.

De acordo com Fambrini et al. (2017), a Formação Missão Velha passou por uma sequência de processos que corresponde: sequência 1 - possui abundância em arenitos médios e médias a finos, já a sequência 2, foi diagnóstica com seus arenitos grossos a muito grosso e de uma forma pouco recorrente encontraram conglomeráticos subordinados com uma quantidade bastante considerável de madeiras fósseis silicificados. Neste sentido, a Formação Brejo Santo representa a primeira fase lacustre da Bacia fornecendo indícios de um ambiente lacustre raso com influência fluvial.

Foi verificado no Geossítio Floresta Petrificada do Cariri, situado numa localidade Rural, no qual o solo é produto da pedogênese, bastante desfrutado para a agropecuária, o que denota, como o solo foi reagindo a fatores (NASCIMENTO et al., 2020). Há autores que mesmo comprovando seus aspectos significativos explicam que não há necessidade de cautela, quando se fala em preservação da seção, mesmo diante de sua relevância não precisa de uma preocupação com preservação desta unidade (FREITAS, 2019).

No entanto, alguns autores descrevem que o principal motivo de criação do Geossítio Floresta Petrificada do Cariri no Geopark Araripe, no ano de 2006, foi a remoção sem autorização destes sedimentos, o que motiva a uma perda simbólica destes sedimentos, mesmo compreendendo que esta informação é centenária da descoberta destas madeiras silicificadas, ainda há uma evacuação mesmo sendo de uma maneira parco (BARRETO JUNIOR, 2015).

A Floresta Petrificada é um dos Geossítios do Geopark Araripe, contudo possui uma especificidade geológica muito limitada, tendo o número de visitas de discentes bem reduzido. Percebe-se ainda a falta de infraestrutura e apoio de órgãos competentes (GABRIELLI, 2014). No entanto, por ter só rochas areníticas e a ocorrências dos troncos silicificados, geralmente as pessoas que vão visitar, são, mas objetivas, ao acesso às informações científicas. Sendo assim, por conta de sua grande especificidade geológica, leva a um reduzido número de visitação por público não acadêmico (FREITAS, 2019).





Figura 1 – Floresta Petrificada de Missão Velha – CE

Fonte: Autores (2023)

Este geossítio não possui uma exuberância diversificada como encontramos na Formação Santana, onde é prestigiada por uma incrível quantidade de fósseis de peixes, insetos e pterossauros (BARRETO JUNIOR, 2015). No entanto, podemos encontrar uma paisagem exuberante, que em períodos chuvosos o verde proporciona uma paisagem encantadora da Grota funda que é seu cânion, e possui também várias trilhas, bem os paredões rochosos (FREITAS, 2019).

Entre seus pontos negativos encontramos uma deficiência nos serviços fundamentais, que ajudarão estudantes e pesquisadores em obterem um melhor aproveitamento em suas pesquisas de campo. É importante fiscalização e manutenção das trilhas, pois caso estejam mal sinalizadas, isso pode fazer com que os visitantes se enganem na localização, levando-os a se perderem nas trilhas. Reforça-se então a carência de serviços fundamentais como ausência de infraestrutura de apoio, falta de energia, de abastecimento de água, trilhas mal sinalizadas (FREITAS, 2019).

As toras que se fossilizaram durante o período geológico, podem ser visualizadas no Geossítio Floresta Petrificada do Cariri, são somadas a indícios do qual no período jurássico ocorriam extensas florestas de coníferas, totalmente distinta dos ecossistemas encontrados recentemente (NASCIMENTO et al., 2020). Os troncos fósseis caracterizados como *Dadoxylon* há pontos que supostamente levem a fazer parte das famílias Taxodiáceas ou Pináceas (FREITAS et al., 2008).

