

## RELATÓRIO DE MÉTRICAS DE PREDIÇÃO

I

28 de maio de 2024

Análise de métricas obtidas para classificação de eventos da Rede  
Sismológica Brasileira.

### UNIDADE RESPONSÁVEL

Cidades Infraestruturas e Meio Ambiente – CIMA  
Seção de Obras Cíveis - SOC

### PERÍODO DE ANÁLISE

Início: 2012

Fim: 2024

## RESUMO

Neste Relatório são apresentados os resultados do monitoramento sísmológico efetuado na área da Usina Hidrelétrica Salto Pilão, por meio da Estação Sísmológica SP7, no período entre 01.12.2022 e 30.06.2023, permitindo acompanhar a sismicidade local e orientar a adoção de eventuais medidas mitigadoras. Durante o monitoramento sísmológico local efetuado, a Estação SP7 registrou sessenta e sete (67) desmontes em obras/pedreiras na região. No período de referência do presente relatório não foi observada a ocorrência de evento sísmico induzido pela implementação do Empreendimento da UHE Salto Pilão. Foram detectados 4 sismos naturais, sendo 3 destes sismos locais próximos à estação SP7, e um evento regional próximo à cidade de Iguape – SP, no estado de São Paulo em 2023-06-16 11:22:00 (UTC) com magnitude 4.0 mR. Ressalta-se a contribuição que este monitoramento sísmológico está dando para a confirmação e a determinação dos parâmetros de eventos ocorridos no território brasileiro, em especial aqueles com epicentros nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, e regiões vizinhas. Assim, recomenda-se que a Estação SP7 seja mantida em funcionamento, possibilitando dar continuidade ao melhor conhecimento da sismicidade local e regional, além do necessário acompanhamento da operação da Usina Hidrelétrica Salto Pilão.

**Palavras-chave:** Sismologia; sismicidade; Salto Pilão; sismos induzidos; sismos naturais; detonações; UHE Salto Pilão.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivo	1
1.3	Pré-processamento dos dados	1
<b>2</b>	<b>MÉTODOS</b>	<b>4</b>
2.1	Aquisição dos dados	4
2.2	Testes e validação do Classificador	4
2.3	Análise de Eventos em Horários Não Comerciais	4
<b>3</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>6</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>6</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização

Este Relatório integra o estudo sismológico em desenvolvimento pela equipe de sismologia do SOC-IPT com os desenvolvidos pelo Laboratório de Planetologia e Geociências da Universidade de Nantes que produziu um algoritmo de classificação supervisionada de eventos sismológicos com redes neurais artificiais convolucionais. Este algoritmo foi treinado com dados de sismos na região metropolitana francesa obtendo acurácias maiores que 95% na classificação entre eventos naturais e antropogênicos, tanto em território francês quanto em um teste feito com dados do estado norteamericano, Utah.

