

## UTILIZAÇÃO DO MODELO SINMAP PARA A AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DAS MARGENS DOS RESERVATÓRIOS SALTO OSÓRIO E SALTO SANTIAGO – PR

SANTOS, I. <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Prof. do Depto de Geografia da Universidade Federal do Paraná – [irani@ufpr.br](mailto:irani@ufpr.br)

GLUFKE, D. <sup>2</sup>

<sup>2</sup>. Aluna de Especialização em Educação, Meio Ambiente e Desenvolvimento da Universidade Federal do Paraná – [theaglufke@hotmail.com](mailto:theaglufke@hotmail.com)

CUNICO, C. <sup>3</sup>

<sup>3</sup>.Mestranda em Geografia da Universidade Federal do Paraná – LABOFIS/bolsista  
CAPES[camilacunico@yahoo.com.br](mailto:camilacunico@yahoo.com.br)

GIBERTONI, R.C. <sup>4</sup>

<sup>4</sup> Pesquisadora do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC – [rosana@lactec.org.br](mailto:rosana@lactec.org.br)

### RESUMO

A ação do homem sobre as bacias hidrográficas, no caso particular da construção de reservatórios, impõe variações ao regime hidrológico regional, introduzindo uma regularização no regime fluvial à jusante e significativas variações de nível à montante, o que torna necessário o monitoramento dos reservatórios e das eventuais conseqüências sobre as áreas ribeirinhas. Com o objetivo de avaliar a estabilidade das margens dos reservatórios Salto Osório e Salto Santiago, localizados na bacia hidrográfica do rio Iguaçu, Estado do Paraná, aplicou-se o modelo SINMAP (Stability Index Mapping) para estimar os graus de estabilidade das encostas com relação à ocorrência de deslizamentos de solo no entorno dos mesmos. A metodologia utilizada no SINMAP (PACK et al, 1997) permite a classificação da estabilidade do terreno com base na variação espacial da declividade e do índice geomorfológico, e de parâmetros relacionados ao clima e ao material constituinte do solo. Na avaliação da susceptibilidade à deslizamentos foi simulada a área do entorno dos reservatórios em uma faixa de 1.000 metros, que corresponde a uma área de aproximadamente 566 km<sup>2</sup> no Salto Santiago e cerca de 256 km<sup>2</sup> no Salto Osório. As variáveis topográficas foram obtidas automaticamente do modelo digital do terreno e os parâmetros transmissividade, coesão adimensional e ângulo interno de fricção do modelo, foram definidos com base nas características dos diferentes tipos de solo. Simularam-se dois cenários distintos com relação à existência ou não de vegetação. Os resultados obtidos em ambos os reservatórios mostram que as encostas apresentam condições que favorecem a estabilidade. Considerando-se apenas as áreas mapeadas como instáveis, efetivamente sujeitas à deslizamentos, notou-se que são insignificantes para ambos os cenários e reservatórios. No entanto, considerando-se as probabilidades de ocorrência de deslizamentos definidas pelas classes situadas no limiar de instabilidade, observou-se uma diferença significativa entre os cenários simulados. A distribuição espacial das classes de estabilidade segue aproximadamente a distribuição espacial das classes de declividade, com as áreas mais instáveis localizadas nas regiões com declividades mais acentuadas. A modelagem como a realizada pelo SINMAP é uma ferramenta bastante eficaz para o planejamento ambiental, uma vez que contribui para a elaboração de diagnósticos e posteriores prognósticos, subsidiando estudos de ordenamento e gestão do território.

Palavras-chave: Reservatórios, Deslizamento, Modelagem, SINMAP.

### INTRODUÇÃO

A ação do homem sobre as bacias hidrográficas, no caso particular da construção de reservatórios, impõe variações ao regime hidrológico regional, introduzindo uma regularização no regime fluvial à jusante e significativas variações de nível à montante, o

que torna necessário o monitoramento dos reservatórios e das eventuais conseqüências sobre as áreas ribeirinhas.

Com o objetivo de avaliar a estabilidade das margens dos reservatórios Salto Osório e Salto Santiago, localizados no Estado do Paraná, aplicou-se o modelo SINMAP (Stability Index Mapping) para estimar os graus de estabilidade das encostas com relação à ocorrência de deslizamentos de solo no entorno dos mesmos. O SINMAP permite que se faça o mapeamento de áreas de instabilidade a partir de dados topográficos, tipos de solos e dados de chuva. O princípio de funcionamento reside na combinação de modelos de estabilidade de encostas e modelos hidrológicos em regime permanente.