Devido a uma similaridade com troncos de Queirolepiácea identificadas na formação Navajo, Estados Unidos (STOKES, 1991). Os xilemas secundários da formação Missão Velha e formação Navajo possuem esta semelhança, no entanto, não é possível diagnosticar em detalhes a constituição de suas flores presentes no leste Cariri Cearense, Bacia do Araripe em períodos remotos ou que seus fragmentos estejam em ótimo estado de preservação (FREITAS et al., 2008).

Quando se fala sobre o gênero das coníferas, Freitas et al. (2008), Freitas (2019) e Assine (2007) enfatizam que os copiosos troncos silicificados da Formação Missão Velha, sugere que sejam de Coníferas do gênero *Dadoxylon Benderi*. No entanto, não chegando a resultados conclusivos sobre sua família se é Taxodiácea, Pinácea ou até mesmo Queirolepiácea, por conta da falta de informação da sua medula e xilema primário.

## CONCLUSÕES

A região do Cariri dispõe de uma grande geodiversidade, na qual se destaque os geossítios do Geopark Araripe, possibilitando diversas maneiras de realizar o geoturismo. Propostas relacionadas a geoconservação, são de extrema relevância, bem como a compreensão de formas de proteção e conservação deste patrimônio tão relevante.

Diante das evidências, foi possível observar que falta um consenso por parte dos autores, quando é mencionado as proposições estratigráficas da Bacia do Araripe, um exemplo, é a Formação Missão Velha que já foi motivo de muita discussão. Em virtude de não possuir fósseis que contribuam para uma idade confiável. Trata-se de uma unidade onde são escassos os estudos científicos.

O Geossítio Floresta Petrificada do Cariri, possui uma grande especificidade geológica, onde podemos evidenciar, a paisagem do Canio da Grota Funda, suas trilhas e os paredões rochosos que exibem a Formação Missão Velha, além da exuberância dos troncos fósseis.

É possível encontrar exposições dos fragmentos da Formação Missão Velha distribuídos pelos municípios de Abaiara, Missão Velha, Mauriti e Brejo Santo. Nas localidades do Morro do cruzeiro, Serra do Espia, Linhas de Alta Tensão, Cachoeira do Macedo, expostos pelas *formas in situ, ex situ* e exumados, de uma assembleia Alóctones do gênero *Dadoxylon benderi*, precisando ainda de mas estudos sobre sua tafonomia e gênero.

Desta forma, é possível concluir que há a predominância de arenitos amalgamados, verificando que a posição da qual estão os troncos fossilizados é na parte superior da Formação. Sendo que a Formação Missão Velha pode ser segmentada em duas frações, conforme critérios estratigráficos. É oportuno frisar, que o objetivo deste estudo foi atingido, conforme verificado na discussão proposta. No entanto, este trabalho apresentou como principais limitações a restrição quanto ao acesso a artigos publicados de forma não pública.



## REFERÊNCIAS

ARAI, M. Revisão Estratigráfica do Cretáceo Inferior das Bacias Inferiores do Nordeste do Brasil. **Geociências**, v. 25, p. 7-15, 2006.

ASSINE, M. L. Bacia do Araripe. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 5, n.2, p.371-389, 2007.

BARRETO-JUNIOR, A. M. **Tafonomia e Paleoecologia da Floresta Petrificada do Cariri- Formação Missão Velha, Bacia do Araripe**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2015.

BARRETO-JUNIOR, A. M; FRAMBINI, G. L; NEUMANN, V. H. M. L; SILVA-FILHO, W. F; OLIVEIRA, E. V. Lenhos fósseis da Formação Missão Velha, Bacia do Araripe: Significado Geológico Com Base em Feições Tafonômicas Sedimentológicas. **Revista do instituto de geociências**, v.21, n.4, p. 91- 101, dez 2021.

BRAUN, O. P. G. Estratigrafia dos Sedimentos da Parte Interior da Região Nordeste do Brasil. **Boletim da DGM**, v. 236, p. 1-76, 1966.

