

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE BORDAS DE RESERVATÓRIO - Aprimoramento dos resultados através da inserção de informações de campo

Rosana de Fátima Colaço Gibertoni¹; Rocianne Bortolazzo Pinto²; Isabella Francoso Rebutini Figueira³; Akemi Kan⁴; Rubem Luiz Daru⁵ & Odemberg Veronez⁶

RESUMO --- Este artigo apresenta os procedimentos e os resultados da avaliação da suscetibilidade a processos erosivos e escorregamentos na área de influência direta de uma usina hidrelétrica, correlacionando esse potencial com as informações das variáveis topográficas, climatológicas e pedológicas da região. O empreendimento selecionado para aplicação do estudo de caso é a UHE Barra Bonita, gerenciada pela AES Tietê e situada no rio Tietê, no Estado de São Paulo. Os mapas de suscetibilidade gerados possibilitam a identificação dos locais mais suscetíveis a deslizamentos. Foi também simulado um cenário distinto em relação à influência da vegetação. A factibilidade do estudo somente foi possível pela realização de inspeção de campo e coleta de amostras para caracterizar os solos em suas propriedades mais relacionadas com estabilidade dos solos, seja do ponto de vista da erosão, ou dos deslizamentos. Através de ferramentas do ArcView® foi possível complementar artificialmente as informações de declividade nas bordas do reservatório, tornando os dados topográficos mais representativos para o problema analisado.

ABSTRACT --- This paper presents the procedures and results from evaluation of the susceptibility to erosion and landslides in the area of direct influence of a hydroelectric plant, correlating this potential with the information of the topographic, climatic and pedological variables in the region. The area selected for implementation of this case study is the Barra Bonita hydroelectric power plant, managed by AES Tiete and located in the Tiete River in São Paulo. The susceptibility maps generated enable the identification of areas most susceptible to landslides. We also simulated one different scenario regarding the influence of vegetation. The study's feasibility was made possible by the completion of field inspection and sampling to characterize the soils on their properties more related to stability of the soil, whether from the standpoint of erosion or landslides. Through tools of ArcView ® was possible to complement slope information at the edges of the reservoir artificially, making topographic data more representative for the problem analyzed.

Palavras-chave: deslizamento, erosão, bordas de reservatório.

1) Pesquisadora do LACTEC - Caixa Postal 1309, CEP 80011-970, Curitiba – PR. Fone: (0xx41)3361-6282. E-mail: rosana@lactec.org.br

2) Estagiária do LACTEC - Caixa Postal 1309, CEP 80011-970, Curitiba – PR. Fone: (0xx41)3361-6282. E-mail: rociannaepinto@lactec.org.br

3) Pesquisadora do LACTEC - Caixa Postal 1309, CEP 80011-970, Curitiba – PR. Fone: (0xx41)3361-6870. E-mail: isabella.figueira@lactec.org.br

4) Pesquisadora do LACTEC - Caixa Postal 1309, CEP 80011-970, Curitiba – PR. Fone: (0xx41)3361-6314. E-mail: akemi.kan@lactec.org.br

5) Pesquisador do LACTEC - Caixa Postal 1309, CEP 80011-970, Curitiba – PR. Fone: (0xx41)3361-6368. E-mail: darul@lactec.org.br

6) Engenheiro Ambiental da AES Tietê - Caixa Postal 22, CEP: 13840-970, Mogi Guaçu – SP. E-mail: odemberg.veronez@aes.com

1 - INTRODUÇÃO

Bordas de rios e de reservatórios são locais normalmente sujeitos a processos erosivos e solapamentos de margens. Este alto potencial erosivo tem suas origens nas intensas declividades das bordas, ação de ondas formadas pelo vento, variação do nível de água, saturação e fragilidade dos solos e elevado índice pluviométrico. Além dos fatores naturais, o processo de intensificação da erosão e deslizamentos pode ser agravado pela intervenção do homem. Desmatamentos, manejo incorreto dos solos do entorno dos corpos d'água, impermeabilizações (intensificando o escoamento superficial), entre outros, podem ser citados como as principais atividades humanas que impactam não somente na perda de solos nas margens, como também na qualidade das águas dos rios e reservatórios. Muitas pesquisas têm sido conduzidas no sentido de mitigar ou controlar a erosão de margens de rios e reservatório.

A AES Tietê S.A. tem realizado e contratado diversos estudos de caráter ambiental, seja para avaliar e mitigar os impactos de suas obras, seja para contribuir na preservação de importantes ecossistemas. Visando atender a alguns destes objetivos, a AES Tietê contratou junto ao LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento), o projeto denominado "Desenvolvimento de Metodologia para Avaliação, Quantificação e Controle a Baixo Custo de Erosão em Bordas de Reservatório". Este projeto é um estudo de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) do Programa de P&D da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. O estudo, iniciado em março de 2010, visa desenvolver uma metodologia para estabelecer o conjunto de procedimentos a serem adotados na avaliação da suscetibilidade a processos erosivos e escorregamentos na área de influência direta de uma usina hidrelétrica.

Este artigo visa apresentar os resultados gerados até o momento na avaliação da susceptibilidade a deslizamentos através da aplicação de um modelo matemático. As simulações já realizadas consideram os atuais usos do solo e a retirada total da vegetação. A factibilidade do estudo somente foi possível pela realização de inspeção de campo e coleta de amostras para caracterizar os solos em suas propriedades mais relacionadas com estabilidade dos solos, seja do ponto de vista da erosão, ou dos deslizamentos. Através das informações de campo foi possível melhorar a representatividade das declividades das bordas, utilizando ferramenta disponível no ArcView®.

O empreendimento selecionado para aplicação do estudo de caso foi a UHE Barra Bonita, gerenciada pela AES Tietê e situada no rio Tietê, no Estado de São Paulo. Esta usina foi selecionada por apresentar perdas consideráveis de solos em suas margens ocasionadas por diferentes processos de erosão. Além disto, dispõe-se para este local, de levantamento e mapeamento das regiões com processos erosivos avançados realizados no ano de 2001, além de

uma atualização deste levantamento iniciado no ano de 2010. Através destas informações, futuramente poderão ser analisados os resultados obtidos nesta pesquisa

Entre os modelos de deslizamento analisados optou-se pela utilização do SINMAP (Stability INDEX MAPping), pois considera metodologias aprimoradas na avaliação da hidrologia de encostas e taludes (Beven e Kirkby, 1979). Entre os avanços considerados pelo modelo pode-se destacar a utilização do conceito de área variável de afluência para estimativa da umidade do solo. Além disso, o SINMAP considera a coesão do solo e o efeito das raízes, incorporando ainda componentes de incerteza associados à variação temporal e espacial dos parâmetros.

2 - CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DO ESTUDO

A região que compreende a barragem e o reservatório de Barra Bonita (figura 1) localiza-se nos municípios de Barra Bonita, Dois Córregos, Mineiros do Tietê, Piracicaba, Santa Maria da Serra, Águas de São Pedro, Anhembí, Botucatu, Conchas, Igaracú do Tietê, Laranjal Paulista e São Manuel, todos pertencentes ao Estado de São Paulo. As coordenadas geográficas da UHE Barra Bonita equivalem a latitude $22^{\circ}31'10,3438''$ S e longitude $48^{\circ}32'0,3668''$ W. O curso d'água que abastece o reservatório é o rio Tietê, pertencente à Bacia Hidrográfica do Rio Paraná com área de drenagem de 32.330 km^2 .

