

# INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NA ESTABILIDADE DE TALUDES NA BACIA DO RIO LIGEIRO (PR)

Ney Lyzandro TABALIPA <sup>1</sup> & Alberto Pio FIORI <sup>2</sup>

(1) Departamento de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR / Campus Pato Branco. PR469 – Via do Conhecimento, km 01. CEP 85501-970. Pato Branco, PR. Endereço eletrônico: ntabalipa@yahoo.com.br

(2) Departamento de Geologia, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, UFPR. Centro Politécnico – Caixa Postal 19.001. CEP 81531-980. Curitiba, PR. Endereço eletrônico: fiori@ufpr.br

## Introdução

Caracterização da Área de Estudo

## Materiais e Métodos

Determinação do Fator de Segurança

Fator de Segurança com Cobertura Vegetal

Pressão Exercida Pelo Vento Sobre as Árvores ( $\sigma_{ve}$ )

Contribuição da Raiz Para a Coesão do Solo ( $S_r$ )

Peso das Árvores ( $\sigma_a$ )

## Resultados e Discussões

Conclusões

Referências Bibliográficas

**RESUMO** – Este artigo apresenta um estudo para se conhecer a influência da vegetação na estabilidade de taludes na bacia do Rio Ligeiro, localizada no município de Pato Branco, Sudoeste do Paraná, Brasil, empregando um modelo matemático associado à utilização de técnicas de mapeamento temático em ambiente SIG. A análise para determinação dos índices de segurança foi efetuada através de método determinístico, baseado no conceito de equilíbrio limite. O modelo matemático adotado baseia-se na distribuição das forças atuantes em uma vertente infinita, considerando a influência da cobertura vegetal sobre as encostas e a saturação do solo. As variáveis atuantes no processo de movimentos de massa e que fazem parte do modelo matemático adotado, foram inseridas em mapas temáticos. Como resultado da interação de todos os parâmetros, obteve-se valores de Fator de Segurança para cada vertente. A análise dos dados mostra que a presença da vegetação é um fator positivo para o aumento do índice de segurança das vertentes, não havendo região instável onde existe vegetação. De acordo com os resultados alcançados no estudo, verifica-se que a bacia do Rio Ligeiro apresenta áreas com instabilidade, susceptível a escorregamentos, como consequência dos fatores ambientais, do meio físico e da ocupação antrópica das encostas.

**Palavras-chave:** Encosta, vegetação, fator de segurança.

**ABSTRACT** – *N.L. Tabalipa & A.P. Fiori - Influence of vegetation on stability of taludes of basin of Ligeiro river (PR).* This article presents a study to verify the influence of the vegetation on the stability of slopes in the Ligeiro river basin, situated in the city of Pato Branco, southwest of Paraná, Brazil using a mathematical model associated with thematic mapping techniques in GIS environment. The analysis to determine the rates of safety was accomplished through deterministic method, based on the concept of balance limit. The mathematical model is based on the distribution of forces engaged in an endless strand, and was considered the influence of vegetation cover on slopes and soil saturation. The variables working in the process of mass movements and forming part of the used mathematical model were incorporated into thematic maps. As a result of the interaction of all parameters, there were values of factor of safety for each strand. Data analysis shows that the presence of vegetation is a positive factor for the increase in the security index aspects, there isn't unstable region where there is vegetation. According to the achieved results in this study, it appears that the Ligeiro river basin presents areas of instability, likely to slip, as a result of environmental factors, the physical environment and the occupation of manmade slopes.

**Keywords:** Slope, vegetation, safety factor.

## INTRODUÇÃO

O uso e ocupação do solo nas cidades brasileiras por muito tempo ocorreram sem a adequada consideração das condicionantes geotécnicas, o que acarretou inúmeros desastres, principalmente em áreas urbanas.

Essa ocupação, sempre manipulada por interesses econômicos e falta de planejamento, realiza-se de forma desordenada, levando a usos inadequados, diminuindo a qualidade de vida da população existente no local e fazendo surgir inúmeros problemas, como erosões e

assoreamentos, escorregamentos, enchentes, recalques de solos, entre outros, que consomem grande recursos, além de, muitas vezes, colocarem em risco a vida da população local. Os escorregamentos são de grande preocupação no Brasil devido a maior possibilidade de perdas de vidas e vultosos prejuízos econômicos.

A estabilidade de uma encosta, em seu estado natural, é condicionada simultaneamente por três fatores principais: por suas características geométricas, por suas características geológicas (tipos de solos e compo-

sição das rochas) e pelo ambiente fisiográfico em que se insere o clima, cobertura vegetal, drenagens naturais, entre outros.

Os escorregamentos podem ser definidos como todo e qualquer movimento que envolva materiais terrosos ou rochosos que, por qualquer causa, processos ou velocidades, sofrem deslocamentos induzidos pelo agente gravidade.

Diversos autores ressaltam a importância da vegetação na proteção do solo e das encostas e que o desmatamento pode promover o surgimento de áreas de risco e escorregamentos.

Nesse sentido, Guidicini & Nieble (1983) afirmam que existe um consenso generalizado de que as florestas desempenham um papel importante na proteção do solo e que o desmatamento pode propiciar não somente o aparecimento da erosão, mas também de movimentos coletivos de solos.

Para Rodrigues (1998), o revestimento vegetal é o meio mais simples e eficiente de proteção de taludes contra a erosão provocada pelas águas da chuva e do vento.

Prandini et al. (1976) admitem que o escoamento superficial seja desprezível nas condições de florestas densas e que a cobertura vegetal também dificulta a penetração profunda da água no maciço.

Augusto Filho (1994) atribui, como efeitos favoráveis, a redistribuição da água da chuva e o acréscimo da resistência do solo devido à presença das raízes (reforço mecânico e escoramento).

O desmatamento de uma encosta gera uma série de efeitos que reduzem o coeficiente de segurança dessa mesma encosta, pois cessa a proteção realizada pelas partes aéreas da floresta, reduz os efeitos mecânicos do sistema radicular por deteriorização dos tecidos vegetais e faz com que os efeitos climáticos ocorram diretamente sobre o solo.

Segundo Gray (1995) na medida em se remove a vegetação das encostas, tem-se um incremento do enfraquecimento e desestabilização solos das encostas. Um dos primeiros estudos sobre esta questão foi conduzido por Bishop & Stevens (1964), ao investigarem áreas no sudeste do Alasca, verificaram um grande aumento na frequência dos escorregamentos e na área por eles afetada, após a derrubada de árvores. Eles afirmam que os escorregamentos são devidos à deteriorização e à destruição gradual do sistema de raízes.

Nesse sentido, Kozciak (2005) afirma que a remoção da sobrecarga e, conseqüentemente, a eliminação da ação dos ventos sobre a vegetação aumentam de imediato a segurança de uma vertente. Mas, ao cabo de um determinado tempo, ocorre novamente o incremento da instabilidade em virtude da deterioração do sistema radicular e da eliminação da redistribuição da água da chuva.

No entanto, é necessário destacar que, com relação aos movimentos coletivos de massa, existem algumas divergências sobre o papel da vegetação na estabilidade das encostas.

Segundo Vargas (1999), os efeitos do desflorestamento sobre a estabilidade dos taludes das encostas naturais é questão muito discutida, principalmente devido ao seu caráter interdisciplinar. Não há dúvida que existe a evidência da degradação da cobertura vegetal coincidir com escorregamentos generalizados das encostas, mas há também casos observados de grandes escorregamentos, deflagrados de chuvas violentas, em regiões cobertas por florestas. Nesses casos, o solo e os blocos de rochas carregavam consigo enormes troncos de árvores.

Prandini et al. (1976) citam que o seu efeito freador e dissipador de energia do material em deslocamento circunscrevem a área afetada, minimizando os danos em terrenos situados à jusante do escorregamento. Por outro lado, como efeitos desfavoráveis da cobertura vegetal, mencionam o efeito alavanca, pela ação dos ventos, o efeito cunha, pela penetração das raízes em fendas e a sobrecarga vertical devido ao peso da vegetação.

