

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Estudo do uso da Técnica de Redes Neurais Artificiais em Engenharia Geotécnica

Katia Vanessa Bicalho
Professora Titular, UFES, Vitoria, Brasil, katia.bicalho@ufes.br

Morgana Moreschi
Mestranda, UFES, Vitoria, morgana.moreschi@edu.ufes.br

Janaina S. Hastenreiter Kuster
Mestranda, UFES, Vitoria, janaina.hastenreiter@gmail.com

Amandio G. de Oliveira Filho
Mestre, UFES, Vitoria, amandio.oliveira@aluno.ufes.br

Wilian Hisatugu
Professor, UFES, Vitoria, Wilian.hisatugu@ufes.br

RESUMO: Este artigo discute a aplicação da técnica de redes neurais artificiais (RNAs) para a previsão de propriedades geotécnicas baseada em propriedades índices previamente conhecidas. O uso de RNAs em solos de diferentes regiões é avaliado para estimativa do índice de compressão, utilizado para calcular o recalque de adensamento primário, e do coeficiente de permeabilidade de solos saturados. O artigo também discute o uso de RNAs para determinação dos valores de limites de consistência de solos de granulometria fina. Os estudos discutidos neste artigo mostram que as RNAs têm potencial de aplicação como alternativa às correlações empíricas obtidas por regressão linear para previsão de propriedades de solos a partir de parâmetros previamente determinados para solos de diferentes regiões do Brasil e outros países.

PALAVRAS-CHAVE: Redes neurais artificiais, índice de compressão, permeabilidade, limites de consistência de solos.

ABSTRACT: This article discusses the application of the technique of artificial neural networks (ANNs) for the prediction of geotechnical properties based on previously known index properties. The use of ANNs in soils from different regions is evaluated to estimate the compression index, used to calculate the consolidation settlement, and permeability of saturated soils. The article also discusses the use of ANNs for determination of consistency limits of fine-grained soils. The studies discussed in this article showed that ANNs have potential application as an alternative to empirical correlations in predicting properties of soils as a function of their index properties for soils from different regions of Brazil and other countries.

KEYWORDS: Artificial neural networks, compression index, permeability, consistency limits of soils.

1 Introdução

A aplicação da técnica de redes neurais artificiais (RNAs) tem sido difundida e investigada em diversas áreas do conhecimento, inclusive na engenharia civil geotécnica. As potencialidades do uso da técnica de RNAs em engenharia geotécnica têm sido observadas na modelagem do comportamento mecânico e hidráulico de solos e na análise de problemas envolvendo engenharia geotécnica (Shahin et al., 2001, 2004, Pooya et al. 2009, Park e Lee 2011, Juwaied, 2018). Diversas correlações empíricas têm sido publicadas na literatura para estimar propriedades mecânicas e hidráulicas de solos de diferentes características em função de suas



propriedades índices. A multiplicidade e variabilidade das correlações empíricas obtidas por regressão previamente publicadas indicam a necessidade de critérios de seleção e uso das mesmas.

RNAs podem ser caracterizadas como 'modelos empíricos computacionais' inspirados na biologia com a capacidade de se adaptar e aprender, para generalizar ou agrupar ou organizar grandes quantidade de dados por meio de algoritmos de aprendizado de máquina inspirados na estrutura de neurônios do cérebro. Uma vantagem das RNAs é que os modelos são capazes de se adaptar quando expostos a novos dados, uma vez que o software é programado para aprender com avaliações anteriores realizadas. As publicações prévias sobre aplicações das RNAs em engenharia geotécnica indicam bons resultados de desempenho geralmente avaliado a partir de técnicas estatísticas (Shahin et al., 2001, 2004, Pooya et al. 2009, Park e Lee 2011, Juwaied, 2018). Este trabalho discute a aplicação da técnica de redes neurais artificiais (RNA) para a previsão de propriedades geotécnicas baseada em propriedades índices previamente conhecidas. Neste artigo o uso de RNAs em solos de diferentes regiões do Brasil e outros países é avaliado nas seguintes propriedades geotécnicas: compressibilidade unidimensional e coeficiente de permeabilidade. Nos últimos, anos tem-se utilizado o termo condutividade hidráulica para se referir à permeabilidade do solo em uma condição não saturada e o termo coeficiente de permeabilidade para se referir à condição saturada, e essa terminologia será adotada neste capítulo. O artigo também discute o uso de RNAs para estimar limites de consistência de solos de granulometria fina. Detalhes sobre os modelos de RNAs utilizados podem ser obtidos nas publicações citadas.