BRILHA, J. B. R. Importância dos Geoparques no Ensino e Divulgação das geociências. **Revista do instituto de Geociências USP**, v. 5, p. 27-33, 2009.

BRITO, I. M. As Unidades Litoestratigráficas da Passagem do Jurássico-Cretáceo no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de geociências**, v.17, n.2, p.81-85, 1987.

CHAGAS, D.B. **Litoestratigrafia da Bacia do Araripe: Reavaliação e Proposta Para Revisão**. Dissertação (Mestrado em Geologia) Universidade Estadual Paulista, Rio claro-SP, 2006. 127p.

FAMBRINI, G. L; LEMOS, D.R; TESSER JR, S; ARAUJO, J. T; SILVA-FILHO, W. F; SOUZA, B.Y.C; NEUMANN, V. H. M. L. Estratigráfica, Arquitetura Depositional e Faciologia da Formação Missão velha (neojurássico- eocretáceo) na Área-Tipo Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil: Exemplo de Sedimentação de Estágio de Início de Rifte a clímax de Rifte. **Revista do Instituto de Geociências**, v.11, n.2, p.55-87, 2011.

FAMBRINI, G. L; NEUMANN, V. H. M. L; MENEZES-FILHO, J. A. B; SILVA-FILHO, W.F; SILVA-FILHO, W.F; OLIVEIRA, E. V. Fácies architecture of the fluvial Missão velha formation (Late jurassic- Early Cretaceous), Araripe Basin, northeast Brasil: Paleogeographic and tectonic implications. **Acta Geologica Polonica**, v.67, n.4, p. 515-545.

FAMBRINI, G. L; SILVA-FILHO, W. F; LEMOS, D.R; SILVESTRE, D. C; ARAÚJO, J. T; MENEZES-FILHO, J. A. B; JUNIOR, S. T; NEUMANN, V. H. M. L. Análise tectonossedimentar das fases início de Rifti e clímax de Rifti da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista do instituto de geociências**, v.19, n.3, p.205-236, 2019.

FREITAS, F. I; HESSEL, M. H; NOGUEIRA NETO, J. A. Troncos Fósseis da Formação Missão velha na Porção Leste da Bacia do Araripe, Ceará. **Revista de Geologia**, v.2, n. 2, p.193- 206, 2008.

FREITAS, F.I. **Geopark Araripe, Geoconservação e desenvolvimento sustentável: Uma estratégia inclusiva**. Tese (Doutorado em Geologia), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2019. 127p.

GABRIELLI, C. Planejamento Turístico no Cariri Cearense: Integração e Desenvolvimento Responsável. **Tourismo And Hospitality International Journal**, v. 3, n. 3, p. 242-258, 2014.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4º ed., São Paulo: Editora Atlas, 2002.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6º ed., São Paulo: Editora Atlas, 2008.

KELLNER, A. W. A. Membro Romualdo da Formação Santana, Chapada do Araripe Ceara. Um dos mais importantes depósitos fossilíferos do Cretáceo brasileiro. **Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil**, p.121-130, 2002.

MACEDO, J. A; PINHEIRO, D. R. C. O Geoparque Araripe e o seu impacto no desenvolvimento local da comunidade Riacho Meio: Barbalha, Ceará, Brasil. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 18, n. 2, p. 145-162, 2014.

MOCHIUTTI, N. F; GUIMARAES, G. B; MOREIRA, J. C; LIMA, F. F; FREITAS, F. I. Os valores da Geodiversidade: Geossítio do Geopark Araripe/Ceará. **Anuário do instituto de geociências-UFRJ**, v.35, p. 173-189, 2012.

NASCIMENTO, M. A. L; SILVA, M. L. N; MOURA-FÉ, M. M. Os Serviços Ecossistêmicos em Geossítios do Geopark Araripe (CE), Nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, n. 4, p. 119-132, 2020.

