

APLICAÇÃO DE UM MODELO DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL HÍBRIDO (NEURO-FUZZY) NA PREVISÃO DO POTENCIAL DE RUPTURA DE TALUDES

Marcos Antonio da Silva¹

Ana Cristina Castro Fontenla Sieira²

Resumo

A estabilidade de taludes naturais é um tema de grande interesse ao engenheiro geotécnico, face às significativas perdas econômicas, e até mesmo humanas, resultantes da ruptura de taludes. Estima-se que a deflagração de escorregamentos já provocou milhares de mortes, e dezenas de bilhões de dólares em prejuízos anuais em todo o mundo. Os fenômenos de instabilização de encostas são condicionados por muitos fatores, como o clima, a litologia e as estruturas das rochas, a morfologia, a ação antrópica e outros. A análise dos condicionantes geológicos e geotécnicos de escorregamentos proporciona a apreciação de cada um dos fatores envolvidos nos processos de instabilização de encostas, permitindo a obtenção de resultados de interesse, no que diz respeito ao modo de atuação destes fatores. O presente trabalho tem como objetivo a utilização de um sistema híbrido que utiliza a Rede Neural e a Lógica Nebulosa (Neuro-Fuzzy) para criação de um modelo que, de forma qualitativa, forneça uma previsão do potencial de ruptura de taludes. Para o cumprimento deste objetivo, foram estudados os fatores envolvidos nos processos de instabilização de encostas, e a forma como estes fatores se inter-relacionam. Análises paramétricas foram executadas com o objetivo fornecer dados para o modelo Neuro-Fuzzy. Após a elaboração do modelo, apresenta-se um caso histórico bem documentado para a validação do mesmo. Dentre as principais conclusões, destaca-se a potencialidade da Modelagem Híbrida Neuro-Fuzzy na previsão do potencial de ruptura de taludes, aparecendo como uma ferramenta capaz de auxiliar na detecção de taludes com potencial de ruptura.

Palavras-chave: Escorregamento de Talude; Neuro-Fuzzy; ANFIS.

¹Doutor em Engenharia Civil pela UERJ. Docente no UGB/FERP.

²Doutora em Engenharia Civil pela PUC-RIO. Docente na UERJ.

APPLICATION OF A HYBRID COMPUTATIONAL INTELLIGENCE MODEL (NEURO-FUZZY) IN FORECASTING THE SLOPE BREAKING POTENTIAL

Abstract

The stability of slopes is a topic of great interest to the geotechnical engineer, given the significant economic losses, and even human, resulting from the slopes collapse. It is estimated that the landslides outbreak has already caused thousands of deaths and tens of billions of dollars in annual losses worldwide. The phenomena of instability of slopes are conditioned by many factors, such as climate, the lithology and structures of rock, the morphology, the anthropic and others. The analysis of geological and geotechnical conditions of landslides provides an appraisal of each of the factors involved in the processes of instability of slopes, allowing the achievement of results of interest with regard to the mode of action of factors. The current work aims at the use a Hybrid system that uses the Neural Network and Fuzzic Logic (Neuro-Fuzzy) to create a model that, in qualitative form, provides a prediction of the potential of slope rupture. To fulfill this objective, we studied the factors involved in the processes of instability of slopes, and how these factors are interrelated. Parametric analyzes were carried out to provide data for the Neuro-Fuzzy model. It is presented in this work, one history case well documented for the validation of the Neuro-Fuzzy Model and among the main findings includes the capability of Hybrid Neuro-Fuzzy Modeling in predicting the potential of slope rupture, appearing as a tool capable of assisting in the detection of slopes with potential for rupture.

Keywords: Slope Landslides. Neuro-Fuzzy. ANFIS.

Introdução

Os escorregamentos, também conhecidos como deslizamentos, são processos de movimentos de massa envolvendo materiais que recobrem as superfícies das vertentes ou encostas, tais como solos, rochas e vegetação. (Varnes, 1958; Guidicini e Nieble, 1983; e Tominaga et al. 2009)

No Brasil, o acelerado crescimento populacional verificado nas últimas décadas levou a ocupação e urbanização de áreas, muitas vezes impróprias à ocupação, e

quando os escorregamentos de solo ocorrem nessas áreas, provocam prejuízos diversos que vão desde danos materiais até a inestimável perda de vidas humanas, e quando isto ocorre passamos a chamá-lo de desastre.

A Defesa Civil Nacional define o desastre como sendo “resultado de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, sobre um ecossistema (vulnerável), causando danos humanos, materiais e/ou ambientais e consequentes prejuízos econômicos e sociais” (Castro, 1998). No Estado do Rio de Janeiro, os desastres devido a escorregamento de solo são recorrentes e ocorrem, principalmente, associados a eventos pluviométricos intensos e prolongados. Nos últimos anos diversas cidades do Estado sofreram com escorregamentos provocados por chuvas intensas, dentre elas podemos citar Angra dos Reis (2010), Niterói (2010), Nova Friburgo (2011), Petrópolis (2011), Rio de Janeiro (2010 e 2012), e Teresópolis (2011).

O Anuário Brasileiro de Desastres Naturais calcula que aproximadamente 4 milhões de pessoas foram afetadas por enxurradas, deslizamentos, alagamentos e inundações no período de 1991 a 2012 no Estado do Rio de Janeiro (CEPED, 2013). Em resposta a esses impactos na região, em 1996 foi criado o sistema de alerta de chuvas do município chamado de Alerta Rio (D'Órsi, et al., 2015). O Alerta RIO tem como objetivo auxiliar no monitoramento de chuvas na cidade, principalmente nas áreas de riscos de deslizamento designadas pela Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro – GEO-RIO.

O conhecimento de todos os processos que provocam os escorregamentos de solo nas encostas é de extrema importância para que novas situações de riscos geotécnicos possam ser minimizadas ou mesmo evitadas. O estudo e a compreensão desses processos servem de subsídio para: o aprimoramento e adequação de métodos de análise e projetos de estabilização; o planejamento e concepção de novas obras a serem implantadas; e tomadas de decisão emergenciais, tais como a emissão de alertas e remoção da população que se encontra nas áreas de risco.

Diante desta situação, foi vislumbrada a oportunidade de elaborar uma ferramenta, que utilizará diversos parâmetros geotécnicos (diferentemente do sistema Alerta RIO que avalia apenas o índice pluviométrico), para definir o potencial de ruptura de taludes de forma a auxiliar na tomada de decisão para possíveis

intervenções em áreas onde exista a possibilidade de escorregamento de solo, minimizando os desastres.

Os fenômenos de instabilização de encostas são condicionados por muitos fatores, como o clima, a litologia e as estruturas de arcabouço rochoso, a morfologia, a ação do homem e outros. A análise dos condicionantes geológicos e geotécnicos envolvidos em escorregamentos proporciona a apreciação de cada um dos fatores envolvidos nos processos de instabilização, permitindo uma melhor compreensão em relação ao modo de atuação destes fatores. Desastres naturais, quando atingem áreas povoadas, sempre provocam grande comoção, todavia abrem a oportunidade para reflexão com relação ao que poderia ter sido feito pelos fatores envolvidos, como forma de evitar ou ao menos mitigar as consequências danosas do evento.