2 Técnica de redes neurais artificiais (RNAs)

Redes neurais artificiais (RNAs) têm sido usadas em engenharia geotécnica para previsões de características geotécnicas de solos a partir de propriedades previamente conhecidas. Desde o trabalho de Rumelhart, Hilton e Williams (1986) sobre o algoritmo *backpropagation*, a aplicação de RNAs ganhou destaque no meio acadêmico, com publicações sobre o uso de RNAs na solução de problemas geotécnicos com relativo sucesso.

As RNAs são geralmente estruturadas nas seguintes bases: armazenar conhecimento; aplicar o conhecimento adquirido na solução de problemas propostos; e se aperfeiçoar e adquirir novos conhecimentos a partir da experimentação. Essas funções são inspiradas no funcionamento do cérebro humano, de forma que a sua realização seja possível com o emprego de recursos computacionais que permitam a reprodução das experiências sinápticas de comunicação entre neurônios. A aplicação de uma rede neural obedece à necessidade do uso de uma técnica de otimização de processamento de dados diversos, para a solução de um problema. Por essa razão, o conjunto de dados de entrada deve ser escolhido com atenção, de forma a ser representativo no domínio de interesse do problema a ser estudado. Superadas as etapas de seleção dos dados representativos do problema a ser modelado, topologia da rede e pré-processamento das variáveis de entrada e saída, segue-se para a fase de treinamento e teste da rede, que consiste em atividade de definição dos pesos adequados para melhorar o desempenho da RNA.

3 Alguns exemplos de aplicações de RNAs em engenharia geotécnica

3.1 Uso de RNAs para estimar limites de consistência de solos

Os valores dos limites de consistência de solos de granulometria fina são usados para identificação, descrição e classificação e como indicadores para avaliação preliminar de propriedades mecânicas desses solos (Mitchell e Soga, 2005). Os valores do Limite de liquidez (LL) e Limite de plasticidade (LP), quando avaliados junto com a análise granulométrica do material, permitem classificar a amostra de solo. É importante especificar o procedimento e equipamento utilizado para determinar o LL de um solo fino. O uso do método do Cone de Penetração para determinação do limite de liquidez, LL_p, de solos argilosos é uma alternativa atrativa por reduzir a interferência do operador nos resultados dos ensaios. Entretanto o extenso banco de dados disponível com correlações entre os valores do LL obtidos pelo método de Casagrande, LL_c, e diferentes propriedades geotécnicas motivam o estudo de comparações entre os valores medidos do LL_c e LL_p para diversos solos finos.



Zolfaghari *et al.* (2015) avaliaram o uso de dados de solos do Irã para previsão de valores de LL usando modelos de RNAs. Os valores de avaliação de desempenho sugerem que a técnica de RNA pode ter um desempenho aceitável para a previsão dos limites de consistência dos solos investigados, principalmente, quando associados a outras propriedades do solo, índices topográficos e de sensoriamento remoto, utilizados como dados de entrada. Os pesquisadores concluíram que os modelos de RNAs forneceram estimativas aceitáveis dos limites de consistência em escala regional, e que além do tamanho das partículas, teor de argila, e do tipo de argila, o teor de matéria orgânica influencia muito os valores de limites de consistência. Diaz *et al.* (2021) utilizaram diferentes algoritmos de aprendizado de máquina para correlacionar valores de LLp e LLc levando em consideração outros parâmetros previamente determinados como LP e granulometria. Os dados investigados incluem solos de diversas regiões e valores de plasticidade. Os resultados demonstram o potencial das técnicas de aprendizado de máquina para relacionar os valores de LL obtidos pelos métodos de Casagrande e do Cone de Penetração em solos finos de baixa a média plasticidade considerando a influência de outros parâmetros previamente determinados, principalmente para valores de LL > 30% para os quais abordagens clássicas de regressão linear fornecem piores ajustes de desempenho.

