

# RELAÇÃO DO MEIO FÍSICO COM O MANEJO SUSTENTÁVEL DE PLANTIO DE EUCALIPTO EM ÁREAS DE TERRENOS ACIDENTADOS – A FAZENDA SANTA EDWIRGES, VALE DO PARAÍBA, SUDESTE DO BRASIL

Silvio Jorge C. SIMÕES <sup>1</sup>, George de Paula BERNARDES <sup>1</sup>,  
Isabel Cristina de Barros TRANNIN <sup>1</sup>, Sueli Yoshinaga PEREIRA <sup>2</sup>,  
Paulo Valladares SOARES <sup>3</sup>

(1) Laboratório de Análise GeoEspacial, LAGE, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, FEG/UNESP. Avenida Ariberto Pereira da Cunha, 333 – Pedregulho. CEP 12516-410. Guaratinguetá, SP.

Endereços eletrônicos: simoes@feg.unesp.br; gpb@feg.unesp.br; isatrannin@uol.com.br

(2) Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, IGe/UNICAMP, Campus Universitário Zeferino Vaz, s/n – Cidade Universitária. CEP 13083-970. Campinas, SP. Endereço eletrônico: sueliyos@ige.unicamp.br

(3) Associação Corredor Ecológico do Vale do Paraíba. Avenida Santa Luzia, 1932. CEP 12380-000.

Santa Branca, SP. Endereço eletrônico: paulo.valladares27@gmail.com

Introdução  
Material e Métodos  
    Localização da Área de Estudo  
    Procedimento Metodológico  
Resultados e Discussão  
    Caracterização Geológica e Formações Superficiais  
    Estruturas Geológicas  
    Caracterização do Relevo  
    Caracterização Geotécnica  
    Relação de Elementos do Meio Físico com o Desenvolvimento de Processos Naturais  
Conclusões  
Agradecimentos  
Referências Bibliográficas

**RESUMO** – Neste estudo são descritos e analisados os elementos e processos do meio físico de uma área de plantio de eucalipto (Fazenda Santa Edwirges), situada em uma região de relevos acidentados no Médio Vale do Paraíba do Sul (porção paulista). Para isto foram elaborados os mapas geológico e geomorfológico em escala de detalhe (1:10.000) e análise de solos, incluindo textura e ensaios geotécnicos com amostras deformadas e indeformadas, procurando correlacionar estes parâmetros do meio físico com a evolução dos processos como erosão acelerada, escorregamentos e inundações. Os resultados mostraram que três associações geológica-geomorfológica - escarpas alongadas com rochas graníticas, morros e morrotes recortados por zonas de cisalhamento e relevos alveolares com sedimentos inconsolidados - representam situações de elevada vulnerabilidade ao desenvolvimento dos processos. Ao contrário, a associação de morros e morrotes com rochas gnáissicas ricas em biotita, mostrou baixa vulnerabilidade, ou seja, maior resiliência aos processos. O conhecimento do meio físico em áreas de florestas plantadas pode contribuir significativamente para o gerenciamento e manejo destas áreas como, por exemplo, estabelecer a porcentagem de áreas plantadas e definir traçados de estradas com menor impacto ambiental.

**Palavras-chave:** geologia; geomorfologia; geotecnica; manejo de florestas plantadas

**ABSTRACT** – S.J.C. SIMÕES, G. de P. Bernardes, I.C. de B. Trannin, S.Y. Pereira, P.V. Soares - Importance of landscape physical elements for evaluating high mountain eucalyptus forest management, Santa Edwirges Farm, Paraíba Valley, Southeast Brazil. This study intends to evaluate the effects of landscape physical elements (rocks and relief) associated with silviculture activities. The study was carried out on a small farm (Fazenda Santa Edwirges) covered by Eucalyptus forested situated in the Paraíba do Sul Basin, Southeast Brazil. The methodology consisted of detailed geological and geomorphological studies at 1:10,000 scale, and laboratory analysis of soil physical properties. The results showed three geologic-geomorphologic associations (ridge escarpment with granitic rocks, steep and gentle hills cut by shear zones and gentle hill with alluvial sediments) present high vulnerability for the development of the physical processes such as accelerated erosion landslides and flooding. In contrast, mountains associated with gneissic rocks present smaller vulnerability and high resilience for the development of the physical processes. The results have showed the importance of considering the interactions among landscape physical for the eucalyptus forest management contributing to a better selection area for eucalyptus cultivation and minimize adverse environment impact in road design.

**Keywords:** geology; geomorphology; geotechnical analysis; eucalyptus forest management.

## INTRODUÇÃO

Assim como em todas as atividades econômicas, o manejo sustentável de florestas plantadas de eucalipto, a silvicultura também busca desenvolver técnicas para Para o manejo sustentável, além de adotar os proce-

dimentos governamentais é preciso considerar, entre outros fatores, as potencialidades e vulnerabilidades do meio físico de cada região.

A avaliação dos atributos do meio físico é um fator determinante a se considerar em uma área com atividade silvicultural com vistas a definir, por exemplo, a proporção da área de plantio e a prevenção ou mitigação dos prováveis processos do meio físico que atuam sobre uma determinada região. Esta importância tende a aumentar na medida em que as áreas de florestas plantadas se situam em áreas com grande diversidade de rochas e relevos recortando diferentes unidades geológicas e geomorfológicas. Dependendo das especificidades do meio físico, uma determinada área pode ser propícia ao aparecimento e desenvolvimento de processos potencializando fenômenos como a erosão acelerada, os movimentos de massa e o assoreamento dos corpos de água.

Apesar da importância de se avaliar o meio físico na busca da sustentabilidade ambiental das florestas plantadas, publicações abordando este tema são escassas na literatura nacional e internacional. A maior parte dos trabalhos discute os efeitos dos processos hidrológicos (Lima, 1996; Whitehead & Beadle, 2004; Lima & Zakia, 2006), e a produção de sedimentos (Zhou et al., 2002) sem considerar uma abordagem dos elementos que compõem o meio físico como a geologia e a geomorfologia. Entretanto, alguns trabalhos de cunho mais abrangente e sistêmico - considerando de forma integrada o meio físico - têm sido realizados em áreas com predominância de silvicultura ou agricultura. Este é o caso do trabalho desenvolvido por De las Salas (1987) para a caracterização de “qualidade do sítio florestal”, ainda que o principal enfoque seja pedológico, particularmente para a avaliação dos nutrientes e fertilidade dos solos. Orea (2007), em sua proposta metodológica de ordenação territorial, também insiste em considerar fortemente aspectos do meio físico como a geomorfologia, a climatologia e a vegetação.

A região deste estudo situa-se no Médio Vale do Paraíba do Sul e foi ocupada originalmente por uma floresta tropical latifoliada que, devido aos diversos “ciclos econômicos” incluindo o da cana-de-açúcar, do café e da pecuária extensiva teve sua paisagem totalmente transformada nos últimos 300 anos (Fujieda et al., 1997). Os diferentes usos da terra desta região aumentaram de forma dramática o processo de degradação da paisagem. Atualmente o uso da terra é constituído por um complexo mosaico onde a pecuária associada a campos limpos e sujos ocupa aproximadamente 53% da área total, os fragmentos de florestas ocupam 30%, o reflorestamento ocupa 9,0%, a agricultura ocupa 4% e as áreas urbanas ocupam cerca de 3% (CEIVAP, 2000).

Após um longo período de estagnação econômica, as áreas rurais do Médio Vale do rio Paraíba do Sul vêm sendo submetidas a um processo de transformação pela introdução de plantios de eucalipto em antigas áreas de pastagem. Segundo Vianna et al. (2007), no trecho entre as cidades de Queluz (SP) e Volta Redonda (RJ), a taxa de expansão no período entre 2000 e 2007 foi da ordem de 250 ha/ano alcançando uma área total de 1755 ha no ano de 2007.

Com base nestas informações, este trabalho teve como objetivo apresentar, discutir e avaliar a importância da dinâmica do meio físico sobre os plantios de eucalipto, considerando nesta avaliação, a fragilidade de uma região montanhosa situada no Médio Vale do Paraíba do Sul, Estado de São Paulo, relacionada aos atributos geológicos, geomorfológicos e geotécnicos. A área avaliada foi a fazenda Santa Edwirges, com aproximadamente 12 km<sup>2</sup>, situada no município de Lorena, Estado de São Paulo, de propriedade da indústria de celulose e papel, Fibria. Apesar da sua pequena dimensão, esta área pode ser representativa das condições geológicas e geomorfológicas de parte do Vale do Paraíba, pois possui diversos tipos de rochas e relevos.