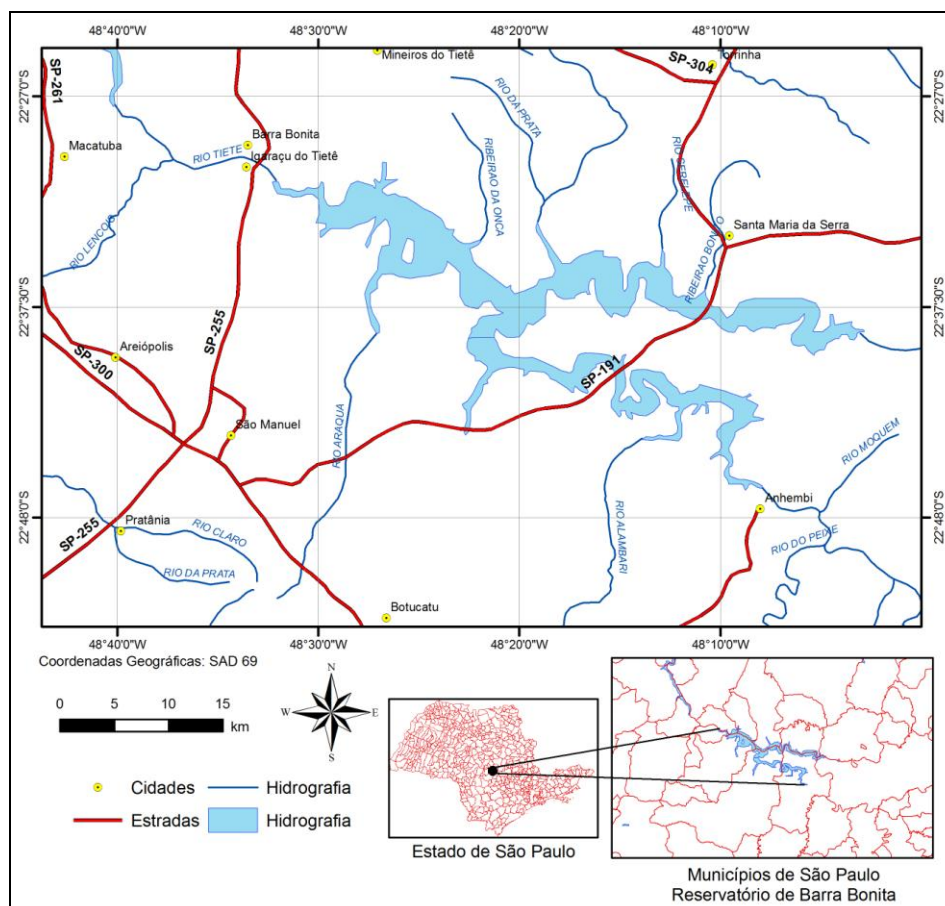


Figura 1 – Localização do reservatório de Barra Bonita – São Paulo

O início das obras para a implantação da UHE Barra Bonita ocorreu em 1957, com o início de operação em 1963. As restrições operativas definem o nível de montante como 446,5 m (mínimo para manter a navegabilidade no rio Tietê), e o nível máximo de montante igual a 452,5 m (acima desta cota, ocorre a inundação da Casa de Força pela água que pode subir pelo poço da comporta da tomada d'água). O perímetro do reservatório equivale a 56 km com comprimento de 788 km.

O rio Tietê nasce no município de Saleópolis, no estado de São Paulo, a uma altitude de 1.030 metros e a 22 km do Oceano Atlântico no contraforte ocidental da Serra do Mar e desemboca no rio Paraná, entre os municípios de Itapura, Ilha Solteira e Castilho. Possui aproximadamente 1.100 km de extensão. Da nascente até a barragem de Barra Bonita percorre aproximadamente 592 km. Os principais afluentes do Tietê são os rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, pela margem direita e os rios Pinheiros e Sorocaba, pela margem esquerda. A bacia do rio Piracicaba, a mais importante na margem direita do reservatório, compreende uma área de 11.313 km². O rio Sorocaba, por sua vez, é o afluente mais importante da margem esquerda, drenando uma área de 5.269 km².

As distribuições das vazões médias mensais relativas aos períodos estudados das séries históricas dos rios Tietê e Piracicaba mostram ter sazonalidade verificada na figura 2, obtida de Mortatti *et al.* (2003), que realizou um estudo da hidrologia dos rios Piracicaba e Tietê a montante de Barra Bonita para demonstrar a influência das ações antrópicas no regime hidrológico destes rios. Ele utilizou série histórica de vazões fluviais na cidade de Tietê e no distrito de Artemis (na cidade de Piracicaba), onde existem estação fluviométrica nos rios Tietê e Piracicaba, respectivamente. Verifica-se que, para ambas as bacias de drenagem, a maior vazão corresponde ao mês de fevereiro. Da mesma forma, o período de seca mais intensa é no mês de agosto, com as menores vazões médias.

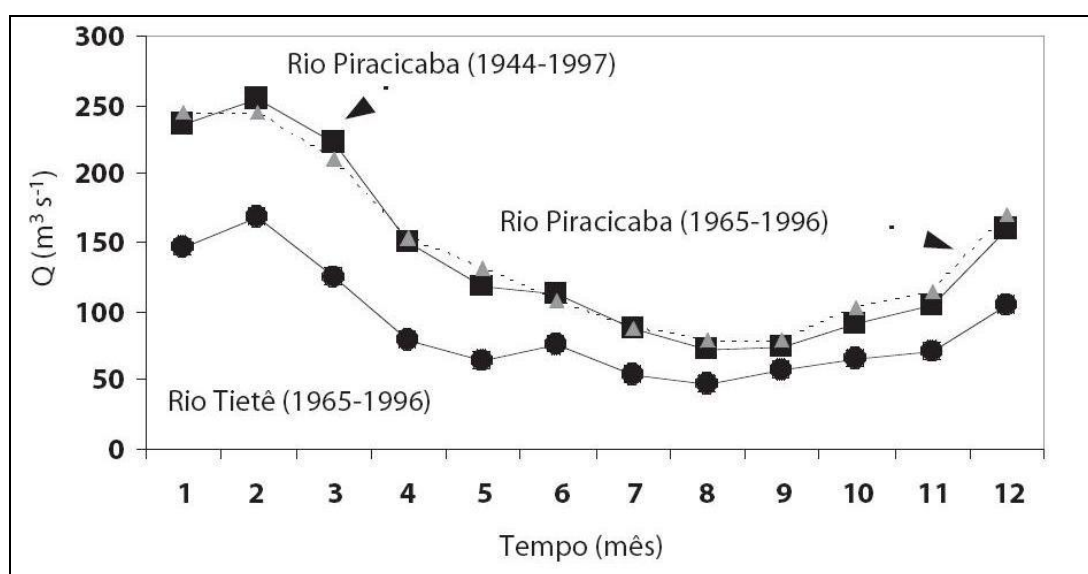


Figura 2 - Distribuição sazonal das vazões médias mensais dos rios Tietê (cidade Tietê) e Piracicaba (distrito de Artemis). Fonte: Mortatti *et al.* (2003).

3 – METODOLOGIA

3.1 - Modelo matemático utilizado

Através da inspeção de campo e análise do material disponibilizado pela AES Tietê, tais como fotos e relatórios ambientais (MRS, 2001), identificou-se que as bordas de reservatório da UHE Barra Bonita são caracterizadas por problemas associados tanto à processos erosivos laminares e lineares como a solapamentos de margens. Entre estes dois problemas, selecionou-se analisar através da modelagem a tendência a deslizamentos, visto que a erodibilidade do solo já foi bem caracterizada pelos ensaios de laboratório. Entre os modelos de deslizamento analisados optou-se pela utilização do SINMAP.