A rede neural desenvolvida se apresenta com an

### 1.2 Objetivo

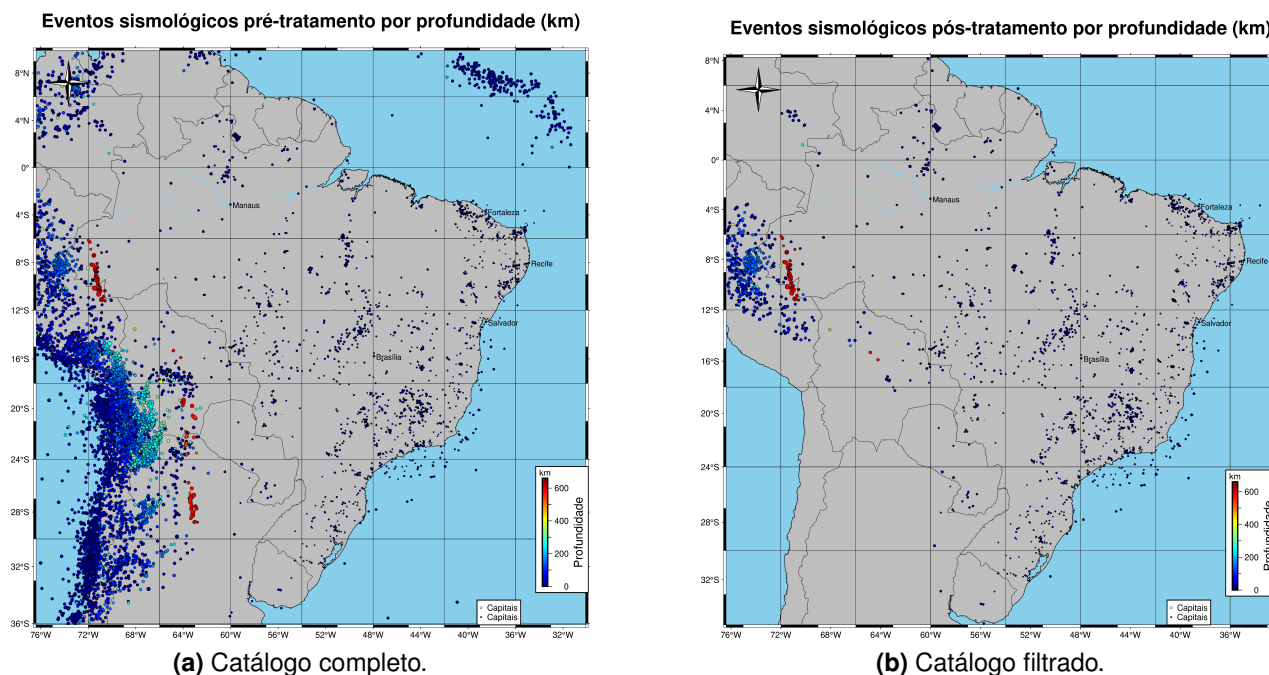
O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados obtidos com a classificação dos sismos do catálogo de eventos disponibilizado pela MOHO-IAG/IEE e aferir a eficácia deste algoritmo em classificar eventos em uma rede esparsa como a brasileira e em um contexto geológico distinto do conjunto de treino do modelo.

### 1.3 Pré-processamento dos dados

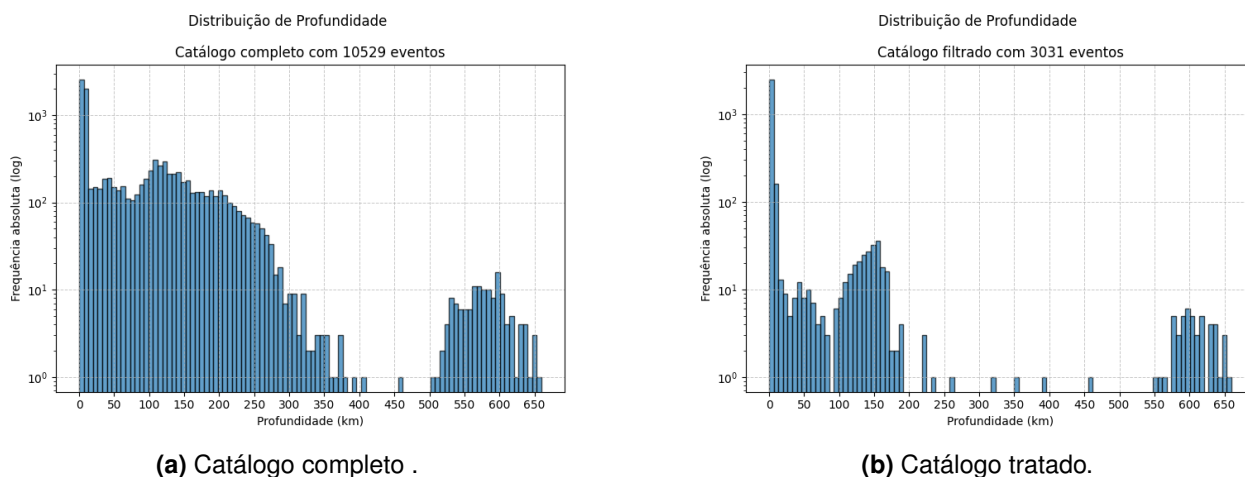
Para iniciar o projeto foi adquirido o catálogo de eventos sismológicos através do serviço de dados da MOHO-IAG/IEE utilizando a página web disponível em <<http://www.moho.iag.usp.br/rq/event>> com o filtro por região de um polígono quadrilátero que inscreve a área do território continental brasileiro adicionado de um buffer de 400 km. Com este processo foram obtidos 10.173 eventos sismológicos de fevereiro de 1903 a maio de 2024. que, após o tratamento dos dados, foram reduzidos para 2594 eventos, dos quais, todos foram rotulados como naturais.