## MATERIAL E MÉTODOS

### LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

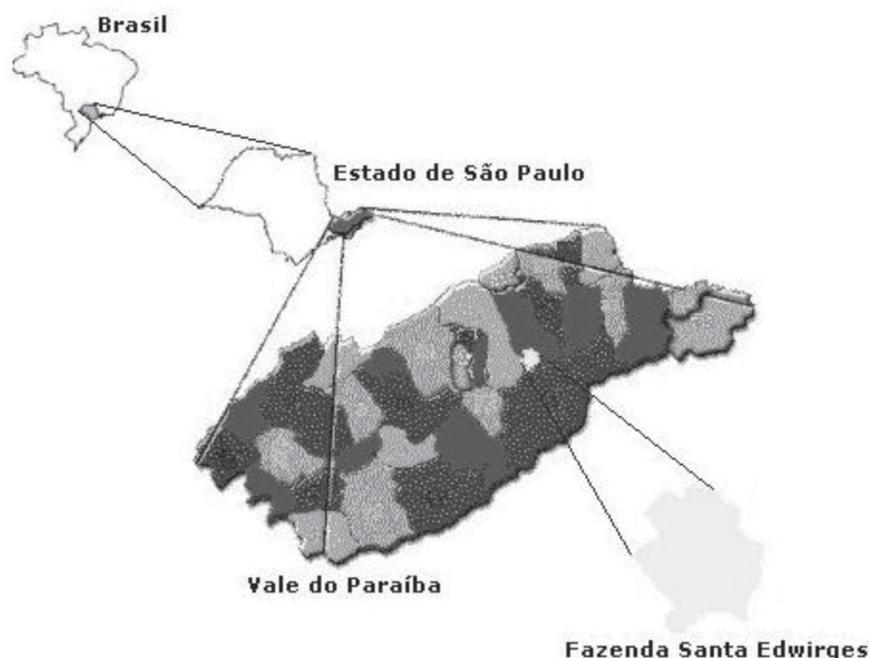
A área da fazenda Santa Edwirges (Figura 1) localiza-se próximo ao divisor de águas da Serra do Quebra Cangalha, uma elevação da Serra do Mar no município de Lorena, Estado de São Paulo. A fazenda tem uma área de 12 km<sup>2</sup> e nela se encontra parte das nascentes do ribeirão Taboão. Este curso d'água é um dos afluentes da margem direita do rio Paraíba do Sul, que nasce na Serra do Quebra-Cangalha (domínio da Serra da Mantiqueira), numa altitude de aproximadamente 1.240 m até desaguar em meio à planície

aluvionar do rio Paraíba do Sul, a 550 m de altitude, na área urbana do município de Lorena.

Na Tabela 1 é possível observar as proporções de uso da terra na Fazenda Santa Edwirges, com destaque para a área de plantio de eucalipto, que ocupa 52,8% e as áreas de preservação permanente (APPs) e reserva legal que, conjuntamente, cobrem 43,8% da área total da fazenda.

### PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Os diferentes atributos do meio físico foram representados cartograficamente em uma mesma escala



**FIGURA 1.** Localização da fazenda Santa Edwirges, no município de Lorena (SP).

**TABELA 1.** Uso da terra na Fazenda Santa Edwirges, Lorena (SP).

Uso do solo	Área (ha)	Área (%)
Plantio de eucalipto	680,2	52,8
APPs e Reserva Legal	546,7	43,8
Estradas e aceiros	28,8	2,2
Rede elétrica, construções e represa	15,0	1,2
Total	1287,7	100,0

(1:10.000), que é compatível com a dimensão da área estudada (12 km<sup>2</sup>).

No tocante à geologia, a região dispõe de apenas mapas em escala de pouco detalhamento e que são incompatíveis com os objetivos deste trabalho. Os levantamentos regionais incluem o Mapa Geológico do Estado de São Paulo em escala 1:500.000 (IPT, 1981) e o Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:250.000 (Landim, 1984). Desta forma, foi elaborado um mapa geológico, apresentando a diversidade litológica (tipos de rochas) e a caracterização das estruturas (zonas de cisalhamento e fraturas). A produção deste mapa foi realizada por meio de fotointerpretação, analisando fotografias aéreas de 1973, em escala 1:25.000, bem como por meio de levantamentos de campo, onde foram descritos 159 pontos de afloramento de rocha, solos de alteração e pontos de controle espacial. O mapa lito-estrutural final foi produzido em meio digital, utilizando o software ArcGIS 9.2<sup>®</sup> dispo-

nível no Laboratório de Análise GeoEspacial (LAGE) da FEG/UNESP.

Para o levantamento das unidades de relevo foram considerados os principais parâmetros morfométricos, a hipsometria e a declividade. Para a elaboração do *Mapa Hipsométrico* foi utilizada a extensão Spatial Analyst do ArcGIS 9.2<sup>®</sup>. O Mapa Hipsométrico foi produzido a partir de um TIN (*Triangulated Irregular Network*), um modelo vetorial que, além do sistema de coordenadas x,y, evidencia a superfície altimétrica. O *Mapa de Declividade* também foi obtido a partir do TIN, sendo definidas seis classes baseadas na variação do relevo, na legislação ambiental e nas diversas fases de operação, que envolve as atividades de silvicultura (Tabela 2).

A declividade de 0 a 3% corresponde às áreas próximas aos topos dos morros e colinas e às áreas de planície aluvionar dos cursos d'água, enquanto as declividades entre 5 e 15% às vertentes dos relevos mais

**TABELA 2.** Classes de declividade encontradas na Fazenda Santa Edwirges, Lorena (SP).

Classes	Declividade (%)
1	0 – 3
2	3 – 15
3	15 – 25
4	25 – 42
5	42 – 100
6	> 100

suaves. A declividade de 25% corresponde ao limite superior para a operação de tratores agrícolas, enquanto a declividade 42% ao limite máximo para operação de máquinas que realizam a colheita de eucalipto. A declividade de 100% corresponde ao limite mínimo de áreas de proteção permanente (APPs) em encostas, conforme o Código Florestal-Lei nº 4.771, de 15/09/1965, que deve ser mantida no atual processo de revisão do novo código.

Da mesma forma que para a geologia, a região não dispõe de um mapa de solos consistente com a escala deste trabalho. Portanto, para a realização dos ensaios geotécnicos e de textura foram coletadas amostras representativas das principais classes de solo identificadas na área de estudo, sendo amostrados 41 pontos georeferenciados que foram utilizados tanto para a realização de estudos de textura de solo quanto estudos geotécnicos.

A análise de textura dos solos foi realizada com base nos princípios da Lógica Fuzzy, que assume que muitos fenômenos naturais não ocorrem de forma abrupta, havendo uma mudança gradativa que separa sua *ocorrência* de sua *não-ocorrência* (McBratney & Odeh, 1997). Em outras palavras, não existe uma linha, por exemplo, que separe exatamente o limite entre dois diferentes tipos de solos, como se observa em mapas pedológicos. No caso deste trabalho, se buscou estabelecer valores numéricos para um conjunto de amostras a partir de análises tátil-visuais, avaliando os seguintes elementos: a agregação das partículas, a presença ou não de minerais primários (sobretudo quartzo) e a aderência das partículas, quando umedecidas. Integrando-se todas estas informações procurou-se classificar os solos como sendo, predominantemente argilosos ou arenosos, atribuindo também classes intermediárias (por exemplo, areno-siltoso, siltos-argiloso). A Figura 2 apresenta as quatro principais classes de solos encontradas na área de estudo e como suas amostras foram classificadas quanto à textura.

Para a realização dos ensaios geotécnicos foram coletadas amostras das principais classes de solo, nos 41 pontos georeferenciados, nas profundidades de 20,

50 e 100 cm, totalizando 123 amostras analisadas.

A variabilidade espacial tanto dos dados texturais quanto dos dados geotécnicos foram avaliados utilizando a abordagem geoestatística (ver por ex., Isaaks & Srivastava, 1989; Goovaerts, 1997), que resultou na produção de mapas a partir de krigagem (Camarinha, 2011). Uma das vantagens em se utilizar uma abordagem geoestatística é que permite avaliar o erro inerente ao processo de interpolação. Neste sentido, este erro pode ser quantificado e minimizado através de novos pontos de amostragem. Para exemplificar a metodologia de amostragem e estimativas dos parâmetros dos solos, na Figura 3 é possível observar a distribuição de erro na estimativa do mapa de porosidade superficial para 30 pontos de amostragem (Figura 3A) e para 38 pontos de amostragem (Figura 3B). A comparação entre as Figuras 3A e 3B deixa bem evidenciado uma redução do erro com o acréscimo dos oito pontos particularmente na região norte da área de estudo. Este mesmo procedimento foi adotado para as três profundidades de amostragem do solo.