SARAIVA, A. A. F; HESSEL, M. H; GUERRA, N.C; FARRA, E. Concreções Calcárias da Formação Santana, Bacia do Araripe: Uma Proposta de Classificação. **Estudos geológicos**, v.17, n.1, p.40-57, 2007.

SILVEIRA, A. C; SILVA, A. C; CABRAL, N. R. A. J; SCHIAVETTI, A. Análise de Efetividade de Manejo do Geopark Araripe- Estado do Ceará. **Geociências**, v.31, n. 1, p. 117-128, 2012.

STOKES, W. L. Petrified mini-forests of the Navajo Sandstone, east-central Utah. **Utah Geological Survey, Bulletin**, v. 25, p. 14-19, 1991.

# A RELAÇÃO ENTRE A REDUÇÃO DA ENERGIA CINÉTICA DOS VENTOS E O AQUECIMENTO DA TERRA

---

*Data de aceite: 01/03/2024*

**Carlos Henrique Silva Dias**

Engenheiro Civil

<https://www.linkedin.com/in/carlos-henrique-silvadias-a6b622249/>

**Fernanda Christina Teotônio Dias Troysi**

Doutora em Engenharia Mecânica PUC  
MG

<https://lattes.cnpq.br/0775840085703413>

**Anna Leticia Teotônio Dias**

Graduação em Farmácia UFMG

<https://www.linkedin.com/in/leticiateotonio>

**RESUMO:** Este trabalho explora eventos cruciais desde a Revolução Industrial, que desempenharam um papel fundamental na redução da energia cinética dos ventos e sua correlação com o aquecimento global. Enquanto os fatores que contribuem para o aumento das temperaturas são amplamente discutidos, a atenção aos elementos que colaboram diretamente para o resfriamento do planeta é notavelmente escassa. A circulação atmosférica, essencial nesse contexto, está sendo cada vez mais impactada.

Na atmosfera, a coesão do ar, atuando como um corpo unificado devido à ausência de

vácuo, destaca a importância de obstáculos na circulação livre do ar, influenciando significativamente o movimento das massas de ar.

O transporte de calor da superfície para camadas superiores da troposfera pelo ar úmido é crucial para a redução da temperatura terrestre. O resfriamento primário ocorre nos ventos alísios, onde o ar úmido ascendente, ao atingir grandes altitudes, irradia calor para o espaço, contribuindo para a redução da temperatura em áreas tropicais.

A presença vital dos ventos na circulação atmosférica é comprometida pelo aumento da rugosidade da Terra devido à urbanização, resultando em turbulência que reduz a energia cinética dos ventos.

A Revolução Industrial e o crescimento populacional acelerado desde 1800 impulsionaram a concentração urbana, resultando em uma expansão vertical das cidades. Atualmente, 5% da superfície do planeta é ocupada por centros urbanos, e se prevê que 61% da população mundial viverá em áreas urbanas até 2025, contribuindo para o aumento desta estatística.

A escassez de medidas que contribuam para a redução da interferência dos edifícios nos padrões de circulação do vento nas grandes cidades é alarmante, fazendo-se

necessária a condução de estudos e definição de diretrizes para orientar construções de maneira sustentável, promovendo abordagens mais equilibradas para o desenvolvimento urbano.

A expansão urbana pode ser positivamente explorada com um planejamento eficiente na construção de novos edifícios, contribuindo para mitigar a turbulência dos ventos causada pela rugosidade superficial, resultando em uma maior transferência de calor da superfície terrestre para o espaço.

**PALAVRAS-CHAVE:** Circulação atmosférica; resfriamento do planeta; expansão vertical das cidades; rugosidade da superfície terrestre; desenvolvimento urbano

## CONTEXTUALIZAÇÃO E DISCUSSÃO

O ar exibe uma baixa condutividade térmica, sendo de 0,0026 w/mK, conforme indicado por Nick Connor, 2020. Entretanto, quando tal elemento encontra-se em movimento, torna-se um agente altamente influente na rápida modificação da temperatura de toda uma região ou até mesmo de um país como todo. Fenômenos meteorológicos, como as frentes frias, exemplificam este impacto, resultando em diminuições substanciais de até 15°C em questão de horas sobre uma extensa área geográfica.