Os fenômenos naturais que ocorreram em janeiro de 2011 na região serrana do Rio de Janeiro e que culminaram na morte de mais de 900 pessoas, deixando 215 desaparecidos e mais de 35.000 pessoas desabrigadas. Da mesma forma, a chuva que assolou a região metropolitana do Estado do Rio de Janeiro (Figura 1), nos dias 5 e 6 de abril de 2010, em 24h choveu 280 milímetros (o dobro da média histórica para o mês de abril inteiro), provocando centenas de deslizamentos, onde o número de mortos foi superior a 250 e 10.800 pessoas perderam suas casas. Estes fenômenos resultaram em uma tragédia que merece uma análise mais aprofundada, tanto do ponto de vista técnico, quanto político e social.

Figura 1 – (a) Escorregamento na Comunidade Cerro Corá, Rio de Janeiro/RJ - 2010.



Fonte: Pesquisa do Autor

Figura 2 – (b) Comunidade Jonatas Botelho - Cubango, Niterói/RJ - 2010.



Fonte: Pesquisa do Autor

Muito tem se falado das carências e deficiências de ações na gestão das questões públicas neste caso. Muito já se estudou a partir de acidentes como estes que ocorreram nos últimos anos neste mesmo Estado e ultimamente a mídia está repleta de casos de insucessos de gestão pública. Mas, por que ainda se sofre tanto com este tipo de situação? Quantas mais tragédias como essa, que se viu no Rio de Janeiro, serão necessárias para promover uma transformação na forma das pessoas/governos reagirem frente a situações de risco? (De Castilho et al., 2012). Quais as técnicas e modelos confiáveis para efetuar o monitoramento das encostas no Município do Rio de Janeiro? Quais os sistemas de alerta de risco implantados no Município do Rio de Janeiro? Como melhorar os Modelos de Previsão de Ruptura de Taludes em uso no Município do Rio de Janeiro?

Objetivo do Estudo

O objetivo do presente estudo é a utilização de um modelo híbrido usando Redes Neurais Artificiais (RNA) e Lógica Nebulosa (LN) para fornecer, de forma qualitativa, uma Previsão de uma Potencial Ruptura de Taludes no Município do Rio

de Janeiro, que tem relevo susceptível à ocorrência de escorregamentos de massas de solo.

Para a validação do modelo foi utilizado um Caso Histórico bem documentado que, de forma qualitativa, permitiu verificar e aferir se a previsão de áreas potencialmente instáveis em solo residual através da modelagem híbrida foi compatível com os dados apresentados no caso Histórico.

Com o intuito de padronizar a tomada de decisões, a partir da utilização dos dados do modelo híbrido Neuro-Fuzzy criado no presente trabalho, foram estabelecidos critérios de priorização de atividades emergenciais, subdividindo as previsões de ruptura de taludes em níveis e determinando as intervenções a serem adotadas em cada nível. Cabe ressaltar, que os resultados fornecidos pela modelagem Neuro-Fuzzy não substituem os resultados obtidos pelos métodos clássicos de análise de estabilidade (e.g. análise por equilíbrio limite ou análise por tensão x deformação), que de forma determinística avaliam a possibilidade de ocorrência de escorregamento de massa de solo presente em talude natural ou construído. O dado de saída do modelo Neuro-Fuzzy é um índice percentual, qualitativo, referente a uma potencial ruptura de taludes, que quando comparado com a tabela de protocolos emergenciais embasa e facilita a tomada de decisões por parte do técnico que está analisando a área estudada.

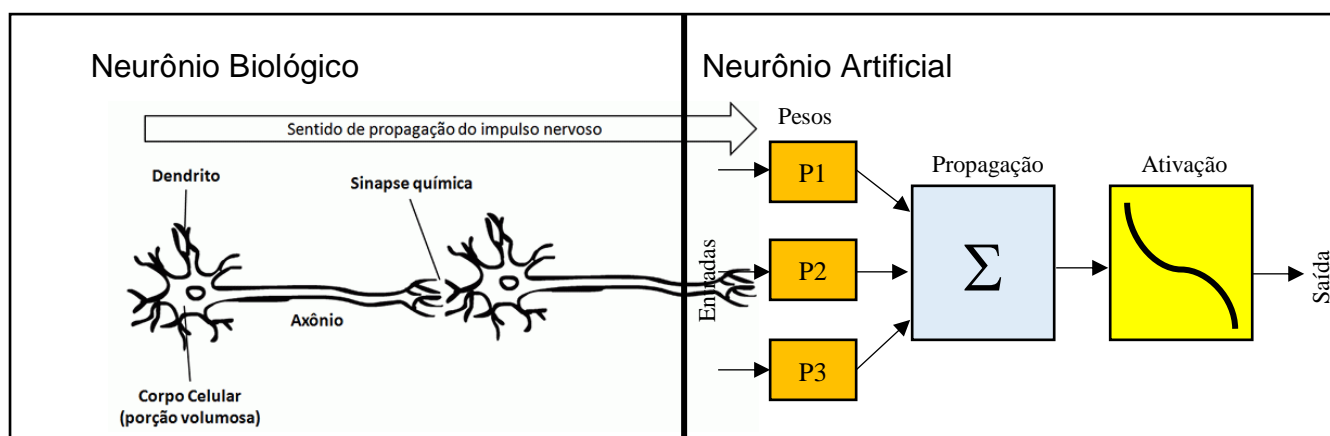
Inteligência Computacional

Segundo Fernandes (2003), a Inteligência Artificial é um tipo de inteligência produzida pelo homem para dotar as máquinas de algum tipo de habilidade que simule a inteligência humana.

Neste sentido, a técnica de inteligência computacional denominada Rede Neural Artificial (RNA), é formada por algoritmos que apresentam um modelo inspirado na estrutura neural do cérebro humano, capazes de adquirir conhecimento através de treinamento.

As RNAs consistem em um método de solucionar problemas de inteligência artificial, construindo um sistema que tenha circuitos que simulem o cérebro humano, inclusive seu comportamento, ou seja, aprendendo, errando e fazendo descobertas. São técnicas computacionais que apresentam um modelo inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência. Uma grande rede neural artificial pode ter centenas ou milhares de unidades de processamento, enquanto que o cérebro de um mamífero pode ter muitos bilhões de neurônios. A Figura 3 apresenta uma ilustração da analogia entre o modelo biológico e o modelo artificial adotado pelas RNAs.

Figura 3. Comparação entre os modelos biológico (Mendes, 2013) e artificial.