Nos ensaios laboratoriais foram empregadas amostras deformadas e indeformadas. Com as amostras deformadas foram realizados ensaios para a determinação da curva granulométrica (com e sem defloculante), teor de umidade natural e higroscópica, massa específica real dos grãos, limites de liquidez e plasticidade. Para as amostras indeformadas foram obtidos os seguintes parâmetros: massa específica natural, massa específica seca, índice de vazios, e porosidade. Para as amostras de cada classe foram determinadas a curva característica e a resistência à tração. A influência das mudanças sazonais nas propriedades dos solos foi avaliada por ensaios que relacionam a capacidade de desagregação do solo em função da variação da umidade e sua respectiva resistência à tração. Uma vez definida as seis classes de solo dominantes, foram determinados em campo a taxa de infiltração superficial, com o emprego do infiltrômetro cilíndrico e a condutividade hidráulica saturada, utilizando o Permeâmetro de *Guelph* para as três profundidades de amostragem.

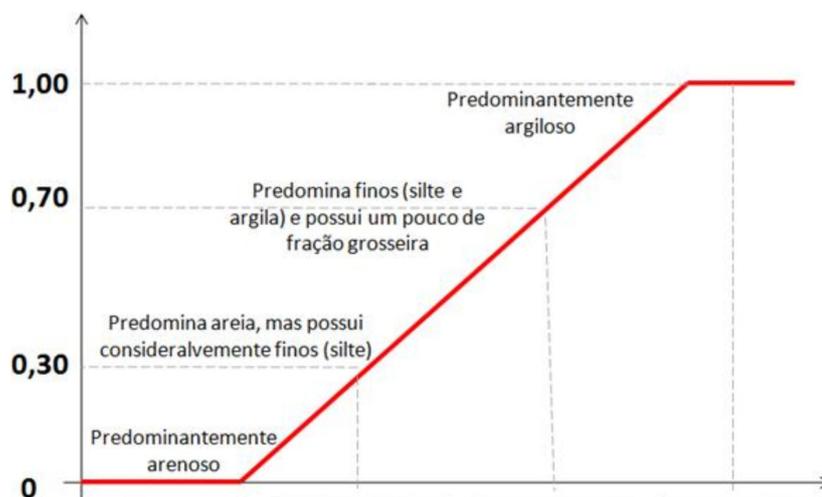


FIGURA 2. Classificação da textura do solo, utilizando Lógica Fuzzy (Camarinha et al., 2011, modificado).

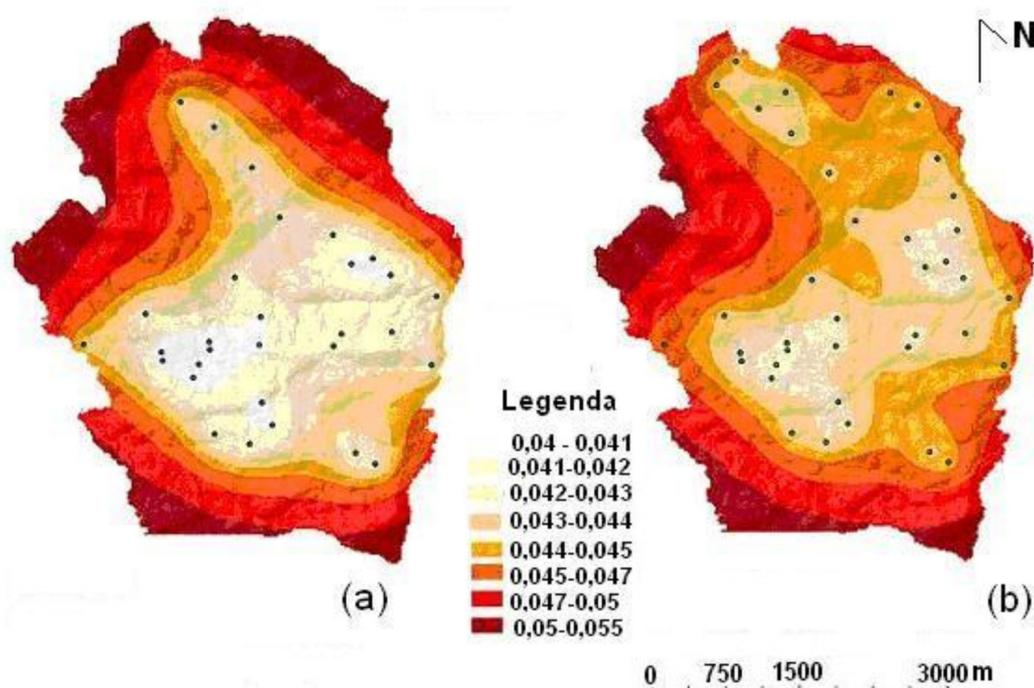


FIGURA 3. Mapa de distribuição de erros para estimativa da porosidade superficial utilizando 30 pontos (a) e 38 pontos (b) (Camarinha, 2011).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E FORMAÇÕES SUPERFICIAIS

A fazenda Santa Edwirges está inserida em um contexto geológico formado por rochas cristalinas de idade precambriana (> 500 milhões de anos), com predomínio de rochas ígneas e metamórficas. No mapa apresentado na Figura 4 é possível observar as diferentes unidades geológicas encontradas na região:

a) rochas metamórficas (xistos, e gnaisses) o que corresponderiam regionalmente ao Complexo Embu (Hasui & Sadowski, 1976; Carneiro et al., 1978; Landim, 1984); b) rochas ígneas (de composição granítica/granodiorítica) correspondendo ao Complexo Quebracangalha (Landim, 1984); c) rochas miloníticas associadas a zonas de cisalhamento; d) terraços fluviais compostos de silte e argila e sedimentos inconsolidados

associados localizados no leito dos cursos de água. Estas unidades serão descritas em seguida.

As rochas metamórficas ocupam a porção norte da área da fazenda e perfazem cerca de 60% de toda a sua extensão. Esta unidade é constituída predominantemente por rochas gnáissicas, que possuem em sua composição minerais facilmente alteráveis como micas (biotita e muscovita) e feldspatos do tipo plagioclásio. A foliação destas rochas se deve, principalmente, à presença da biotita, que muitas vezes corresponde ao mineral mais abundante e encontra-se orientada, segundo a foliação principal  $S_n$ . Em escala de afloramento pode-se evidenciar a presença de *kink bands* truncando esta foliação  $S_n$  de maneira oblíqua, correspondendo a uma segunda foliação ( $S_{n+1}$ ). Além da biotita encontra-se a muscovita, que acompanha em parte a foliação  $S_n$  e em parte a foliação  $S_{n+1}$ . A presença da muscovita é atribuída ao processo de retro-metamorfismo, que promove a passagem de fluidos pelo feldspato, proporcionando a formação deste mineral. Como consequência, os solos originados da alteração destas rochas são normalmente finos, argilosos, mais homogêneos e de baixa permeabilidade.

Os solos originados destes litotipos são profundos e possuem coloração avermelhada devido à presença de minerais ricos em ferro, provenientes de rochas ricas em biotita e são classificados como Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos (Oliveira et al., 1999). A análise textural corrobora esta afirmativa com a presença de solos predominantemente argilosos (Camarinha et al., 2011).

A unidade *Granitóide Quebra-Cangalha* corresponde a 35% do mapa geológico, ocupando a porção sul da área da Fazenda Santa Edwirges. Esta unidade geológica é constituída, predominantemente, por granitos leucocráticos, constituídos de minerais mais resistentes à alteração, como o quartzo e o feldspato potássico. Devido à presença destes minerais, os solos originados destas rochas apresentam coloração esbranquiçada, de constituição areno-argilosa, com o predomínio de frações minerais mais grosseiras, que caracterizam os Cambissolos.