O modelo SINMAP (Stability INDEX MAPping) foi desenvolvido com a colaboração da Utah State University, Terratech Consulting, Canadian Forest Products, e C.N. Goodwin Fluvial System Consulting. Os desenvolvedores incorporaram avanços recentes obtidos nas pesquisas com hidrologia de encosta devidos a Beven e Kirkby (1979), ao clássico modelo de vertente infinita para determinação de estabilidade. Entre os avanços considerados pelo modelo pode-se destacar a utilização do conceito de área variável de afluência para estimativa da umidade do solo. Além disso, o SINMAP considera a coesão do solo e o efeito das raízes, incorporando ainda componentes de incerteza associados à variação temporal e espacial dos parâmetros. Com isto, o SINMAP pode estimar os graus de estabilidade das encostas com relação à ocorrência de deslizamentos de solo no entorno de reservatórios de barragens. O modelo permite que se faça o mapeamento de áreas de instabilidade a partir de dados topográficos (basicamente inclinação do terreno), tipos de solos e dados de chuva.

O SINMAP considera o modelo de estabilidade de vertente infinita onde são comparados os componentes desestabilizadores da gravidade e os componentes restauradores (parâmetros de resistência ao cisalhamento) num plano falho paralelo à superfície do terreno, desprezando-se os efeitos das margens (Pack *et al.*, 1997). A pressão dos poros devido à umidade do solo reduz a tensão normal efetiva, a qual, através do ângulo de atrito é relacionada com a força cortante. Essa pressão é obtida supondo-se estados uniformes (*steady-state*) e considerando-se que a proporção de solo saturado é suficiente para manter o escoamento lateral proporcional ao índice geomorfológico.

A utilização do parâmetro índice geomorfológico, definido como a área de contribuição por unidade de comprimento do contorno [m^2/m] (figura 3), tem sido um dos avanços recentes desenvolvidos na hidrologia. Este avanço, devido a Beven e Kirkby (1979), tem sido incorporado aos modelos hidrológicos como mecanismo para representar a geração do escoamento superficial. Esses desenvolvimentos procuram incorporar conhecimento oriundo de observações de campo, onde se verifica que os maiores índices de umidade do solo ou áreas saturadas, tendem a ocorrer em fundos de vale com relevo suave e vertentes côncavas, onde as linhas de fluxo são convergentes.

Além disso, estudos anteriores constataram que os deslizamentos de terra ocorrem, preferencialmente, em áreas de topografia convergente (Montgomery e Dietrich, 1994).

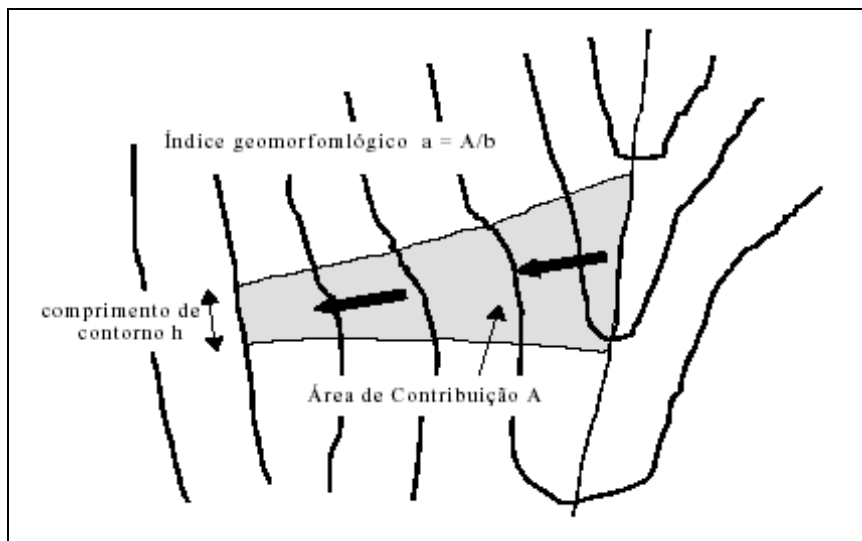


Figura 3 - Definição do índice geomorfológico

Resumidamente, o modelo funciona utilizando a declividade e o índice de umidade de forma distribuída, ou seja, calculados para cada *pixel* da área em estudo, e os demais parâmetros como constantes para cada região homogênea, sendo que estas podem ser definidas pelo tipo de solo predominante. Como a profundidade do solo também é considerada constante, é de fundamental importância definir regiões homogêneas quanto ao tipo de solo, cujos parâmetros são: transmissividade, coesão adimensional, e ângulo de atrito interno.

O SINMAP faz a classificação da estabilidade do terreno com base na variação espacial da declividade e do índice geomorfológico, e de outros parâmetros ligados às características do clima e do material constituinte do solo. Cada um desses parâmetros também pode ser considerado de forma distribuída. Primeiramente é calculado o índice de estabilidade, um valor numérico para cada unidade de terreno (*pixel*) que posteriormente é utilizado para classificar ou categorizar a estabilidade em cada ponto da área em estudo. As variáveis topográficas, declividade e índice geomorfológico são obtidas automaticamente do modelo digital do terreno (MDT), sendo que a qualidade destas informações depende da escala do mapeamento básico utilizado.

O conjunto de parâmetros ligados ao solo e à precipitação possui uma série de incertezas associadas, relacionadas tanto aos métodos de determinação quanto à variabilidade espacial e necessidade de regionalização dos valores dos parâmetros. Por isso, o modelo trabalha em termos de limites máximos e mínimos para estes parâmetros. Assim, o índice de estabilidade é definido como a probabilidade de uma região ser estável, assumindo distribuições uniformes de parâmetros sobre esses intervalos de incerteza.

3.2 - Definição dos dados de entrada e parâmetros do modelo SINMAP

Basicamente os dados de entrada do modelo SINMAP são dados topográficos, climáticos e pedológicos. Outro tipo de dado necessário ao SINMAP é a delimitação de subáreas dentro da região modelada (linhas de contornos), denominadas de regiões de calibração, onde é assumida homogeneização dos valores dos parâmetros pedológicos e climáticos.

Os dados climáticos são representados através da precipitação, a qual pode caracterizar uma situação extrema prevista ou um determinado evento observado. Já quanto aos dados pedológicos, são considerados parâmetros que representam algumas das principais características do solo obtidas da literatura ou, preferencialmente, de ensaios nos solos da região. Os parâmetros climatológicos e pedológicos incorporam algum grau de incerteza e admitem a adoção de limites inferior e superior. Formalmente, estes intervalos, definem os limites de distribuições uniformes de probabilidade, entre os quais se assume que os valores variam aleatoriamente.

Para definir as regiões de calibração foi necessária a utilização de dados secundários: tipos e usos do solo, e características dos solos obtidas dos ensaios realizados em nove pontos amostrais da região pelo Laboratório de Materiais e Estruturas do LACTEC (LACTEC, 2010a).

3.2.1 - Dados topográficos

O SINMAP realiza a análise de estabilidade na escala do mapa altimétrico, e assim, é de notável importância a existência de um modelo numérico do terreno com representação mais fiel possível das variações do relevo (Lopes *et al.*, 2007). Conforme apresentado em Paulin *et al.* (2010), deslizamentos pequenos e superficiais podem não ser detectados pelo modelo quando utilizados MDT com resolução espacial de 10 a 30 m. Por outro lado, deslizamentos mais profundos são representados por número suficiente de *pixels* com resolução do MDT de 30 m.

O modelo numérico do terreno disponível, inicialmente, para a região do entorno do reservatório de Barra Bonita apresentava resolução espacial de 30 m no plano horizontal, referenciada em WGS84/EGM96, gerado a partir de dados topográficos digitais produzidos pela NASA, Japan's Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) e Japan's Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC), em formato GeoTIFF, obtido através do Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model (GDEM). Entretanto, os dados de ASTER não apresentaram qualidade suficiente para gerar resultados factíveis na região estudada, pois esta resolução não permite a representação dos taludes nas bordas do reservatório, conforme o objetivo da simulação.

Para tentar obter dados mais representativos, foram digitalizadas manualmente duas cartas topográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Barra Bonita e Santa Maria da Serra, disponibilizadas por este instituto na escala 1:50.000 e com curvas de nível equidistantes

em 20 m. Através destes dados, os resultados gerados pelo SINMAP foram mais adequados. Entretanto, as margens do reservatório ainda não estavam bem representadas pelo mapa de declividades gerado pelo modelo, pois curvas de 20 em 20 m não permitem a produção de um MDT capaz de reproduzir as declividades verificadas nas bordas.