Gray & Leiser (1982) atribuem, como efeitos favoráveis: (a) a redistribuição da água proveniente das chuvas pelas copas das árvores, retardando e diminuindo a quantidade efetiva de água que se infiltra no solo; (b) a evapotranspiração retirando água do solo; (c) acréscimo da resistência do solo devido às raízes pelo reforço mecânico e pelo escoramento (raízes pivotantes e profundas). Como efeitos desfavoráveis, esses autores relacionaram: o efeito alavanca, força cisalhante transmitida pelos troncos das árvores ao terreno, quando suas copas são atingidas por ventos; o efeito cunha, pressão lateral causada pelas raízes ao penetrar em fendas, fissuras e canais do solo ou rocha; a sobrecarga vertical causada pelo peso das árvores, que pode ter um efeito benéfico, ou não, na estabilidade, em vista à inclinação das encostas e às características do solo.

Fiori & Borchardt (1997) propõem um importante estudo sobre o papel negativo que a vegetação pode desempenhar no índice de segurança das encostas. De acordo com o trabalho realizado pelos autores na região de Guaraqueçaba, litoral do Paraná, averiguou-se que em situação de rajadas de vento de 90 km/h, atuando no sentido da inclinação da vertente, a presença de vegetação situada em solos residuais, passa a contribuir negativamente na estabilidade de vertentes.

Neste trabalho, o objetivo principal é apresentar uma análise da estabilidade das vertentes na bacia do Rio Ligeiro levando-se em conta a influência da vegetação no cálculo do Fator de Segurança.

## CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia do Rio Ligeiro, com área de 44 km<sup>2</sup>, está localizada no município de Pato Branco, no Sudoeste do Estado do Paraná, entre as coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator), em quilômetros, 7.092 a 7.104 e 328 a 338 (Figura 1).

A distância da sede do município à Curitiba é de aproximadamente 433 km, na direção Oeste. O acesso à área, partindo de Curitiba, pode ser efetuado através da rodovia BR-476 que liga Curitiba a Horizonte. A partir de Horizonte, segue-se pela BR-280, em direção oeste, passando por Palmas, Clevelândia, Mariópolis e Pato Branco.

Segundo a Embrapa (1984), toda a área de estudo acha-se sujeita, conforme a classificação de Köppen, ao clima do tipo Cfb, com temperatura média do mês mais quente inferior a 22° C. A região encontra-se sob influência de um clima chuvoso, mesotérmico, úmido e superúmido sem estação seca, de verões frescos e geadas severas e bastante frequentes, com média de precipitação anual entorno de 2.109,79 mm/ano.

A área mapeada situa-se compreendida entre as altitudes de 600 a 1000 m e apresenta uma topografia de relevo suavemente ondulado com vales abertos na porção leste, sendo que na faixa oeste predominam as

superfícies levemente aplainadas. As temperaturas médias anuais na região variam entre 14° C e 22° C.

A caracterização e descrição dos solos se embasaram no Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Sudoeste do Estado do Paraná, Embrapa (1974), adaptado para a nova classificação adotada pela Embrapa (1999). Assim sendo, na área em estudo, ocorrem solos das ordens Latossolo (Roxo Álico), Nitossolo (Terra Roxa Estruturada), Cambissolo (Distrófico), Neossolo (Solos Litólicos Distróficos ou Álicos) e Depósitos Aluvionares.

A constituição geológica da região é relativamente simples, representada pelas rochas basálticas da Formação Serra Geral, que recobrem inteiramente a área mapeada. Segundo o Mapa Geológico do Brasil elaborado pela CPRM (1996), a geologia da região Sudoeste do Paraná se enquadra: JKβsg – Rochas basálticas do Grupo São Bento, Formação Serra Geral. As rochas são do tipo basalto toleítico com intercalações de arenito e rochas vulcânicas ácidas, ambas cortadas por diques e sills de diabásio.

Na área de estudo, a vegetação pertence à Floresta Subtropical Perenifólia que caracteriza-se por ser



FIGURA 1. Localização do Município de Pato Branco no Estado do Paraná.

mais resistente ao frio e menos exuberante que as florestas tropicais, sendo as árvores geralmente de porte médio, havendo, no entanto locais com domínio de indivíduos de grande porte e de grande diâmetro.

Esta floresta, em geral, apresenta três níveis ou

extratos, sendo o superior constituído por araucária, imbuia, cedro, canela e outras espécies de grande porte; o médio por pimenteira, erva-mate, caroba, bracatinga e outras; e o inferior por ervas, arbustos e gramíneas (Embrapa, 1984).

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução deste estudo, o trabalho foi dividido em três etapas. A primeira parte consistiu em fazer uma revisão da bibliografia sobre os aspectos naturais da área da bacia do Rio Ligeiro, caracterizando fisiograficamente a área de estudo. Além disso, agregou-se o cartas e base planialtimétrica de Pato Branco para preparar uma base cartográfica digital. A segunda parte consistiu em viajar ao local de estudo com o propósito de fazer um reconhecimento da área, registrando através de fotografias os aspectos gerais e coletando amostras de solo deformadas e indeformadas para posterior determinação do comportamento geotécnico de cada tipo de solo da área estudada, através de ensaios em laboratório que incluíram: análise granulométrica, teor de umidade, limites de Atterberg (limites de liquidez e limite de plasticidade), cisalhamento direto e de permeabilidade. Na última etapa, montou-se um banco de dados com as informações obtidas e aplicou-se a equação para os

cálculos do Fator de Segurança, partindo-se para a análise dos resultados encontrados e produção dos mapas temáticos. Nesta fase, também se elaborou o Mapa de Fator de Segurança.

Para extração das informações básicas, tais como curvas de nível, vias de acesso, rede de drenagem principal, pontos cotados entre outros, foram utilizadas cartas topográficas do DSG – Diretoria de Serviço Geográfico (1980 a, b), na escala 1:50.000 e a Base Planialtimétrica do Perímetro Urbano de Pato Branco, elaborado pelo Paranacidade, na escala 1:10.000.

Na seqüência, foi elaborado o Mapa de Uso e Ocupação do Solo através da classificação da imagem do satélite QUICKBIRD, resolução espacial – 0,60 m – em quatro bandas multiespectrais (PAN: 450 – 900 nm, Blue: 450 – 520 nm, Green: 520 – 600 nm e Red: 630 – 690 nm) datada de dezembro de 2005 (Figura 2).