As *zonas milonitizadas* ou de cisalhamento, correspondem à cerca de 10% da área total estudada ocorrendo em faixas de direção NE-SW, na região central e sul da fazenda Santa Edwirges. Estas zonas

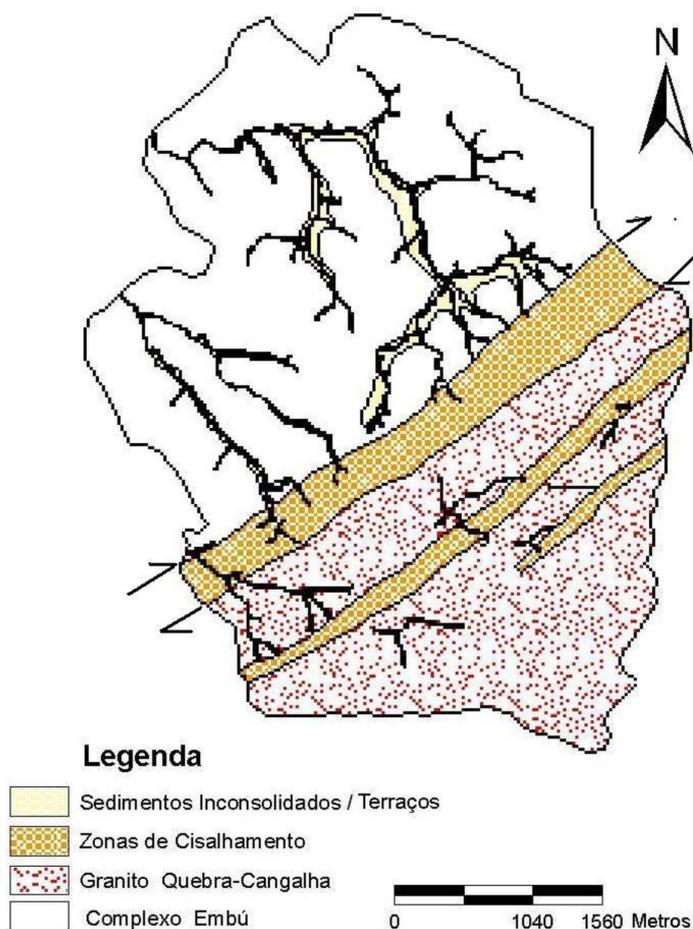


FIGURA 4. Mapa Geológico da fazenda Santa Edwirges, escala 1:10.000.

são originadas pela ocorrência de intensas tensões tectônicas em condições dúcteis, ou seja, a profundidades maiores que 10 km (Ramsay, 1980). Por esta razão, apresentam uma foliação bastante desenvolvida e a presença de minerais finos, com estrutura em camadas, como mica e clorita decorrentes dos processos de retrometamorfismo que são comuns nestes tipos de rochas (Bell et al., 1986). À medida que se aproxima da zona de cisalhamento e conforme aumenta a deformação da rocha, os granitóides perdem quantidade de feldspato e ganham em quantidade de sericita/muscovita. Portanto, neste ambiente, a presença de minerais primários pouco resistentes ao intemperismo, é favorável ao desenvolvimento de solos com textura predominantemente argilo-siltosa, conforme ressaltado por Camarinha et al. (2011). Nestas zonas milonitizadas ocorrem solos pouco evoluídos, com presença de minerais primários pouco resistentes ao intemperismo e muito rasos (< 50 cm até o substrato rochoso), com horizonte A sobre a rocha, ou cascalheira espessa ou sobre horizonte C pouco espesso, que caracterizam os Litossolos.

As unidades *Terraço Fluvial* e *Sedimentos Inconsolidados* correspondem a 5% da área total e são constituídos por sistemas deposicionais recentes, de idade Quaternária, associados à planície fluvial do ribeirão Taboão e seus principais afluentes. Nesta área são identificados paleo-terraços com sedimentos de composição pelítica como silte e argila e, secundariamente, sedimentos clásticos (areia) associados a seixos angulosos de quartzo e feldspato, que caracterizam os Neossolos Flúvicos. Também podem ser observados sedimentos não consolidados de cor preta a cinza escura, que indicam a presença de grande quantidade de matéria orgânica e que caracteriza os Gleissolos háplicos. Devido à alta quantidade de sedimentação fina nesta unidade, pode-se considerá-la como uma micro-bacia restrita, com relativa baixa energia do ambiente e uma área fonte de sedimento muito próxima do local de deposição, possivelmente oriundos dos gnaisses bandados e xistos.

## ESTRUTURAS GEOLÓGICAS

A análise das estruturas geológicas – tanto dúcteis quanto rúpteis - mereceram certo destaque, pois a área de estudo é recortada por uma espessa zona de cisalhamento. As estruturas dúcteis medidas em campo incluem a análise de anisotropias penetrativas planares representadas pela foliação gnáissica ( $F_c$ ) e foliação milonítica ( $Z_c$ ) e a anisotropia penetrativa linear representada pela lineação mineral ( $L_x$ ). As principais estruturas rúpteis observadas são falhas ( $F_n$ ) e juntas ( $J_n$ ).

A foliação é, particularmente, penetrativa nos gnaisses, possuindo direção geral NE e mergulhos

variando tanto para SE quanto para NW, normalmente apresentando altos ângulos (entre 50° e 90°). Esta zona de cisalhamento possui variação de direção, o que indica que o seu traçado é antes curvilíneo do que retilíneo. Quanto mais as rochas gnáissicas se aproximam da zona de cisalhamento, maiores são os ângulos de mergulho até alcançarem valores próximos a 90° na sua porção central. Nas zonas pouco deformadas (rochas graníticas) observa-se apenas a orientação das placas de biotita, sendo que tanto o quartzo quanto o feldspato permanecem com textura ígnea (mosaico granular).

As zonas de cisalhamento, em escala de afloramento, alternam de cinemática (sentido de movimentação), sendo dextrais ou sinistrais, e são observadas, principalmente, nas rochas de composição granítica. Contudo, a análise dos sigmóides de quartzo e feldspato aponta que estas zonas são predominantemente dextrais.

A principal lineação observada foi a de estiramento mineral ( $L_x$ ), bem marcada pelos grãos de quartzo, medida em diferentes afloramentos localizados principalmente nas rochas graníticas. Esta lineação se caracteriza por apresentar direção geral NE e baixo mergulho (entre N50/10NE e N70/10NE).

No caso das estruturas rúpteis, apenas uma falha foi observada associada às rochas graníticas, tratando-se de uma falha de empurrão com atitude N75/70SE. Ao contrário, as juntas ocorrem com certa frequência e utiliza-se este termo para designar todas as fraturas - abertas ou fechadas - sem movimento paralelo.

A densidade das juntas foi tratada por diagramas de roseta para visualizar as direções preferenciais dos planos de fratura. Ao todo foram coletadas 36 medidas de planos de fraturas, obtidas particularmente em rochas graníticas. Os resultados apontam que estas juntas tiveram a sua evolução associada à zona de cisalhamento principal com base no modelo de Riedel, que estabelece as direções de fratura R, R', T e X (Misra et al., 2009). Comparando as direções observadas com o modelo de fraturamento teórico de Riedel, observa-se que a principal família de fraturas obtidas (NW-SE) é semelhante à fratura R' de Riedel; a família WNW-ESSE é semelhante à fratura T (junta de tensão) e a família NNW-SSE corresponde à fratura X. A família de juntas NE-SW representa a direção principal da foliação. Esta associação entre as zonas de cisalhamento e o padrão organizado de fraturas caracteriza um regime tectônico de natureza dúctil-ruptil para a evolução das estruturas na região.

## CARACTERIZAÇÃO DO RELEVO

A área está regionalmente inserida na unidade geomorfológica do Planalto do Médio Vale do Paraíba

(Ponçano et al., 1981; Ross & Moroz, 1997) e, apesar de relativamente pequena, possui uma significativa variação no relevo. Isto se deve, em grande parte, a diversidade do substrato geológico descrito anteriormente. Na escala de trabalho adotada (1:10.000), foi possível identificar, com base nos principais elementos morfométricos - hipsometria e declividade - três unidades geomorfológicas descritas a seguir:

- Escarpas Degradadas – ocupa a região sul da área estudada (Figura 5A), apresentando declividades dominantes maiores que 30% (Figura 5B), topos normalmente estreitos e alongados e afloramentos esporádicos de blocos de rochas.
- Morros e Morrotes – ocupa a porção centro-norte da área de estudo (Figura 5A), apresentando declividades dominantes entre 20 e 30% (Figura 5B) e topos com formas arredondadas. Neste relevo se observa uma menor intensidade dos processos de dissecação que na unidade descrita anteriormente.
- Colinas Alveolares – ocupa uma extensa área na porção centro-norte (Figura 5A), correspondendo as áreas com declividades inferiores a 10% (Figura 5B) e áreas de relevo aplainado (planícies aluvionares).

## CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

As características geológicas e geomorfológicas da região criaram um ambiente propício à formação de solos com características bem distintas. Como ilustração, na Figura 6 são apresentadas as curvas granulométricas obtidas com e sem defloculante, para apenas duas das amostras ensaiadas representativas de duas das classes de solo identificadas na região. A primeira trata-se de uma amostra de solo residual jovem em ambiente de Cambissolo distrófico (Figura 6A), proveniente de granito e a segunda de um solo residual maduro, em ambiente de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, originado de gnaisse (Figura 6B).