Para melhorar a representatividade das declividades das bordas foram gerados arquivos com *pixels* de 5 m, e introduziu-se artificialmente a informação de declividade das bordas, através de ferramenta disponibilizada no ArcView ®. Devido à capacidade de processamento da modelagem, esse procedimento só foi possível através do recorte da região estudada em três áreas menores. Através de uma análise visual das imagens registradas na inspeção de campo, identificou-se que, dentre os pontos mapeados, as maiores declividades pertencem a taludes, cujas alturas passam de 10 m, e as menores àqueles com até cerca de 3 m de altura. Com base nesta informação, foi realizada uma estimativa para representação no mapeamento das declividades de bordas mais próximas dos valores reais. A figura 4 apresenta o modelo digital do terreno referente à carta topográfica Barra Bonita, região cujos resultados serão apresentados neste artigo.

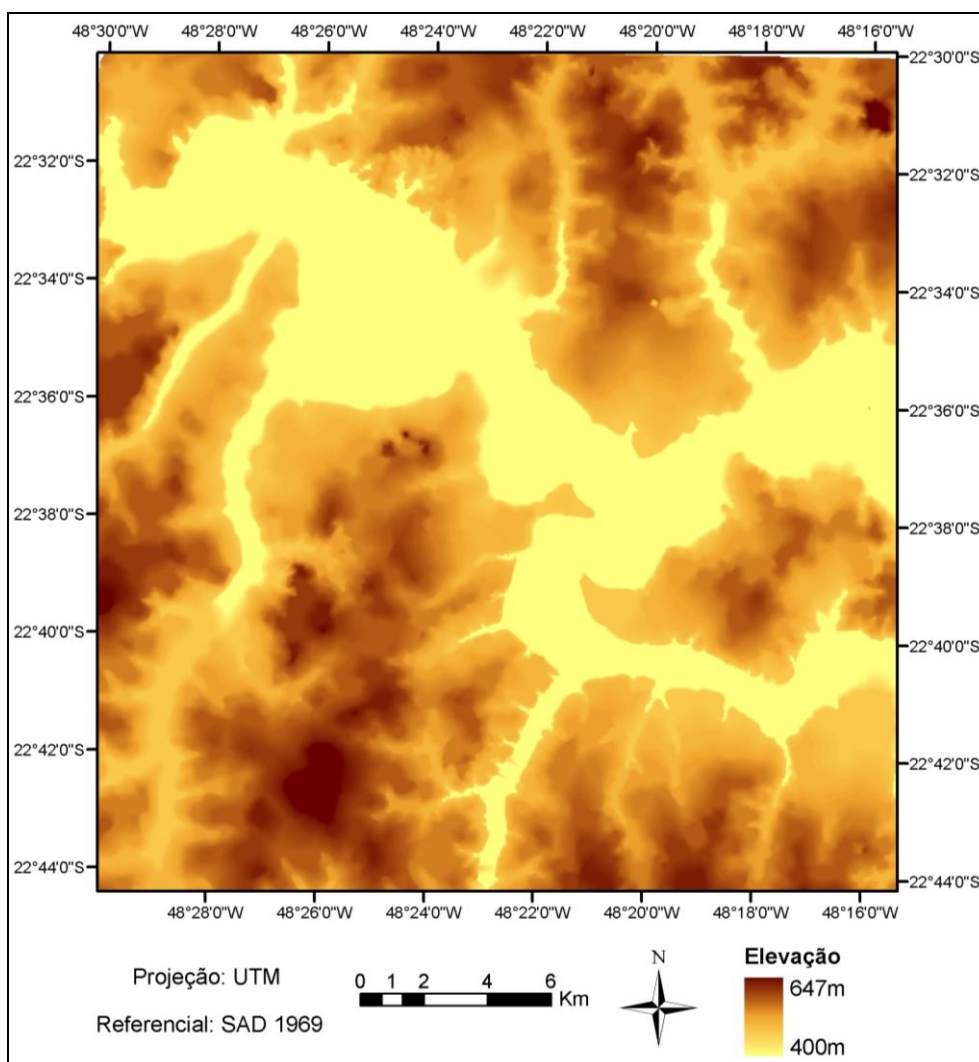


Figura 4 - Modelo Digital do Terreno, referente à carta topográfica Barra Bonita

3.2.2 - Dados climatológicos

A precipitação é um dos principais deflagradores dos escorregamentos. Na realidade, o modelo SINMAP considera como dado de entrada a recarga efetiva, que a rigor, é o valor da precipitação descontado dos valores devidos à evaporação, interceptação pela vegetação e percolação profunda. Porém, é comum, a despreocupação na valoração destes três fenômenos, visto que a definição destes valores não traz ganhos significativos frente à soma das outras incertezas, que possuem impacto significativamente maior que esta simplificação. Devido a estes fatores, no presente trabalho também considerou-se a recarga efetiva como sendo igual à precipitação.

A recarga efetiva deverá representar uma determinada situação de saturação que se deseje analisar, considerando o estado hidrológico uniforme (*steady-state*), onde a descarga lateral em cada ponto está em equilíbrio com o estado uniforme de recarga. A taxa de recarga efetiva é inserida no modelo combinada com a transmissividade do solo, outro parâmetro que deve ser estimado para possibilitar a simulação no modelo SINMAP. Assim, a razão entre transmissividade e taxa de recarga efetiva, dada em metros, combina fatores climáticos e hidrológicos (Vestena, 2010).

Para o cálculo da recarga efetiva foram considerados eventos críticos representados por chuvas intensas de 60 min de duração e tempo de recorrência de 50 anos. A adoção desta recorrência baseou-se na intenção de simular uma situação crítica e com uma probabilidade razoável de ocorrência. Apesar das durações das tormentas poderem ocorrer em um grande intervalo de tempo, observa-se que estas têm comumente ocorrido em períodos que variam entre 15 a 180 minutos, com grande número de eventos durando em torno de 60 minutos.

As chuvas intensas foram obtidas de DAEE (1999), que utilizou as equações definidas para diversas regiões do Estado de São Paulo. Neste trabalho, para a definição das equações de chuvas intensas, optou-se por seguir uma formulação matemática similar à apresentada em Mero e Magni (1982) *apud* DAEE (1999), que trabalharam somente com séries históricas anuais de intensidades de chuvas. As equações que relacionam intensidade, duração e frequência das precipitações para cada localidade, incorporam a expressão proposta por Ven-Te-Chow (Chow, 1951 *apud* DAEE, 1999), para a qual admite-se que as precipitações intensas atendem à distribuição de Gumbel.

Do trabalho apresentado em DAEE (1999), foram selecionadas duas estações pluviométricas localizadas mais próximas à bacia incremental que drena diretamente à área alagada do empreendimento. São elas: Botucatu e Piracicaba. O número de anos considerado para a análise de frequência de cada uma destas estações utilizou o período disponível até o ano de 1997. O valor da taxa de recarga adotado corresponde à média entre os valores encontrados para cada estação e o mesmo valor será aplicado em todas as regiões de calibração. A tabela 1 apresenta o valor de recarga efetiva adotado (valor único para os limites inferior e superior).

Tabela 1 - Valor de chuvas intensas para tempo de recorrência de 50 anos

Estação	Nº de anos utilizado	Precipitação (mm/h)
Botucatu	27	72
Piracicaba	18	104
Recarga Efetiva Adotada (Média)		88

3.2.3 - Dados pedológicos

Os parâmetros do modelo, definidos com base nas características dos tipos de solo, são: transmissividade, coesão adimensional, ângulo interno de fricção e densidade de campo. Para a definição destes valores foram considerados os ensaios geotécnicos realizados pelo LACTEC no âmbito desta pesquisa para nove pontos amostrais distribuídos ao longo das margens do reservatório (LACTEC, 2010a). Estes pontos amostrais são apresentados na figura 5.