Os ventos Alísios, provenientes da região dos trópicos (AYOADE 2003) vão sendo aquecidos na sua trajetória em direção à região do equador meteorológico, lá recebem ainda mais calor e umidade, pela baixa pressão e alta temperatura seguem em direção às camadas mais altas da troposfera.

O vento úmido exerce papel essencial na redução da temperatura terrestre, decorrente de sua capacidade de transportar o calor da superfície do planeta até às camadas superiores da troposfera. Neste processo, o calor é então irradiado para o espaço, contribuindo significativamente para o mecanismo de resfriamento global.

O gradiente vertical térmico nesse processo é de aproximadamente -6,5°C a cada 1000 metros de altitude, podendo atingir temperaturas abaixo de -60°C, de acordo com a *U.S. Navy Weather Research Facility*. Esse ar já seco e gelado, ao iniciar o movimento de descida na direção dos trópicos (célula de Hadley), contribui para a redução da temperatura nessas áreas, ilustrado na Figura 1.

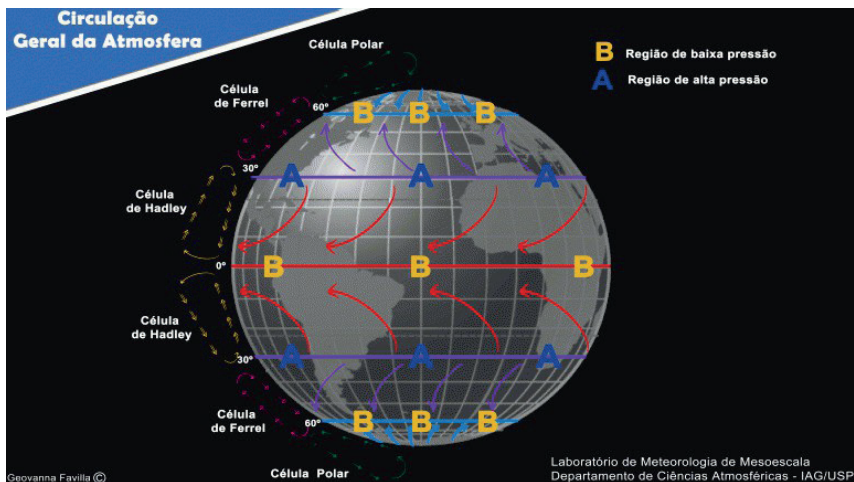


Figura 1.

Na atmosfera, tendo-se em vista a ausência de vácuo, a redução da energia cinética dos ventos interfere na circulação do ar em sua totalidade. Nos séculos passados, como no século XIII o planeta Terra se distinguia pelo predomínio de uma extensa cobertura vegetal, em marcante contraste com a presente realidade constatada nas áreas urbanas, conforme apresentado na Tabela 1 abaixo.

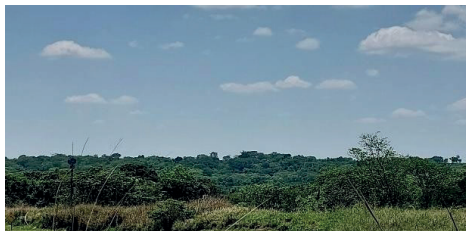
Descrição do terreno	Zo (mm)
Terreno muito liso, gelo, lama	0,01
Mar aberto em condição de calmaria	0,20
Mar agitado	0,50
Neve	3,00
Gramado	8,00
Pasto rugoso	10,00
Campo de pouso	30,00
Plantações	50,00
Poucas árvores	100,00
Muitas árvores, poucas construções	250,00
Florestas altas	500,00
Subúrbio	1.500,00
Centros urbanos	3.000,00

Tabela 1. Comprimento de rugosidade

Fonte: Adaptado de Manwell (2002).