A comparação entre curvas granulométricas obtidas com e sem defloculante possibilita inferir sobre as características de erodibilidade do solo. Para solos arenosos ou siltosos, originados de rochas graníticas (Figura 6A), a interação entre partículas é fraca e, conseqüentemente, não existem diferenças significativas nas curvas obtidas com e sem defloculante, indicando que este solo desagrega com facilidade com a ação das chuvas e do escoamento superficial. Por outro lado, para os solos originados de rochas gnáissicas, existe uma grande diferença entre as curvas granulométricas, porque a interação entre os argilominerais

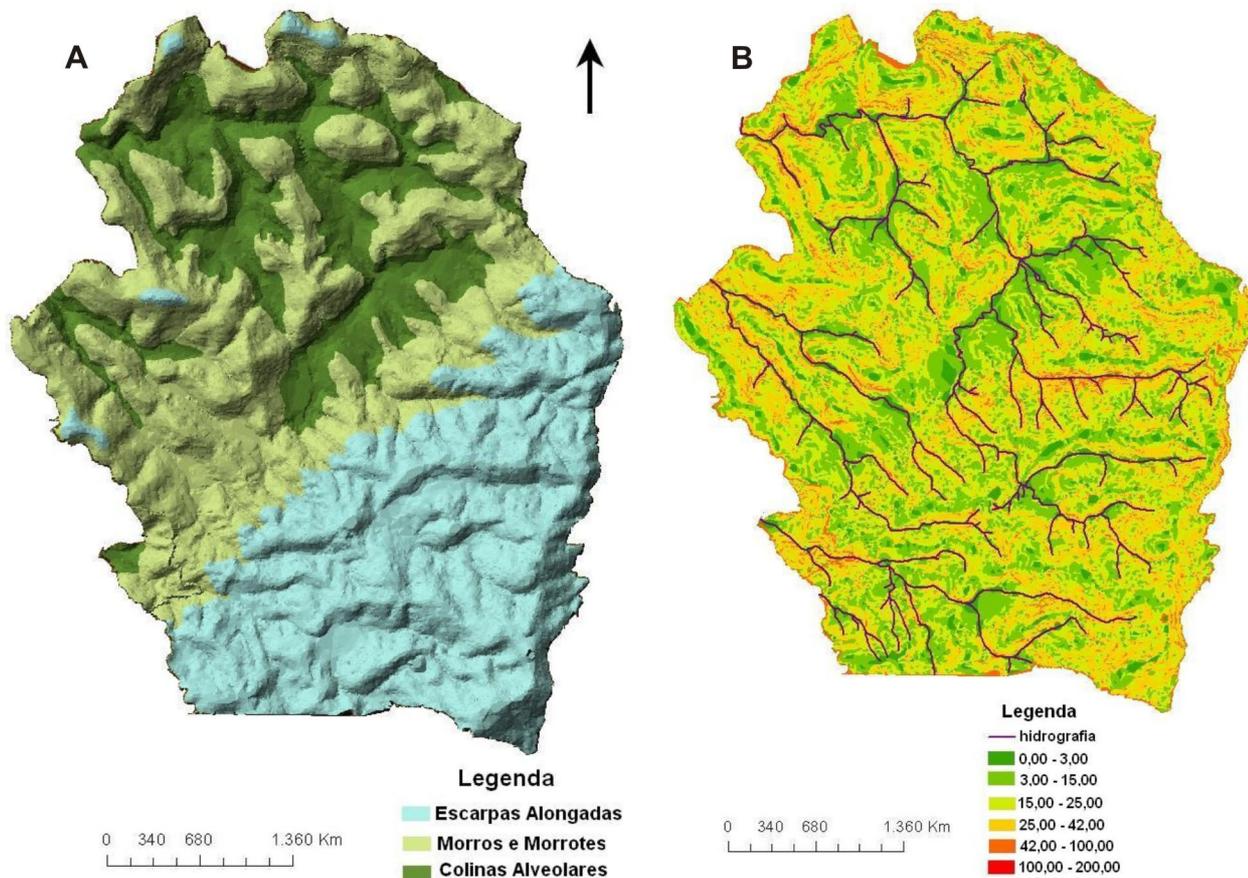


FIGURA 5. Mapa hipsométrico (A) e Mapa de declividade, com drenagem associada (B), ambos em escala 1:10.000.

sem o defloculante é grande, formando grumos que apresentam maior resistência ao arranque e arrasto (Figura 6B).

O estudo detalhado da erodibilidade dos solos da fazenda Santa Edwirges foi apresentado por Santos et al. (2006). O efeito das mudanças sazonais à variação da sucção nas características de erodibilidade dos solos da região pode ser avaliado pela Figura 7. A Figura 7A apresenta a curva característica obtida e a Figura 7B apresenta a variação da resistência à tração em função da variação da umidade volumétrica em amostra de solo maduro (Latossolo Vermelho-Amarelo).

A partir destes gráficos foi possível observar que existe uma faixa de variação da umidade volumétrica entre 5 e 25%, onde a resistência à tração permaneceu praticamente constante na faixa de 60 kPa. Para umidades acima de 25%, ocorreu uma queda brusca da sucção, de 1000 para menos de 10 kPa, com consequente redução da resistência à tração (+/- 20 kPa). Por meio da relação entre as condições iniciais do solo e a intensidade e duração da chuva foi possível determinar o risco de ocorrência de erosão em diferentes

tipos de solos. Santos et al. (2007), desenvolveram mapas de índices de erosão para a Fazenda Santa Edwirges, considerando as inter-relações existentes entre a declividade do terreno, o uso do solo, a erosividade da chuva ( $EI_{30}$ ) e a erodibilidade das classes de solo em função do tipo de ensaio realizado. A Figura 8 apresenta os mapas de potencial de erosão obtidos por meio dos ensaios de granulometria realizados com e sem defloculante (Figura 8A), limites de liquidez e plasticidade (Figura 8B) e de resistência à tração dos solos (Figura 8C).

Um ponto interessante dos mapas apresentados na Figura 8 é que os dois primeiros mapas de potencial de erosão foram elaborados com base em amostras deformadas, utilizando os dados de granulometria e limites de liquidez e plasticidade; ou seja, foram baseados na atividade coloidal dos argilominerais. O terceiro mapa, que indica uma condição mais crítica, foi elaborado com base em amostras indeformadas, utilizando dados de resistência à tração. Neste caso, verifica-se que a estrutura do solo tem muita influência na erodibilidade dos solos da região.

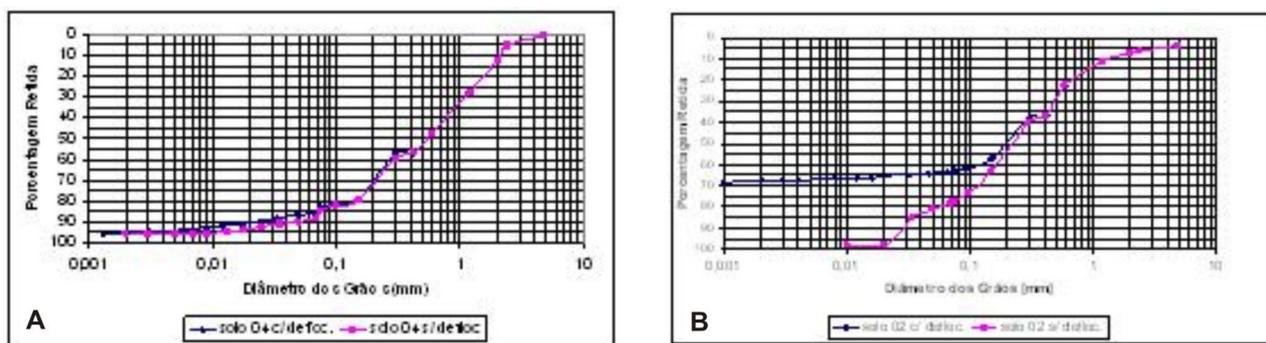


FIGURA 6. Curvas granulométricas obtidas com e sem defloculante para um solo residual proveniente de granitos em ambiente de Cambissolo distrófico (A) e para um solo residual proveniente de rochas gnáissicas em ambiente de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (B).