## ÁREA DE ESTUDO

Os reservatórios Salto Osório e Salto Santiago localizam-se na bacia hidrográfica do rio Iguazu (FIGURA 01), principal rio do Estado do Paraná, que possui suas nascentes nas proximidades de Curitiba.

A bacia corta três das cinco regiões morfológico-geográficas do Estado do Paraná, exceto as regiões da Serra do Mar e do litoral, sendo: Primeiro, Segundo e Terceiro Planalto Paranaense. Tanto a topografia como os rios nas três regiões revelam características distintas. O Iguazu representa um rio antecedente, geologicamente antigo, cruzando duas escarpas em vales de ruptura.

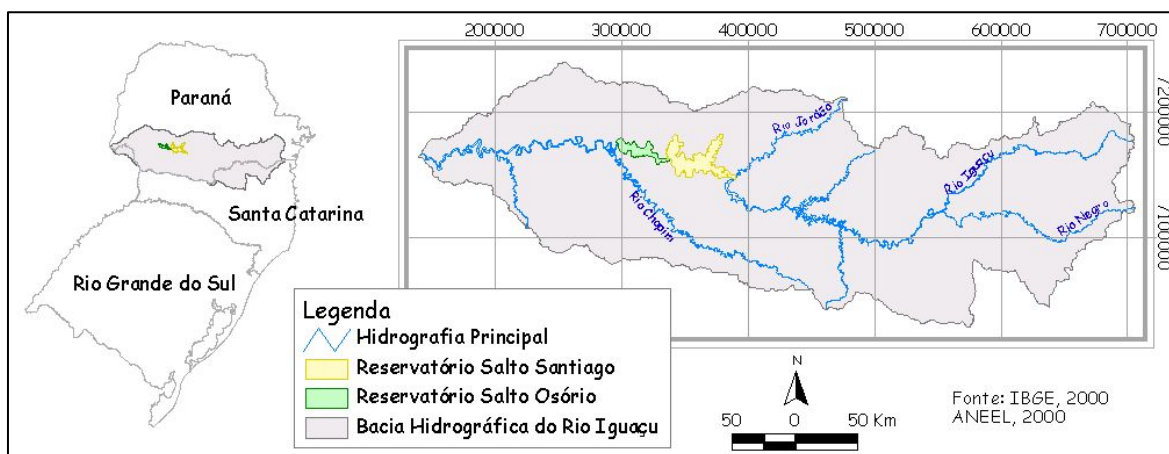


Figura 01 – Localização dos Reservatórios Salto Osório e Salto Santiago

## METODOLOGIA

A metodologia utilizada no SINMAP (PACK et al, 1997) é baseada no modelo de estabilidade de vertente infinita, que compara os componentes desestabilizadores da gravidade e os componentes restauradores do atrito e da coesão num plano falho paralelo à

superfície do terreno, desprezando-se os efeitos das margens. 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 (*SI*), um valor numérico para cada unidade de terreno 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. 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. Por isso, o modelo trabalha com limites máximos e mínimos que podem variar entre 0 (mais instável) e 1 (menos instável), sendo permitida a utilização de valores superiores quando são adotados parâmetros que favorecem a desestabilização e ainda assim resultam em estabilidade.

A Tabela 01 apresenta as classes de estabilidade definidas a partir do *SI*. Para a estabilidade das vertentes considera-se a natureza dos materiais constituintes e dos agentes perturbadores, quer sejam de natureza geológica, antrópica ou geotécnica.

Tabela 01 – Classes de Estabilidade

<b>Índice de Estabilidade</b>	<b>Classe</b>	<b>Classes de Estabilidade</b>	<b>Intervalo dos Parâmetros</b>	<b>Possível influência de fatores não modelados</b>
$SI > 1.5$	1	Estável	Instabilidade não prevista	São necessários fatores desestabilizantes significativos para gerar instabilidade
$1.5 > SI > 1.25$	2	Estabilidade moderada	Instabilidade não prevista	São necessários fatores desestabilizantes moderados para gerar instabilidade
$1.25 > SI > 1.0$	3	Estabilidade baixa	Instabilidade não prevista	São necessários fatores desestabilizantes mínimos para gerar instabilidade
$1.0 > SI > 0.5$	4	Limiar inferior de instabilidade	Combinação pessimista prevê instabilidade	Fatores desestabilizantes não são necessários para gerar instabilidade
$0.5 > SI > 0.0$	5	Limiar superior de instabilidade	Combinação otimista prevê estabilidade	Fatores estabilizantes podem gerar estabilidade
$0.0 > SI$	6	Instável	Estabilidade não prevista	Fatores estabilizadores são necessários para gerar estabilidade