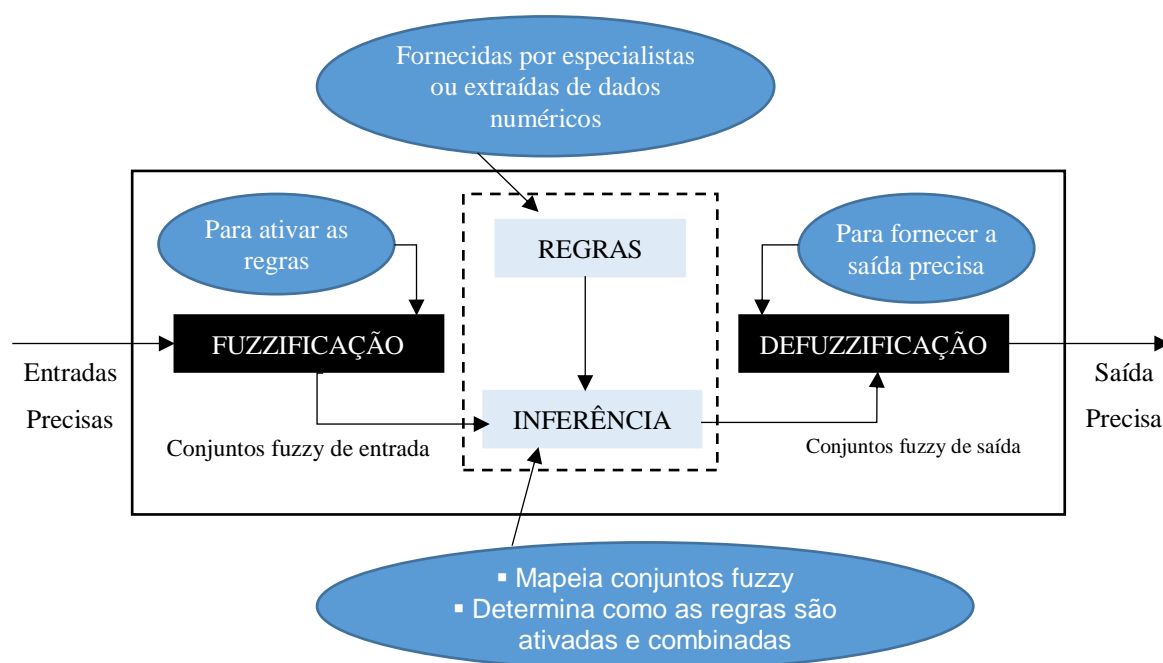
Fonte: Pesquisa do Autor

A propriedade mais importante das redes neurais é a habilidade de aprender de seu ambiente e com isso melhorar seu desempenho. Isso é feito através de um processo iterativo de ajustes aplicado a seus pesos, o treinamento. O aprendizado ocorre quando a rede neural atinge uma solução generalizada para uma classe de problemas.

Outra técnica de inteligência computacional conhecida como Lógica Fuzzy (LF) ou Lógica Nebulosa serve para tratamento de incertezas, pois possui habilidade em inferir conclusões e gerar respostas baseadas em variáveis linguísticas que podem ser, por exemplo: muito, pouco, frio, calor, alto, baixo, entre outros, ou seja, informações vagas, ambíguas e qualitativamente incompletas e imprecisas.

Um tratamento *fuzzy* possui as seguintes etapas típicas: fuzzificação, inferência, defuzzificação. Tanscheit (2007) sintetizou na Figura 3 um típico sistema de inferência *Fuzzy*, visando facilitar a compreensão.

Figura 4. Sistema de Inferência Fuzzy (Adaptado de Tanscheit, 2007)



Fonte: Pesquisa do Autor

Já o modelo híbrido Neuro-Fuzzy refere-se à combinação de um conjunto de teorias fuzzy e redes neurais artificiais. Neste método, são incorporadas as vantagens de ambas as abordagens anteriores.

Apesar da instabilidade de taludes ser um fenômeno natural muito estudado por pesquisadores de todo o mundo, há grande dificuldade em determinar as complexas interações entre os diversos fatores condicionantes e as suscetibilidades de escorregamento. Para tratar dessas complexas interações, os métodos de Inteligência Computacional supracitados podem, quando bem modelados, produzir resultados precisos e acurados, pois estes são capazes de: realizar o tratamento de qualquer tipo de informação (numérica, linguística, lógica, etc.); gerenciamento do impreciso, parcial, vago ou informação imperfeita; resolução de conflitos por

colaboração e agregação; capacidade de auto aprendizado, de auto-organização e de auto direcionamento; imitação humana do processo de tomada de decisão; rápida computação usando operações de números fuzzy; habilidade de aprender: representação transparente do conhecimento e habilidade de lidar com incertezas com as vantagens das redes neurais; e se existem dados "experts", estes podem ser usados, pois após o treinamento, as novas regras podem ser analisadas e em alguns casos disponibilizam informações úteis sobre o problema em questão.

Metodologia

No presente trabalho foi utilizado um modelo baseado em um Sistema Adaptativo de Inferência Neuro-Fuzzy (ANFIS), que foi implementado utilizando o software MATLAB®, da empresa The Mathworks, Inc. Para a utilização deste modelo adotou-se dados de análises paramétricas efetuadas com o Software de equilíbrio limite Slope-W pertencente ao pacote de aplicativos da GEO-STUDIO, resultando em uma previsão do potencial de ruptura de talude próxima da realidade.

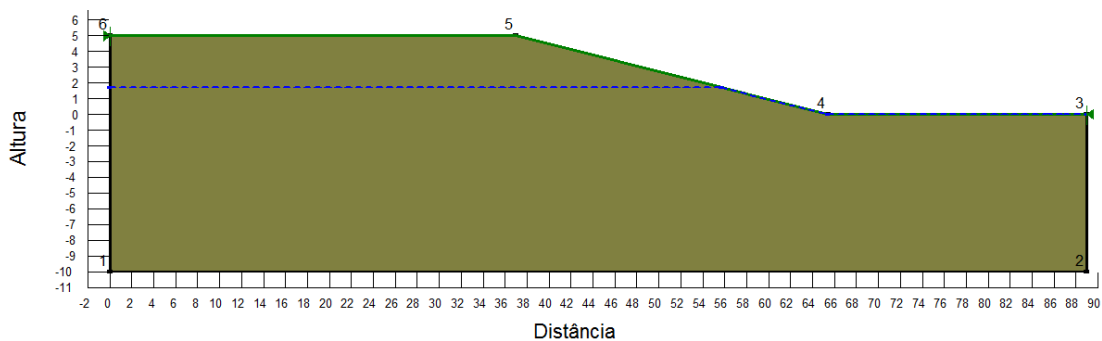
Nos itens a seguir, serão apresentados: a Modelagem ANFIS, as sugestões para Protocolos Emergenciais baseados na Modelagem ANFIS, o Estudo de Caso para a validação da Modelagem ANFIS e os Resultados obtidos com a Modelagem.

Modelagem ANFIS

O efeito das variáveis geométricas (altura e inclinação), dos parâmetros do solo (peso específico, coesão e ângulo de atrito) e da pluviosidade (que impacta diretamente no nível d'água do terreno natural) foram inicialmente avaliados com o programa de equilíbrio limite Slope-W pertencente ao pacote de aplicativos da GEO-STUDIO, conhecido no meio técnico como Geo-Slope. Com esta ferramenta, foram analisadas diversas geometrias distintas, de forma a adquirir dados referentes à influência destes parâmetros na estabilidade de taludes, ou seja, para a obtenção dos

Fatores de Segurança nas mais variadas faixas (da Ruptura a Segurança Total). A Figura 5 exemplifica uma Geometria com 05 metros de altura, 10° de inclinação e Nível d'água coincidente com 1/3 da altura do talude.