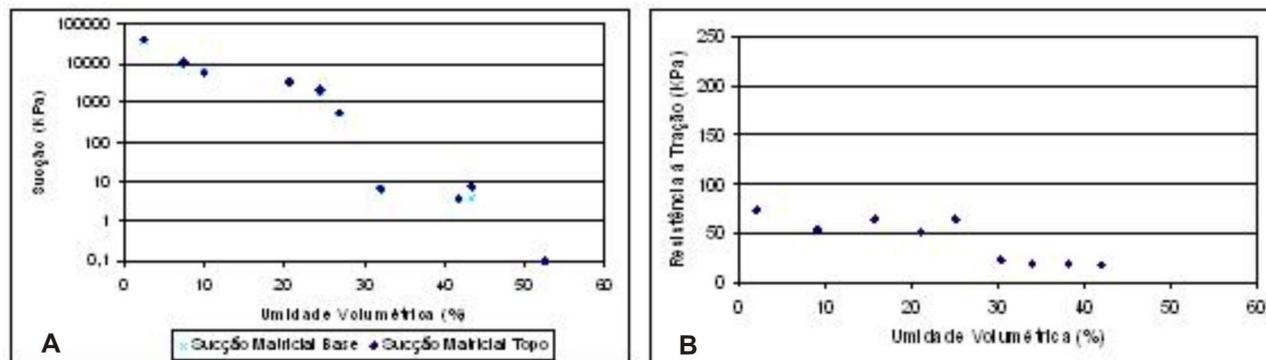
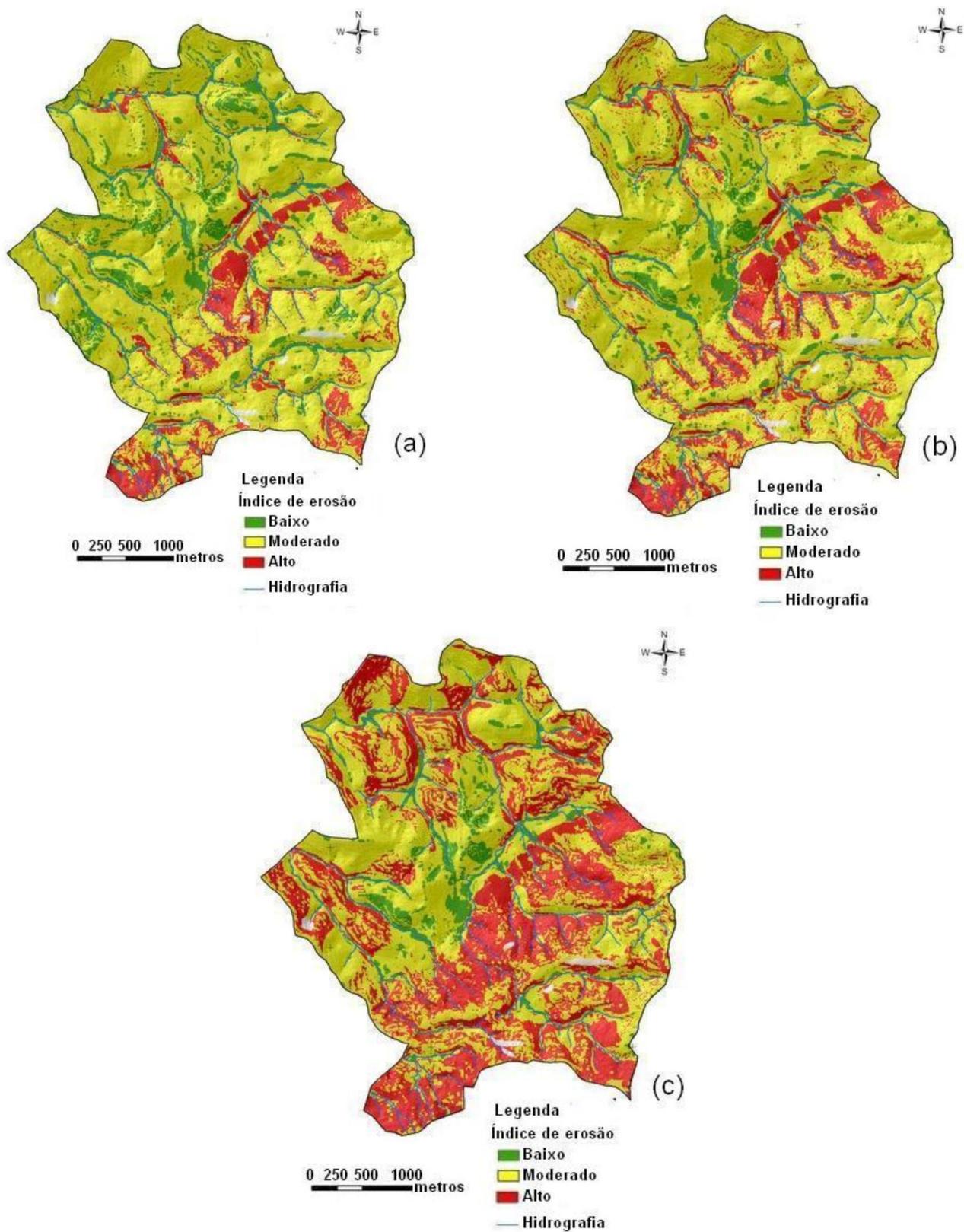


FIGURA 7. Curva Característica – umidade volumétrica x sucção (A), e resistência à tração (B) em solo maduro (Latossolo Vermelho-Amarelo).

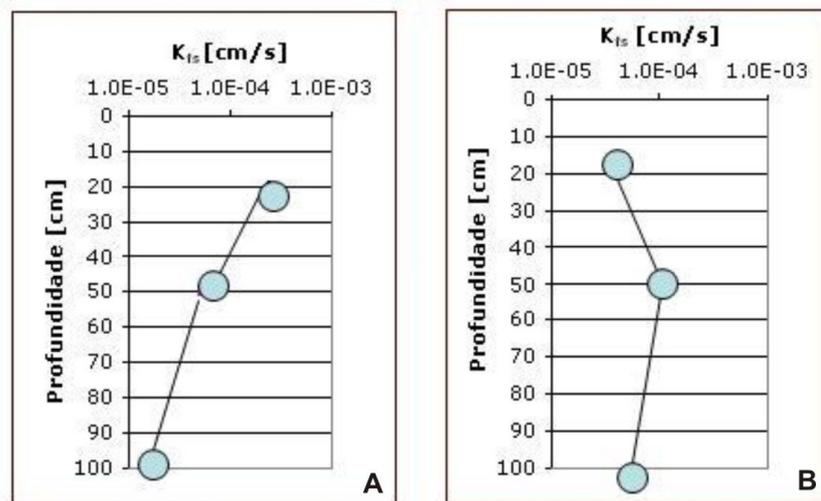


**FIGURA 8.** Mapas de potencial de erosão da fazenda Santa Edwirges, obtidos por ensaios de granulometria com e sem defloculante (A); limite de liquidez e plasticidade (B) e resistência à tração dos solos (C).

Além dos ensaios de curva característica e resistência à tração foram realizados ensaios para a avaliação das propriedades hidráulicas dos solos, utilizando o Permeâmetro de Guelph, considerando profundidades de até um metro (Latgé, 2005). Os pontos onde foram realizados os ensaios foram determinados com base nas classes de solos e nos mapas de estimativa de porosidade. Na região de morros, onde predominam os Latossolos Vermelho-Amarelos, provenientes de rochas gnáissicas, o perfil de condutividade hidráulica saturada ( $K_{fs}$ ) apresentou uma redução no valor de  $5,0 \times 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$  obtido na camada superficial para  $1,2 \times 10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$  na profundidade de 100 cm (Figura 9A). Ao contrário, na região de relevos de escarpa, onde predominam Cambissolos distróficos, provenientes de rochas de composição granítica, a condutividade hidráulica saturada

( $K_{fs}$ ) mostrou-se praticamente constante nos primeiros 100 cm, tendo-se obtido o valor  $6,0 \cdot 10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$  (Figura 9B). Este resultado indicou uma capacidade de infiltração mais favorável para as regiões onde predominam Cambissolos distróficos, provenientes de rochas graníticas, com textura predominantemente arenosa, do que para as regiões onde predominam os Latossolos Vermelho-Amarelos argilosos, provenientes da alteração de rochas gnáissicas.

Os Cambissolos distróficos, embora apresentem maior Condutividade hidráulica (maior infiltração nos primeiros 100 cm de perfil), são mais susceptíveis aos processos erosivos, ou seja, apresentam maior erodibilidade que os Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos de textura argilosa. A textura argilosa diminui a permeabilidade, mas aumenta a agregação, tornando os Latossolos menos susceptíveis aos processos erosivos.



**FIGURA 9.** Condutividade hidráulica saturada ( $K_{fs}$ ) de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, em relevo de morro (A) e em Cambissolo distrófico, em relevo de escarpas (B) da Fazenda Santa Edwirdes, Lorena (SP).