Figura 5 - Identificação dos pontos amostrados no entorno do reservatório. (Modificado do Google Earth, 2010).

A transmissividade é um parâmetro hidrogeológico que corresponde à capacidade de um meio para transmitir água. Pode ser definida como a quantidade de água que escoar através da seção vertical do aquífero quando se diminui a carga hidráulica de uma unidade e expressa-se comumente em m^2/dia ou cm^2/s (LNEG, 2011). Considerando seu valor invariável ao longo do perfil do aquífero, pode ser calculada multiplicando-se a condutividade hidráulica pela espessura do aquífero (Fowze *et al.*, 2007).

A condutividade hidráulica saturada foi estimada para cada ponto amostral através dos teores de areia e argila, e da porosidade do solo, conforme metodologia apresentada em Rawls e Brakensiek (1985). Os valores da porosidade de cada tipo de solo foram calculados a partir do

índice de vazios (Krynine e Judd, 1957). Os valores do índice de vazios, porcentagem de argila e de areia presentes no solo foram obtidos dos pontos amostrais analisados pelo LACTEC (LACTEC, 2010b; e LACTEC, 2010c). A profundidade do solo foi encontrada no Levantamento de Reconhecimento de Solos do Estado de São Paulo (SNPA, 1960), para os tipos de solos correspondentes a cada amostra.

A tabela 2 apresenta os valores do índice de vazios, porcentagem de argila e de areia, profundidade do solo, porosidade, condutividade, transmissividade e densidade. Os valores de transmissividade assumidos são os mesmos para os limites superior e inferior.

Tabela 2 - Valores característicos do solo em cada ponto amostral

Reg. de Origem	Índice de Vazios	Argila %	Areia Total %	Profund. (m)	Porosidade	Condutivid. Hidráulica (m/h)	Transmis. (m ² /h)	Massa Específ. (kg/m ³)
P1	0,81	10,8	82,9	2,5	0,448	2,829	7,073	1570
P2	0,68	14,8	77,3	2	0,405	1,076	2,152	1780
P3	0,68	18	77,2	2	0,419	0,177	0,353	1900
P4	0,57	6,6	90,1	2	0,394	2,040	4,081	1700
P5	0,68	12,4	83,9	2	0,375	1,487	2,974	1710
P6	0,72	24,6	60,7	2	0,422	1,421	4,081	1610
P7	0,65	6,4	89,1	2	0,363	2,040	2,842	1740
P8	0,6	9,7	86,4	2	0,405	2,007	4,014	1750
P9	0,73	12,6	82	2	0,405	1,036	2,072	1770

A coesão adimensional, assim como o ângulo de atrito interno, é um dos parâmetros de resistência ao cisalhamento utilizados pelo SINMAP. Seu valor pode ser calculado pela equação (1), que leva em conta a coesão do solo, C_s , a coesão das raízes, C_r , a espessura do solo, h , e a densidade do solo, ρ_s .

$$C = (C_r + C_s) / (h\rho_s g) \quad (1)$$

A coesão do solo é resultado da atração eletrostática entre as superfícies de partículas que estão muito próximas, e, ou, resultante do efeito de agentes cimentantes, tais como óxidos e argila (Mitchell, 1976; Kimpe *et al.*, 1983 *apud* Silva *et al.*, 2005). Outra parcela da coesão do solo é resultado da tensão superficial da água nos capilares do solo, que tende a aproximar as partículas entre si, sendo uma parcela da resistência ao cisalhamento de solos parcialmente saturados (Fredlund e Rahardjo, 1993 *apud* Silva *et al.*, 2005). Para todos os pontos amostrais foi adotado o valor da coesão do solo obtida pelo LACTEC para o ponto 4, correspondente a 14,8 KPa (limite inferior e superior).

A coesão das raízes é um dos fatores que evidenciam a influência da cobertura vegetal sobre a estabilidade de taludes. Um dos fatores relacionados a esta influência é a profundidade de desenvolvimento destas raízes relacionada à profundidade total do solo e de suas características. Quando as raízes localizam-se acima do plano de deslizamento, entende-se que a sua coesão não

exerce nenhuma influência na estabilidade e assim pode ser considerada como nula.

São raros os estudos que quantificaram a coesão de raízes através de medições diretas. Assim, como em outras aplicações do SINMAP (Morrissey, 2001; Meisina, 2007; Vestena, 2010), foram adotados valores aproximados baseados em estudos realizados em outras regiões com vegetação similar. De forma geral, as regiões do entorno do reservatório de Barra Bonita apresentam cobertura vegetal característica de gramíneas ou são áreas sem cobertura vegetal.

Tsukamoto e Kusakabe (1984) analisaram através de medições em campo os valores reais da coesão de raízes em áreas escarpadas do Japão, utilizando o dispositivo de medição apresentado na figura 6. As piores condições analisadas caracterizaram valores de coesão de raízes variando, segundo uma probabilidade definida, por um valor médio de 3 kPa e desvio-padrão de 2 kPa. Estas condições foram observadas em uma escarpa onde as raízes das plantas não penetram na rocha intemperizada, assim, a zona de raiz está acima do plano de falha.

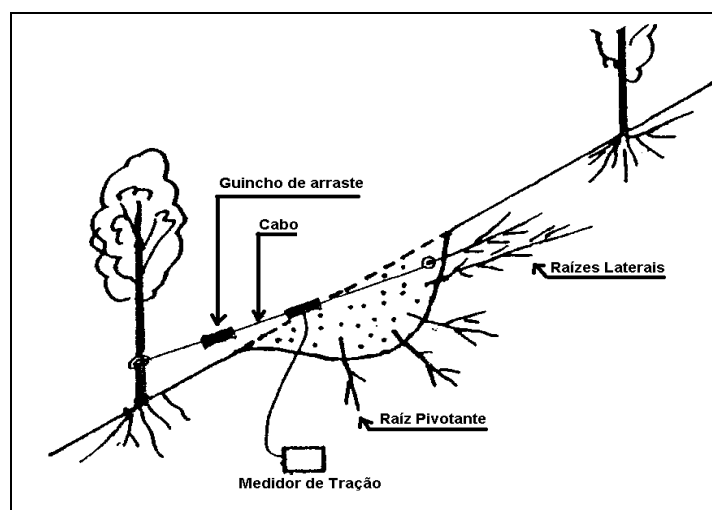


Figura 6 - Dispositivo de medição de coesão de raízes (Fonte: Tsukamoto e Kusakabe, 1984)

O trabalho desenvolvido por Morrissey (2001) analisou a estabilidade de taludes de uma pequena área de Madison County, Virgínia, comparando os resultados do SINMAP com outros modelos disponíveis. O autor considerou que o solo avaliado tinha coesão de raízes provavelmente menor que 2 kPa, pois o sistema solo-raiz analisado localizava-se acima do plano de falha e, conseqüentemente, a resistência da raiz teve reduzido efeito sobre a estabilidade dos taludes.

Lopes *et al.* (2007) utilizaram, para a região da Serra de Cubatão, SP, valores obtidos por Guimarães (2000), que definiu as classes de mata preservada, mata degradada e gramíneas a partir da interpretação de imagens de satélite e fotografias aéreas, com respectivos valores de coesão 20, 10 e 12 kPa.

Para verificar a influência da cobertura vegetal na coesão de raízes e sua conseqüente interferência na estabilidade de encostas, Schmidt *et al.* (2001), estimaram coesão de raízes para 41

locais na região costeira de Oregon, EUA. Os autores encontraram valores variando de 6,8 a 23,2 kPa em florestas industriais com significantes áreas de sub-bosque e vegetação decídua, e valores entre 25,6 a 94,3 kPa em florestas naturais dominadas por coníferas. Já para regiões de gramíneas, Schimidt *et al.* (2001) estimou coesão de raízes entre 1,6 e 2,1 kPa, considerando valores médios para raízes laterais e raízes pivotantes, respectivamente.

