



INSTITUTO
TECNOLÓGICO
VALE

RODRIGO FINA FERREIRA

**PREDIÇÃO DE TML UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL:
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE MODELOS PREDITIVOS COM ADIÇÃO DE
ATRIBUTOS MINERALÓGICOS E GRANULOMÉTRICOS**

Ouro Preto, MG

2023

RODRIGO FINA FERREIRA

**PREDIÇÃO DE TML UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL:
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE MODELOS PREDITIVOS COM ADIÇÃO DE
ATRIBUTOS MINERALÓGICOS E GRANULOMÉTRICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista em Sistemas Inteligentes: Ênfase em Ciência de Dados.

Área de concentração: Sistemas Inteligentes: Ênfase em Ciência de Dados

Orientador: Jodelson Sabino, Dr.

Ouro Preto, MG

2023

Título: PREDIÇÃO DE TML UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE MODELOS PREDITIVOS COM ADIÇÃO DE ATRIBUTOS MINERALÓGICOS E GRANULOMÉTRICOS
Classificação: () Confidencial () Restrita (X) Uso Interno () Pública

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

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

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

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação(CIP)

F528p

Ferreira, Rodrigo Fina

Predição de TML utilizando inteligência artificial: avaliação de desempenho de modelos preditivos com adição de atributos mineralógicos e granulométricos. Rodrigo Fina Ferreira... [et al.] - Ouro Preto, MG: ITV, 2023.

60 p.: il.

Monografia (Especialização latu sensu) - Instituto Tecnológico Vale, 2023.
Orientador: Jodelson Sabino

1. Limite de Umidade Transportável. 2. Modelos preditivos. I. Sabino, Jodelson. II. Título.

CDD.23. ed. 629.892

Rodrigo Fina Ferreira

**PREDIÇÃO DE TML UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL:
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE MODELOS PREDITIVOS COM
ADIÇÃO DE ATRIBUTOS MINERALÓGICOS E GRANULOMÉTRICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em [Sistemas Inteligentes: Ênfase em Ciência de Dados].

Orientador: Prof. D.Sc. Jodelson Aguilar Sabino

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em 28 de novembro de 2023 pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. D.Sc. Jodelson Aguilar Sabino
Orientador – Vale

Prof. D.Sc. Gustavo Pessin
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale

Prof. D.Sc. Neymayer Pereira Lima
Membro externo – Vale

Os Signatários declaram e concordam que a assinatura será efetuada em formato eletrônico. Os Signatários reconhecem a veracidade, autenticidade, integridade, validade e eficácia deste Documento e seus termos, nos termos do art. 219 do Código Civil, em formato eletrônico e/ou assinado pelas Partes por meio de certificados eletrônicos, ainda que sejam certificados eletrônicos não emitidos pela ICP-Brasil, nos termos do art. 10, § 2º, da Medida Provisória nº 2.200-2, de 24 de agosto de 2001 (“MP nº 2.200-2”).



PROTOCOLO DE ASSINATURA(S)

O documento acima foi proposto para assinatura digital na plataforma Portal de Assinaturas Vale. Para verificar as assinaturas clique no link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/5F38-8353-1413-4230> ou vá até o site <https://vale.portaldeassinaturas.com.br:443> e utilize o código abaixo para verificar se este documento é válido. The above document was proposed for digital signature on the platform Portal de Assinaturas Vale. To check the signatures click on the link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/5F38-8353-1413-4230> or go to the Website <https://vale.portaldeassinaturas.com.br:443> and use the code below to verify that this document is valid.

Código para verificação: 5F38-8353-1413-4230



Hash do Documento

1EAF6B4299B84D0CCB80A3E34322E0D82CBC2D736849AAE8E902574C07D98C57

O(s) nome(s) indicado(s) para assinatura, bem como seu(s) status em 29/01/2024 é(são) :

- ☒ GUSTAVO PESSIN (Signatário) - 939.084.900-49 em 29/01/2024 09:16 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: gustavo.pessin@itv.org; Código de acesso: 1

Evidências

Client Timestamp Mon Jan 29 2024 09:16:17 GMT-0300 (Brasilia Standard Time)

Geolocation Latitude: -29.9905809 Longitude: -51.1735229 Accuracy: 100

IP 177.174.196.205

Hash Evidências:

911A066E7D0DE8D6BC68047F7ABA87DE7820CC8300509D39FB734946E45E3DB9

- ☒ Jodelson Aguilar Sabino (Signatário) - 793.799.077-53 em 29/01/2024 09:16 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: jodelson.sabino@vale.com; Código de acesso: 1

Evidências

Client Timestamp Mon Jan 29 2024 09:16:11 GMT-0300 (Brasilia Standard Time)

Geolocation Latitude: -20.2780807 Longitude: -40.2877961 Accuracy: 15.012

IP 177.159.72.212

Hash Evidências:

B3621916CB4DB903F0E0B9204FC3459B2B008CA45ECCC03C375AFF2327465A5

- ☒ Neymayer Pereira Lima (Signatário) - 889.851.056-04 em 26/01/2024 17:28 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: neymayer.lima@vale.com; Código de acesso: 1

Evidências

Client Timestamp Fri Jan 26 2024 17:28:19 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -20.407807 Longitude: -43.526386 Accuracy: 133

IP 138.121.67.22

Hash Evidências:

7BAAD4312FEFA3E2EF634E9711E1D4A5B395C82B0195A51C67B50AE48F2C59BA



AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo. Agradeço à minha família, minha esposa Lúcia e minha filha Maria Teresa, pelo apoio constante. Ao ITV, a todos os professores do curso de especialização, em especial ao Jodelson pela dedicação, disponibilidade e pela generosidade em compartilhar conhecimento de forma tão carismática. Aos colegas do curso pela parceria e por compartilhar ideias e conhecimento. À Vale S/A e aos líderes Ivan Pena, Marco Tulio e Victor Padula, pelo suporte ao desenvolvimento contínuo dos colaboradores. Ao Centro de Pesquisas Tecnológicas (CPT) da Vale pela execução da caracterização tecnológica. A Rossana Melo e à equipe do laboratório do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira, pela coleta e preparação das amostras. Aos colegas Matheus Sampaio e Conrado Souza por toda a ajuda no Python, que foi imprescindível para a conclusão deste trabalho. Ao colega Rodrigo Martins por me inspirar a trilhar esse caminho em Ciência de Dados. Aos membros da banca de avaliação por todas as contribuições ao trabalho.

RESUMO

O advento da obrigatoriedade de determinação do Limite de Umidade Transportável (TML, do inglês *Transportable Moisture Limit*), visando a segurança no transporte marítimo de minérios, trouxe novos desafios para a indústria mineral. A exigência de embarcar o minério com umidade inferior ao TML traz consigo a necessidade de uma gestão acurada tanto da umidade quanto do TML. Neste âmbito, a Vale S/A desenvolveu modelos preditivos para os dois parâmetros, utilizando técnicas avançadas de aprendizado de máquina, a fim de prover previsibilidade para estas variáveis. Apesar de apresentar bom desempenho médio, o preditor de TML apresenta pontualmente erro acima do limite definido como aceitável. O presente trabalho teve por objetivo avaliar a possibilidade de melhorar o desempenho do preditor de TML utilizado Corredor Norte da Vale S/A, através da inclusão de novos atributos ao modelo. Para tal, foram coletadas 136 amostras de produto fino de minério de ferro (<19 mm), obtendo-se para cada uma delas os atributos utilizados no atual preditor de TML. Realizou-se a caracterização mineralógica e granulométrica gerando novos atributos para modelagem. A base de dados gerada foi submetida a análise estatística exploratória e modelagem utilizando inteligência artificial, com emprego de dezenas de tipos de modelos preditivos. Através das técnicas SHAP e “todos os modelos possíveis” foram selecionados os atributos e modelos de melhor desempenho. Os resultados demonstraram que a introdução de novos atributos mineralógicos e granulométricos não melhorou, de forma significativa, o desempenho em comparação com o caso base (modelo atual). Porém, o estudo chegou a um subconjunto de atributos que já são atualmente utilizados pelo preditor em uso, que reduziu o erro absoluto máximo de predição em 0,13 p.p., o que é significativo para gestão do TML e pode ser implantado como uma melhoria.

Palavras-chave: Limite de Umidade Transportável. Modelos preditivos.

Fase da Cadeia: Cadeia de valor.

ABSTRACT

The advent of the requirement to determine the Transportable Moisture Limit (TML) in order to ensure the safety of maritime transportation of mineral products has brought new challenges to the mining industry. The requirement to ship the ore with moisture content below the TML brings the need for accurate management of both moisture and TML. In this context, Vale S/A has developed predictive models for both parameters using advanced machine learning techniques to provide predictability for these variables. Despite achieving good average performance, the TML predictor occasionally exhibits errors above the defined acceptable limit. This study aims to evaluate the possibility of improving the performance of the TML predictor for the Northern Corridor of Vale S/A by including new attributes in the model. To do this, 136 samples of iron ore fines (< 19 mm) were collected, and the attributes used in the current TML predictor were obtained for each of them. Mineralogical and granulometric characterization was performed, generating new attributes for modelling. The generated database underwent exploratory statistical analysis and modelling using artificial intelligence, employing dozens of predictive model types. Using the SHAP and all possible models techniques, the attributes and models with the best performance have been selected. The results showed that the introduction of new mineralogical and granulometric attributes did not significantly improve the performance compared to the baseline case (current model). However, the study identified a subset of attributes which are currently used by the predictor that reduced the maximum absolute prediction error by 0.13 percentage points, which is significant for TML management and can be implemented as an improvement.

Keywords: Transportable Moisture Limit. Predictive models.