

METODOLOGIA PARA A ELABORAÇÃO DE MAPA DE POTENCIALIDADE PARA A SILVICULTURA COM BASE EM ÁLGEBRA DE MAPAS - A PORÇÃO PAULISTA DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL, BRASIL

Talita Peixoto de Oliveira SÁTIRO¹; Silvio Jorge Coelho SIMÕES¹; Giordano Bruno AUTOMARE²; George de Paula BERNARDES¹; Paulo Valladares SOARES³; Isabel Cristina de Barros TRANNIN¹; Juliano Ferreira DIAS²

(1) Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Laboratório de Análises GeoEspacial (LAGE), 12516-410, Guaratinguetá, SP. Endereços eletrônicos: simoes@feg.unesp.br; gpb@feg.unesp.br; isatrannin@uol.com.br.

(2) Fibria Celulose SA. E-mails: giordano.automare@fibria.com.br, juliano.dias@fibria.com.br

(3) Associação Corredores Ecológicos do Vale do Paraíba do Sul. Endereço eletrônico: paulo.valladares27@gmail.com.

Introdução
Materiais e métodos
 Localização e características da área de estudo
 Bases Teórico-Metodológicas
Resultados e discussões
 Geologia
 Geomorfologia
 Pedologia
 Mapa de Potencialidade
Conclusões
Agradecimentos
Referências Bibliográficas

RESUMO - Este estudo desenvolveu uma metodologia com o objetivo de identificar as áreas mais apropriadas para silvicultura baseada na interação entre elementos do meio físico utilizando um sistema de informação geográfica (SIG). A área de estudo corresponde a bacia do rio Paraíba do Sul (sudeste do Brasil) a qual foi escolhida por ter tido uma significativa ampliação de área de silvicultura nas últimas décadas. A bacia compreende aproximadamente 15.300 km² sendo caracterizada por uma paisagem heterogênea e complexa. A análise do meio físico considerou os mapas temáticos regionais de geologia, geomorfologia e pedologia os quais foram obtidos em formato AutoCAD e depois convertidos e ajustados no ambiente ArcGIS[®]. Para cada elemento da paisagem (rocha e estruturas, relevo e solo) foram aplicados critérios de ponderação do mais adequado (5) para o menos adequado (1) no sentido de evitar o avanço dos processos erosionais e escorregamentos. O mapa de integração final foi o Mapa de Potencialidade à Silvicultura que possibilitou indicar as áreas mais favoráveis para a silvicultura. As áreas mais adequadas estão associadas a um conjunto de fatores que incluem rochas sedimentares, relevos suaves e solos espessos e homogêneos (latossolos). As menos favoráveis estão associadas com dois tipos de ambientes físicos: a) áreas de relevos de serras com substrato formado por rochas graníticas e solos pouco espessos (cambissolos) e b), áreas formadas por solos hidromorfos e nível freático próximo à superfície. Os resultados mostraram que cerca de 80% da área total poderia ser considerada adequada ou muito adequada para a silvicultura do ponto de vista do meio físico. A maioria das áreas adequadas representa vastas regiões formadas por rochas migmatíticas associadas a relevos de morros e solos relativamente pouco espessos. O Mapa de Potencialidade à Silvicultura constitui uma importante ferramenta para o gerenciamento da atividade de silvicultura, particularmente em áreas com elevada diversidade geológica e geomorfológica.

Palavras chaves: Gerenciamento de florestas plantadas; elementos do meio físico; sistemas de informação geográfica.

ABSTRACT - This study developed a methodology in order to identify the most appropriate areas for eucalyptus plantations based in the interactions among physical landscape elements using GIS. The area of study is the Paraíba do Sul basin (southeast of Brazil), which has been chosen for being an area where a cycle of great expansion of the eucalyptus plantation has begun in the last decades. This basin comprises nearly 15.300 km² and it is characterized by a complex heterogeneous landscape. The analysis of the physical elements took into account thematic maps (geology, geomorphology and pedology) obtained from CEIVAP project in AUTOCAD format and later was converted and adjusted in ArcGIS[®] environment. To each landscape feature (rocks and structures, relief, and soil) it was applied a scale factor which corresponds the most suitable (5) or the less suitable (1) for the forest eucalyptus management. The final map (Silviculture Potentiality Map) indicated the areas, which might be considered the most favorable to the eucalyptus plantations. The most suitable areas are associated with well-drained, homogeneous and thick soils (oxisols) and reliefs with low and intermediate steepness. The less favorable areas are associated with two types of very different physical substrates: a) areas of steeper relief with substratum of acid granites rocks and shallow soils (cambisols) and b), areas under conditions of poor drainage and high water table level associated with Paraíba do Sul River (gleysols). Results have showed that about 80% of the total area could be considered very good or good for eucalyptus plantation. Most part of these suitable areas represent vast region of migmatites rocks associated with Mountain with Steeper Hillslope relief and relatively shallow soils. The Silviculture Potentiality Map constitutes an important tool for eucalyptus plantation management particularly for the forestry activities in mountainous regions.