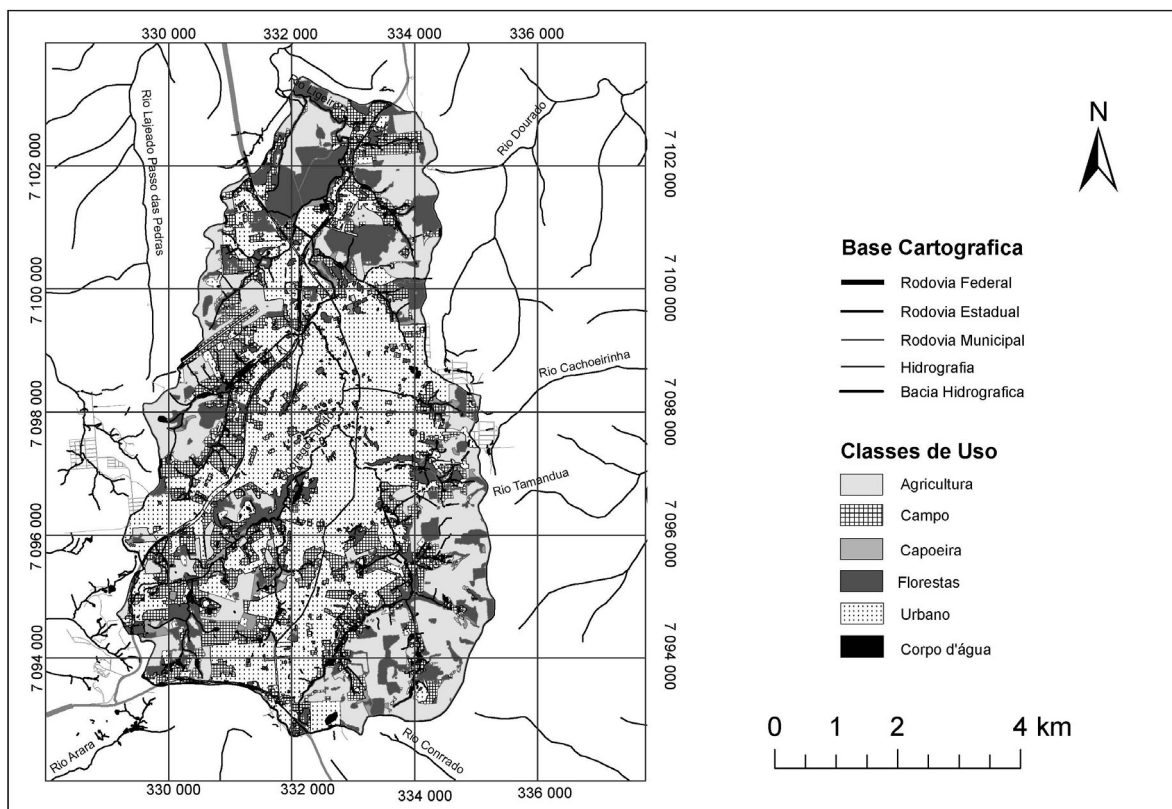


FIGURA 2. Mapa de Uso e Ocupação do Solo.



O Mapa de Uso e Ocupação do Solo foi de grande utilidade para a separação das áreas de cobertura vegetal de porte arbóreo (que influenciam no fator de segurança das encostas), das áreas de vegetação de porte mais ralo (de pouca relevância na aplicação da equação de fatores de segurança) das demais áreas sem vegetação.

As classes identificadas no mapeamento de uso e ocupação do solo basearam-se seguindo o critério proposto pelo IBGE (2006). As classes cobertas por estratos vegetais foram divididas conforme o seu porte e estágio de regeneração, ficando a legenda do mapa de uso e ocupação do solo assim representado:

- Agricultura: a essa classe correspondem todas as áreas de cultivo, independentemente do tipo de cultura e se de espécies perenes ou temporárias.
- Campo: classe que corresponde às áreas de pastagem sem presença arbustiva.
- Urbana: área com ocupação urbana, lotes residenciais, comerciais, industriais e infraestrutura pública.
- Capoeira: são comunidades vegetais de porte ralo a médio, que incluem os estágios da vegetação herbácea, regenerando após sofrerem corte raso.
- Florestas: consiste em toda a vegetação da formação pioneira e floresta secundária. A formação pioneira apresenta na sua estrutura original mais do que um estrato arbóreo. A floresta secundária sofreu regeneração, após o corte raso, apresentando assim diferentes estágios de vegetação, conforme a sua recuperação.
- Corpos d'água: classe que representa os rios e lagos existentes na área de estudo.
- Não classificado: classe que representa a área do mapa que não pertence ao município de Pato Branco, não sendo analisada no estudo.

Foram excluídas dos cálculos do Fator de Segurança as áreas ocupadas pelos Depósitos Aluvionares, por apresentarem-se totalmente estáveis, e os corpos d'água (totalizando 4,14 km<sup>2</sup>). As classes de Uso do Solo da bacia foram reorganizadas e ficaram divididas, respectivamente, em 1,66% de Capoeira, 16,43% de Florestas, 20,17% de Campo, 24,46% de Agricultura e 37,28% de Uso Urbano (Tabela 1).

## DETERMINAÇÃO DE FATOR DE SEGURANÇA

O Fator de Segurança ( $F_s$ ) indica o grau de estabilidade de uma vertente e ainda a superfície de ruptura crítica, quando este for mínimo. Trata-se de um valor adimensional que resulta da razão entre as forças resistentes ao movimento e as solicitantes do mesmo. Por esta definição clássica, observa-se que, quando as forças forem de igual valor, tem-se um Fator de Segurança unitário, representando a situação limite de equilíbrio, onde se igualam as forças resistentes e as solicitantes do movimento. Quando  $F_s < 1$ , significa que as forças solicitantes excederam às de resistência e, nesta situação, o talude é considerado instável. Caso contrário, quando o numerador for maior que o denominador, o  $F_s$  será maior que 1, denotando condição estável e estabilidade no sistema.

O modelo matemático adotado no trabalho teve por base a distribuição das forças atuantes em um talude de extensão infinita, avaliando a influência da vegetação, através do Fator de Segurança.

Os mapas de fatores de segurança foram obtidos a partir da aplicação de operações matemáticas e correlações espaciais entre mapas temáticos, utilizando Sistemas de Informação Geográficas. Os mapas temáticos utilizados para análise dos fatores de segurança foram: declividade, mapa de uso do solo, orientação das encostas e mapa de solos. Estes mapas foram

**TABELA 1.** Uso do Solo da bacia sem considerar áreas de depósitos aluvionares e corpos d'água.

Uso do solo na Bacia	Área total da bacia		Área da bacia sem os depósitos aluvionares e corpos d'água	
	Área (km <sup>2</sup> )	(%)	Total (km <sup>2</sup> )	Total (%)
Florestas	7,26	16,5	6,55	16,43
Capoeira	0,76	1,73	0,66	1,66
Urbano	16,81	38,2	14,86	37,28
Agricultura	9,91	22,52	9,75	24,46
Campo	9,09	20,66	8,04	20,17
Corpo d'água	0,17	0,39		
<b>Total da Bacia</b>	<b>44,00</b>	<b>100</b>	<b>39,86</b>	<b>100</b>

processados em ambiente GIS através do *software ArcGIS 9.2*, módulo *ArcMap*, e organizados como *coverage* poligonais, sendo sobrepostos com operação de análise espacial (*intersect – overlay*), e criado, então, um novo nível de informação, onde cada polígono é o resultado da intersecção de todos os polígonos de *input*. Na seqüência os parâmetros geotécnicos levantados foram inseridos no banco de dados produzido e associados aos novos níveis de informação gerados, de forma que cada polígono criado estivesse relacionado aos dados geotécnicos.

Nesta nova *coverage* criada, foram atribuídos novos itens (colunas) onde cada polígono passou a ter o resultado das equações aplicadas. Trabalhou-se diretamente com o *tool standart* de cálculo da *ESRI ArcMap Spatial Analyst*.

Para a confecção do mapa de fatores de segurança das encostas, foram estabelecidas nove classes de intervalo de fator de segurança e convencionou-se que, para a encosta ser considerada estável, o fator de segurança determinado deverá resultar em um valor maior que 1,5, em conformidade com o utilizado pelo DNER (1996) em taludes das rodovias brasileiras (Tabela 2).

Os valores de fator de segurança foram obtidos para a área da bacia do Rio Ligeiro a partir da aplicação do modelo matemático adotado (equação 06), através de operações matemáticas e correlações espaciais entre mapas temáticos, utilizando Sistemas de Informação Geográficas (Figura 3).

## FATOR DE SEGURANÇA COM COBERTURA VEGETAL

Para analisar a influência da cobertura vegetal na estabilidade de vertentes, primeiramente distinguiram-se as tipologias vegetais presentes na área de estudo.

**TABELA 2.** Definição das classes de cada intervalo de fator de segurança, considerando  $F_s$  de estabilidade determinado pelo DNER ( $F_s = 1,5$ ) como padrão.

Intervalos de $F_s$	Classes	Diagnóstico
$0 < F_s < 1$	1	Instabilidade
$1 \leq F_s < 1,5$	2	
$1,5 \leq F_s < 2$	3	Estabilidade crítica
$2 \leq F_s < 3$	4	Boa estabilidade
$3 \leq F_s < 4$	5	Alta estabilidade
$4 \leq F_s < 5$	6	Excelente estabilidade
$5 \leq F_s < 8$	7	
$8 \leq F_s < 10$	8	
$F_s \geq 10$	9	

Conforme o Mapa de Uso do Solo, a área de estudo apresenta vegetações dos tipos agricultura, campo, capoeiras e remanescentes florestais.