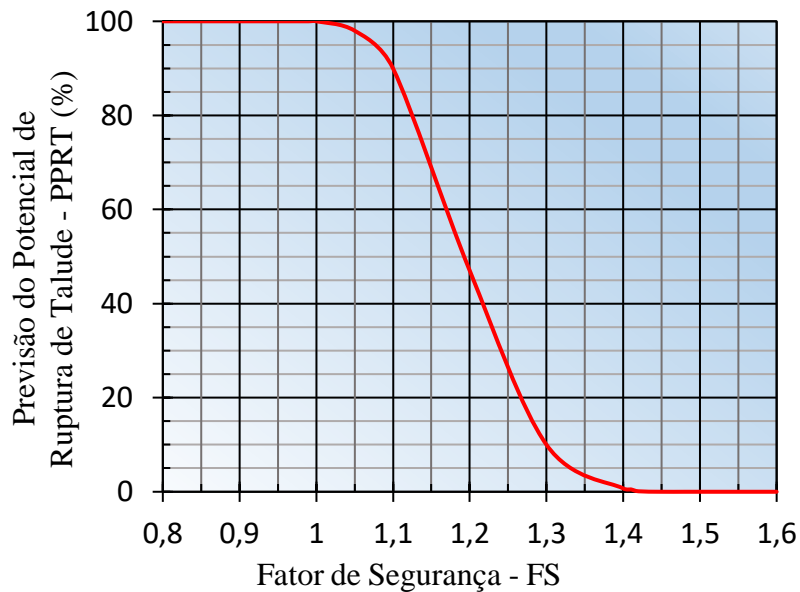
Figura 5. Geometria: Altura= 5,0m - Inclinação= 10° - Linha piezométrica= 1,7 m



Fonte: Pesquisa do Autor

Cabe ressaltar que o programa de equilíbrio limite fornece um valor de fator de segurança para o talude analisado, sendo, portanto, um método determinístico. Entretanto nesta Modelagem ANFIS, apesar de fornecer valores que podem ser comparados com o Fator de Segurança (FS), estes serão convertidos em valores expressos em percentual para a obtenção de uma Previsão do Potencial de Ruptura de Taludes (PPRT), através da curva da Figura 5, implementada em um novo modelo ANFIS no final do processamento, para a obtenção automática deste valor, evitando conversões manuais.

Figura 6. Curva de Conversão de FS em PPRT (%), adaptado de Costa (2005)



Fonte: Pesquisa do Autor

A curva de conversão de FS para PPRT (Figura 05) foi adaptada de Costa (2005), que através de iterações de Monte Carlo, método probabilístico, obteve o gráfico da função de distribuição acumulada do Fator de Segurança (FS) em relação a probabilidade de segurança do talude (%). Como este trabalho trata de um parâmetro inverso à probabilidade de segurança, ou seja, a ruptura do talude, efetuou-se a inversão do eixo da probabilidade (eixo vertical) para adequá-lo à realidade do presente estudo.

Para cada geometria analisada, o único parâmetro fixo foi o peso específico do solo $\gamma = 19 \text{ KN/m}^3$. Procedendo-se à variação da altura (h), da inclinação do talude (l), da coesão (c), do ângulo de atrito ϕ e do nível d'água (hw), determina-se o fator de segurança correspondente. A Tabela 1 apresenta a faixa de valores de cada uma destas variáveis.

Tabela 1. Faixa de Valores das Variáveis Altura, Inclinação, Coesão, Ângulo de Atrito e Nível D'água.

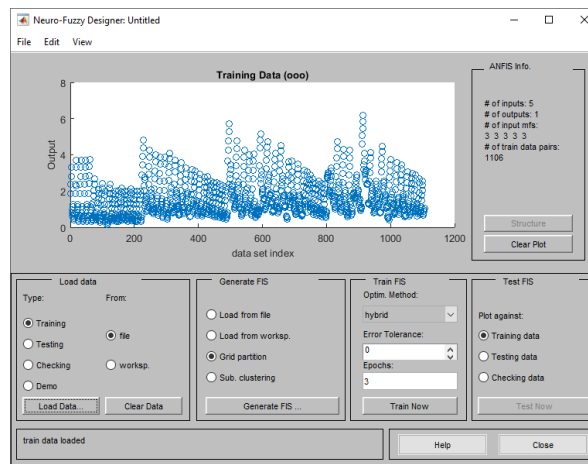
Variável	Unidade	Faixa de Valores
Altura (h)	metros	2,5 a 40
Inclinação (i)	Graus (°)	10 a 90
Coesão (c)	kPa	0 a 20
Ângulo de Atrito (ϕ)	Graus (°)	20 a 36
Nível D'Água (hw)	metros	0 a 40*

* Nível d'água coincidente com a superfície de montante do talude

Fonte: Pesquisa do Autor

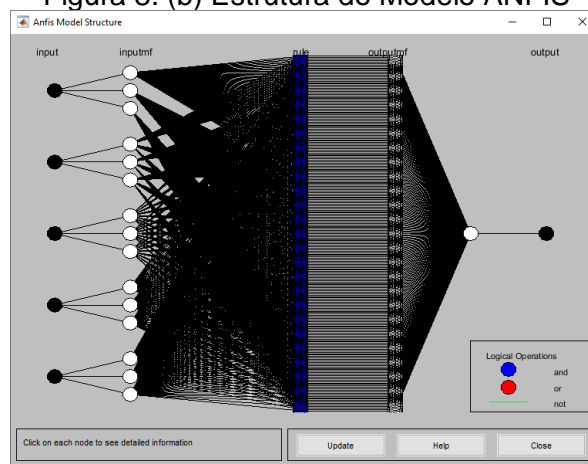
Para a modelagem do ANFIS foi utilizada a Toolbox Neuro-Fuzzy Designer, juntamente com o seguinte conjunto de dados: 1106 registros para treinamento do modelo e 64 registros para checagem do modelo (que não pertenciam ao conjunto de treinamento). A Figura 7 apresenta a Neuro-Fuzzy Toolbox, o gráfico dos dados para treinamento do Modelo ANFIS e a estrutura do Modelo ANFIS onde na primeira camada (input) estão representadas as seguintes Variáveis do Modelo: Coesão, Ângulo de Atrito, Altura, Inclinação e Nível D'água. As camadas 02, 03 e 04 (inputmf, rule e outputmf) representam os adjetivos com as funções de pertinência de cada variável de entrada, as regras criadas e as funções de pertinência da variável de saída, respectivamente. A última camada apresenta um valor comparável ao Fator de Segurança.