Na natureza intocada, observa-se uma transição gradual entre os biomas, caracterizada por um crescimento suave na altura das paisagens. Esse fenômeno contrasta com o ambiente urbano, onde edifícios altos frequentemente se erguem imediatamente próximos a estruturas mais baixas, conforme exemplificado na Figura 2 com fotos capturadas pelos autores.

**A.**



Cerrado próximo a Uberlândia-MG

**B.**



Bairro Morada da Colina, Uberlândia-MG

Um dos principais catalisadores para o aumento da rugosidade do planeta foi a Revolução Industrial. Esse período crucial, marcado pela intensificação da produção e demanda por serviços, desencadeou um significativo êxodo rural para as áreas urbanas.

Ainda, somado a este movimento migratório, têm-se o expressivo crescimento populacional que, a partir de 1800, o planeta atingiu o marco de 1 bilhão de pessoas, e, posteriormente, aumentando exponencialmente, em 1922 atinge-se 2 bilhões de pessoas, 4 bilhões em 1975 e, atualmente, em 2023, atinge-se a marca extraordinária de 8 bilhões de habitantes no mundo.

O aumento vertiginoso da população global, aliado à tendência de concentração urbana, desencadearam uma demanda exponencial por edifícios, resultando em um cenário de expansão vertical das cidades.

Conforme os dados apresentados pelo renomado arquiteto e urbanista Jorge Wilhelm, estima-se, para 2025, que 61% da população mundial habitará em áreas urbanas. Comparando-se esta projeção com o ano de 1975, este quantitativo era de apenas 37%, evidenciando-se, portanto, a marcante transição demográfica. (Boletim do Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo).

No que concerne à ocupação de áreas por centros urbanos, atualmente atinge-se o número de 5% da superfície do planeta. Embora o nível de ocupação possa parecer baixo, o distanciamento do crescimento dos centros urbanos com a realização de medidas adequadas para minimizar o impacto destes grandes aglomerados na circulação dos ventos é preocupante. Um exemplo disto é que nas leis de uso e ocupação do solo das grandes cidades as quais pesquisamos, não encontramos uma menção sequer a algo que leve a uma redução da rugosidade da região urbana com relação a circulação dos ventos, os

critérios para aprovação de construções altas são em sua maioria com base na capacidade de tráfegos das vias, os afastamentos e a altura com relação a rota de aviões.

Reflete-se, portanto, a escassez de estudos e diretrizes que busquem avaliar e orientar a construção de forma a reduzir a interferência nos padrões de vento, proporcionando uma abordagem mais sustentável e equilibrada para o desenvolvimento urbano.

Constando-se irregularidade na ocupação da superfície do planeta, influenciada por diversos fatores, como o nível de desenvolvimento, além da densidade populacional de cada país ou região, a interferência na circulação dos ventos apresenta considerável variação de uma região para outra. Sendo assim, estas áreas de maior desenvolvimento urbano, em decorrência do aumento da rugosidade da superfície, tendem a sentir mais pronunciadamente os efeitos da redução do volume de ar circulante. Ou seja, o aumento na rugosidade implica na menor transferência de calor para o espaço, limitando o fenômeno de resfriamento da temperatura terrestre desta região específica.

As figuras 3 e 4 abaixo, imagens noturnas capturadas pela Nasa, corroboram na compreensão não só da irregularidade da ocupação das áreas metropolitanas, como também do aumento da rugosidade, criando-se obstáculos na circulação dos ventos.



Figura 3. Estados Unidos

Imagem noturna da superfície do planeta capturadas pela ISS divulgada pela Nasa.





Figura 4. Continente Europeu

Imagem noturna da superfície do planeta capturadas pela ISS divulgada pela Nasa.