Keywords: Eucalyptus management, physical elements, geographical information system.

INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de grandes extensões territoriais, com grande variação de solos, relevo e clima. Devido a essa diversidade, um dos maiores desafios para produtores florestais é a definição das melhores áreas para o cultivo de certa espécie, respeitando as características do meio físico e as características ambientais. Portanto, para o sucesso de um empreendimento florestal é preciso se considerar os fatores relacionados ao meio físico, levando-se em conta tanto os fatores favoráveis quanto os limitantes.

Para contribuir para a diminuição do desmatamento das florestas tropicais se precisa pensar no reflorestamento com espécies de rápido crescimento, como é o caso do eucalipto. Uma abordagem positiva a respeito do potencial das plantações de eucalipto não deve subestimar a necessidade de aplicação de tecnologia silvicultural e do conhecimento detalhado e integrado do meio físico para que a plantação não tenha um custo ambiental excessivo. Nesse caso, torna-se necessária a elaboração de trabalhos que possam identificar tanto as áreas mais críticas, quanto aquelas cuja intervenção antrópica não contribua para deflagrar intensos processos do meio físico como erosão acelerada e feições de escorregamento, com o conseqüente assoreamento e redução da qualidade dos corpos d'água.

A análise geo-espacial integrada com base em Sistema de Informação Geográfica (SIG) contribui para se estabelecer, regionalmente, mapas de potencialidade a um determinado tipo de uso da terra – como é o caso da silvicultura. No Brasil, nas últimas duas décadas, tem sido produzidos mapas de integração que apontam potencialidade (ou vulnerabilidade) através de instrumentos legais como, por exemplo, os zoneamentos agroecológicos que vem sendo desenvolvidos, principalmente pela Embrapa, em diferentes regiões do país. Como exemplos se podem citar aqueles realizados para o Nordeste brasileiro (Silva et al., 1993), para o estado do Mato Grosso (Sanchez, 1992; Chagas et al., 2008) ou mais especificamente para diferentes municípios (por ex., Martorano, 1998; Silva et al., 2002).

Mapas que indiquem potencialidade (ou vulnerabilidade) com ênfase para a silvicultura têm recebido pouca atenção mesmo na literatura internacional. Parcela significativa dos trabalhos existentes enfatiza determinadas características dos solos em áreas de eucalipto como a avaliação da hidrofobicidade dos solos em áreas com tendência a incêndios (Doer et al., 1998) ou a variação espacial do conteúdo de umidade do solo em diferentes estações do ano (Epron et al., 2004).

Portanto, além da variabilidade de parâmetros do solo, não foram identificados trabalhos que tenham, como foco principal, a análise integrada dos elementos do meio físico (rocha-relevo-solo) no sentido de se estabelecer as áreas com diferentes potencialidades para a atividade de silvicultura. A caracterização de “qualidade do sítio florestal” utilizada em Engenharia Florestal (Salas, 1987) tem sido empregada principalmente sob um enfoque pedológico, particularmente para a avaliação dos nutrientes e fertilidade dos solos (Lima, 1993; Gama-Rodriguez e Barros, 2002).

Esta ausência de se considerar elementos geológicos e geomorfológicos até se explica em regiões com baixa diversidade paisagística como, por exemplo, a bacia sedimentar do Paraná, que cobre porções significativas dos estados de São Paulo, Paraná e Mato Grosso do Sul. Nesta região ocorre pouca diversidade geológica ou de relevos, o que torna as características do solo os principais indicadores para se avaliar a potencialidade/vulnerabilidade natural do meio físico. Entretanto, em regiões montanhosas – como aquela que engloba a porção leste de São Paulo e os estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais – a elevada complexidade geológica e a grande diversidade de formas de relevos, necessita ser avaliada considerando o meio físico de forma integrada e que procure levar em conta os diversos mapas temáticos existentes.