Em função das características do modelo o fator de segurança é dado por (PACK et al, 1997):

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2 \theta [\rho_s g (D - D_w) + (\rho_s g - \rho_w g) D_w] \tan \phi}{D \rho_s g \sin \theta \cos \theta} \quad (1)$$

onde,  $C_r$  é a coesão da raiz [N/m<sup>2</sup>],  $C_s$  é a coesão do solo [N/m<sup>2</sup>],  $\theta$  é da declividade da encosta [graus],  $\rho_s$  é a densidade do solo úmido [kg/m<sup>3</sup>],  $\rho_w$  é a densidade da água [kg/m<sup>3</sup>],  $g$  é a aceleração da gravidade [9.81 m/s<sup>2</sup>],  $D$  é a profundidade vertical do solo [m],  $D_w$  é o nível do lençol freático dentro da camada de solo [m], e  $\phi$  o ângulo de atrito interno do solo [graus].

Na avaliação da susceptibilidade à deslizamentos foi simulada a área do entorno dos reservatórios em uma faixa de 1.000 metros. Esta faixa corresponde a uma área de aproximadamente 566 km<sup>2</sup> em Salto Santiago e cerca de 256 km<sup>2</sup> em Salto Osório.

Foram definidas regiões correspondentes aos tipos de solo existentes na área, sendo adotados parâmetros médios regionais definidos com base nas características de cada tipo de solo (EMBRAPA, IAPAR, 1984). Para os parâmetros relacionados aos solos foram adotadas faixas de variação buscando incorporar as incertezas associadas à determinação dos mesmos. As Tabelas 2 e 3 apresentam valores mínimos e máximos adotados para os parâmetros: relação transmissividade/precipitação (T/R), coesão adimensional (C), e ângulo de atrito interno ( $\phi$ ).

Tabela 2 – Parâmetros de solo adotados nas simulações de Salto Santiago

Tipo de Solo	Geral				Cenário I		Cenário II	
	T/R <sub>min</sub>	T/R <sub>max</sub>	$\Phi_{min}$	$\Phi_{max}$	C <sub>min</sub>	C <sub>max</sub>	C <sub>min</sub>	C <sub>max</sub>
Latosolo Roxo	1	20	25	45	0.28	0.33	0	0.28
Terra Bruna Estruturada	1	355	25	45	0.15	0.19	0	0.15
Terra Roxa Estruturada	1	10	25	45	0.25	0.30	0	0.25
Solo Litólico	1	5	25	45	0.36	0.46	0	0.36

Tabela 3 – Parâmetros de solo adotados nas simulações de Salto Osório

Tipo de Solo	Geral				Cenário I		Cenário II	
	T/R <sub>min</sub>	T/R <sub>max</sub>	$\Phi_{min}$	$\Phi_{max}$	C <sub>min</sub>	C <sub>max</sub>	C <sub>min</sub>	C <sub>max</sub>
Latosolo Roxo	1	20	25	45	0.28	0.33	0	0.28
Terra Roxa Estruturada	1	10	25	45	0.25	0.30	0	0.25
Solo Litólico	1	5	25	45	0.36	0.46	0	0.36

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das simulações são mostrados em tabelas e mapas, sendo apresentados dois cenários distintos com relação à existência ou não de vegetação: Cenário

I considerando a existência de vegetação arbórea cobrindo toda a área de estudo e Cenário II considerando a inexistência de cobertura vegetal arbórea.

A Tabela 4 apresenta um resumo comparativo dos cenários simulados para ambos reservatórios. As Figuras 2, 3, 4 e 5 mostram os mapas resultantes das simulações.

Tabela 4 – Resultado dos cenários simulados para Salto Santiago e Salto Osório

N.	Classe de Estabilidade	Salto Santiago Área (Km <sup>2</sup> )		Salto Osório Área (Km <sup>2</sup> )	
		Cenário I	Cenário II	Cenário I	Cenário II
1	Estável	505.02	233.00	242.11	148.72
2	Estabilidade moderada	33.07	46.78	8.26	21.19
3	Estabilidade baixa	21.68	69.50	4.61	26.92
4	Limiar inferior de instabilidade	6.18	202.73	1.17	56.84
5	Limiar superior de instabilidade	0.38	14.27	0.07	2.55
6	Instável	0.01	0.07	0.01	0.02
	<b>Total</b>	<b>566.34</b>	<b>566.34</b>	<b>256.24</b>	<b>256.24</b>

Os resultados obtidos em ambos os reservatórios mostram que as encostas apresentam condições que favorecem a estabilidade. Analisando-se o cenário I, mais próximo da realidade considerando-se as condições locais de vegetação, tem-se aproximadamente 1% da área apresentando probabilidade de ocorrer deslizamento de solo. Considerando-se apenas as áreas mapeadas como instáveis, efetivamente sujeitas à deslizamentos, nota-se que são insignificantes para ambos os cenários e reservatórios.