Quando a influência da cobertura vegetal é considerada na avaliação da estabilidade de encostas, alguns parâmetros podem ser acrescidos no caso de haver cobertura vegetal de porte considerado e ventos soprando no sentido da inclinação da vertente, conforme é mostrado na Figura 4.

## Pressão Exercida Pelo Vento Sobre as Árvores ( $\sigma_{ve}$ )

A pressão ( $\sigma_{ve}$ ) exercida pelo vento sobre uma cobertura vegetal pode ser transmitida ao solo, devendo esta força ser adicionada às forças favoráveis ao movimento. O cálculo que define a força do vento ( $F_{ve}$ ) está relacionado à inclinação da vertente, sendo obtido através da razão entre a pressão exercida pelo vento ( $\sigma_{ve}$ ), nas copas das árvores, com a área da vertente ( $1/\cos i$ ), dada por:

$$F_{ve} = \frac{\sigma_{ve}}{\cos i} \quad (1)$$

A pressão de arrasto do vento nas árvores foi investigada através de experimentos com florestas modelos, em túneis de vento (Hsi & Nath, 1970). Os dados obtidos pelos experimentos foram então submetidos à uma equação que determina o valor de  $\sigma_{ve}$ , sendo a pressão de arrasto do vento dada por:

$$\sigma_{ve} = C \left( \frac{\rho \mu_a^2}{2} \right) \quad (2)$$

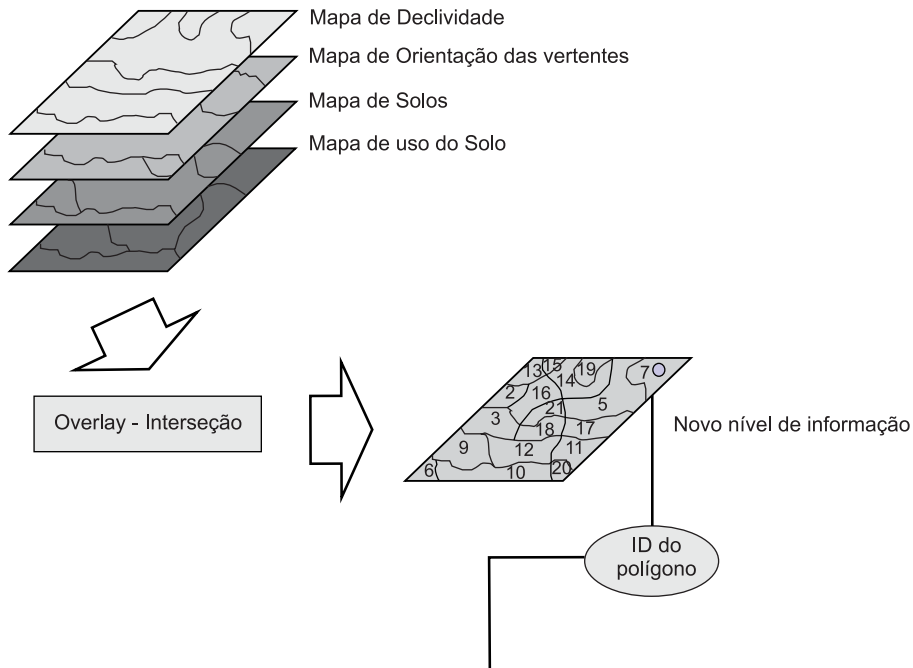
onde  $C$  é o coeficiente de arrasto, possuindo valores de 0,30 e 0,15 kPa;  $\rho$  é a densidade do ar (0,00123 g/cm<sup>3</sup>);  $\mu_a$  é velocidade do vento em km/h.

Estudos feitos por Styczen & Morgan (1995), segundo Fiori & Borchardt (1997) revelam que a força do vento somente tem significado para o aumento das forças favoráveis ao movimento, quando este sopra na direção do declive da encosta a partir de uma velocidade de 40 km/h.

## Contribuição da Raiz Para a Coesão do Solo ( $S_r$ )

Em oposição à pressão do vento na copa das árvores, a coesão do solo é acrescida na região do contato solo-raiz, reforçando a resistência ao cisalhamento num valor equivalente à variável definida como ( $S_r$ ).

Para avaliar a contribuição na resistência ao cisalhamento do solo pelas raízes, é necessário considerar a interação solo-raiz que leva a um aumento da resistência contra eventuais escorregamentos nas encostas (Waldron, 1977).



ID	UNIDADE	CLASSE	espessura (Z) m	h1 e h2	COESAO Cs	Angulo de Atrito (φ)	$\gamma_{nat}$	$\gamma_{sub}$	$\gamma_{sat}$	raiz $\theta$	$\gamma_s$	Pa kPa	Sr kPa	T Kn/m	declividade	DECL ADOT	DECL GRAUS i	DECL GRAUS	Ve km/h	Fve kPa	vento	Fs
1,00	(C) 263	CAMBISSOLO	0,75	0,38	7,90	16,49	16,10	7,97	17,97	45,00	10,00	3,00	5,90	5,00	15 - 20%	0,20	11,31	11°18'	90,00	1,00	1,0198	<b>4,882</b>
2,00	(E) 264	LATOSSOLO	2,50	1,25	3,78	21,60	14,70	6,98	16,98	45,00	10,00	3,00	5,90	5,00	0 - 5%	0,05	2,86	2°51'	90,00	1,00	1,0012	<b>9,989</b>
3,00	(D) 266	LATOSSOLO	2,50	1,25	15,23	18,37	17,00	7,18	17,18	45,00	10,00	3,00	5,90	5,00	0 - 5%	0,05	2,86	2°51'	90,00	1,00	1,0012	<b>13,838</b>
4,00	(F) 267	CAMBISSOLO	0,75	0,38	5,15	15,48	13,80	6,50	16,50	45,00	10,00	3,00	5,90	5,00	20 - 30%	0,30	16,70	16°42'	90,00	1,00	1,0440	<b>2,731</b>
5,00	(H) 268	TERRA ROXA	1,50	0,75	4,22	17,12	15,10	6,74	16,74	45,00	10,00	3,00	5,90	5,00	5 - 10%	0,10	5,71	5°42'	90,00	1,00	1,0050	<b>4,963</b>

FIGURA 3. Esquema das atividades realizadas para cálculo do fator de segurança. Fonte: Modificado de Kozciak (2005).

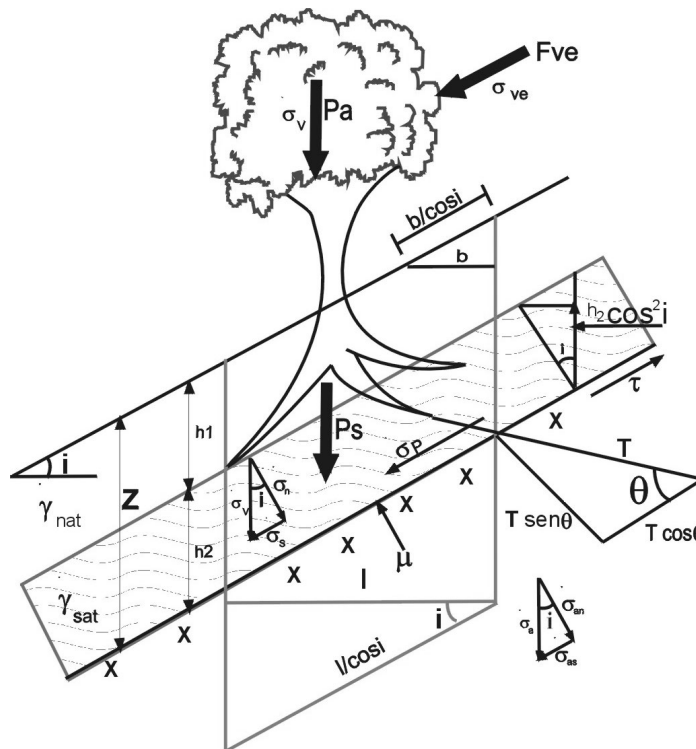


FIGURA 4. Principais fatores da vegetação que influenciam na análise de vertentes e forças atuantes. Fonte: Fiori & Carmignani (2001).

