

Aplicação de modelo simplificado de evolução de paisagem para análise dos locais das usinas de Angra dos Reis – RJ.

Luiz Augusto Richit¹ & Masato Kobiyama²

ABSTRACT – There are various models of landscape evolution (LEM), which consider and analyze various environmental parameters during a long time scale. The present paper applied a simple LEM to the nuclear power plants installation site of the Angra dos Reis – RJ and analyzed the soil surface changes at this site during 1500 years. The simulation results show that the duration of 1500 years is not so long to transform rocks in soils and that the study area would not suffer from a large change of the land elevation. In the simulation, the soil depth was initially set larger at the coastal zone and smaller at the top of the mountains. After 1500 years, the lower and higher areas in the study site have more erosion and a small change of elevation was verified in most of the study area. In case of the simulated scenario, the predicted surface changes were insignificant for the Angra dos Reis power plants area.

Palavras-Chave – Usinas nucleares de Angra dos Reis, Evolução de Paisagem, Alterações de Superfície.

1 - INTRODUÇÃO

Os estudos da evolução da superfície da terra através de modelos de evolução de paisagem permitem compreender e prever o comportamento das alterações da superfície e suas implicações para paisagem ao longo do tempo de acordo com os fatores considerados e abordagens realizadas (TUCKER & HANCOCK, 2010; PERRON, 2011). Muitos destes estudos concentram seu foco na formação das bacias, nas alterações fluviais e/ou evolução de encostas, no transporte e formação do solo procurando descrever física ou biologicamente, teoricamente, qualitativamente ou quantitativamente essas alterações de superfície (VAN DE WIEL *et al.*, 2007; VAN MAANEN *et al.*, 2015), bem como as ferramentas computacionais criadas (COULTHARD, 2001).

No estudo de evolução de paisagem, uma possibilidade menos discutida, mas nem por isso menos relevante, refere-se aos efeitos das modificações de superfície para as atividades humanas e o uso do solo, como exemplo aquele que é realizado em empreendimentos de longa duração (na história humana). Ao colocar-se atenção sobre os desastres com prejuízos ao ser humano, mas também para a biodiversidade e os recursos naturais, avaliar a evolução de paisagem e as

1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, luizaugustorichit@gmail.com.

2) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, masato.kobiyama@ufrgs.br.

alterações da superfície para empreendimentos como usinas nucleares e os depósitos de rejeitos mostra-se uma interessante e indispensável perspectiva.

Considerando os riscos à natureza e especialmente para o ser humano que desastres envolvendo falhas para empreendimentos nucleares podem gerar (por exemplo, DE SOUZA CRUZ, 1987; BERGER, 2010; FARNSWORTH, 2014), analisar os locais de instalação previamente mencionados sob inúmeros aspectos e processos pode ser imprescindível. Ao analisarmos as características econômicas, a dependência do turismo e da pesca (ANGRA DOS REIS, 2018), prejuízos envolvendo acidentes radioativos nesta região se constituem uma justificativa para este tipo de estudo. Assim sendo, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a área de instalação da usina nuclear no município de Angra dos Reis/RJ por meio da aplicação de modelo simplificado de evolução de paisagem, a fim de verificar o risco para o empreendimento.

2 - TEORIA

2.1 - Modelo conceitual

De forma clássica, a evolução de paisagem para encostas é descrita segundo leis de transporte que regem o balanço de massa entre produção e transporte (erosão/sedimentação) do solo entre a camada móvel e a camada de rocha em função de diferentes forçantes (CHEN et al., 2014; VALTERS, 2016). Como uma das descrições mais simplificadas, a evolução de paisagem é mecanicamente modelada segundo as seguintes equações:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\rho_r}{\rho_s} e + D \nabla^2 h \quad (1)$$

$$\frac{\partial b}{\partial t} = u - e \quad (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial b}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

onde ρ_r é a densidade da camada rochosa; ρ_s é a densidade do solo; D é o coeficiente difusivo de transporte de sedimentos do leito móvel; u é a taxa de soerguimento tectônico; e e é a taxa de conversão da rocha em solo (DIETRICH *et al.*, 2003; PERRON, 2011). As derivadas no tempo representam a variação da largura da camada de solo h , a elevação do leito rochoso b e a elevação total $z = b + h$. Nesta formulação os parâmetros são considerados constantes no tempo e espaço. No presente trabalho, o modelo de difusão linear foi adotado e sua equação foi resolvida na forma bidimensional, isto é:

$$\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \quad (4)$$

2.2 - Solução numérica

Considerando o conjunto de equações apresentadas na seção 2.1 para modelar a evolução de paisagem, aplicou-se o método de diferenças finitas e o esquema de Du Fort & Frankel (1953), explícito, de precisão de segunda ordem no espaço e no tempo e comumente referido como incondicionalmente estável. Para manter a consistência do modelo o valor do passo de tempo empregado foi $\Delta t = 0,01$. Nos contornos aplicou-se a condição de Neumann.

A solução numérica do modelo foi implementada em Matlab (versão R2018a). As condições iniciais para aplicação do modelo foram obtidas de base de dados de elevação para área de estudo e os valores dos parâmetros típicos estão baseados naqueles descritos na literatura, como apresentado na sequência. Além disso, a profundidade inicial foi estimada através da expressão dada por Saulnier *et al.* (1997), i.e.:

$$H = H_{\max} - \left(\frac{H_{\max} - H_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \right) (Z - Z_{\min}) \quad (5)$$

onde H e Z são a profundidade do solo e a elevação na célula, respectivamente; H_{\max} e H_{\min} são as profundidades máxima e mínima, respectivamente; e Z_{\max} e Z_{\min} são as elevações máxima e mínima na bacia, respectivamente.

2.3 - Estudo de caso: Evolução de encosta em Angra dos Reis – RJ.

2.3.1 - Área de estudo

O local selecionado para aplicação do modelo simplificado refere-se às áreas de instalação das usinas de Angra dos Reis – RJ. Estando localizadas em regiões montanhosas e na zona costeira ficam sujeitas a inúmeros processos naturais e também à influência humana direta e/ou indireta que causam riscos às instalações. Dessa maneira torna-se importante que análises baseadas em diferentes processos, cenários e escalas de tempo sejam realizadas para fornecer dados sobre a segurança destes empreendimentos, a qual inclui metas de controle, correção, e gestão de acidentes e riscos.

Localizada no bioma Mata Atlântica, a área das usinas de Angra dos Reis possui o solo Cambissolo pouco desenvolvido e de baixa espessura e arenoso (MENDONÇA-SANTOS *et al.*, 2007). A vegetação apesar de muito alterada em muitos trechos contém remanescentes da vegetação natural, contando com áreas de grande biodiversidade e exuberância, sobretudo nas unidades de conservação existentes na região (INEA, 2018).

2.3.2 - Dados de entrada

Para aplicação do modelo, o valor médio de $\rho_r/\rho_s = 2,1$ foi empregado com base em Embrapa-solos (2013). O mapa de elevação foi obtido gratuitamente no site do Topodata - Banco

de dados geomorfométricos do Brasil (arquivos formato GeoTiff, '23S45_ZN' e '22S45_ZN' - TOPODATA, 2018) ambos disponibilizados em setembro de 2011. A resolução dos mapas é de 30 m e o tempo total de simulação empregado foi de $t = 1500$ anos. Os valores de $Z_{\max} = 643$ m e $Z_{\min} = 2$ m foram obtidos do mapa de elevação e os valores $H_{\max} = 2,0$ m e $H_{\min} = 0,5$ m foram empregados. Aos parâmetros u e e foram atribuídos os valores pequenos de 0,0001 e 0,0001 para indicar uma situação mais crítica (quanto a incrementos de elevação externos) muito embora o valor do parâmetro e tenda a ser maior já que o intemperismo da matriz rochosa seja esperado para ser maior nas áreas tropicais. Para o coeficiente difusivo (D) foi empregado também um valor alto, isto é, $D = 10^2 \text{ m}^2$ por século, como condição crítica.