Figura 7. (a) Neuro-Fuzzy Toolbox com os Dados do Treinamento



Fonte: Pesquisa do Autor

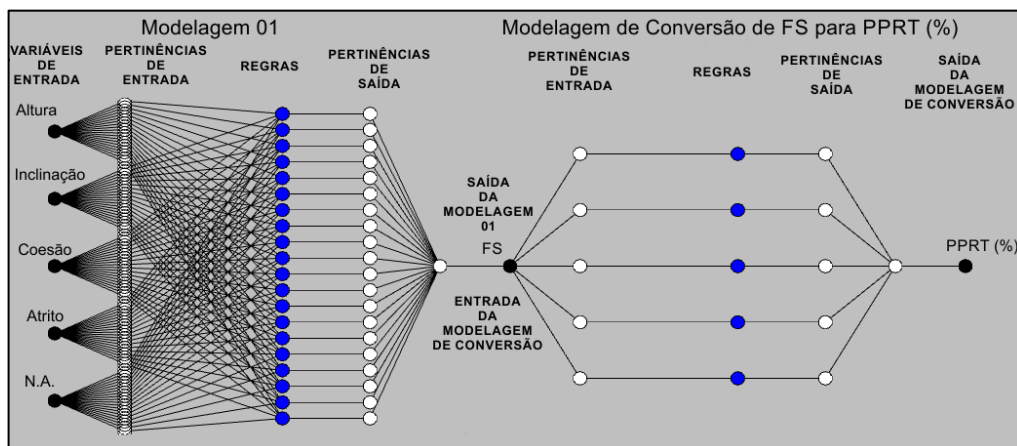
Figura 8. (b) Estrutura do Modelo ANFIS



Fonte: Pesquisa do Autor

A conversão do Fator de Segurança obtido a partir da Modelagem ANFIS para a variável Previsão do Potencial de Ruptura de Taludes (PPRT), expresso em percentual, foi realizada utilizando a Curva de conversão apresentada na Figura 6. Para tal, foi criado um novo um Modelo Neuro-Fuzzy, denominado Modelo de Conversão, onde a variável de saída é a Previsão do Potencial de Ruptura de Talude (PPRT), expressa em percentual. A Figura 7 apresenta a Estrutura da Modelagem ANFIS para a obtenção da Previsão do Potencial de Ruptura do Talude, onde a Saída da Modelagem ANFIS é a Entrada do Modelo de Conversão, ou seja, foram realizadas Duas Modelagens ANFIS ligadas em Série.

Figura 9. Estrutura da Modelagem ANFIS com Saída em PPRT (%)



Fonte: Pesquisa do Autor

Após a criação do modelo, também foi criada uma Rotina de Programação no software MATLAB para facilitar a inserção dos valores das variáveis de entrada e obtenção da Previsão do Potencial de Ruptura do Talude de forma mais amigável, sem a utilização da NEURO-FUZZY Toolbox do MATLAB.

Sugestão de Protocolos Emergenciais baseados na Previsão do Potencial de Ruptura de Taludes obtida pela Modelagem ANFIS

Uma sugestão para o monitoramento de taludes é a utilização dos dados da Previsão do Potencial de Ruptura de Taludes (PPRT), obtidos pela Modelagem ANFIS, combinados com Protocolos Emergenciais baseados nos valores dos PPRTs. Os protocolos emergenciais atuais, gerenciados pelo INEA ou pela Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (Sistema Alerta Rio – Geo-Rio e Defesa Civil) utilizam-se de escalas padronizadas e dependentes, basicamente, de apenas uma variável, que é a precipitação.

O valor da PPRT baseia-se em uma combinação de diversos condicionantes geológico-geotécnicos, tais como: Geometria do Talude (altura e inclinação); Parâmetros de Resistência do solo (coesão e ângulo de atrito); e poropressão (nível

do lençol freático), e não apenas de uma única variável, como nos modelos em uso atualmente, o que torna a saída do Modelo ANFIS (PPRT) um parâmetro mais robusto, quando comparado a uma análise de uma única variável condicionante de ruptura de taludes. Cabe ressaltar que para a obtenção do nível do nível freático, piezômetros ou indicadores de nível d'água deverão estar instalados no Talude.

Face o exposto, a Tabela 2 mostra uma sugestão para protocolos emergenciais baseados nos valores das PPRTs obtidas pela Modelagem ANFIS.

Tabela 2. Protocolos Emergenciais baseados nas PPRTs

PPRT (%)	Potencial de Ruptura	Estado	Protocolo Emergencial
< 25	Inexistente	Normalidade	<p>Encostas Habitadas: Criação de locais que podem servir como Pontos de Apoio e/ou Abrigo de Moradores. Cadastro de Moradores. Treinamento contínuo dos Moradores, ocupantes das encostas, para deslocamentos aos pontos de apoio em caso de alertas sonoros. Verificação e manutenção contínua dos equipamentos instalados (piezômetros ou Medidores de Nível D'água).</p> <p>Encostas não habitadas: Verificação e manutenção contínua dos equipamentos instalados (piezômetros ou Medidores de Nível D'água).</p>
≥ 25 e < 60	Baixo	Atenção	<p>Encostas Habitadas: Comunicar a mudança de Estado aos Líderes comunitários, Subprefeitos e Administradores regionais. Verificação dos pontos de apoio e/ou abrigo de moradores.</p> <p>Encostas não habitadas: Verificação e manutenção contínua dos equipamentos instalados (piezômetros ou Medidores de Nível D'água).</p>
≥ 60 e < 85	Alto	Alerta	<p>Encostas Habitadas: Comunicar a mudança de Estado aos Líderes comunitários, Subprefeitos e Administradores regionais. Acionar a Defesa Civil e/ou órgãos municipais/ estaduais. Emissão de Alertas Sonoros contínuos. Envio de Equipes ao local para: Coordenação da Abertura dos Pontos de Apoio e/ou abrigo de Moradores; Encaminhamento de todos os moradores das encostas para os Pontos de Apoio e/ou abrigo de Moradores, de forma ordenada; e Efetuar as interdições e isolamentos pontuais. Mitigação dos Problemas que possam ocorrer.</p> <p>Encostas não habitadas:</p>

PPRT (%)	Potencial de Ruptura	Estado	Protocolo Emergencial
			<p>Acionar a Defesa Civil, órgãos municipais/estaduais/federais ou Concessionárias (em caso de rodovias).</p> <p>Interdições e isolamentos pontuais.</p> <p>Mitigação dos Problemas que possam ocorrer.</p>
≥ 85	Iminente	Crítico	<p>Encostas Habitadas: Comunicar a mudança de Estado aos Líderes comunitários, Subprefeitos e Administradores regionais. Acionar a Defesa Civil e/ou órgãos municipais/ estaduais. Emissão de Alertas Sonoros contínuos. Envio de Equipes ao local para: Coordenação da Abertura dos Pontos de Apoio e/ou abrigo de Moradores; Encaminhamento de todos os moradores das encostas para os Pontos de Apoio e/ou abrigo de Moradores, de forma ordenada; e Efetuar interdições e isolamentos das áreas críticas. Mitigação dos Problemas ocorridos.</p> <p>Encostas não habitadas: Acionar a Defesa Civil, órgãos municipais/estaduais/federais ou Concessionárias (em caso de rodovias). Interdições e Isolamentos das áreas críticas. Mitigação dos Problemas ocorridos.</p>

Fonte: Pesquisa do Autor

Resultados

A análise de estabilidade de taludes feita por técnicas convencionais preveem que a instabilidade do talude será deflagrada quando as tensões cisalhantes mobilizadas se igualarem à resistência ao cisalhamento. Geralmente, as tensões (σ') e os parâmetros de resistência (c' e ϕ') são fundamentais para a determinação do FS de um talude.

Como as técnicas de inteligência computacional possuem a capacidade de realizar o tratamento das informações conforme relatado anteriormente, o que se espera como resultado da presente pesquisa é a obtenção da variável de saída, através do modelo

Rev. Episteme Transversalis, Volta Redonda-RJ, v.11, n.1, p.155-180, 2020.