Por fim, conforme estudos apresentados durante o evento *Planet Under Pressure*, organizado pelas Nações Unidas, estes indicam que nas próximas duas décadas, as áreas urbanas devem expandir-se em 1,5 milhão de quilômetros quadrados. Contudo, esta tendência pode ser explorada positivamente por meio do planejamento meticuloso da construção de novos edifícios, que, se orientado e executado de forma eficiente, tal processo pode contribuir na mitigação da turbulência dos ventos, ocasionada pela rugosidade superficial, e, conseqüentemente, na maior transferência de calor da superfície terrestre para o espaço.

## CONCLUSÃO

O presente trabalho destaca eventos cruciais desde a Revolução Industrial que desempenharam um papel fundamental na redução da energia cinética dos ventos, correlacionando-se com o aquecimento global. Embora os fatores de aumento de temperatura sejam amplamente discutidos, a atenção aos elementos de resfriamento planetário é notavelmente escassa, com a circulação atmosférica essencial sendo cada vez mais afetada. A presença vital dos ventos na circulação atmosférica é comprometida pela rugosidade da Terra devido à urbanização, contribuindo para a redução da energia cinética dos ventos.



A região dos Trópicos emerge como particularmente sensível à redução de energia, pois as massas de ar, ao retornarem da troposfera, apresentam menor volume e temperaturas médias mais elevadas. A crescente rugosidade do planeta desde a Revolução Industrial, que impulsionou o desenvolvimento urbano, é incontestável, resultando na perda de energia cinética dos ventos e, conseqüentemente, na redução de sua velocidade, impactando no volume de ar circulante na célula de Hadley ao longo do tempo.

A falta de medidas para reduzir a interferência dos edifícios nos padrões de vento nas grandes cidades é preocupante, sendo urgente conduzir estudos e estabelecer diretrizes para orientar construções de forma sustentável, buscando abordagens mais equilibradas no desenvolvimento urbano.

Entretanto, há uma oportunidade positiva na expansão urbana: um planejamento eficiente na construção de novos edifícios pode mitigar a turbulência dos ventos causada pela rugosidade superficial, resultando em uma maior transferência de calor da terra para o espaço. Assim, a integração de abordagens sustentáveis na urbanização torna-se crucial para enfrentar os desafios emergentes, oferecendo perspectivas promissoras para um desenvolvimento urbano equilibrado e resiliente no contexto das mudanças climáticas.

## REFERÊNCIAS

AYOADE, J.O. Introdução à climatologia para os trópicos. Bertrand Brasil, 2003. Rio de Janeiro.

Nick Connor (2019, 22 de maio), "What is Thermal Conductivity of Polyurethane Foam - Definition".

SELLERS, W.D. Physical Climatology. Chigago: The University of Chicago Press.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. Wind energy explained.

EcoDebate, 2/02/2010. Disponível em: [http://bit.ly/ALVES\\_2010](http://bit.ly/ALVES_2010)

Porto Editora – *Aumento Demográfico do Século XVIII*

GRUBB, M. J; MEYER, N. I. Wind energy: resources, systems and regional strategies. In: JO-HANSSON, T. B. et. al. Renewable energy: sources for fuels and electricity. Washington, D.C.: Island Press.

Sistema Global de Observação do Clima, co-patrocinado pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, sigla em inglês), Comissão Oceanográfica Intergovernamental-UNESCO, Conselho Internacional de Ciências e Programa Ambiental das Nações Unidas.

LEITE, Duarte. O mais antigo mapa do Brasil. In: DIAS, Carlos Malheiros (coord.). *História da Colonização Portuguesa do Brasil*

E. Roukema, *Brazil in the Cantino map, Imago Mundi*, volume 17 (1963)

Satterthwaite D. Coping with rapid urban growth. London: Royal Institution of Chartered Surveyors; 2002.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Departamento de População e Indicadores Sociais.