A contribuição das raízes para o aumento da resistência do solo ao cisalhamento ( $S_r$ ) foi estimada a partir da equação de Coulomb descrita em Fiori & Carmignani (2001), dada por:

$$S_r = \tau_r + \sigma_r \cdot \text{tg}\phi \quad (3)$$

Segundo Wu et al. (1979), o valor de  $S_r$  pode ser estimado em 5,9 kPa nas tipologias de florestas e nas áreas de vegetação rupreste e campos, quando estes apresentavam-se em solos com profundidade até 1,50 m.

### Peso das Árvores ( $\sigma_a$ )

A pressão ( $\sigma_a$ ) exercida pelo peso das árvores sobre uma encosta de inclinação ( $i$ ), é obtida multiplicando o peso das árvores ( $P_a$ ) pela área de abrangência das raízes.

Alguns pesquisadores estimaram valores para ( $\sigma_a$ ), sendo encontrados valores de 5,2 kPa (Wu et al., 1979); 2,5 kPa (Bishop & Stevens, 1964) e de 3,0 kPa na Serra do Mar (Wolle & Pedrosa, 1981).

A pressão ( $\sigma_a$ ) que a cobertura vegetal exerce sobre a vertente deriva do seu peso ( $P_a$ ) e é dada por:

$$\sigma_a = P_a \cdot \cos i \quad (04)$$

Para efeito de cálculo, no presente trabalho, considerou-se uma média de 3,6 kPa para florestas e 2,0 kPa para capoeiras, conforme Kozciak (2005).

Utilizando os parâmetros para determinar o fator de segurança, caso de solo saturado ( $h_1=0$  e  $h_2=Z$ ) e incluindo os parâmetros de cobertura vegetal (contribuição da raiz para a coesão do solo, a tensão a que são submetidas as raízes como forças resistentes ao movimento, a força do vento atuando sobre a copa das árvores, como força solicitante e o peso das árvores tanto como força resistente como solicitante), a equação utilizada pode ser definida como:

$$F_s = \frac{(C_s + S_r) + [(Z \cdot \gamma_{sub} + P_a) \cdot \cos^2 i + T \cdot \text{sen}\theta] \text{tg}\phi + T \cdot \cos\theta}{[(Z \cdot \gamma_{sub} + Z \cdot \gamma_a + P_a) \text{sen}i + F_{ve}] \cdot \cos i} \quad (6)$$

onde:  $F_s$  = fator de segurança;  $C_s$  = coesão do solo;  $S_r$  = contribuição da raiz para a coesão do solo;  $Z$  = profundidade do solo;  $\gamma_{sub}$  = peso específico do solo submerso;  $\gamma_a$  = peso específico da água;  $P_a$  = peso das árvores sobre o solo;  $F_{ve}$  = força exercida pelo vento nas árvores;  $\phi$  = ângulo de atrito interno do solo;  $i$  = ângulo de inclinação da vertente;  $T$  = tensão das raízes.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma vez determinadas todas as variáveis que atuam no processo de estabilidade de uma encosta, aplicou-se o modelo matemático, obtendo diferentes valores de fator de segurança nas simulações realizadas. Este modelo possibilita o mapeamento dos diferentes graus de risco ao escorregamento, interpolando os dados obtidos pelas equações de fator de segurança com os mapas temáticos elaborados.

Nesses casos, as forças derivadas da presença de vegetação aumentam a resistência ao escorregamento do solo. Observa-se que a presença de vegetação, aliada à coesão do solo, contribui significativamente para a estabilidade das vertentes, não havendo região instável onde existe vegetação.

Durante o mapeamento dos fatores de segurança das encostas, pode-se observar a existência de zonas estabilizadas pela cobertura vegetal, com altas declividades, tornando-se instáveis tão logo foi retirada a cobertura vegetal.

Considerando o solo saturado com vegetação observa-se, na Tabela 3, que mais de 3,29% da área da bacia apresenta-se instável com valores de  $F_s$  menores que 1,5. Caso fosse feita a extração da vegetação existente na bacia, as áreas instáveis ( $F_s < 1,5$ ) aumentariam de 3,29% para 6,27%.

Os fatores de segurança determinados, considerando a presença de vegetação e saturação do solo, permitiram produzir o mapa da Figuras 5.

Observa-se nitidamente que, ainda na Tabela 3, para a pior situação (quando não se consideram os parâmetros da cobertura vegetal em solos saturados), mais de 6,27% da área apresenta valores de  $F_s$  menor que 1,5, sendo que desses, 0,29% correspondem a áreas com valores de  $F_s$  menor que 1, ou seja, áreas altamente instáveis.

Através do estudo realizado, verificou-se que os parâmetros da cobertura vegetal auxiliam na estabilidade da encosta, uma vez que, fazendo-se a correlação entre o Uso do Solo e os fatores de segurança, as áreas vegetadas (florestas e capoeiras) não apresentaram porções instáveis ( $F_s < 1,5$ ). Todavia, quando se simulou a retirada dessa vegetação para calcular os  $F_s$  percebeu-se o surgimento de áreas com risco de escorregamento.

Em 18,33%, as áreas cobertas por capoeiras apresentaram instabilidade ao se retirar essa vegetação, enquanto que nas regiões de florestas a retirada da vegetação tornou instável 11,41% da área.

Independentemente da classe de solo, declividade do terreno ou velocidade do vento, em todos os casos



TABELA 3. Fator de segurança das áreas com e sem vegetação.

<i>F<sub>S</sub></i> das Áreas com Vegetação			<i>F<sub>S</sub></i> das Áreas sem Vegetação		
Classe	Solo Saturado Área (km <sup>2</sup> )	%	Classe	Solo Saturado Área (km <sup>2</sup> )	%
<i>F<sub>S</sub></i> < 1	0,08	0,19	<i>F<sub>S</sub></i> < 1	0,13	0,29
<i>F<sub>S</sub></i> 1 - 1,5	1,37	3,10	<i>F<sub>S</sub></i> 1 - 1,5	2,63	5,98
<i>F<sub>S</sub></i> 1,5 - 2	2,93	6,66	<i>F<sub>S</sub></i> 1,5 - 2	6,60	15,01
<i>F<sub>S</sub></i> 2 - 3	3,18	7,23	<i>F<sub>S</sub></i> 2 - 3	-	-
<i>F<sub>S</sub></i> 3 - 4	16,50	37,71	<i>F<sub>S</sub></i> 3 - 4	18,00	41,00
<i>F<sub>S</sub></i> 4 - 5	11,40	25,91	<i>F<sub>S</sub></i> 4 - 5	12,50	28,41
<i>F<sub>S</sub></i> 5 - 8	4,40	10,00	<i>F<sub>S</sub></i> 5 - 8	-	-
<i>F<sub>S</sub></i> 8 - 10	-	-	<i>F<sub>S</sub></i> 8 - 10	-	-
<i>F<sub>S</sub></i> > 10	-	-	<i>F<sub>S</sub></i> > 10	-	-
Não Considerada	4,14	9,40	Não Considerada	4,14	9,40
<b>Total</b>	<b>44,00</b>	<b>100,00</b>	<b>Total</b>	<b>44,00</b>	<b>100,00</b>