ANFIS, que fornecerá resultados qualitativos a respeito da estabilidade do talude estudado que será o valor da Previsão do Potencial de Ruptura de Taludes (PPRT). Ressaltando que estes resultados não podem ser comparados diretamente ao FS determinado pelas técnicas convencionais, porém podem dar uma estimativa do quão o talude está seguro.

A grande vantagem da utilização da técnica da inteligência computacional em problemas de estabilidade é que o valor esperado da variável de saída (Previsão do Potencial de Ruptura de Taludes - PPRT) no modelo (método ANFIS) indicará a PPRT em uma escala de 0 a 100 (ou 0 a 1), onde 100 é o indicativo que o talude rompeu ou romperá por escorregamento, assim como o $FS=1,0$. Entretanto, valores menores que 100 sempre indicarão o percentual do potencial de ruptura associado ao escorregamento do talude em questão.

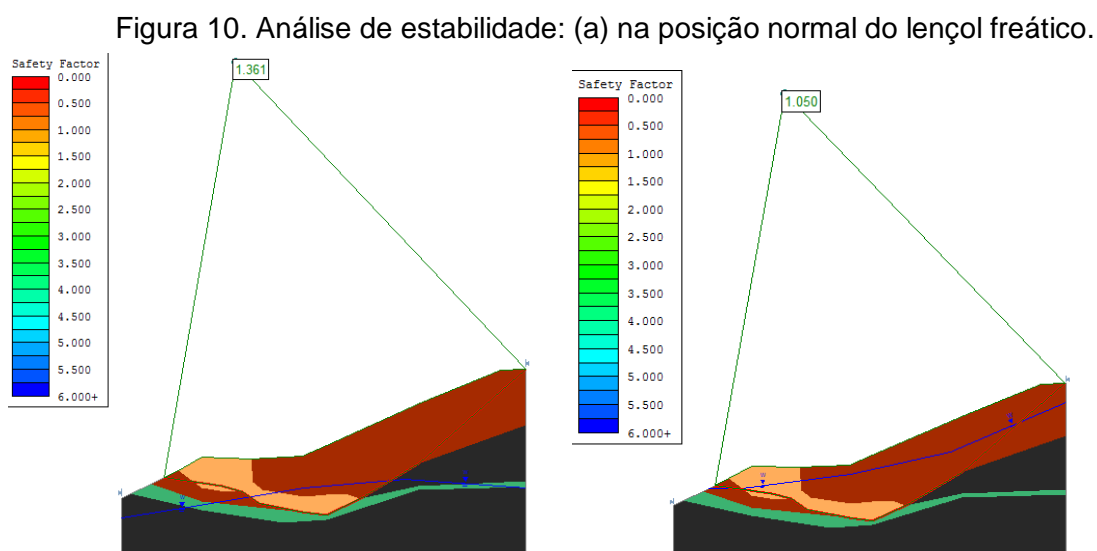
Outro fator importante sobre a utilização do método sugerido é que no caso de as coordenadas geográficas dos locais vistoriados serem conhecidas, as PPRTs geradas após a execução do modelo podem ser inseridas em Sistemas de Informações Geográficas (GIS), podendo-se criar mapas de risco de escorregamento de talude, com pontos/áreas de diversas cores para diferentes graus de potenciais de ruptura, facilitando a visão global de uma localidade, bairro ou até mesmo de todo o Município.

Estudo de Caso

Foi realizado o estudo de um caso histórico de escorregamento que iniciou no ano de 2006, no Município de Rio Bonito/RJ. Mota (2014) estudou o escorregamento ocorrido e apresentou a retroanálise realizada através de estabilidade por equilíbrio limite para as condições anterior e posterior à ruptura. Essa retroanálise foi realizada com o uso do software Slide v. 6.0 e para atingir-se o proposto, foi considerado como hipótese de instabilização a elevação do nível d'água para que o talude apresentasse fator de segurança (FS) da ordem de 1,0. Mota (2014) apresentou o resultado obtido a partir do método de avaliação do fator de segurança proposto por Bishop (1955).

A comparação entre os resultados das análises de estabilidade por equilíbrio limite (Mota, 2014) e a variável de saída do modelo ANFIS (PPRT) tem como objetivo a validação do modelo ANFIS na previsão do Potencial de Ruptura de Taludes.

A Figura 10 (a) ilustra a análise de estabilidade (Método de Bishop Simplificado) para a posição normal do lençol freático, onde se obteve o $FS=1,36$. A superfície de ruptura obtida na condição crítica do nível freático Figura 10 (b) foi similar à representada na Figura 10 (a) e a análise de estabilidade para esta condição crítica demonstra a redução do fator de segurança provocado pelo aumento das poropressões, ocasionado pela elevação do nível do lençol freático. Logo, observa-se na Figura 10b, que a superfície de ruptura apresenta $FS=1,05$ quando o nível do lençol freático se encontra 4,0 m acima da posição normal.



Fonte: lençol freático na condição crítica. (Mota 2014)

Validação da Modelagem ANFIS

Para validação do Modelo ANFIS foram utilizados dados referentes ao estudo de Mota (2014), apresentados no item anterior, que foram inseridos na Rotina programada no MATLAB, descrita anteriormente. A Tabela 3 indica os valores iniciais adotados no modelo proposto, ou seja, os dados antes da elevação do nível do nível freático provocada pelas chuvas nos primeiros meses do ano. Após a execução da Rotina ANFIS, estes valores foram digitados nos campos correspondentes a cada variável e a Figura 11 mostra que o Fator de Segurança obtido com a modelagem ANFIS, $FS=1,3482$, se aproximou do fator de segurança obtido pela retroanálise feita por Mota (2014), $FS=1,361$, com erro de 0,94%.

Tabela 3. Valores Iniciais e finais das Variáveis adotados no modelo ANFIS

Variáveis	Valores Iniciais Adotados (N.A. Normal)	Valores Finais Adotados (N.A. Elevado)
Coesão (kPa)	0	0
Altura (m)	20	20
Inclinação (°)	24	24
Ângulo de Atrito (°)	32	32
Altura do Lençol Freático (m)	1,5	5,5

Fonte: Pesquisa do Autor

A Figura 11 também demonstra que a Previsão do Potencial de Ruptura do Talude – PPRT é igual a 4,09%, ou seja, o Talude para essa situação encontra-se estável.