2.3.3 - Procedimentos

Os mapas de elevação obtidos por download do site do Topodata (<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>) foram processados no software Grass GIS versão 7.2. As encostas onde situam-se os reatores da usina foram selecionadas através da criação de uma máscara baseada no traçado de um polígono através de ferramenta própria do software (criação e edição de vetores e posterior conversão para mapa raster empregado como máscara - *module v.to.rast*) para área de interesse. Esse mapa de elevação para área selecionada foi então exportado convenientemente para ser legível em Matlab (formato '.mat' - *module r.out.mat*). Já no Matlab o mapa de elevação então em formato .mat foi carregado e juntamente com os valores informados para os parâmetros foi empregado para realizar as simulações.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos com a simulação da área analisada mostram as alterações de elevação em face aos parâmetros empregados nas simulações. As Figuras 1(a) e 1(b) demonstram as condições de elevação para condição atual e para 1500 anos de evolução de paisagem, respectivamente. Por esses resultados evidencia-se que o modelo prevê alterações pequenas de elevação na área de estudo.

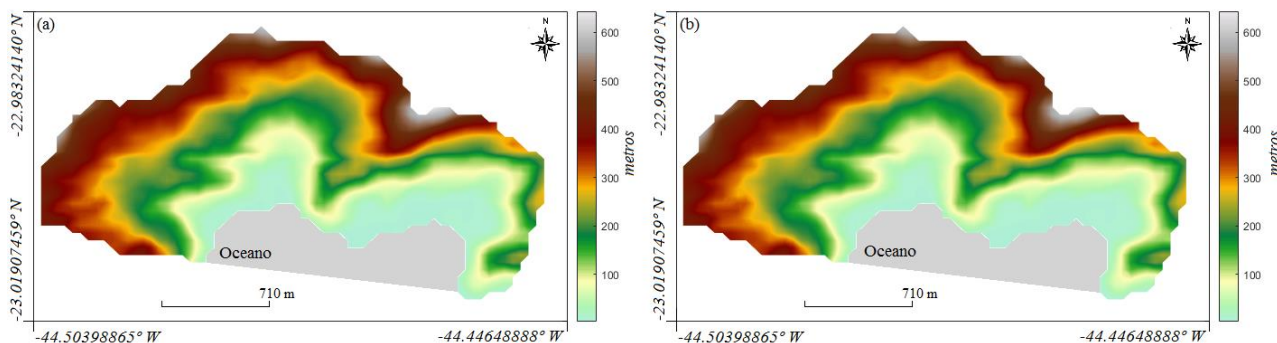


Figura 1 – Mapas de elevação: (a) atual; e (b) 1500 anos de evolução.

A profundidade do solo inicial, gerada a partir da equação (5) pode ser observada na Figura 2. Inicialmente os locais mais baixos (áreas costeiras) possuem solos mais profundos em relação aos locais de maior elevação. Durante os 1500 anos avaliados, todos os locais sofrem os processos erosivos (desagregação/transporte/deposição) e conseqüentemente ocorrem mudanças em relação à condição inicial de elevação (Figura 1).

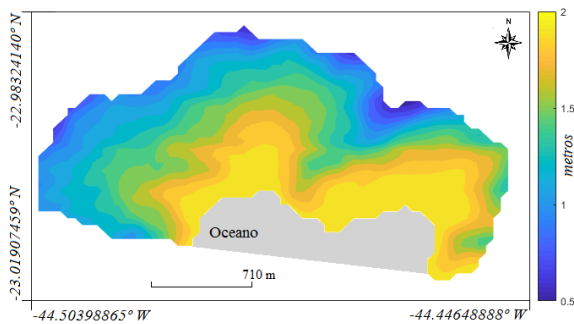


Figura 2 – Profundidade inicial do solo.

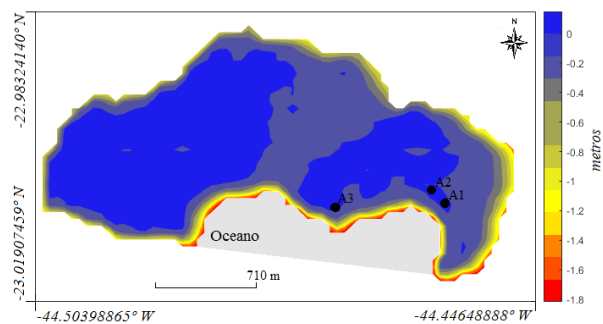


Figura 3 – Alteração da elevação do solo pela erosão (negativa) e deposição (positiva). Obs.: A1, A2 e A3 são os locais dos reatores 1, 2 e 3 respectivamente.