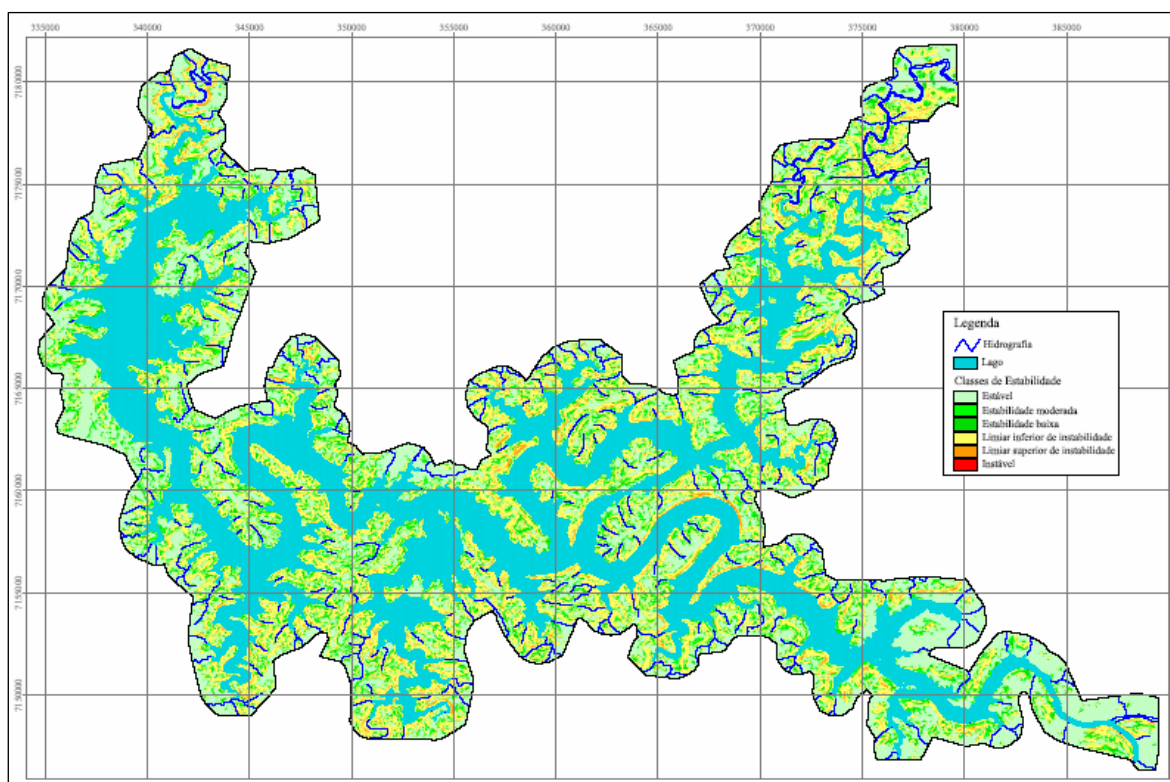


FIGURA 02 – Cenário I do Reservatório Salto Santiago

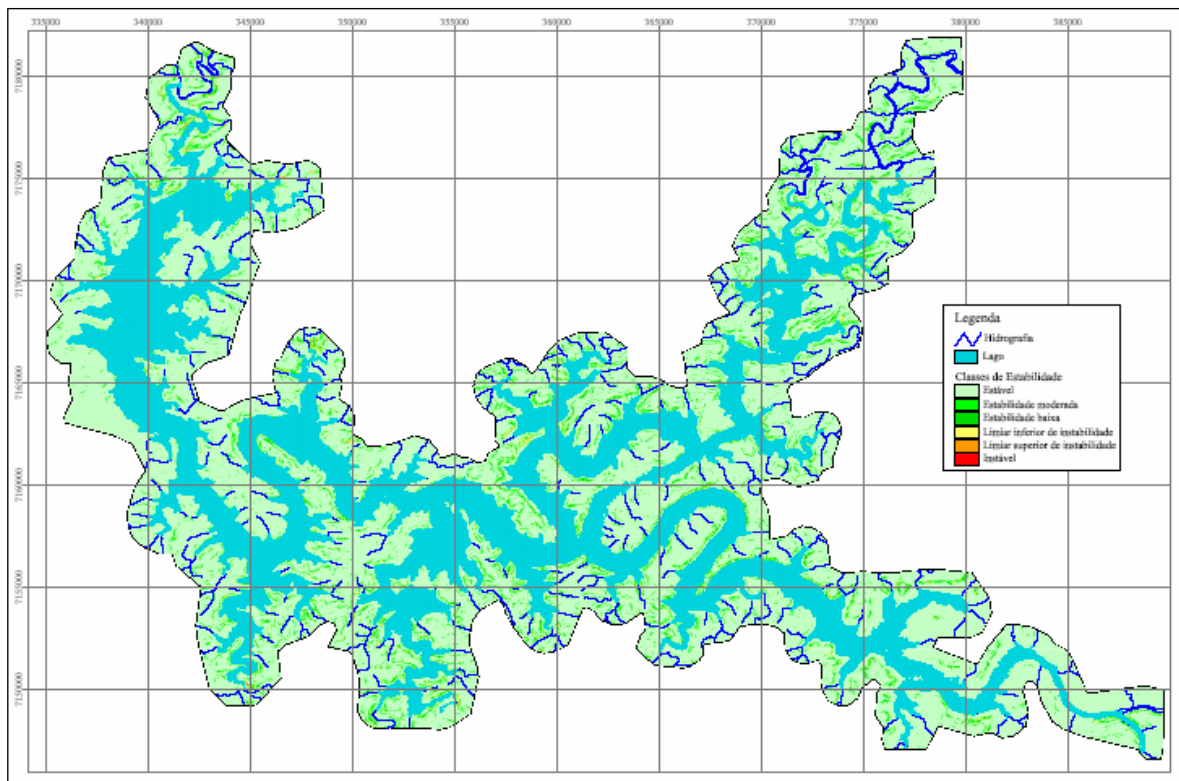


FIGURA 03 – Cenário II do Reservatório Salto Santiago

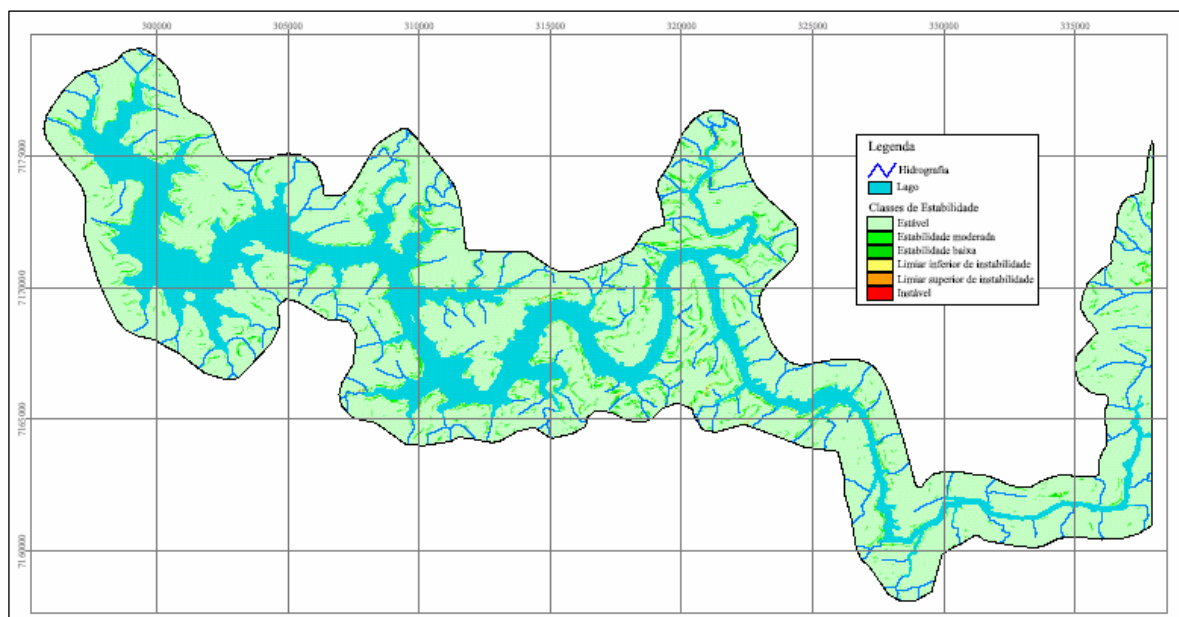


FIGURA 04 – Cenário I do Reservatório Salto Osório



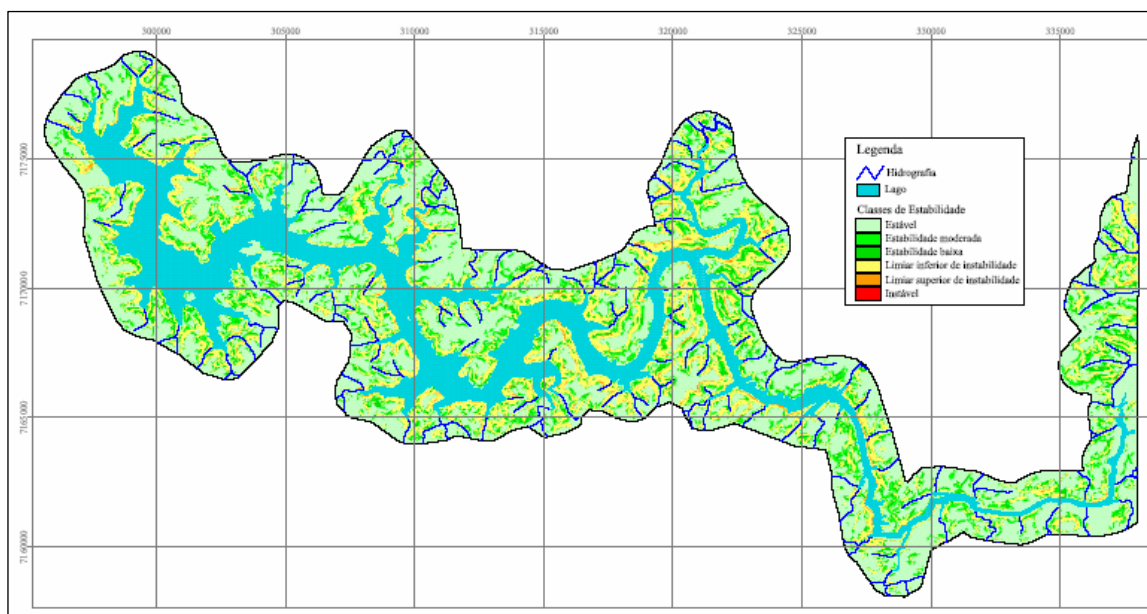


FIGURA 05 – Cenário II do Reservatório Salto Osório

No entanto, considerando-se as probabilidades de ocorrência de deslizamentos definidas pelas classes situadas no limiar de instabilidade, nota-se uma diferença significativa entre os cenários simulados, com o cenário II apresentando uma indicação mais favorável à ocorrência de instabilidade das encostas. Agrupando as três primeiras classes como indicadoras de estabilidade e as três últimas como sendo indicadoras de alguma