Apesar da diversidade geológica e geomorfológica da região, que compreende a bacia do rio Paraíba do Sul, não estão ainda disponíveis mapas que apontem a potencialidade da silvicultura ou mesmo mapas

agroecológicos em escala regional ou municipal.

Com base nestas considerações, este trabalho procura contribuir para apontar, em escala regional, as áreas mais favoráveis para a silvicultura para a porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul, considerando três elementos do meio físico - rocha, relevo e solo – no sentido de identificar aquelas áreas que, potencialmente, estão mais suscetíveis aos processos do meio físico como erosão acelerada e movimentos de massa. Ainda que existam diversos outros fatores de natureza ambiental e

social, este trabalho tem como objetivo considerar apenas critérios do meio físico e sua aptidão para florestas manejadas, no sentido de se evitar áreas com maior potencial para o aparecimento e aceleração dos processos do meio físico. Desta forma, os elementos do meio físico são a base de apoio para as decisões da ponderação neste trabalho. Porém, para o estabelecimento de políticas agrícolas na região, além do Mapa de Potencialidade aqui proposto, deveriam ser acrescentados outros parâmetros de natureza ambiental e social.

MATERIAIS E MÉTODOS

Localização e características da área de estudo

A área selecionada para este estudo corresponde à bacia do rio Paraíba do Sul (porção paulista) na qual está inserido o “Vale do Paraíba”. Esta região faz a ligação entre as duas maiores cidades brasileira, São Paulo e Rio de Janeiro, sendo uma das mais importantes bacias hidrográficas do país. Do ponto de vista econômico essa bacia concentra expressiva produção industrial a qual ocorre ao longo da

calha do rio Paraíba do Sul. A região possui intenso processo de conurbação urbana, como os trechos Jacareí - São José dos Campos – Caçapava; Taubaté – Pindamonhangaba e Aparecida – Guaratinguetá - Lorena.

Em face da base de dados cartográfica disponível, se considera para este estudo apenas a porção paulista (Figura 1) compreendendo as regiões designadas de “Alto Vale” e o “Médio Vale Superior” com cerca de 15.300 km² de área.

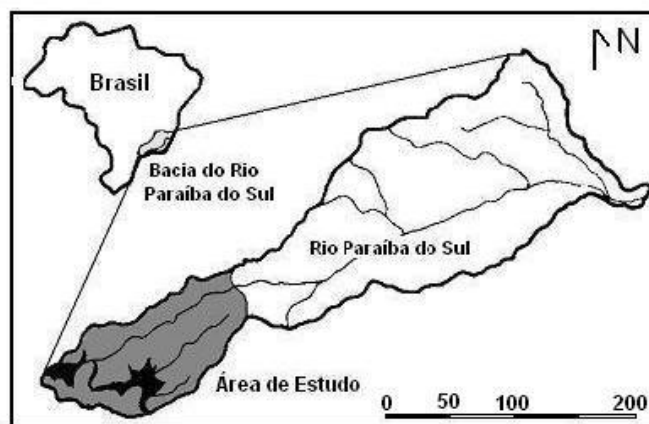


Figura 1. Localização da área de estudo

No aspecto geológico a bacia do rio Paraíba do Sul é formada por três unidades distintas: uma seqüência de rochas de idade pré-cambriana (embasamento cristalino), uma seqüência sedimentar (Bacia do Taubaté), de idade Cenozóica e sedimentos inconsolidados, de idade Quaternária, relacionados às extensas planícies aluvionares (Hasui e Sadowski, 1976; Carneiro et al., 1978; IPT, 1981, Landim, 1984;

Fúlfaro e Bjomberg, 1993; Ricomini, 1989; Ricomini et al., 2004).

Esta diversidade geológica foi responsável por uma grande variação nos relevos no interior da bacia do rio Paraíba do Sul. A região apresenta extensas planícies inundacionais (áreas com declividades inferiores a 2%) associadas ao curso principal do rio Paraíba do Sul e seus afluentes; relevos colinosos suaves com declividades médias inferiores a 15%;

relevos de morros com declividades altas – 20 a 30% em média - e amplitude entre 100 e 300 metros e, finalmente, relevos de serras com declividades superiores a 30% e amplitudes superiores a 300m (Ponçano, 1981).