O maior valor encontrado para região de gramíneas por Lopes *et al.* (2007), em relação aos estimados por Schimidt *et al.* (2001), pode ser atribuído a existência de raízes mais profundas na Serra de Cubatão. Uma justificativa para isso seria que o local apresenta forte degradação da cobertura vegetal devido à poluição atmosférica (Wolle, 1986 *apud* Lopes *et al.*, 2007), e por isso, é possível inferir que as gramíneas nesse local apresentem raízes mais profundas a fim de buscarem nutrientes na região do solo abaixo da zona mais rasa contaminada com substâncias de origem atmosférica.

Assim, considerando as condições ambientais do entorno do reservatório de Barra Bonita, adotou-se 0 e 2 kPa como limites inferior e superior de coesão das raízes, sendo o limite superior uma aproximação dos valores encontrados por Schimidt *et al.* (2001) para gramíneas. Os valores adotados são conservadores, pois, devido aos intensos processos de solapamentos verificados nas bordas do reservatório, acredita-se que a coesão de raízes assume valores muito baixos ou não exerce influência no plano onde ocorrem as rupturas.

A contribuição para a estabilidade do solo também é influenciada pelo ângulo de atrito interno, cujo valor é reduzido à medida que a umidade do solo aumenta, devido o aumento da poropressão e conseqüente diminuição da força normal exercida sobre a matriz do solo (Pack *et al.*, 2005). Foram adotados os mesmos limites inferiores e superiores para os valores do ângulo de atrito (20° e 25°, respectivamente), os quais foram estimados a partir do ângulo de atrito obtido pelo ensaio realizado pelo LACTEC para o ponto de campo 4, cujo valor é 23,4°. Para a adoção do limite mínimo e máximo, foi analisada a ordem de grandeza da variação entre valores encontrados na literatura para solos similares (Schimidt *et al.*, 2001).

A equação do fator de segurança do modelo de estabilidade de vertente infinita adotado pelo SINMAP tem como um de seus parâmetros a densidade do solo úmido (umidade de campo ou natural). Portanto, foram utilizados os valores da massa específica natural, que corresponde à relação entre a massa total da amostra, incluindo a fase líquida, e seu volume total. Os valores massa específica natural adotados são os fornecidos pelos ensaios realizados pelo LACTEC para os pontos de amostragem (tabela 2). Para este parâmetro não existe a possibilidade de variação entre os limites inferior e superior, sendo necessário especificar um valor padrão para caracterizá-lo.

3.2.4 - Regiões de calibração

As regiões de calibração são áreas com os mesmos valores de densidade do solo e dos limites inferiores e superiores dos demais parâmetros de calibração: razão entre transmissividade e recarga, coesão adimensional e ângulo de atrito do solo (Pack *et al.*, 2005). Estas regiões são normalmente definidas através da análise dos mapas de solo, geológicos e de uso do solo para identificação das áreas que possuem características em comum.

Para a determinação das regiões de calibração do entorno do reservatório de Barra Bonita, tomou-se como base, primordialmente, a localização dos nove pontos amostrais, visto que, para estes locais são disponíveis os valores de alguns parâmetros exigidos pelo modelo SINMAP. Primeiramente, os pontos de amostragem foram agrupados conforme o tipo de solo em que estão localizados, segundo o mapa de classificação dos solos (MRS, 2001), resultando em três agrupamentos conforme os três tipos de solo encontrados na região do entorno do reservatório.

Em seguida, a fim de identificar se seria possível adotar as regiões de calibração diferenciadas conforme o tipo de solo, foram analisadas as características geotécnicas relacionadas aos parâmetros do modelo, bem como, a unidade geológica que cada ponto pertence, de acordo com o mapa geológico da região. Entre as características geotécnicas obtidas pelo LACTEC para cada um dos pontos foram analisados os valores da porcentagem de areia total e de argila, o índice de vazios e a erodibilidade, segundo o critério de erodibilidade de Araújo (2000) *apud* (LACTEC, 2010c).

Não foi possível considerar apenas os grupos formados pelos tipos de solo como determinantes dos contornos das regiões de calibração. Os critérios utilizados para criar estas regiões utilizaram outras informações fisiográficas e seguem a seguinte ordem hierárquica: determinação pela formação geológica em que o ponto se insere e determinação pelo uso do solo. O mapa com a delimitação das áreas de calibração é mostrado na figura 7.

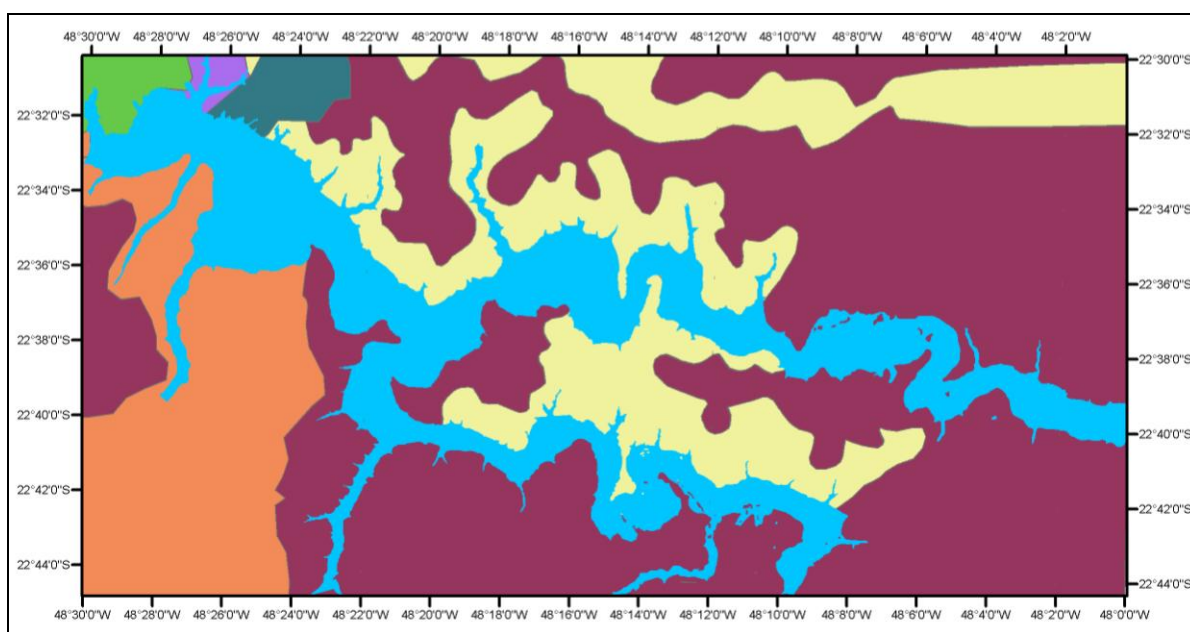


Figura 7 - Regiões de calibração do entorno do reservatório da UHE Barra Bonita

3.3 - Cenários analisados

O intuito da simulação dos cenários foi avaliar as variantes da ocupação da bacia, que podem influenciar na estabilidade das margens do reservatório. No presente artigo serão apresentados os seguintes cenários:

- **Cenário I:** considera as condições atuais de ocupação do entorno do reservatório.
- **Cenário II:** as áreas do entorno são consideradas completamente desmatadas. Objetivo: fornecer um panorama global da efetiva importância das áreas possuírem alguma vegetação e/ou correto manejo do solo.