probabilidade de ocorrência de deslizamento, têm-se para o reservatório de Salto Santiago que no cenário I, 99% da área não apresenta probabilidade de deslizamento e menos de 1% está sujeita a deslizamentos. No cenário II a área sem deslizamento baixa para 62% e a área provavelmente de deslizamento sobe para 38%. Para Salto Osório o cenário I resulta menos de 1% de área sujeita a deslizamento, subindo para 23% no cenário II. Estes resultados demonstram a importância da presença da vegetação arbórea na estabilização das encostas.

Analisando-se a distribuição espacial das classes de estabilidade nota-se que, conforme esperado, a configuração segue aproximadamente a distribuição espacial das classes de declividade, com as áreas mais instáveis localizadas nas regiões com declividades mais acentuadas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia utilizada permitiu a identificação e classificação do entorno dos reservatórios Salto Santiago e Salto Osório segundo limiar de instabilidade das encostas, utilizando-se dados topográficos, tipos de solos e dados de chuva, que influenciam na ocorrência de deslizamentos de solo.

A modelagem como a realizada pelo SINMAP é uma ferramenta bastante eficaz para o planejamento ambiental, uma vez que contribui para a elaboração de diagnósticos e posteriores prognósticos, subsidiando estudos de ordenamento e gestão do território.

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

EMBRAPA; IAPAR. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná**. Londrina: IAPAR, 1984. Tomos I e II. 791p.

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