Entre os principais fatores que influenciaram na composição dos solos encontrados na bacia se podem destacar as características geológicas, a diversidade do relevo e as elevadas taxas de pluviosidade. Dessa forma, encontra-se presente na área os tipos Argissolos Vermelho Amarelos (PVA), Latossolos Vermelho Amarelos (LVA), Gleissolos Melânicos (GM) e Cambissolos Háplicos (CX) (Oliveira et al., 1999).

Neste contexto bastante diversificado, no que se refere ao clima e ao meio físico, a região em estudo apresenta cobertura vegetal variada. Registros e reconstituições da vegetação do sudeste brasileiro indicam que a região do Vale do Paraíba apresentava-se, originalmente, coberta por uma floresta tropical latifoliada em quase toda a sua extensão, mas devido aos diversos “ciclos” de agricultura (cana-de-açúcar, café e pastagem), a paisagem regional teve mudanças dramáticas nos últimos 300 anos (Fujieda et al., 1997). 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 dos plantios de eucalipto no período entre 2000 e 2007 foi da ordem de 250 ha/ano ocupando uma área total de 1755 ha no ano de 2007. O crescimento da atividade de silvicultura não

ocorreu de forma homogênea nem com a mesma intensidade em todos os domínios geomorfológicos da bacia do rio Paraíba do Sul. Entretanto esta afirmativa é antes baseada na percepção espacial do que em levantamentos quantitativos os quais não estão disponíveis que corroborem esta assertiva.

Os mais recentes dados quantitativos sobre o uso da terra na porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul foram levantados por SMA (2009). Esse levantamento foi elaborado a partir da interpretação de imagens de satélite, obtidas da fusão das imagens do satélite IRS P6 e do LandSat 7 ETM, com resolução espacial compatível com a apresentação na escala 1:50.000, ou menor. Este trabalho é mais uma constatação que a paisagem na bacia é constituída por um complexo mosaico, no qual a pecuária associada a campos limpos e sujos ocupam 50,0% (Tabela 1) e constituem a matriz da paisagem, de acordo com os princípios da ecologia da paisagem (Forman e Godron, 1986; Forman, 1995). Em seguida, ocorrem as áreas formadas por mata ou capoeira (41%) constituídas na sua maioria, por fragmentos isolados que se concentram principalmente nas regiões de morros e serras. Em porcentagem bem menor ocorrem as áreas urbanas (3,2%) e as áreas de reflorestamento (3,1%) e os corpos d’água, incluindo os reservatórios regionais (2,2%). As culturas anuais, perenes e semi-perenes são bastante inexpressivas e foram consideradas como “outros usos” conforme se observa na Tabela 1. De qualquer forma, estes dados devem ser vistos com ressalvas, pois podem existir discrepâncias segundo a metodologia e o sensor empregados no levantamento.

Tabela 1. Tipos de uso da terra em porcentagem e superfície para a bacia do rio Paraíba do Sul (porção paulista) (SMA, 2009)

Classes de uso do solo	Área (km ²)	Área (%)
Mata ou capoeira	5941,18	41,0
Pasto	7245,35	50,0
Urbana	463,70	3,2
Reflorestamento	449,21	3,1
Corpos d’água	318,79	2,2
Outros usos	72,42	0,5
Área total das classes	14490,70	100,00

Bases Teórico-Metodológicas

Mapas de potencialidade são mapas criados para representar o potencial de uma determinada “unidade” enfatizando diferentes recursos naturais, sejam relacionados ao uso agrícola e ao uso da terra (Fiori et al., 1999), sejam relacionados à água subterrânea (Governo do Estado de São Paulo, 2005) ou mesmo relacionados à identificação de áreas de queimadas (Fernandes et al., 1998). A dificuldade em localizar mapas de potencialidade voltados especificamente para a silvicultura é que, normalmente, esta atividade específica se insere em mapas que tratam do potencial de uso da terra ou de zoneamentos agro-ecológicos conforme já discutidos anteriormente.

Os trabalhos para delimitação de unidades com diferentes graus de potencialidade levam em conta um conjunto de parâmetros utilizando principalmente uma abordagem semi-qualitativa. Esta análise é baseada no julgamento de especialistas, por meio de dados cartográficos e de campo e explorando as ferramentas de análise geoespacial do ambiente de um Sistema de Informação Geográfica (SIG).