Arama *et al.* (2021) investigaram uma base de dados de 1253 diferentes amostras de solos argilosos de alta plasticidade localizados na Turquia. Análises de regressão e técnicas de inteligência artificial foram utilizadas para obtenção dos valores de LP e IP a partir dos resultados de LL, objetivando uma relação direta entre LL e IP, e permitindo a eliminação da determinação de LP na classificação dos solos. Os valores de LL e IP foram considerados como entrada e saída de dados, respectivamente, realizando a pré-seleção entre diferentes parâmetros de solo (compactação, profundidade, conteúdo de finos). Foi utilizada uma estrutura de rede multicamadas e *feed-forwarded*, e o treinamento do modelo também foi realizado por meio do algoritmo de retro propagação de Levenberg-Marquardt. Os pesquisadores concluíram que a aplicação das RNAs dá resultados mais precisos que as expressões empíricas obtidas por regressão para a determinação do valor do índice de plasticidade dos solos argilosos investigados.

Edib *et al.* (2021) utilizaram as técnicas de programação genética (PG) e RNA para estimar os limites de consistência LL e LP de um solo não saturado tratado com um ligante conhecido como cimento híbrido. Os pesquisadores avaliaram 121 amostras de solo que foram divididas entre dados de treinamento (81 amostras) e dados de validação (40 amostras). Foi utilizado uma RNA simples de retro propagação, sem camadas ocultas e função de ativação linear, para comparar a precisão das técnicas. Embora a simplicidade da configuração da RNA, segundo os pesquisadores, o modelo foi capaz de determinar as relações entre as entradas e as saídas com precisão. Os resultados de previsão mostraram que a técnica de RNAs superou a técnica de programação genética em termos de avaliação de desempenho conduzida por métodos estatísticos que utilizaram a soma do erro quadrático (RMSE) e o coeficiente de determinação (R^2).

3.2 Uso de RNAs para estimar compressibilidade unidimensional de solos moles

O índice de compressão C_c é utilizado para calcular o recalque de adensamento primário de solos moles quando solicitados por carregamentos externos. Diversas correlações empíricas têm sido publicadas na literatura para estimar valores de C_c para diferentes solos moles em função de suas propriedades índices como limite de liquidez (LL_c), índice de plasticidade (IP), índice de vazios inicial (e_0) e umidade natural (w_n). A multiplicidade e variabilidade de correlações empíricas obtidas por regressão linear previamente publicadas (Azzouz *et al.* 1976, Kootahi e Morati 2016) indicam a necessidade de critérios de seleção e uso das mesmas. Geralmente os pesquisadores utilizam LL_c , obtido pelo método de Casagrande, em modelos empíricos de regressão linear para estimar valores de C_c de solos moles.

Com relação à aplicação de RNAs em estudos de previsão do C_c de argilas moles, Kolay, Rosmina e Ling (2008) e Ozer, Isik e Orhan (2008) treinaram redes neurais artificiais com propriedades índices do solo para estimar C_c ; Park e Lee (2011) avaliaram a previsão de C_c a partir de RNA empregando as propriedades índices e_0 , LL_c , w_n e IP; Kalantary e Kordnaeij (2012) analisaram centenas de amostras de argilas do norte do Irã com aplicação de redes neurais tendo encontrado bons resultados com o treinamento de RNA com as variáveis w_n , e_0 , LL_c e G_s ; Kurnaz *et al.* (2016) analisaram 246 amostras de solo, a partir das propriedades índices do solo, como LL_c , IP, e_0 e w_n e obtiveram melhores resultados de previsão de C_c do que com o uso da análise de regressão linear; Oliveira Filho *et al.* (2020) avaliaram o desempenho de previsão de RNA comparado com correlações empíricas lineares obtidas a partir do banco de dados compilado e investigado



(i.e., resultados de 225 ensaios de adensamento (edômetro) e propriedades índices correspondentes de diversos solos da costa brasileira). Além disso, correlações apresentadas na literatura também foram utilizadas e avaliadas por meio de diferentes técnicas estatísticas. No geral, para o conjunto de dados organizado, a técnica de RNAs superou as correlações empíricas, destacando a fragilidade e as limitações de correlações empíricas obtidas pela análise de regressão linear simples e múltiplas.