O tratamento consistiu em adicionar um limite de idade em janeiro de 2010 e requerindo apenas os eventos que intersectam a geometria criada a partir do buffer de 400km do território continental brasileiro como apretneta a Figura 1. Além desta filtragem, nesta etapa de pré-processamento do catálogo, foram verificados os valores de profundidade dos eventos filtrados, e foi observado que praticamente todos ocorreram com menos de 10km de profundidade, com

excessão dos sismos na fronteira com Peru e Bolívia que atingem 600 km.



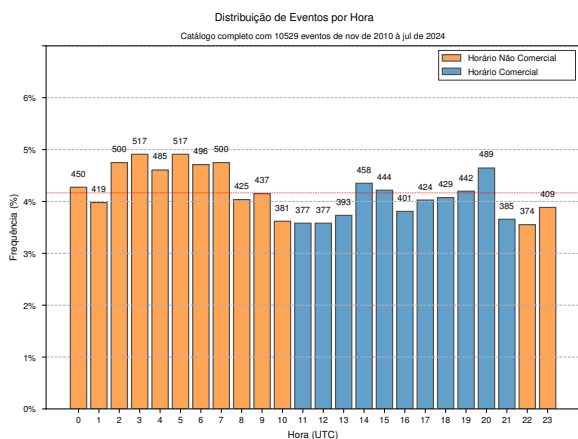
**Figura 1** – Distribuição dos eventos por profundidade presentes no catálogo completo(a) e filtrado(b).



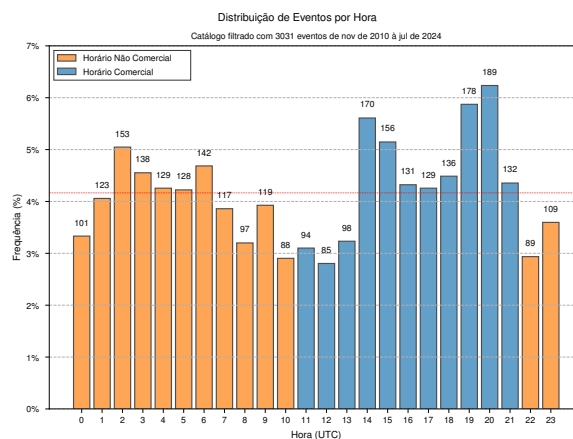
**Figura 2** – Distribuição dos eventos por profundidade presentes no catálogo completo(a) e filtrado(b).

Adicionado à isto, com esta análise da distribuição espacial dos eventos, foi possível observar que muitos sismos ocorrem a uma distância maior que 20 km da costa, que adicionado à profundidade, pode compor um conjunto de proxies que segmentam com maior certeza de que

são eventos naturais. Também foi possível criar um terceiro parâmetro para selecionar eventos naturais, sendo os epicentros localizados em regiões de alta densidade florestal e regiões metropolitanas sem ocorrência de mineração de rochas duras.



(a) Catálogo completo.



(b) Catálogo tratado.