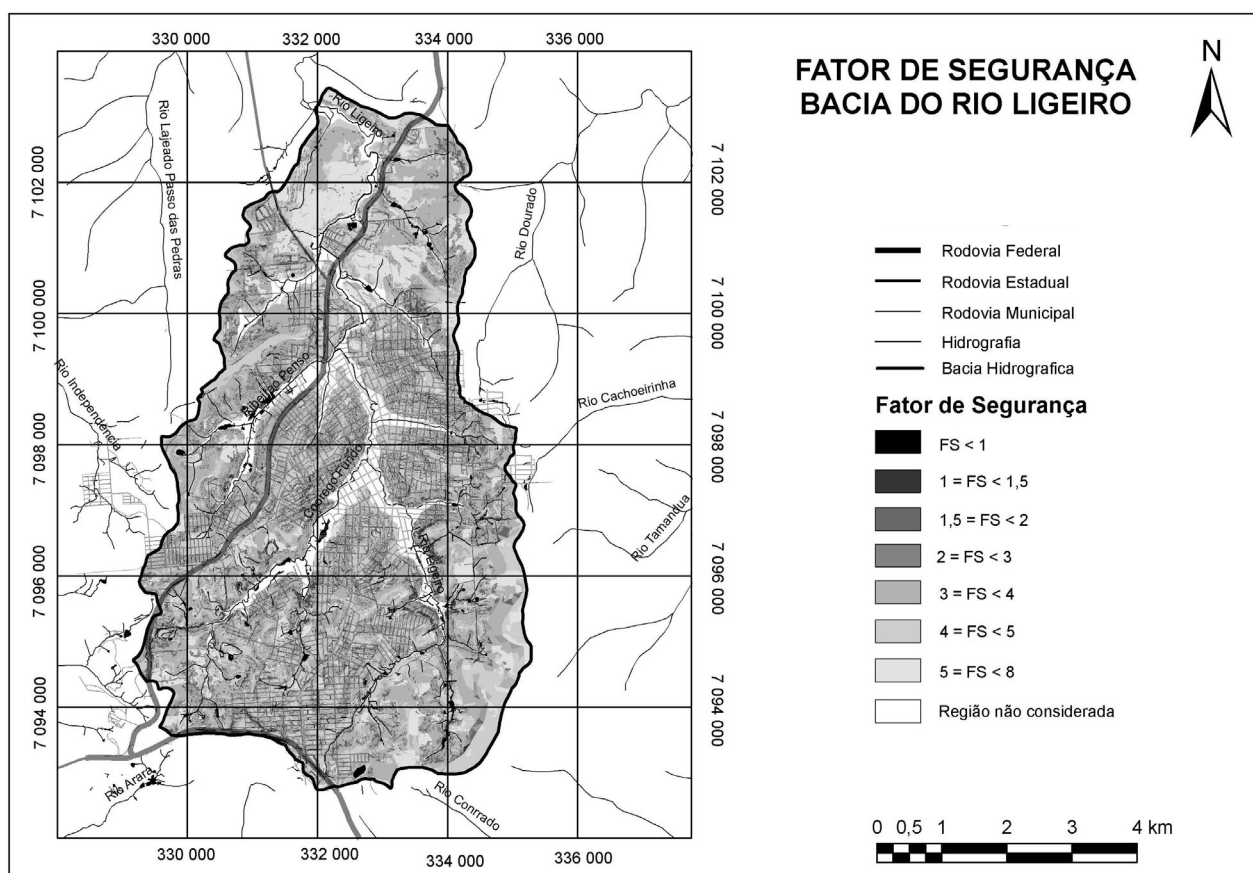
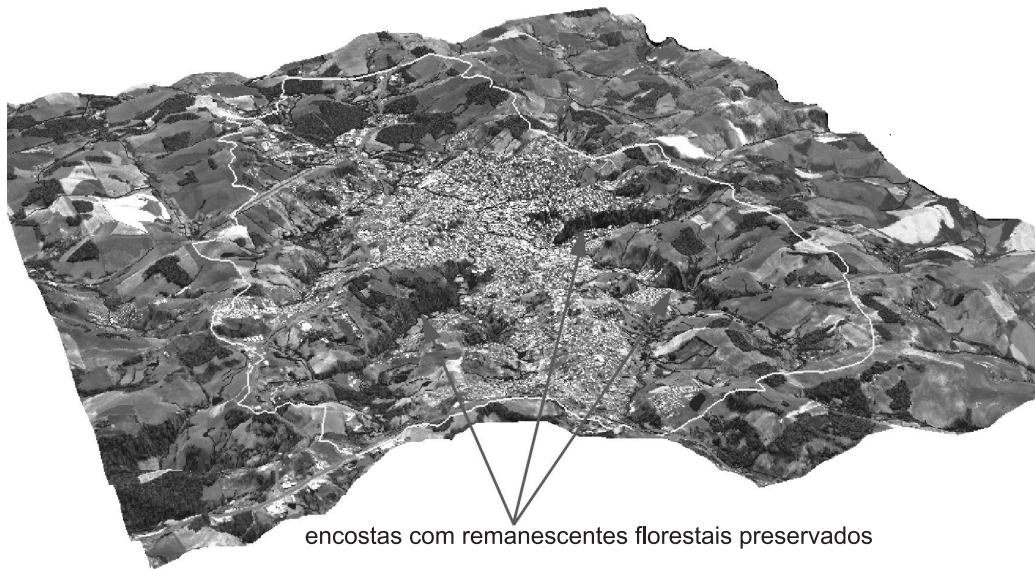
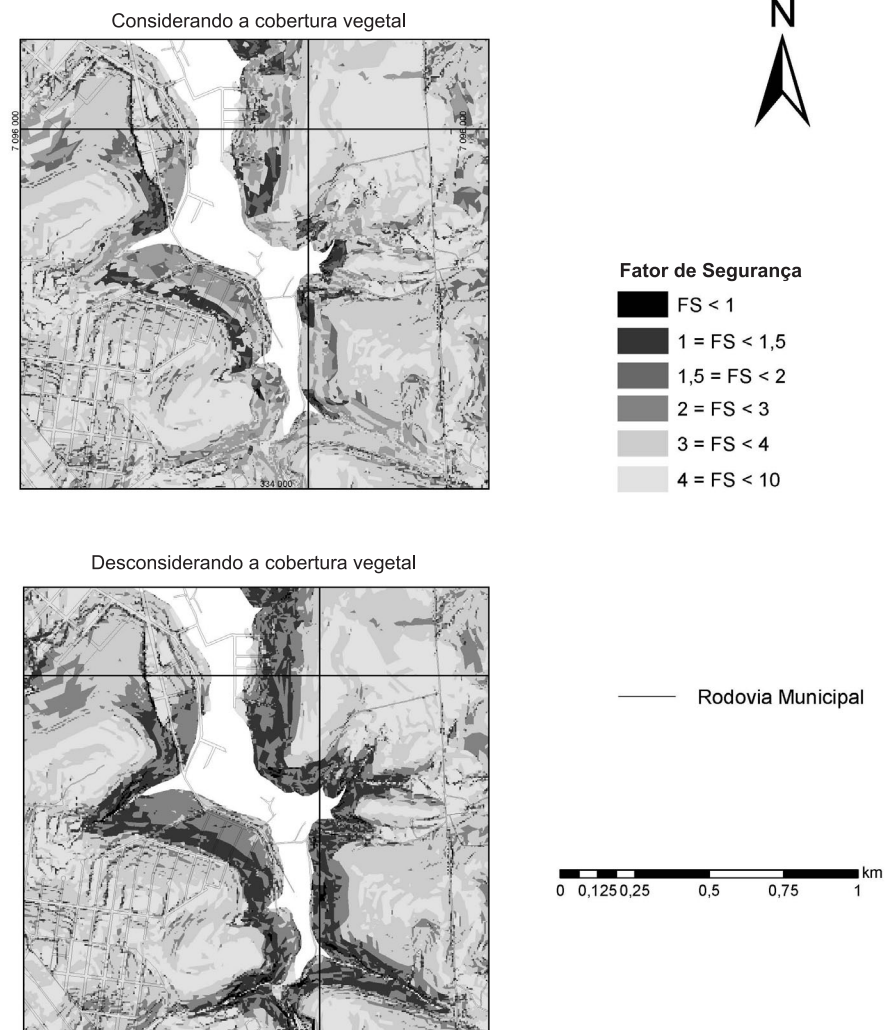


FIGURA 5. Mapa de fator de segurança do solo saturado com vegetação.