Figura 11. Análise ANFIS para a situação inicial, antes da elevação do NA

The screenshot shows the MATLAB R2015a interface. The Command Window displays the following text:

```

MODELAGEM ANFIS PARA O CÁLCULO DO PPRT

ENTRADA DE DADOS NO MODELO ANFIS
Digite a Coesão do Solo (kPa): 0
Digite a Altura do Talude (m): 20
Digite a Inclinação do Talude (°): 24
Digite o Ângulo de Atrito do Solo (°): 32
Digite a altura do Nível d'água, a partir da base do talude (m): 1.5

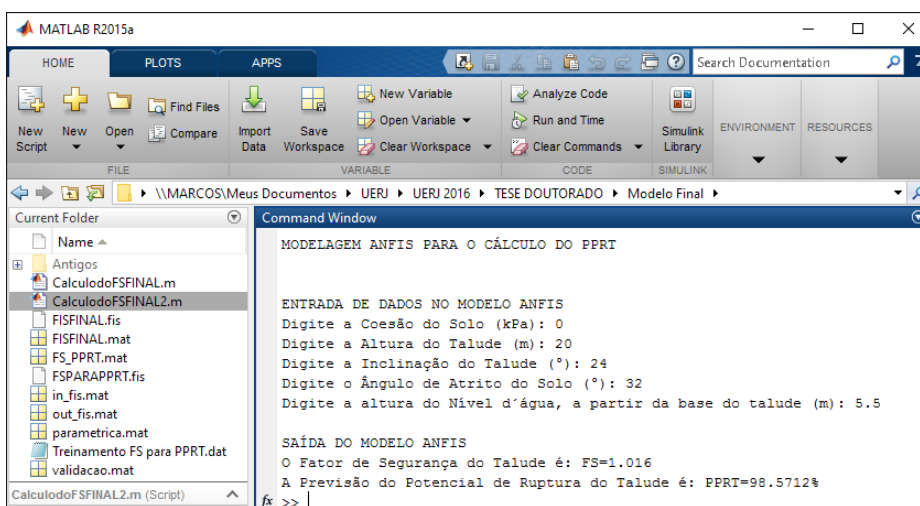
SAÍDA DO MODELO ANFIS
O Fator de Segurança do Talude é: FS=1.3482
A Previsão do Potencial de Ruptura do Talude é: PPRT=4.0889%
  
```

Fonte: Pesquisa do Autor

Os valores finais adotados no modelo proposto, indicados na Tabela 3, são os dados após a elevação do nível freático, 4,0 metros acima do nível freático inicial. Após a execução da Rotina ANFIS, estes valores foram digitados nos campos correspondentes a cada variável e a Figura 12 mostra que o Fator de Segurança obtido com a modelagem ANFIS, $FS=1,016$, também ficou muito próximo do fator de segurança obtido pela retroanálise feita por Mota (2014), $FS=1,05$, com erro de 3,24%.

A Figura 12 também demonstra que a Previsão do Potencial de Ruptura do Talude – PPRT é igual a 98,57%, ou seja, o Talude para essa nova situação encontra-se instável.

Figura 12. Análise ANFIS para a situação final, após a elevação do NA

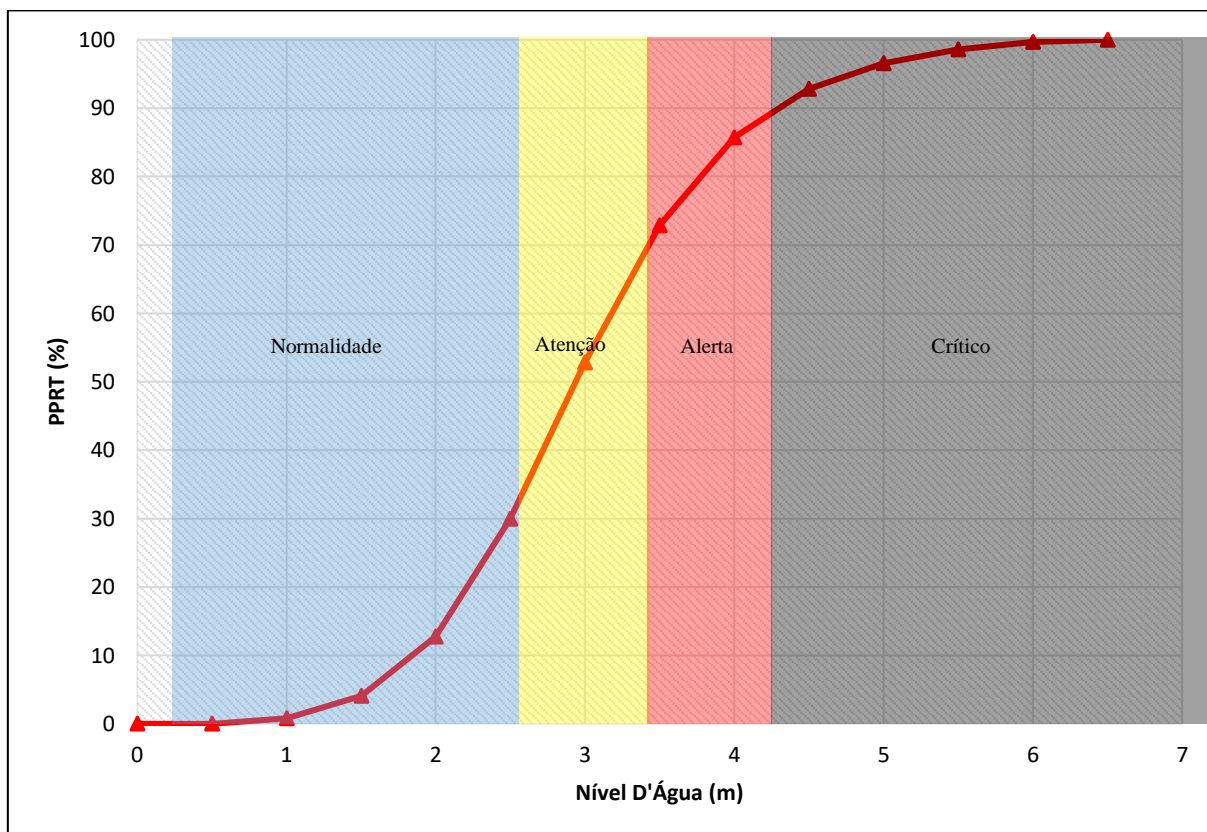


Fonte: Pesquisa do Autor

Observa-se que a variável altura do nível d'água influenciou, para este caso, todo o processo de estabilização da encosta. Para a verificação da sensibilidade dessa variável, foi efetuada análise utilizando a Modelagem ANFIS onde se manteve constante todas as variáveis do Talude e considerou-se a elevação do nível d'água, com os resultados apresentados na Figura 13 que apresenta o gráfico da variação do PPRT com a Altura do Nível D'água. Da análise deste gráfico foi verificado que para o nível d'água inexistente (0 m), a previsão do Potencial de Ruptura do Talude (PPRT) foi de 0% (potencial de ruptura inexistente). Quando se elevou o nível d'água a 2,5 metros, o valor de PPRT aumentou para 29,97% (potencial de ruptura baixo), quando o nível d'água atingiu a cota de 3,5 metros, o valor de PPRT aumentou para 72,85% (potencial de ruptura alto) e para níveis d'água superiores a 4,0 metros o PPRT é maior que 85,74%, o que deixa o talude com um potencial de ruptura crítico, ou seja, a ruptura é iminente.

As faixas que delimitam os Estados para os Protocolos Emergenciais baseados na PPRT, foram representadas na Figura 13 através de cores, onde a faixa Azul representa o estado de Normalidade ($PPRT < 25\%$), o Amarelo significa que o estado é de Atenção ($25\% < PPRT < 59,99\%$), o Vermelho encontra-se no estado de Alerta ($60\% < PPRT < 84,99\%$) e o Preto indica o estado Crítico ($PPRT \geq 85\%$).