Os resultados apresentados mostram que as RNAs treinadas têm potencial de aplicação para as estimativas dos valores de C_c de solos moles como alternativa às correlações empíricas durante a investigação preliminar de adequação de estudos de geotecnia. Conforme esperado as correlações empíricas são melhores aplicadas ao local de origem. Pela capacidade de aprender, os resultados de RNA adaptados são menos influenciados pela variabilidade natural do local geográfico, geológico e geotécnico. Além disso, a técnica de RNAs pode ser atualizada para obter melhores resultados, acrescentando novos dados de treinamento com valores de C_c medidos e propriedades índices correspondentes disponíveis. Assim, o uso de RNAs é recomendado para avaliar a variação dos valores estimados de C_c de solos moles da costa brasileira e de outros países.

3.3 Uso de RNAs para estimar coeficiente de permeabilidade de solos saturados

O fluxo de água líquida no solo é caracterizado pela Lei de Darcy, uma abordagem macroscópica que considera que a taxa de fluxo hidráulico é linearmente proporcional ao gradiente hidráulico (Masrouri; Bicalho; Kawai, 2008). A constante de proporcionalidade da Lei de Darcy é conhecida como coeficiente de permeabilidade e, para solos em condição de saturação completa, é representada por k_{sat} .

O valor de k_{sat} é normalmente determinado a partir de resultados de ensaios conduzidos em campo ou laboratório. Na ausência ou limitação de resultados de ensaios, o comportamento hidráulico do solo saturado pode ser estimado por correlações empíricas e técnicas de inteligência artificial em função de propriedades índices das amostras desses solos. Nesse sentido, a RNA representa uma ferramenta adicional para métodos empíricos convencionais de regressão e que permite o processamento de uma grande quantidade de dados, com aplicabilidade a problemas complexos e com alto grau de não linearidade.

Várias pesquisas têm sido conduzidas com o objetivo de avaliar o uso de RNA para a previsão de k_{sat} a partir de propriedades índices de mais simples obtenção. Inicialmente, constata-se a importância da fase de pré-processamento; por ser um parâmetro influenciado por diversas características do solo, pesquisadores têm evidenciado a melhora no desempenho das RNAs após a realização de procedimentos na fase de pré-processamento dos dados, como análise de aderência pelo Teste Gama, avaliação do grau de multicolinearidade (Singh et al., 2020; Williams; Ojuri, 2021), enquanto Park (2011) utilizou o coeficiente de correlação de Spearman para quantificar a relação entre as variáveis de entrada e saída a fim de ajustar um melhor modelo.

Verifica-se que pesquisas têm se concentrado no uso de modelos de RNA para estimativa de k_{sat} a partir de dados que caracterizam a distribuição granulométrica do solo, como teor de finos (argila e/ou silte), teor de areia, teor de matéria orgânica, e dados como densidade real dos grãos, peso específico aparente seco, índice de plasticidade e limite de liquidez (Akbulut, 2005; Tizpa et al., 2014; Kashani et al. 2020; Singh et al., 2020; Trejo-Alonso et al., 2021; Williams; Ojuri, 2021).

Singh et al. (2020) utilizaram um modelo *perceptron* de multicamadas (MLP), com algoritmo Levenberg-Marquardt, para previsão de k_{sat} a partir de dados de granulometria (percentual de argila, silte, areia), teor de matéria orgânica, densidade real dos grãos e peso específico aparente seco. O desempenho das RNAs foi comparado ao de outras técnicas de inteligência artificial: Máquinas de Vetores de Suporte (SVM), sistema de inferência neuro-fuzzy coativado (CANFIS), árvore aleatória e árvore de decisão. Parâmetros estatísticos, dentre os quais a raiz do erro quadrático médio e o coeficiente de correlação, por exemplo, foram utilizados para avaliação dos modelos. Ainda que o desempenho das RNA tenha sido superado pelas demais técnicas, os pesquisadores destacaram que todos os modelos investigados apresentaram resultados satisfatórios para previsão do coeficiente de permeabilidade das amostras saturadas ensaiadas. Além disso, ao submeterem os modelos à otimização com transformada *Wavelet*, destacaram a melhora no desempenho dos modelos investigados na pesquisa.