Para os parâmetros críticos empregados, as áreas de maior perda de solo previstas pelo modelo localizam-se prioritariamente nas áreas costeiras (contorno vermelho na Figura 3) embora os valores previstos tenham sido da ordem de dezenas de centímetros até metros para o tempo de simulação de 1500 anos. Na Figura 3, A1, A2, e A3 são os locais dos reatores de Angra 1, Angra 2, e Angra 3 que está em construção, respectivamente. Assim, pode-se dizer que a os reatores não vão sofrer com a forte alteração de elevação segundo os resultados obtidos. As alterações previstas mostraram-se mínimas para os parâmetros considerados, muito embora pontuemos aqui que a descrição dada pelo modelo baseia-se apenas na evolução de encostas sem levar em conta inúmeros fatores, por vezes mais influentes para evolução de paisagem.

4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente texto apresentou o emprego de uma metodologia simples para modelagem da evolução de paisagem e sua utilização para análise da área de instalação da usina nuclear no município de Angra dos Reis-RJ. Embora com restrições, o modelo mostrou-se capaz de descrever ao longo do tempo o processo de alteração da superfície com base nos dados de entrada e nos valores dos parâmetros aplicados. Embora a calibração dos parâmetros e a validação do modelo não tenham sido realizadas, assumiu-se que os valores baseados na literatura estão condizentes e, portanto os resultados obtidos das simulações, ainda que restritos, deem informações preliminares a respeito da evolução de paisagem. Certamente muitos processos suplementares e que envolvam inúmeros processos antrópicos e fenômenos naturais potencializados ao impacto sobre o ambiente e seus recursos, devem ser avaliados para uma análise global e mais acurada.

Dessa maneira, procurou-se destacar com essa pesquisa sobre a evolução da superfície do solo, a importância de análise de longa escala de tempo. Além disso, busca-se pela apresentação deste trabalho encorajar novos estudos envolvendo a evolução de paisagem na análise de superfície para grandes empreendimentos (de alto risco para desastres tecnológicos) envolvendo grande escala de tempo de vida, como locais de instalação de usinas nucleares ou mesmo para os depósitos nucleares. Quaisquer atividades relacionadas as usinas nucleares são altamente perigosas e podem criar danos de grande impacto sobre os recursos vivos e não vivos, sendo exemplos conhecidos os acidentes nucleares de Chernobyl (BERGER, 2010; BROMET, 2012) e de Fukushima (KASAI, 2016).

A metodologia proposta aqui é demasiadamente simples, necessitando incorporar diversos fenômenos de curta e longa escala de tempo (inundações, tornados, terremotos, tsunamis, alterações do nível do mar, entre outros). Segundo Berrocal *et al.* (2006), o tsunami é considerado mais improvável de ocorrer no litoral brasileiro do que para locais no oceano pacífico ou índico, por exemplo. Isso reduz a forte necessidade de considerar tal fenômeno na evolução de paisagem, entretanto, a possibilidade de sua ocorrência não é nula.

Ivins (2016) apresentou um trabalho que relaciona o processo de degelo às mudanças gravitacionais criadas e consequentes alterações de seu nível do mar. Posteriormente, Larour *et al.* (2017) estimaram as taxas de elevação do nível do mar e alterações de taxa de declividades da linha d'água no oceano, fornecendo informações a respeito do efeito direto sobre as áreas costeiras. Essa questão também deve ser considerada para mais acurada descrição da evolução de paisagem, embora não seja discutida neste trabalho.

Além disso, a inclinação acidentada das encostas (típica característica da Serra do Mar) e, as chuvas intensas (típica característica da área tropical) favorecem frequentes ocorrências de movimento de massas tais como escorregamento e fluxo de detritos (SOARES, 2006; SOARES & MARTON, 2006; LOPES & NAMIKAWA, 2011). Portanto, esse fenômeno catastrófico que altera a paisagem drasticamente em curto intervalo de tempo deve ser considerado para futuros trabalhos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fornecimento de bolsas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGRA DOS REIS. Prefeitura Municipal de Angra dos Reis. (2018). “*Dados Econômicos e Turismo*”. Disponível em: <<http://www.angra.rj.gov.br/>>. Acesso em: 24 de abril de 2018.