Figura 13. Variação da PPRT com a Altura do Nível D'água para o Caso Histórico



Fonte: Pesquisa do Autor

Se os protocolos emergenciais baseados no PPRT, mostrados na Tabela 2, fossem adotados nas duas situações validadas neste Item, para a primeira situação, antes da elevação do nível d'água, que gerou um PPRT=4,09% seria adotado o seguinte protocolo emergencial: verificação e manutenção contínua dos equipamentos instalados na encosta (piezômetros ou Medidores de Nível D'água). Para a segunda situação, após a elevação do nível d'água, que gerou um PPRT=98,57% seria o seguinte protocolo emergencial: acionamento da Concessionária (por se tratar de rodovia concedida); interdições e isolamentos das áreas críticas; e obras para Mitigação dos Problemas ocorridos.

Considerações Finais

O presente trabalho apresentou a aplicação do Neuro-Fuzzy na previsão do potencial de ruptura de taludes. Os dados para o treinamento das variáveis de influência no modelo, foram obtidos através da realização de análises paramétricas. Na idealização do modelo ANFIS, foram adotadas as seguintes variáveis como condicionantes geológico-geotécnicas envolvidas na ruptura de taludes: altura e inclinação da encosta; coesão e ângulo de atrito do solo; e nível do lençol freático. Como resposta do modelo, obteve-se a Previsão do Potencial de Ruptura de Taludes (PPRT), em percentuais.

Adicionalmente, um caso histórico de escorregamento bem documentado foi apresentado, com o objetivo de comparar e validar os resultados fornecidos pela Modelagem Neuro-Fuzzy (análise qualitativa) com os resultados de análises por equilíbrio limite (análises quantitativas).

O estudo do caso histórico mostrou que a análise realizada utilizando o modelo Neuro-Fuzzy refletiram de forma eficiente os resultados apresentados por Mota (2014) em análises por equilíbrio limite. Para a condição antes da ruptura, o modelo Neuro-Fuzzy forneceu uma previsão de ruptura inexistente (PPRT=4,1%), enquanto as análises de estabilidade realizadas por Mota (2014) indicaram FS=1,36, ou seja, talude estável. Para a condição após a ruptura, Mota (2014) obteve um valor de fator de segurança igual a 1,05, que indica que o talude se encontra instável, já o modelo Neuro-Fuzzy, para esta mesma condição, forneceu coerentemente uma previsão de ruptura iminente (PPRT=98,6%). Como a Modelagem ANFIS também fornece o valor do Fator de Segurança (qualitativo), foram calculados os erros para cada uma das situações descritas, comparando os valores dos Fatores de Segurança, qualitativo e quantitativo, e verificou-se que os erros foram de 0,94% para a condição antes da ruptura e de 3,24% para a condição após a ruptura, ou seja, apresentou erros muito baixos evidenciando a capacidade de generalização da Modelagem ANFIS.

É interessante ressaltar que análises por equilíbrio limite fornecem um valor numérico para o fator de segurança, ou seja, é um método essencialmente

determinístico (quantitativo). No presente trabalho, o fator de Segurança foi obtido por um método não determinístico (qualitativo). A ideia de confrontar os dois métodos teve como objetivo mostrar que a resposta do modelo Neuro-Fuzzy, dentro de uma faixa de valores de previsão do potencial de ruptura de talude, encontra-se em concordância com o método determinístico usualmente adotado na avaliação da estabilidade de taludes.

Cabe comentar que para a aplicação do modelo além da geometria do talude, são necessários parâmetros de resistência do solo e dados do nível d'água. Os parâmetros de resistência podem ser obtidos através de ensaios de laboratório (ensaios triaxiais e cisalhamento direto, por exemplo) e o nível d'água, através de piezômetros ou indicadores de nível d'água, instalados nos locais a serem estudados. Face ao exposto, conclui-se que o Modelo Neuro-Fuzzy na Previsão do Potencial de Ruptura de Taludes é eficiente, de fácil utilização e de baixo custo. O modelo também mostra-se uma ferramenta válida para ser utilizada no monitoramento das encostas do Município do Rio de Janeiro, desde que sejam realizados ensaios para a obtenção de parâmetros de resistência nas áreas de interesse e que nestes locais sejam instalados piezômetros ou indicadores de nível d'água, com envio de dados através de telemetria (transmissão sem fio utilizada para envio dos dados dos pluviômetros instalados no município do Rio de Janeiro), onde os dados recebidos poderão ser inseridos automaticamente no Modelo Neuro-Fuzzy e as saídas (PPRTs) comparadas com os diversos protocolos de acionamento emergenciais propostos.

Referências

BISHOP, A.W., (1955). ***The use of the slip circle in the stability analysis of slopes.*** Geotechnique 5(1): 7-17.

CASTRO, A. L. C. 1998. **Glossário de defesa civil: estudo de riscos e medicina de desastres.** s.l. : Brasília, 1998.

CEPED. 2013. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012.** s.l. : Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Florianópolis: CEPED/UFSC. Disponível em: <http://www.ceped.ufsc.br/atlas-brasileiro-de-desastres-naturais-1991-a-2012/>. Acesso: 11 nov. 2016.

COSTA, E.A. 2005. **Avaliação de ameaças e risco geotécnico aplicados à Estabilidade de Taludes.** s.l.: Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do rio Grande do Sul. Escola de engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2005.

DE CASTILHO, L.A., OLIVEIRA, P.M.C, FABRIANI, C.B. 2012. **Análise de Uma Tragédia Ambiental e a Participação da População no Equacionamento dos Problemas de Moradia: Um Estudo de Caso da Tragédia na Região Serrana do Rio De Janeiro.** s.l. : VI Encontro Nacional da ANPPAS. Belém/PA, Brasil, 2012.

D'ÓRSI, R. N., et al. 2015. **Cidade do rio de janeiro em relação a eventos pluviométricos intensos no período 1966-2013.** s.l. : 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. Bento Gonçalves/RS. Agosto, 2015.

FERNANDES, A.M.R. 2003. **Definições de Inteligência Artificial. Inteligência Artificial.** s.l. : Florianópolis – SC: Visual Books Editora, 2003.

GUIDICINI, G. e NIEBLE, C.M. 1983. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação.** s.l. : Ed. Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1983.

MENDES, M. 2013. **Tecido Nervoso.** s.l. : site: http://maxaug.blogspot.com.br/2013_11_01_archive.html, visitado em 31/05/2016, 2013.

MOTA, A.P. 2014. **Retroanálise de escorregamento ocorrido em um talude na Via Lagos.** s.l. : Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia., 2014.

TANSCHKEIT, R. 2007. Sistemas Fuzzy. s.l. : Disponível em: <<http://www.dainf.cefetpr.br/~myriam/PastaWeb/Fuzzy/ApostilaFuzzy.pdf>>. Acesso em maio 2007.

TOMINAGA, L.K., SANTORO, J. e AMARAL, R. 2009. **Desastres Naturais: conhecer para prevenir.** s.l.: 1ª Edição, Instituto Geológico, São Paulo, 2009.

VARGAS, M. 1977. **Introdução à Mecânica dos Solos.** s.l. : Capítulo V., 1977.