Williams e Ojuri (2021) desenvolveram modelos de RNA, do tipo *perceptron* de multicamadas, com algoritmo de retropropagação de erro, para prever o coeficiente de permeabilidade de amostras saturadas e



compararam os resultados obtidos com análise de regressão linear múltipla. Dados de granulometria (teor de areia, de finos e de argila), índice de plasticidade e características de compactação (como umidade ótima e peso específico aparente seco máximo) foram utilizados como variáveis de entrada. Os resultados obtidos por Williams e Ojuri (2021) mostraram que as RNAs são uma excelente ferramenta para descrever relações complexas e não lineares entre atributos e que, tendo um banco de dados cuidadosamente selecionado, é possível a condução da fase de treinamento e validação que conduza a resultados precisos da rede.

Desenvolver um modelo em RNA para previsão do coeficiente de permeabilidade em solos saturados de matriz granular foi o objetivo de Akbulut (2005). Os dados de entrada do modelo foram o teor de finos, o teor de areia, o teor de pedregulho, o diâmetro efetivo (d_{10}), o diâmetro médio das partículas (d_{50}) e o índice de vazios do solo. Os resultados da RNA foram comparados com regressão linear múltipla e com as fórmulas empíricas de Hazen e de Slichter. Os resultados da pesquisa de Akbulut (2005) mostraram que tanto a RNA treinada com a arquitetura 6-12-1 e a regressão linear múltipla foram capazes de prever o coeficiente de permeabilidade das amostras a partir de informações de granulometria, índice de vazios e composição do solo. E, o desempenho das RNAs foi superior ao apresentado pela regressão linear múltipla.

Conclui-se, os resultados apresentados na literatura demonstram o desempenho satisfatório das RNAs para a previsão de k_{sat} a partir de características texturais de fácil obtenção. E, destaca-se a importância da etapa de pré-processamento que envolve preparação, organização e estruturação dos dados para a seleção de variáveis com maior influência no modelo considerado e a possibilidade de melhorias de desempenho com o uso de modelos de RNA híbridos.

4 Conclusões

Os estudos discutidos neste artigo mostram que as RNAs treinadas têm potencial de aplicação como alternativa às análises empíricas de regressão na estimativa de propriedades geotécnicas para solos de diferentes regiões do Brasil e outros países. Conforme esperado as correlações empíricas são melhores aplicadas ao local de origem. Pela capacidade de aprender, os resultados de RNA adaptados são menos influenciados pela variabilidade natural do local geográfico, geológico e geotécnico. Além disso, a técnica da RNA sempre pode ser atualizada para obter melhores resultados, apresentando novos dados de treinamento à medida que novos resultados experimentais se tornam disponíveis. E, destaca-se a importância do pré-processamento para a seleção de variáveis com maior influência para a construção do modelo e melhorias do desempenho com o uso de modelos de RNA híbridos. Importante mencionar que modelos para estimativas de propriedades dos solos devem ser usados em projetos geotécnicos durante estudos preliminares e/ou investigações complementares de campo.

AGRADECIMENTOS

A primeira autora agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akbulut, S. (2005) Artificial neural networks for predicting the hydraulic conductivity of coarse-grained soils. *Eurasian Soil Science*, 38 (4), p. 392-398.
- Arama, Z. A., Yucel, M., Akin, M. S., Ilknur, A. (2021) A comparative of study on the application of artificial intelligence networks versus regression analysis for the prediction of clay plasticity. *Arabian Journal of Geosciences*, 14 (534), p.1-16.
- Azzouz, A. S.; Krizek, R. J. & Corotis, R. B. (1976). Regression analysis of soil compressibility. Tokyo. *Soils Foundations*, 16(2), p. 19-29.
- Diaz, E.; Pastor, J. L.; Rabat, Á; Tomás, R. (2021) Machine learning techniques for relating liquid limit obtained by Casagrande cup and fall cone test in low-medium plasticity fine grained soils. *Engineering Geology*, 294, p. 1-10.