**FIGURA 6.** Delimitação da bacia do rio Ligeiro em 3D, mostrando vegetação preservada em encostas de grande declividade.

**Fator de Segurança de Solo Saturado**



**FIGURA 7.** Detalhe da área em estudo, mostrando a influência da vegetação no fator de segurança.

o fator de segurança nas áreas com vegetação de porte arbóreo foi superior a 2,0, indicando uma boa estabilidade.

Os remanescentes vegetais existentes na área da bacia encontram-se nas encostas de grande declividade (Figura 6) e, conforme se observou, foram preservados principalmente pela dificuldade da ocupação urbana dessas áreas.

Avaliando os resultados do fator de segurança determinados para solos sem cobertura vegetal, observa-se que a instabilidade ocorre em solo saturado a partir de declividades iguais a 20%. No caso de haver cobertura vegetal, o risco ocorre a partir de declividades superiores a 30%.

A Figura 7 mostra um comparativo do fator de segurança da mesma área (Bairro Bonato) com e sem vegetação. Na primeira parte, as áreas ocupadas por florestas e capoeiras estão estabilizadas apresentando  $F_s$  superior a 3,0. Na segunda parte, quando se descon-

siderou a cobertura vegetal, as áreas que estavam ocupadas por florestas e capoeiras se tornaram em grande parte instáveis, apresentando  $F_s < 1,5$ .

A Figura 8 mostra três pontos da encosta do Bairro Bonato que, segundo o cálculo do fator de segurança, são consideradas áreas instáveis com solo saturado e sem vegetação. ( $1 < F_s < 1,5$ ).

As encostas de grande declividade, como é o caso no Bairro Bonato (Figura 8 – Foto A), estão sendo ocupadas por invasões, sem planejamento e de forma desordenada ou através de aprovação incorreta de loteamentos. Com isso, as vertentes estão sendo modificadas, trocando a vegetação da encosta por construções ou solos expostos, o que tem contribuído para a ocorrência de escorregamentos.

Na Figura 8 – Foto B, pode-se observar em primeiro plano uma área onde a floresta da encosta foi retirada, sendo trocada por campo e pastagem, apresentando processo de instabilidade, sendo possível ver

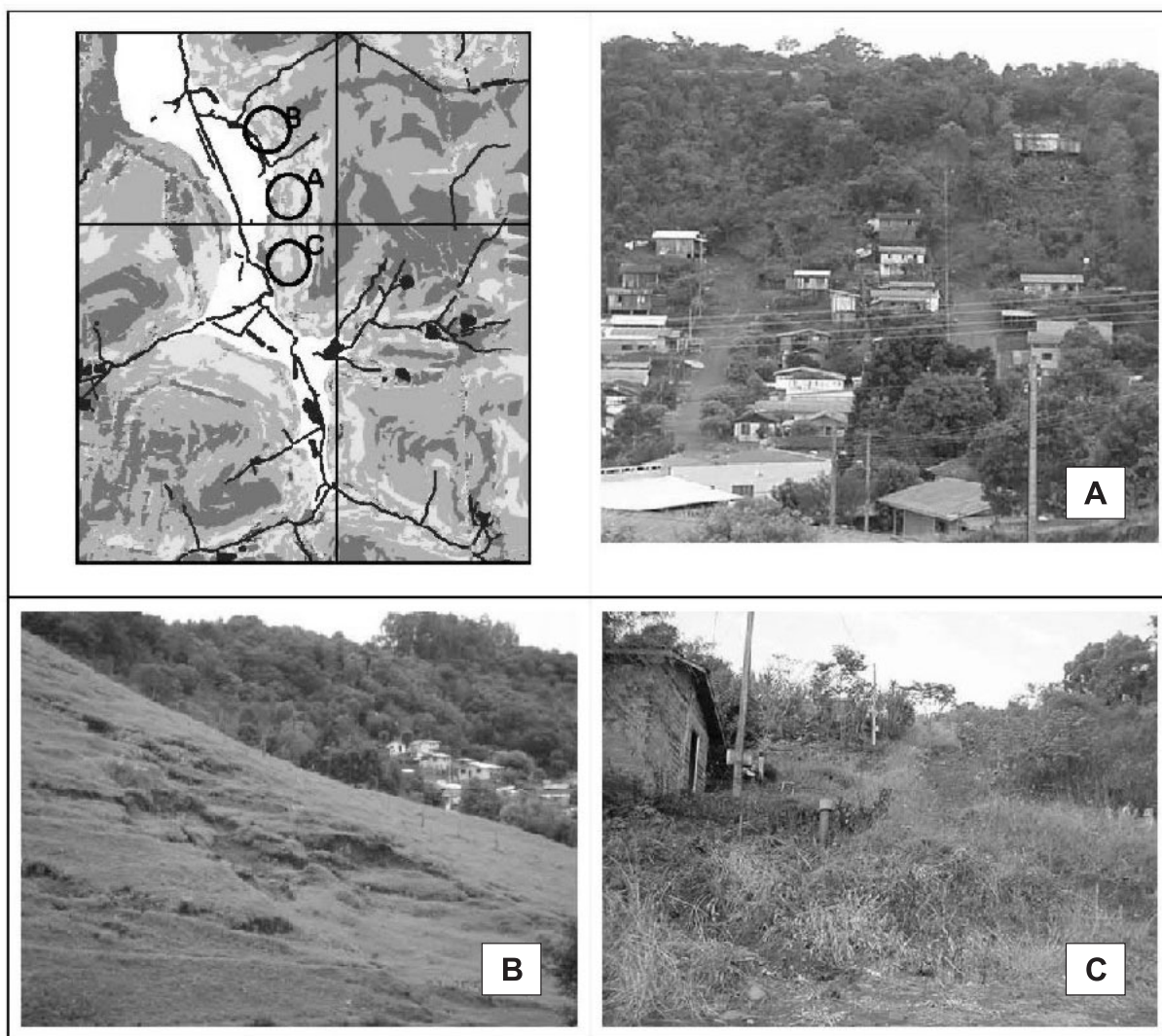


FIGURA 8. Detalhes do Bairro Bonato.



rastejos e erosões por toda a encosta, confirmando o resultado obtido nesse trabalho. Ao fundo da mesma foto, ainda é possível ver o surgimento de moradias morro acima, de forma desordenada, com retirada da vegetação.

Na Figura 8 – Foto C, pode-se notar que as encostas do Bairro Bonato, mesmo apresentando declividade superior a 60%, estão sendo ocupadas e a vegetação está sendo retirada para dar lugar às moradias, tornando-as áreas de risco.

Importante mencionar que, conforme o Mapa de Fator de Segurança, as áreas das Fotos A, B e C (Figura 8) estão localizadas em regiões com risco de escorregamento quando o solo estiver saturado e a vegetação for retirada.

Essas ocupações contrariam, além dos critérios geológicos e ambientais, as determinações da Lei

Federal 6.766/79, que trata do parcelamento do solo urbano e considera que, em terrenos com declividade > 30%, somente será admitido o seu parcelamento ou uso se atendidas as exigências específicas das autoridades competentes e as determinações da Lei Federal 4.771/65, que institui o Código Florestal, modificada pela Lei Federal 7511/86, que considera de preservação permanente as vegetações naturais em encostas com declividade superior à 45°.

É comum ver loteamentos sendo aprovados pela Prefeitura Municipal de Pato Branco, em áreas sujeitas a essas restrições legais sem o cumprimento das exigências específicas, mesmo possuindo informações sobre o meio físico. A idéia não é impedir totalmente a ocupação das encostas, mas sim que o uso seja realizado de forma adequada e segura, respeitando as condicionantes naturais.

## CONCLUSÕES

Nessa pesquisa, estudou-se a influência da vegetação na estabilidade de taludes, através de métodos analíticos, empregando a teoria do equilíbrio limite.

Os fatores envolvidos na análise de estabilidade encontrados foram aplicados em dois modelos matemáticos para análise dos índices de segurança da área estudada, em função da existência ou não de vegetação.