**Figura 3** – Distribuição dos eventos por hora do dia presentes no catálogo completo(a) e filtrado(b).

## 2 MÉTODOS

### 2.1 Aquisição dos dados

Foi construída um fluxo de requisição de dados com python utilizando a biblioteca *obspy* para acessar o banco de dados *MOHO* e obter 60 segundos de forma de onda a partir de 10 segundos antes do seleção de onda 'P' e que a origem preferida do epicentro estivesse a pelo menos 400 km de distancia da estação que foi realizada o pick. Por tanto, todos os eventos que foram rotulados, porém estivesse a mais de 400km ou não possuíssem a seleção da onda 'P' foram descartados. Na etapa de treino, de acordo com o artigo, a rede neural foi apresentada a 60 segundos de forma de onda, porém, com início igual a 5 à 20 segundos antes da chegada da onda P. Precisamos testar a diferença entre uma janela fixa e uma janela variável entre 5 e 20 segundos antes da onda P para a fase de testes/validação.

### 2.2 Testes e validação do Classificador

O classificador foi testado utilizando um conjunto de dados rigorosamente selecionado, composto por eventos rotulados como naturais por especialistas. Esta fase de testes foi crucial para validar a precisão do classificador na discriminação entre eventos antrópicos e naturais, ajustando parâmetros e refinando o modelo conforme necessário.

Os resultados dos testes foram encorajadores, mostrando uma boa capacidade do modelo em identificar corretamente a natureza dos eventos sismológicos. As métricas de desempenho, como precisão e recall, foram calculadas e apresentaram resultados satisfatórios, reforçando a eficácia do classificador desenvolvido.

Adicionalmente, foram realizados ajustes baseados nos resultados dos testes, incluindo a otimização da captura de dados e do pré-processamento, para melhorar a acurácia das classificações.

### 2.3 Análise de Eventos em Horários Não Comerciais

Uma parte significativa do estudo envolveu a análise de eventos sismológicos registrados em horários não comerciais, definidos como o período entre as 23:00 UTC e 11:00 UTC. Este intervalo foi escolhido considerando as diferenças de fuso horário entre as várias regiões do Bra-

sil, que abrangem de -3 UTC a -5 UTC. A análise focou em identificar características distintivas dos eventos naturais e antropogênicos ocorridos neste período.

Os dados foram processados e visualizados usando uma série de scripts Python desenvolvidos para filtrar, analisar e plotar informações sismológicas detalhadas. Os gráficos resultantes, como distribuições de probabilidade natural, boxplots de distância por natureza do evento e matrizes de correlação, ajudaram a ilustrar diferenças significativas nas características dos eventos registrados durante o horário não comercial.

Especificamente, a distribuição de *prob\_nat* (probabilidade de um evento ser natural) para eventos naturais mostrou-se distinta daquela para eventos antropogênicos, com eventos naturais tendendo a ter valores mais altos de probabilidade. Além disso, a análise de recall por número de estações envolvidas no registro dos eventos revelou que um maior número de estações frequentemente correlaciona-se a uma classificação mais precisa entre eventos naturais e antropogênicos.

Os histogramas de recall ajustados para a hora do dia destacaram a precisão da classificação durante os horários não comerciais, refletindo a eficácia do algoritmo em identificar corretamente a natureza dos eventos sob condições variáveis de ruído ambiental e atividade humana.

Todas essas análises são cruciais para entender a dinâmica sismológica em horários menos típicos para atividades humanas, oferecendo insights sobre a influência de fatores naturais isolados das interferências antrópicas. Os resultados estão detalhados nos Apêndices A e B, onde figuras e tabelas fornecem uma representação visual e quantitativa das descobertas.

A validação destes resultados foi facilitada pela utilização de scripts automatizados que permitiram uma reprodutibilidade eficiente e a geração de outputs consistentes para análises subsequentes e revisões de estudo.

Este foco em eventos durante períodos não comerciais não apenas enriquece a compreensão da sismicidade natural mas também aprimora as metodologias de monitoramento e análise sismológica em condições controladas de ruído.



### **3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**