3.4 - Resultados e discussões

As Figuras 8 e 9 apresentam as simulações referentes aos Cenários I e II, respectivamente. Para simular o Cenário I (situação atual) foram utilizados os dados de entrada apresentados no item 3.2. Para o Cenário II foram considerados os parâmetros do item 3.2, alterando-se, porém, os valores respectivos ao parâmetro coesão adimensional, anulando o efeito da vegetação sobre a estabilidade dos solos (coesão de raízes igual a zero).

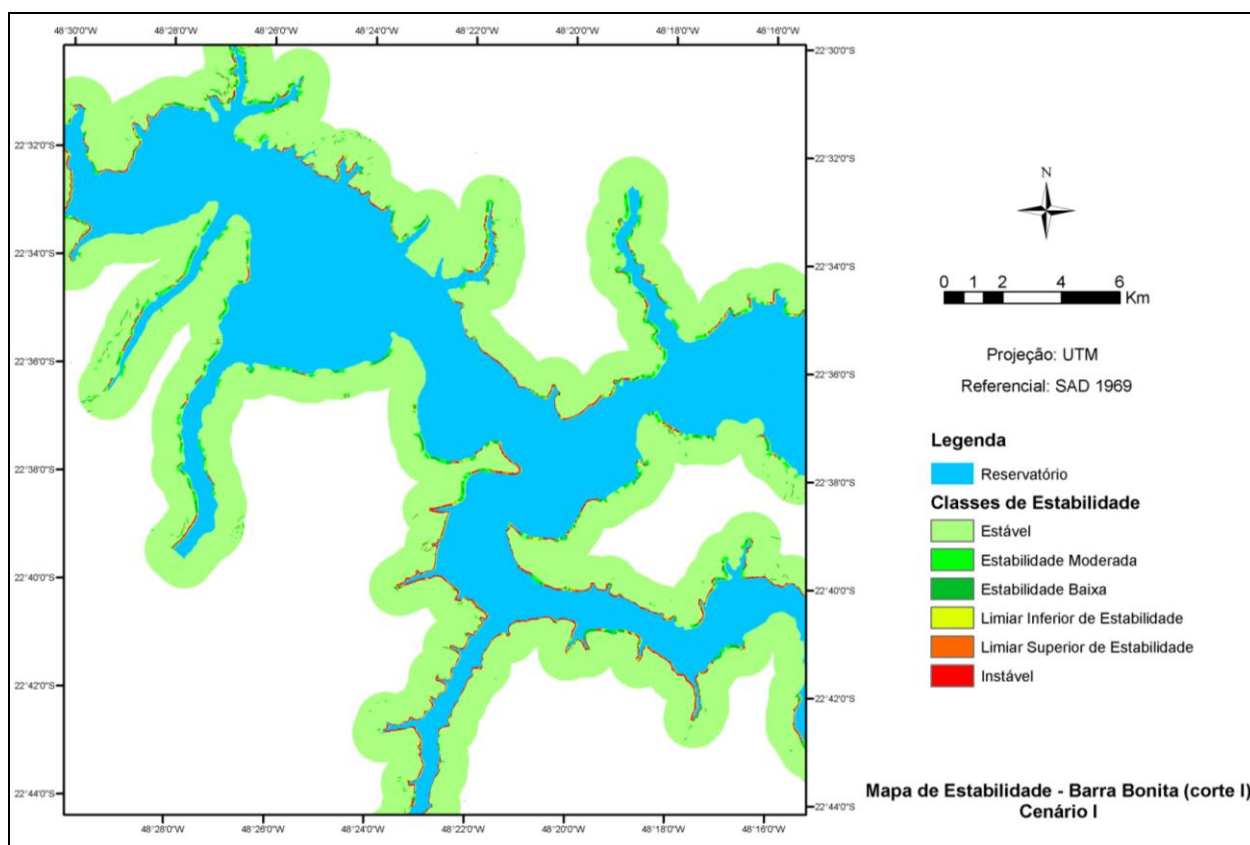


Figura 8 – Mapa de estabilidade referente à situação atual de ocupação do solo – Cenário I

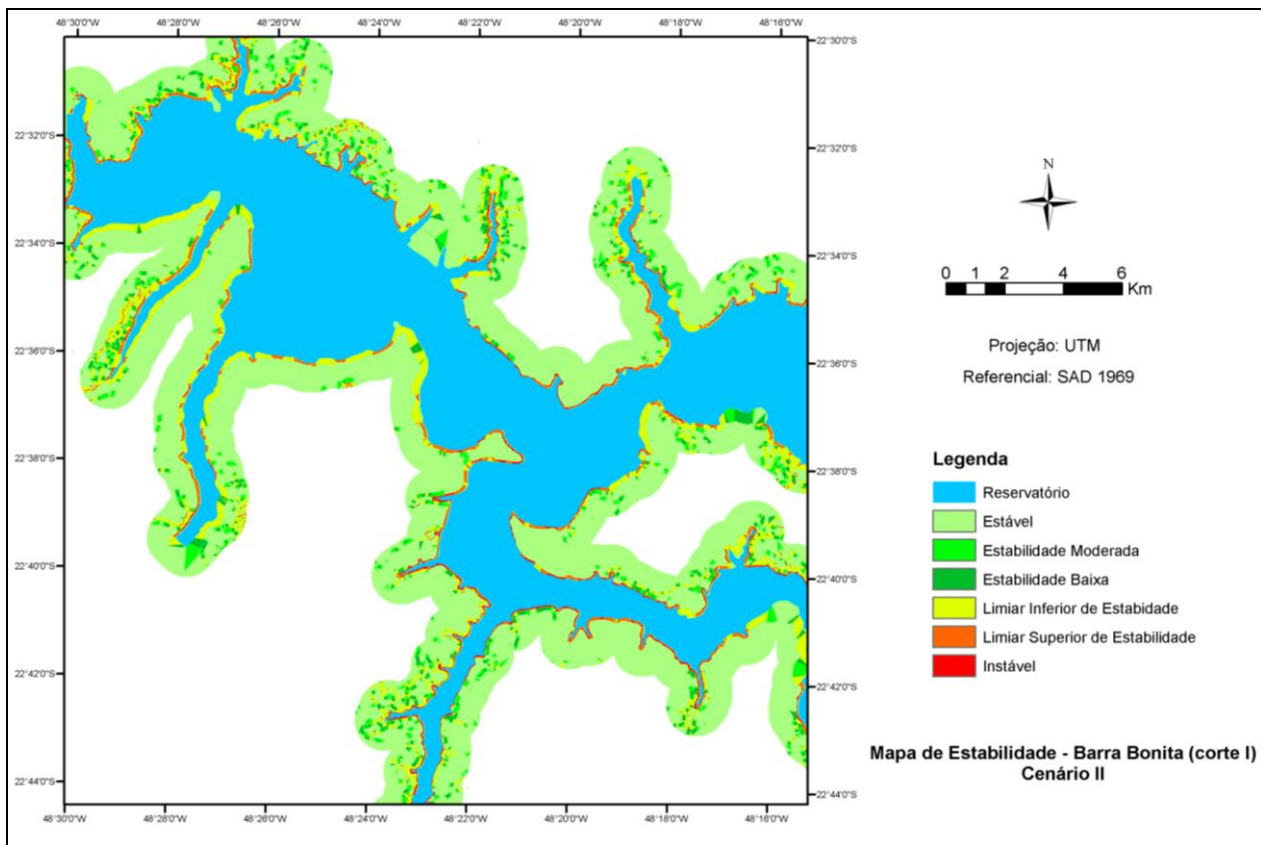


Figura 9 – Mapa de estabilidade referente ao cenário de retirada total da vegetação – Cenário II

As bordas do reservatório da UHE Barra Bonita possuem três situações referentes aos usos do solo: presença de gramíneas (pastagem), agricultura, e presença de árvores e arbustos. Os usos preponderantes são para agricultura ou pastagem. Assim, o efeito das raízes na coesão do solo foi considerado como muito baixo. Entretanto, mesmo valores muito baixos de coesão de raízes representam um efeito na estabilidade que não pode ser desprezado, como se pode observar na comparação entre as figuras 8 e 9.