- Edib, A. M., Nwobia, L. I., Onyelowe, K. C., Aneke, F. I. (2021) Predicting Nanobinder-Improved Unsaturated Soil Consistency Limits Using Genetic Programming and Artificial Neural Networks. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, p. 1-13.
- Juwaied, N. S (2018). Applications of artificial intelligence in geotechnical engineering. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13 (8), p. 2764-2785.
- Kalantary, F.; Kordnaeij, A. (2012). Prediction of compression index using artificial neural network. *Scientific Research and Essays*, 7(31), p. 2835-2848.
- Kashani, M. H., et al. (2020) Multiple AI model integration strategy – Application to saturated hydraulic conductivity prediction from easily available soil properties. *Soil & Tillage Research*, 196, p. 1-10.
- Kolay, P. K. Rosmina, A. B; Ling, N. W. (2008) Prediction of compression index for tropical soil by using artificial neural network. *International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, p. 1-6
- Kootahi, K.; Moradi, G. (2016). Evaluation of compression index of marine fine-grained soils by the use of index tests. *Marine Georesources & Geotechnology*, 35(4), p. 548-570.
- Kurnaz, T.F.; Dagdeviren, U.; Yildiz, M. & Ozkan, O. (2016). Prediction of compressibility parameters of the soils using artificial neural network. *Springer Plus*, 5(1801):1-11.
- Masrouri, F., Bicalho, K. V., Kawai, K. (2008) Laboratory Hydraulic Testing in Unsaturated Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26, p. 691-704.
- Mitchell, J. K., Soga, K. (2005) *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley & Sons. 3rd ed.
- Oliveira Filho, A. G., Totola, L. B., Bicalho, K. V., Hisatugu, W. H. (2020) Prediction of Compression Index of Soft Soils from the Brazilian Coast Using Artificial Neural Networks and Empirical Correlations. *Soils and Rocks*, 43 (1), p. 109-121.
- Ozer, M.; Isik, N.S. & Orhan, M. (2008). Statistical and neural network assessment of the compression index of clay-bearing soils. *Bull Eng Geol Environ.*, 67(4), p. 537- 545.
- Park, H. I. (2011) Development of neural network model to estimate the permeability coefficient of soil. *Marine Georesources & Geotechnology*, 29 (4), p. 267-278.
- Park, H.I.; Lee, S.R. (2011). Evaluation of the compression index of soils using an artificial neural network. *Computers and Geotechnics*, 38(4), p. 472-481.
- Pooya Nejad F, Jaksa MB, Kakhi M, McCabe BA. (2009). Prediction of pile settlement using artificial neural networks based on standard penetration test data. *Computers and Geotechnics* 36:1125e33.
- Ranasinghe R.A.T.M., Jaksa M.B., Kuo Y.L., Pooya Nejad F (2017). Application of artificial neural networks for predicting the impact of rolling dynamic compaction using dynamic cone penetrometer test results. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(2). p.340-349
- Rumelhart, D.E.; Hilton, G.E. & Williams, R.J. (1986). Learning representation by back-propagation errors. *Nature*, 323(6088), p. 533-536.
- Shahin M A, Jaksa, M B, Maier H R (2001). Artificial neural network applications in geotechnical engineering. *Australian Geomechanics*, p.49-62.
- Shahin MA, Maier HR, Jaksa MB. (2004). Data division for developing neural networks applied to geotechnical engineering. *Journal of Computing in Civil Engineering* 4;18(2):105e14.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
 23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
 23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
 COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

- Singh, V. K., Devendra K, Kashyap PS, Singh, PK, Kumar, A, Singh, SK (2020) Modelling of soil permeability using different data driven algorithms based on physical properties of soil. *Journal of Hydrology*, 580, p. 1-10.
- Tizpa, P., Chenari, RJ, Karimpour-Fard, M, Machado, S (2014). ANN prediction of some geotechnical properties of soil from their index parameters. *Arabian Journal of Geosciences*, 8 (5), p.2911-2920.
- Trejo-Alonso, J., Fuentes, C., Chávez, C, Quevedo A , Gutierrez-Lopez A., González-Correa B. (2021) Saturated hydraulic conductivity estimation using artificial neural networks. *Water*, 13 (5), 705. p. 1-15.
- Williams, C. G., Ojuri, O. O. (2021) Predictive modelling of soil's hydraulic conductivity using artificial neural network and multiple linear regression. *SN Applied Sciences*, 3 (152), n.p..
- Zolfaghari, Z., Mosaddeghi, M. R., Ayoubi, S. (2015) ANN-based pedotransfer and soil spatial prediction functions for predicting Atterberg consistency limits and indices from easily available properties at the watershed scale in western Iran. *British Society of Soil Science, Soil Use and Management*, p. 1-13.