Climatologia: noções básicas e climas do Brasil - Francisco Mendonça, Inês Moresco Danni-Oliveira - Google Livros

AMBRIZZI, T; MARQUES, R; NASCIMENTO, E. Bloqueios Atmosféricos. Tempo e Clima no Brasil. Iracema F. A. Cavalcante.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change.

MARENGO, J. A. Mudanças Climáticas: Detecção e cenários futuros para o Brasil até o final do século XXI. Tempo e Clima no Brasil. Iracema F. A. Cavalcante [et al]

MARQUES, R. F. C. e RAO, V. B. Bloqueio atmosférico no hemisfério sul durante o período de 1980 a 1993. In: Climanálise Especial: edição INPE/CPTEC, 1996.

MENDONÇA, M.; ROMERO, H. 8º Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica. Alto Caparaó/MG, 2008.

MENDONÇA, Francisco; DANNI-OLIVEIRA, Inês Moresco. Climatologia: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MONTEIRO, M. A. Dinâmica atmosférica

MORIZE, H. Contribuição ao estudo do clima do Brasil. Observatório Nacional do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2ª ed. 1927.

“Movimentos da Terra” em Só Geografia. Virtuous Tecnologia da Informação, 2007-2019.

**FABRÍCIO MORAES DE ALMEIDA:** Possui Doutorado em Física pela UFC (2005) com Pós-doutorado - UFMT/CNPq (2009).  
<http://lattes.cnpq.br/5959143194142131>.

**A**

Altura de superfícies 16, 18, 19

Autocorrelation function 2

**B**

Baixa condutividade térmica 50

Batimetria 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 26

**C**

Captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> (CCS) 28

Carbon capture and storage 28, 36, 37

Célula de Hadley 50, 55

Circulação atmosférica 49, 50, 54

Copiosos troncos silicificados 46

**D**

Desenvolvimento urbano 50, 53, 55

**E**

Energia elétrica 1, 2, 3, 8, 9, 10, 11, 14

Estimativas da batimetria 16

Expansão vertical das cidades 49, 50, 52

**F**

Fenômenos atmosféricos 18

Forme hidrocarbonetos 32

Fossilization 39

Fossil trunks 39

Fragments 39

Função de autocorrelação 1, 2, 3, 12, 13, 14, 15

Função de eventos meteorológicos 17

Fuzzyficador tipo triângulo 4

Fuzzy Identification Methods 2

Fuzzy Logic 2

**G**

Gases como o CO<sub>2</sub> 28

Geossítio floresta petrificada 39, 40, 41, 44, 45

Gradiente vertical térmico 50

## I

ICESAT-2 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27

Intrusões magmáticas 32, 33

## L

LIDAR in the 532 nanometer band that 17

Lógica Fuzzy 1, 2, 3, 5, 6, 7, 11

## M

Maiores plumas de CO<sub>2</sub> 35

## O

Os eventos de magmatismo 32

## P

Previsão de demanda 1, 2, 3, 14

## R

Redução da energia cinética dos ventos 49, 51, 54

Resfriamento do planeta 49, 50

Revolução Industrial 49, 52, 54, 55

Rugosidade da superfície terrestre 50

## S

SARIMA (p, d, q) (P, D, Q) 3, 10

Sedimentation 39

Sensor ATLAS 19

Surface estimations 17

## T

Troncos de queirolepiácea 46

# EXPLORANDO O UNIVERSO

**DAS CIÊNCIAS EXATAS:**

TEORIA E APLICAÇÕES

🌐 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

✉ [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

📷 @atenaeditora

📘 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

**Atena**  
Editora  
Ano 2024

# EXPLORANDO O UNIVERSO

**DAS CIÊNCIAS EXATAS:**

TEORIA E APLICAÇÕES

🌐 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

✉ [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

📷 @atenaeditora

📘 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

**Atena**  
Editora  
Ano 2024