- BERGER, E. M. (2010). "The Chernobyl disaster, concern about the environment, and life satisfaction". *Kyklos*, v.63, n.1, p.1-8.
- BERROCAL, J.; PRATES, C.; FEMANDES, C. (2006). "Tsunamis que podem atingir o litoral brasileiro". In: *Anais do II Simpósio Brasileiro de Geofísica*.
- BROMET, E.J. (2012). "Mental health consequences of the Chernobyl disaster". *Journal of Radiological Protection*, v.32, n.1, p.N71.
- CHEN, A.; DARBON, J.; MOREL, J.M. (2014). "Landscape evolution models: A review of their fundamental equations". *Geomorphology*, v.219, p.68-86.
- COULTHARD, T.J. (2001). "Landscape evolution models: a software review". *Hydrological Processes*, v.15, p.165-173.
- DE SOUZA CRUZ, F.F. (1987). "Radioatividade e o acidente de Goiânia". *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v.4, n.3, p.164-169.
- DU FORT, E.; FRANKEL, S.P. (1953). "Stability conditions in the numerical treatment of parabolic differential equations". *Mathematical Tables and Other Aids to Computation*, v.7, n.43, p.135-152.
- EMBRAPA-SOLOS. (2013). "*Sistema brasileiro de classificação de solos*". Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos.
- FARNSWORTH, T. (2014). "Cobalt-60 Stolen, Recovered in Mexico". *Arms Control Today*, v.44, n.1, 5.p.
- INEA. Instituto Nacional do Ambiente - Governo do Rio de Janeiro. (2018). "*Unidades de Conservação da Natureza*". Rio de Janeiro: INES.
- IVINS, E.R. (2016). "ISSM-SESAW v1. 0: Mesh-based computation of gravitationally consistent sea-level and geodetic signatures caused by cryosphere and climate driven mass change". *Geoscientific Model Development*, v.9, n.3, p. 9769-9816.
- KASAI, S. (2016). "*Bokuha syaberutameni kokohe kita.*" Tokyo: Shoncho-sya, 333p. (em japonês).
- LAROUB, E.; IVINS, E.R.; ADHIKARI, S. (2017). "Should coastal planners have concern over where land ice is melting?" *Science Advances*, v.3, n.11, p.e1700537.
- LOPES, E. S. S.; NAMIKAWA, L. M. (2011). "Risco de escorregamentos: monitoramento e alerta de áreas urbanas nos municípios no entorno de angra dos reis—rio de janeiro." In: *Anais do 13*

Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. Sociedade Brasileira de Geologia e Engenharia Ambiental, São Paulo. p. 1-9.

MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; SANTOS, H. G. dos; DART, R. de O.; PARES, J. G. (2007). "Mapeamento digital de classes de solos no Estado do Rio de Janeiro". Embrapa Solos-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E).

PERRON, J. T. (2011). "Numerical methods for nonlinear hillslope transport laws." *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v.116, n.F2, p. 1-13.

SAULNIER, G.M.; BEVEN, K.; OBLED, C. (1997). "Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL." *Journal of Hydrology*, v.202, n.1-4, p.158-172.

SOARES, E. P. (2006). "Caracterização da precipitação na região de Angra dos Reis e a sua relação com a ocorrência de deslizamentos de encostas." Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro. 145. p.

SOARES, E. P.; MARTON, E. (2006). "Relação entre precipitação e deslizamentos de encostas na região de Angra dos Reis". In: *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Florianópolis.

TOPODATA - Banco de dados geomorfológicos do Brasil. (2018). "Arquivos de Elevação (ZN) 23S45_ZN' e '22S45_ZN'." Acesso em 20 de abril de 2018.

TUCKER, G.E.; HANCOCK, G.R. (2010). "Modelling landscape evolution". *Earth Surface Processes and Landforms*, v.35, n.1, p.28-50.

VALTERS, D. (2016). "Modelling Geomorphic Systems: Landscape Evolution." *Geomorphological Techniques*, v.12, p.1-24.

VAN DE WIEL, M. J. et al. (2007). "Embedding reach-scale fluvial dynamics within the CAESAR cellular automaton landscape evolution model." *Geomorphology*, v.90, n.3-4, p. 283-301.

VAN MAANEN, B.; COCO, G.; BRYAN, K.R. (2015). "On the ecogeomorphological feedbacks that control tidal channel network evolution in a sandy mangrove setting." *Proc. R. Soc. A*, v.471, n.2180, p.1-15.