Considerando-se a vertente com cobertura vegetal e saturada, constata-se que mais de 3,29% da área da bacia tornou-se instável.

Quando é simulada a situação de solo sem cobertura vegetal as áreas instáveis aumentaram de 3,29% para 6,27% para solo saturado.

Verificou-se também que a vegetação, aliada à coesão do solo, contribui para a estabilização das encostas da região, uma vez que, o efeito da vegetação na encosta fez aumentar o Fator de Segurança da área estudada, não havendo região instável onde existe vegetação.

Muitas áreas estão estáveis graças à ação da vegetação que aumentou o valor de  $F_s$  acima de 2,0, indicando uma boa estabilidade. A vegetação dessa forma está protegendo essas áreas, garantindo a sua estabilidade e sua remoção faz com que essas áreas passem a ser instáveis em condições de risco de escorregamento.

Observou-se ainda que a vegetação representa 18,09% do total da bacia e quando retirada a vegetação, nas regiões de florestas 11,41% da área tornou-se instável, já nas áreas ocupadas por capoeiras passaram a apresentar 18,33% de instabilidade para solo saturado.

A avaliação dos índices de segurança da área da bacia do Rio Ligeiro permite concluir que a vegetação

apresenta um papel importante na estabilidade das vertentes por efeito do peso das árvores e agregação do solo pelas raízes. Este fato mostra a importância da vegetação no aumento da estabilidade de vertentes e a necessidade de sua preservação.

Percebeu-se que, para a pior situação, quando não se consideram os parâmetros da cobertura vegetal em solos saturados, mais de 6,27% da área apresenta valores de  $F_s < 1,5$ , sendo que desses, 0,29% corresponde a áreas com valores de  $F_s$  menor que 1, ou seja, áreas altamente instáveis.

Através do mapeamento realizado e sem considerar a cobertura vegetal observa-se que o risco de escorregamento ocorre a partir de declividades iguais a 20%, em terrenos com solo saturado. No caso de haver cobertura vegetal, o risco ocorre a partir de declividades superiores a 30%.

Ficou evidente que a bacia do Rio Ligeiro apresenta áreas instáveis com solo saturado, susceptíveis a escorregamentos, como consequência dos fatores ambientais, do meio físico e da ocupação antrópica das encostas que remove a vegetação.

Assim, evidenciou-se que os mapas de índices de segurança tornam-se ferramentas indispensáveis para o planejamento territorial e amenização das consequências geradas pelos escorregamentos. São de fundamental importância para os planejadores, pois permitem elaborar medidas de prevenção e mitigação dos riscos, direcionando as políticas públicas de uso e ocupação do solo.

Enfim, pode-se concluir que a metodologia aqui apresentada mostrou-se satisfatória, apresentando resultados coerentes com a realidade. O esclare-



cimento sobre as limitações e potencialidades dos terrenos possibilitará ao governo municipal tomar decisões em relação ao uso e ocupação do solo, a partir do conhecimento das principais características do meio físico estudado.

Espera-se que, através do mapa de uso do solo, possa ser feito o controle para a preservação da cobertura vegetal restante, devendo ser feitas atualiza-

ções periódicas para informações sobre as mudanças ocorridas na área em determinada época.

Espera-se que este trabalho contribua com a sociedade em geral para o desenvolvimento da cidade, servindo como uma ferramenta de subsídio ao seu crescimento planejado, respeitando as questões ambientais e orientando o uso e ocupação do solo na área de expansão do município.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AUGUSTO FILHO, O. **Cartas de risco de escorregamento: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ihabela, SP**. São Paulo, 1994. 172 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
2. BISHOP, A.W. & STEVENS, M.E. **Landslide on logged areas in southeast Alaska**. United States Department of Agriculture, Forest Service, Northern Forest Experiment Station, Juneau, AK, Research Paper NOR-1, 18 p., 1964.
3. CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Mapa Hidrogeológico da América do Sul – Escala: 1:5.000.000: texto explicativo/UNESCO**. Departamento Nacional de Produção Mineral, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Brasília: CPRM, 1996.
4. DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Manual de Pavimentação**. MT – Ministério de Transportes; Divisão de Capacitação Tecnológica, p. 48-62, 1996.
5. DSG – DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO. **Folha topográfica MI – 2862/2 (Pato Branco), Estado do Paraná, Escala 1:50.000**, 1980 (a).
6. DSG – DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO. **Folha topográfica MI – 2862/4 (Mariópolis), Estado do Paraná, Escala 1:50.000**, 1980 (b).
7. EMBRAPA – CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLOS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 412 p., 1999.
8. EMBRAPA – SERVIÇO NACIONAL DE LEVANTAMENTO E CONSERVAÇÃO DOS SOLOS. **Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Sudoeste do Estado do Paraná**. Curitiba: EMBRAPA-SNLCS/SUDESUL/IAPAR, 79 p., 1974. (Boletim Técnico n. 40).
9. EMBRAPA – SERVIÇO NACIONAL DE LEVANTAMENTO E CONSERVAÇÃO DOS SOLOS. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná**. Curitiba: EMBRAPA-SNLCS/SUDESUL/IAPAR, 196 p., 1984. (Boletim de Pesquisa, 27).
10. FIORI, A.P. & BORCHARDT, N. Influência da vegetação na estabilidade de taludes naturais. Curitiba: **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 45, p. 43-58, 1997.
11. FIORI, A.P. & CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. Curitiba: Editora da UFPR, 550 p., 2001.
12. GRAY D.H. Consequences of vegetation removal. In: D.H. BARKER (Ed.), **Vegetation and Slopes: Stabilisation, Protection and Ecology**. London: Thomas Telford, 296 p., 1995.
13. GRAY, G.L. & LEISER, A.J. Role of vegetation in stability and protection of slopes. **Biotechnical slope protection and erosion control**. New York. Van Nostrand Reinhold Company, p. 37-65, 1982.
14. GUIDICINI, G. & NIEBLE, C.M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. São Paulo: Editora Blücher, 196 p., 1983.
15. HSI, G. & NATH, J.H. Wind drag within a simulated forest. **Journal of Applied Meteorology**, n. 9, p. 592-602, 1970.
16. IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico de uso da terra**. Série Manuais Técnicos em Geociências, n. 7, 91 p., 2006.
17. KOZCIAK, S. **Análise da estabilidade de vertentes na bacia do Rio Marumbi – Serra do Mar – Paraná**. Curitiba, 2005. 141 p. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Paraná.
18. PRANDINI, L.F.; GUIDICINI, G.; BOTTURA, J.A.; PONÇANO, W.L.; SANTOS, A.R. **Atuação da cobertura vegetal na estabilidade de encostas: uma resenha crítica**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 38 p., 1976. (Relatório n. 1074).
19. RODRIGUES, B.B. **Inventário e análise de susceptibilidade aos escorregamentos de massa gravitacionais e erosão na região de Águas de Lindóia – SP – Escala 1:10.000**. São Carlos, 1998. 163 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos.
20. STYCZEN, M. & MORGAN, R.P.C. Engineering properties of vegetation. In: MORGAN, R.P.C. & RICKSON, R.J. (Eds.), **E&FN SPON**, Cap. 2, p. 2-58, 1995.
21. VARGAS, M. Revisão histórico-conceitual dos escorregamentos na Serra do Mar. **Boletim Solos e Rochas (ABMS e ABGE)**, v. 22, n. 1, p. 53 - 83, 1999.
22. WALDRON, L.J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. **Soil Science Society of America Journal**, n. 41, p. 843-849, 1977.
23. WOLLE, C.M. & PEDROSA, J.A.B. Horizontes de transição condicionam mecanismos de estabilização de encostas na Serra do Mar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 3, 1981, Itapema. **Anais...** Itapema, 1981, v. 2, p. 121-135.
24. WU, T.H.; McKINNELL, W.P.III.; SWANTON, D.N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. **Canadian Geotechnical Journal**, n. 16, p. 19-33, 1979.

*Manuscrito Recebido em: 21 de agosto de 2008  
Revisado e Aceito em: 23 de dezembro de 2008*