4 - CONCLUSÕES

Para entender o processo de instabilidade que ocorre na bordas de reservatórios é necessário analisar todos os fatores que possam de alguma forma atuar sobre este processo. Sob este enfoque, a metodologia aqui proposta é adequada para analisar este fenômeno, visto que permite a inserção das informações mais relevantes para esta avaliação através da inspeção de campo e modelagem.

Verificou-se que, para a detecção de solapamentos nas margens, é necessário utilizar um MDT com resolução espacial de, no mínimo, 5 m. Normalmente, não se dispõe desta precisão neste tipo de informação, fato ocorrido também neste estudo. Entretanto, através de informações coletadas em inspeção de campo, foi possível aprimorar a informação topográfica e atingir o objetivo da pesquisa.

A simulação dos cenários ajudou a definir as próximas etapas, para as quais foram estabelecidos os valores de coesão adequados para garantir maior estabilidade nas margens. Verificou-se que, pequenas alterações nos valores da coesão podem tornar notáveis as alterações na estabilidade do solo. Assim, as próximas pesquisas deverão ser conduzidas no sentido de avaliar as possibilidades de aumento da coesão do conjunto solo/raízes, através da adoção de métodos específicos que, se adotados, poderão aumentar a segurança da população ribeirinha e diminuir os riscos de danos ambientais e operacionais.

Apesar das análises estarem condicionadas a diversas limitações, principalmente devido às simplificações adotadas quanto aos dados de entrada da modelagem, sua função mais relevante reside no confronto relativo entre as situações simuladas. Sob este aspecto, acredita-se que a metodologia indicada atingiu os objetivos propostos, pois permitiu avaliar a estabilidade das margens e poderá auxiliar na tomada de futuras decisões e medidas de controle e mitigação.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à AES Tietê, que por meio do Programa P&D ANEEL financiou este trabalho; e ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, que gentilmente forneceu as cartas topográficas. Os autores também agradecem as contribuições de Eder David Borges da Silva e Fabiano Scheer Hainosz, pesquisadores do LACTEC.

BIBLIOGRAFIA

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. (1979). “*A physically based, variable contributing area model of basin hydrology*”. Hydrological Sciences Bulletin, 24, p. 43-69.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. (1999). *Equações de chuvas intensas do Estado de São Paulo*. Convênio DAEE e Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras do Governo do Estado de São Paulo. Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos da USP. São Paulo.

FOWZE, J. S. M.; BUENA, D.; DAAG, A. S.; HAZARIKA, M. K.; SAMARKOON, L. (2007). *Spatial modeling of rain-triggered landslides. A case study in Southern Leyte Province, Philippines. Asian Conference on Remote Sensing (ACRS)*, (disponível em: <http://www.a-a-r-s.org/acrs/proceedings2007.php>; acesso em: 03/11/2010).

GUIMARÃES, R. F. (2000). “*Utilização de um modelo de previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos com controle topográfico: adequação e calibração em duas bacias de drenagem*”. Tese de Doutorado em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 150 f. Rio de Janeiro.

KRYNINE, D. P.; JUDD, W. R. (1957). *Principles of Engineering Geology and Geotechnics*. McGraw-Hill.

LACTEC – INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO. (2010a). *Desenvolvimento de metodologia para avaliação, quantificação e controle a baixo custo de erosão em bordas de reservatório - Relatório Técnico Referente à Inspeção de Campo*. Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento P&D ANEEL (AES Tietê). Curitiba.

LACTEC – INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO. (2010b). *Desenvolvimento de metodologia para avaliação, quantificação e controle a baixo custo de erosão em bordas de reservatório - Relatório Mensal nº 7*, Setembro. Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento P&D ANEEL (AES Tietê). Curitiba.

LACTEC– INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO. (2010c). *Desenvolvimento de metodologia para avaliação, quantificação e controle a baixo custo de erosão em bordas de reservatório - Relatório Mensal nº 8*, Outubro. Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento P&D ANEEL (AES Tietê). Curitiba.

LNEG – LABORATÓRIO NACIONAL DE ENERGIA E GEOLOGIA; E- Geo – Sistema Nacional de Informação Geocientífica. (Disponível em: http://e-geo.ineti.pt/bds/lexico_hidro/lexico.aspx?Termo=Transmissividade; acesso em: 15/03/2011.

LOPES, E. S. S.; RIEDEL, P. S.; BENTZ, C. M.; FERREIRA, M. V. (2007). *Calibração e validação do índice de estabilidade de encostas com inventário de escorregamentos naturais na bacia do rio da Onça na região da Serra de Cubatão, SP*. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 26, n. 1, p. 83-95.

MACHADO, R. E. (2002). *Simulação de escoamento e produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento*. Tese, doutorado em Agronomia. Escola Superior em Agricultura ‘Luiz de Queiroz’, Universidade de São Paulo. Piracicaba.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A. (1994). “*Physically based model for the topographic control on shallow landsliding*”. Water Resources Research, v. 30, n. 4, p. 1153-1171.

MORRISSEY, M. M.; WIECZOREK, G. F.; MORGAN, B. A. (2001). *A comparative analysis of hazard models for predicting debris flows in Madison County, Virginia*. U.S. Geol. Surv. Open File Rep. 2001. 67p.

MORTATTI J.; BORTOLETTO Jr. M. J.; MILDE L. C. E. & PROBST J. L. (2003). *Hidrologia dos rios Tietê e Piracicaba: série temporal de vazão e hidrograma de cheia*. Revista de ciência e tecnologia v12,nº 3 pg 55-67, Nov.

MRS Estudos Ambientais Ltda. (2001). *UHE Barra Bonita – Relatório Ambiental*. Porto Alegre.

PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N. (1997). *SINMAP - A stability index approach to terrain stability hazard mapping – Users Manual*. Utah State University, 1997. Disponível: <http://hydrology.neng.usu.edu/sinmap/>.

PAULIN, G. L.; BURSIK, M.; LUGO-HUBP, J.; OROZCO, J. J. Z. (2010). *Effect of pixel size on cartographic representation of shallow and deep-seated landslide, and its collateral effects on the forecasting of landslides by SINMAP and Multiple Logistic Regression landslide models*. Physics and Chemistry of the Earth 35 (2010) 137–148. Disponível em: www.elsevier.com/locate/pce. Acesso em 19/01/2011.

RAWLS W. J.; BRAKENSIEK, D. L. (1985). *Prediction of Soil Properties for Hydrologic Modeling In: JONES, E. B.; WARD, T. J. (Ed.). Watershed Management in the 80's*. New York. Cap. 13, p. 293-299. ASCE.

SNPA – SERVIÇO NACIONAL DE PESQUISAS AGRONÔMICAS. (1960). *Levantamento de Reconhecimento de Solos do Estado de São Paulo*. Ministério da Agricultura. Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas. Rio de Janeiro.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. (2005). *Influência de diferentes sistemas de uso e manejo na coesão, resistência ao cisalhamento e óxidos de Fe, Si e Al em solo de tabuleiro costeiro de Alagoas*. Revista Brasileira de Ciências do Solo, vol. 29, nº3, Viçosa, Maio/Junho de 2005. (Disponível em: <www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832005000300015&script=sci_arttext> acesso em 15/03/2011).

TSUKAMOTO, Y. E.; KUSAKABE, O. (1984). *Vegetation influences on debris slide occurrences on steep slopes in Japan*. Symposium on effects of forest land use on erosion and slope stability. University of Hawaii E-W Center Environmental and Policy Institute, p. 63-72. Honolulu.

VESTENA, L. R. (2010). *Mapeamento da susceptibilidade a deslizamentos na bacia hidrográfica do Caeté, Alfredo Wagner/SC*. Programa de Pós-Graduação em Geografia, UNICENTRO. Guarapuava.