## RELAÇÃO DE ELEMENTOS DO MEIO FÍSICO COM O DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS NATURAIS

A dinâmica e a velocidade dos processos naturais são decorrentes de determinadas características do meio físico, onde rocha, relevo e tipo de solo, constituem um conjunto difícil de ser tratado de forma individual ou compartimentada. Desta forma, as diferentes características do meio físico geram respostas distintas nas relações entre os sistemas bióticos e abióticos, com consequências profundas sobre a paisagem, por meio de processos naturais, que intensificam fenômenos como erosão acelerada, assoreamento, inundação e variação no nível freático.

Apesar da pequena extensão territorial, a área estudada possui diferentes tipos de rocha e relevo,

tornando-se interessante para a avaliação das relações entre os elementos do meio físico e o desenvolvimento dos processos naturais distintos e díspares. Assim, a integração entre aspectos geológicos, geomorfológicos juntamente com as características texturais e geotécnicas dos solos possibilitaram identificar quatro conjuntos distintos, apresentados na Tabela 3 e descritos a seguir.

- *Associação entre rochas graníticas e relevos de escarpas* – as áreas onde ocorrem as escarpas alongadas são predominantemente morfogenéticas (formadoras do relevo) em detrimento daquelas áreas onde predominam os processos pedogenéticos (formadores de solos). Nestas condições predominam solos pouco espessos, nos quais normalmente, o horizonte C (com estruturas reli-

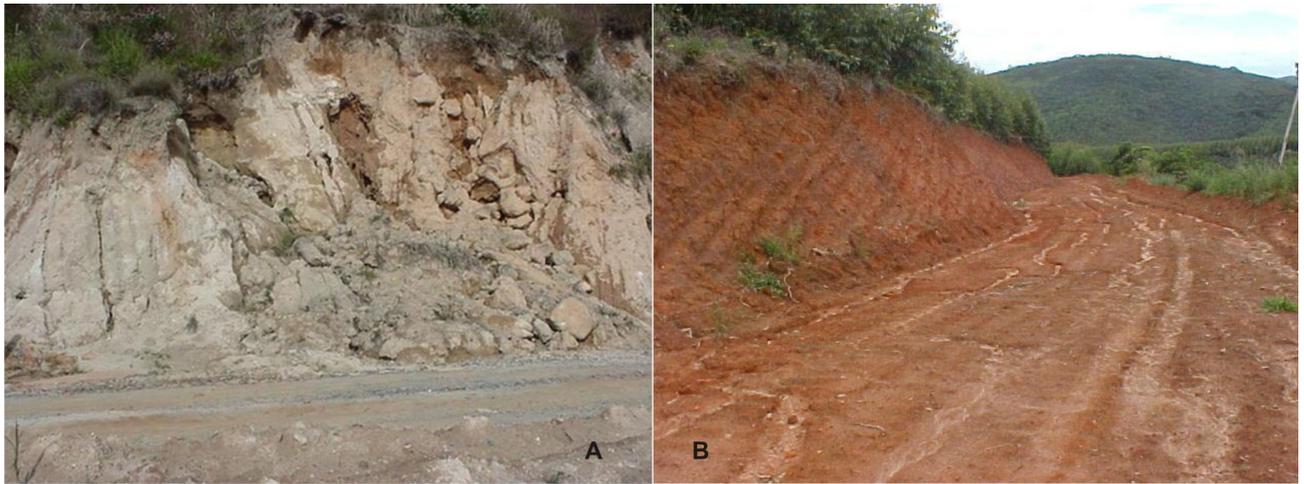
**TABELA 3.** Associação entre geologia, geomorfologia e tipos de solos e suas relações com os riscos de silvicultura e a vulnerabilidade aos processos naturais.

Unidade Geológica	Unidade Geomorfológica	Tipo de Solo	Riscos à Silvicultura	Vulnerabilidade aos Processos do Meio Físico
Rochas ígneas de composição granítica (correspondente a unidade Quebra-Cangalha)	Escarpas Alongadas	Solos rasos e pouco desenvolvidos, predominantemente arenosos (domínio de Cambissolos distróficos)	Processos erosivos lineares e escorregamentos	Alta
Rochas metamórficas de composição gnáissica (correspondente a unidade Complexo Embu)	Morros e Morrotes	Solos profundos e bem desenvolvidos predominantemente argilosos (domínio de Latossolos Vermelho-Amarelos)	Erosão laminar, ausência de feições de escorregamento	Média
Rochas Miloníticas	Morros e Morrotes e Colinas Alveolares	Solos rasos e pouco desenvolvidos predominantemente silto-arenosos (domínio de Litossolos e Cambissolos distróficos)	Processos erosivos lineares	Alta
Sedimentos inconsolidados	Colinas alveolares e planícies inundáveis	Solos pouco desenvolvidos, predominantemente argilo-orgânicos (domínio de Gleissolos e Neossolos Flúvicos)	Processos inundacionais	Alta

quias das rochas originais) está frequentemente exposto. Por meio da análise textural, verificou-se que os solos são predominantemente arenosos nesta porção da área estudada (Camarinha et al., 2011). Quando em associação com rochas graníticas, estas áreas de elevada declividade geram condições muito favoráveis à evolução dos processos erosivos lineares. As formações superficiais provenientes de rochas graníticas possuem elevadas quantidades de minerais primários (particularmente quartzo e feldspato) e baixa agregação das partículas, como demonstrado pelas análises geotécnicas (Figura 6A). As condições favoráveis à infiltração, observadas para as primeiras camadas dos solos (Figura 6B), contribuem para a aceleração dos processos erosivos até profundidades superiores a 1 m. Além da composição das rochas, os processos deformacionais de natureza rúptil, responsáveis pelo fraturamento nas rochas, potencializam os processos de ravinamento comuns nestas regiões. Esta relação de relevos muito íngremes com rochas ígneas/metamórficas favorece os processos de ravinamento de pequena dimensão, porém com elevada frequência (Figura 10A). As causas para o avanço da erosão envolvem complexas relações e inter-relações, que incluem a declividade do relevo, a composição e a evolução das formações superficiais e presença de foliação e/ou fraturamento nas rochas (Simões, 2001). Ao contrário, em regiões onde ocorrem relevos mais suaves e rochas sedimentares, os processos

de erosão são controlados principalmente, pela textura arenosa das rochas sedimentares.

- *Associação entre rochas gnáissicas e relevos de morros e morrotes* – as áreas onde ocorrem os relevos de morros e morrotes apresentam uma relação mais equilibrada entre morfogênese e pedogênese. Os processos erosivos são mais atenuados e as feições de ravinamento são menos evidentes e, neste contexto, a perda de solo tende a ocorrer por processos laminares. As rochas gnáissicas ricas em biotita, quando intemperizadas, geram formações superficiais ricas em argila e empobrecidas de frações arenosas. Isto foi constatado pela análise textural dos solos realizada por alguns dos autores deste trabalho (Camarinha et al., 2011). A homogeneidade e a composição fina destes solos são, portanto, fatores que dificultam o desenvolvimento de processos erosivos acelerados, como as ravinas e as voçorocas. As condições de baixa infiltração observada para as camadas superficiais (Figura 9A) também dificultam a aceleração dos processos erosivos em profundidade. A pedogênese é intensa e favorece a formação de solos profundos, nos quais o horizonte B tende a ficar exposto na maioria dos cortes de estrada (Figura 10B). Os ensaios geotécnicos corroboram com as características destes solos, bem desenvolvidos e homogêneos (Figura 6B).
- *Associação entre sedimentos inconsolidados e relevos alveolares* – nestas regiões predominam os processos pedogenéticos e de deposição geoló-



**FIGURA 10.** Cortes de estradas na região da associação granito com relevo de escarpas (A), e na região da associação de rochas gnáissicas com relevos de morros e morrotes (B).

gica recente. Na área de estudo, os relevos alveolares estão associados com os sedimentos inconsolidados de idade Quaternária, com grande variabilidade textural, incluindo desde sedimentos argilosos muito finos até sedimentos arenosos grosseiros. Em regiões que, em grande parte do ano, os solos são saturados em água, é comum a presença de sedimentos escuros, com grande quantidade de matéria orgânica. Com base nos aspectos geotécnicos, estas áreas são constituídas por solos de baixíssima resistência e muito propícias a inundações frequentes. Por outro lado, nestas áreas, frequentemente são encontradas pequenas bacias naturais, que funcionam como áreas de contenção e contribuem para reduzir o pico das vazões máximas e a ocorrência de grandes inundações à jusante.

- *Associação entre rochas miloníticas e relevos de morros e morrotes* – ao contrário das três

outras associações mencionadas neste trabalho, onde a relação entre unidade geológica e geomorfológica pode ser regionalmente definida, a associação entre rochas miloníticas e unidades de relevo nem sempre pode ser bem estabelecida. Isto porque as rochas miloníticas correspondem a rochas oriundas de processos deformacionais intensos, conhecidos como *zonas de cisalhamento*, que podem recortar diferentes unidades de relevo. No caso da área de estudo, as zonas de cisalhamento estão mais associadas à unidade de relevo Morros e Morrote do que às demais unidades. Estas áreas tendem a apresentar um comportamento bastante frágil, evidenciado por uma foliação planar bem penetrativa e por fraturamento intenso. Nestas condições, estas rochas ficam bastante suscetíveis ao desenvolvimento de processos erosivos acelerados com o aparecimento de ravinas.

## CONCLUSÕES

A análise do meio físico, visando à otimização e a racionalização do uso e ocupação da terra em áreas de florestas plantadas é um instrumento fundamental para o alcance do manejo sustentável, particularmente, em áreas de grande diversidade geológica e geomorfológica.

A associação entre rochas graníticas, relevos de escarpas e solos com textura arenosa, localizados na porção sul da área estudada mostrou ser propícia ao desenvolvimento dos processos erosivos e feições de escorregamento. Ao contrário, as rochas gnáissicas ricas em biotita, quando associadas aos relevos de

morros e morrotes, são menos suscetíveis ao desenvolvimento dos processos naturais.

A análise da interação entre parâmetros geológicos, geomorfológicos e pedológicos se mostrou de grande importância para a seleção de áreas adequadas ao plantio de eucalipto, menos vulneráveis aos processos erosivos e aos escorregamentos, que têm como consequência o assoreamento dos corpos d'água.

A integração das características geológicas, geomorfológicas e pedológicas também deve ser considerada para a definição do traçado das estradas, no intuito de aprimorar o traçado e diminuir os custos

de manutenção das estradas. Esta é uma necessidade básica para o plantio em áreas de relevos montanhosos, nos quais os processos morfogenéticos predomina-

minam sobre os pedogenéticos e potencializam as atividades erosivas e de movimento de massa em suas diferentes formas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da empresa Fibria, que disponibilizou para este estudo várias áreas de plantio de eucalipto na região do Vale do Paraíba, possibilitando o desenvolvimento desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BELL, T.H.; RUBENACH, M.J.; FLEMING, P.D. Porphyroblast nucleation, growth and dissolution in regional metamorphic rocks as a function of deformation partitioning during foliation development. **Journal of Metamorphic Rocks**, v. 4, n. 1, p. 37-67, 1986.
2. CAMARINHA, P. **Mapeamento do potencial de infiltração de água no solo como subsídio ao planejamento de pequenas bacias hidrográficas Uma proposta metodológica usando geotecnologias**. Guaratinguetá, 2011. 101 p. Dissertação (de Mestrado) – Programa Multi-Campus em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual Paulista.
3. CAMARINHA, P.; TRANNIN, C.B.; SIMOES, S.J.C.; BERNARDES, G.P. Fuzzy logic and geostatistical techniques for spatialization of soil textures in region with rough terrain. **Procedia Environmental Sciences**, v. 7, p. 347-352, 2011.
4. CARNEIRO, C.D.R.; HASUI, Y.; GIANCURSI, F.D. Estruturas da Bacia do Taubaté na região de São José dos Campos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29, 1978, Ouro Preto. **Anais...** Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 1978, v. 4, p. 247-256.
5. CEIVAP – COMITÊ PARA A INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL. Projeto Qualidade das Águas e Controle da Poluição Hídrica (PQA). **Relatório Executivo**. São Paulo: CEIVAP, 122 p., 2000.
6. De las SALAS, G. **Suelos y ecosistemas forestalis: com ênfasis em America Tropical**. San Jose, IICA, 450 p., 1987.
7. FUJIEDA, M.; KUDOH, T.; DE CICCO, V.; CARVALHO, J.L. Hydrological processes at the subtropical forest catchments of the Serra do Mar, Sao Paulo, Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 196, p. 26-46, 1997.
8. GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. Oxford: Oxford University Press, 483 p., 1997.
9. HASUI, Y. & SADOWSKI, G. Evolução geológica do precambriano na região sudeste de São Paulo. São Paulo: **Revista Brasileira de Geociências**, v. 6, p. 187-200, 1976.
10. IPT – INSTITUTO TECNOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:500.000. Volume I. Governo de São Paulo, IPT, 1981.
11. ISAAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M. **Applied geostatistics: An introduction**. Oxford: Oxford University Press, 592 p., 1989.
12. LANDIM, P.M.B. (Coord.). **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:50.000, São Paulo: IGCE/UNESP, 1984.
13. LANE, P.N.J.; MORRIS, J.; NINGNAN, Z.; GUANGYI, Z.; GUOYI, Z.; DAPING, X. Water balance of tropical eucalypt plantations in south-eastern China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 124, p. 253-267, 2004.
14. LATGÉ, A. Determinação de taxa de infiltração do solo na área de recarga da sub-bacia do ribeirão Taboão, município de Lorena/SP. **Relatório Final** PIBIC-2004. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP, 37 p., 2005.
15. LIMA, W.P. **Impacto ambiental do eucalipto**. São Paulo: EDUSP, 301 p., 1996.
16. LIMA, W.P. & ZAKIA, M.J.B. **As florestas plantadas e a água**. Rio Claro: Editora Rima, 218 p., 2006.
17. MCBRATNEY, A.B. & ODEH, I.O.A. Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements, and fuzzy decisions. **Geoderma**, v. 7, p. 113, 1997.
18. MISRA, S.; MANDAL, N.; CHAKRABORTY, C. Formation of Riedel shear fractures in granular materials: Findings from analogue shear experiments and theoretical analyses. **Tectonophysics**, v. 471, p. 253-259, 2009.
19. OLIVEIRA, T.P.; SIMOES, S.J.C.; AUTOMARE, G.B.; BERNARDES, G.P.; TRANNIN, I.C.; DIAS, J.F. Desenvolvendo uma metodologia para a elaboração de um mapa de silvicultura com base em elementos do meio físico – a Bacia do Rio Paraíba do Sul, sudeste do Brasil. **Scientia Forestalis** (aceito, em revisão).
20. OREA, D.G. **Ordenación territorial**. Madrid: Mundi-Prensa Libros, 766 p., 2007.
21. PONÇANO, W.L.; CARNEIRO, C.D.R.; BISTRICHI, C.A.; ALMEIRA, F.F.M.; PRANDINI, F.L. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:500.000, São Paulo: IPT, 1981.
22. RAMSAY, J. Shear zones geometry: a review. **Journal of Structural Geology**, Mainz, v. 2, p. 83-99, 1980.
23. ROSS, J.L.S. & MOROZ, I.C. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: FFLCH/USP e IPT/FAPESP, 1997.
24. SANTOS, C.M.Z.; BERNARDES, G.P.; SIMÕES, S.J.C. Estudo da erodibilidade dos solos da bacia hidrográfica do ribeirão Taboão, Lorena, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 13, 2006, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABMS, 2006, v. 3, p. 1773-1778.
25. SANTOS, C.M.Z.; BERNARDES, G.P.; SIMÕES, S.J.C.; AUTOMARE, G.B.B. Proposta metodológica para a caracterização de áreas com potencial de erosão. In: SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE, 3, 2007, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: ABMS, 2007. CD-ROM.
26. SIMÕES, S.J.C. Accelerated erosional processes in contrasting landscape – Campinas, SP. Ciência & Cultura, **Journal of the Brazilian Association for the Advancement of Science**, v. 53, n. 1, p. 39-43, 2001.

27. VIANNA, L.G.G.; SATO, A.M.; FERNANDES, M.C., COELHO NETTO, A.L. Fronteira de expansão dos plantios de eucalipto no geocossistema do médio vale do rio Paraíba do Sul (SP/RJ). In: SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL: O EUCALIPTO E O CICLO HIDROLÓGICO, 1, 2007, Taubaté. **Anais...** Taubaté: IPABHi, 2007, p. 367-369.
28. WHITEHEAD, D. & BEADLE, C.L. Physiological regulation of productivity and water use in Eucalyptus: a review. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1-2, p. 113-140, 2004.
29. ZHOU, G.; WEI, X.; YAN, J. Impacts of eucalyptus (*Eucalyptus exserta*) plantation on sediment yield in Guangdong Province, Southern China – a kinetic energy approach. **Catena**, v. 49, p. 231-251, 2002.

*Manuscrito Recebido em: 11 de outubro de 2011*  
*Revisado e Aceito em: 3 de maio de 2012*