O SIG é um sistema computacional para capturar, armazenar, indagar, analisar e visualizar dados geoespaciais (Chang, 2010) e tem, nos últimos anos, ampliado suas interfaces com outras geotecnologias como o sensoriamento remoto e a aerofotogrametria e também evoluído para elaboração de modelos e cenários.

Neste sentido, o modelamento geoespacial consiste em combinar vários estágios de transformação e manipulação de dados para a obtenção de um único propósito (Longley et al., 2011). Como exemplo, se pode combinar diferentes mapas temáticos para a obtenção de um mapa de integração. Desta forma, o conceito de *álgebra de mapas* ou *modelamento cartográfico* é uma das mais bem sucedidas técnicas de interação de mapas desenvolvida, inicialmente, por Dana Tomlin (Tomlin, 1990). A álgebra de mapas propicia a possibilidade de

se obter modelos considerando diferentes áreas do conhecimento que, para suas análises, necessitam integrar dados geoespaciais de diferentes naturezas e com diferentes finalidades, entre eles mapas de vulnerabilidade e potencialidade.

O princípio da álgebra de mapas é baseado em um conjunto de operações matemáticas realizadas para cada unidade de pixel considerando cada *layer* selecionado. Neste sentido, a restrição para se usar o modelo é que tanto os dados de entrada quanto aqueles de saída sejam em formato matricial que, além de facilitar, tornam muito mais rápido os procedimentos de operação (Demers, 2002). Entre estes procedimentos se incluem os *operadores aritméticos* que, utilizando-se uma *calculadora raster*, possibilitam se realizar operações de adição, subtração, multiplicação e divisão para cada pixel existente nos mapas temáticos.

Desta forma, este trabalho utiliza os princípios da modelagem cartográfica utilizando mapas em escala regional em formato matricial. Os mapas temáticos originais foram obtidos em AutoCAD (formato dwg) a partir da base de dados fornecida pelo projeto Plano de Qualidade da Água produzido para a porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul (CEIVAP, 2000). Os mapas originais foram convertidos em formato *shapefile*, dentro do ambiente ArcGIS®, utilizando técnicas que possibilitaram transformar todos os polígonos existentes no formato AutoCAD em *polylines* para que, desta maneira, pudessem ser lidos em ambiente SIG. O fato dos mapas originais já estarem georeferenciados contribuiu para tornar mais rápido o procedimento de conversão do ambiente Auto CAD para o ambiente SIG.

Os parâmetros do meio físico utilizados na classificação das áreas relacionam-se à geologia (tipos litológicos e estruturas), geomorfologia (tipos de relevos) e pedologia (tipos de solos) conforme se observa na Figura 2. Estes critérios foram os mais compatíveis considerando a escala regional, a disponibilidade dados e os objetivos deste trabalho.

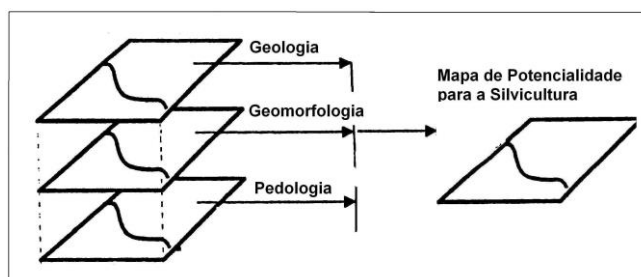


Figura 2. Três níveis de informação utilizados para produzir o Mapa de Potencialidade para a Silvicultura

Com a utilização desses mapas e das ferramentas de análise espacial disponíveis no programa ArcGIS®/Spatial Analyst foi possível fazer atribuições de valores numéricos (ponderações) para cada unidade existente em cada mapa, cujo processo de integração torna possível a produção do mapa com as unidades físicas mais propícias ao plantio do eucalipto.

Neste contexto, a maior dificuldade está em conseguir relacionar, numericamente, os parâmetros do meio físico associados aos mapas temáticos. Quando se elabora a ponderação, muitos fatores influenciam e contribuem para o processo decisivo final como, por exemplo, saber quais declividades são limitantes para os movimentos de massa ou determinar que tipo de solo tem maior potencial para o avanço dos processos erosivos acelerados. Para reduzir estas incertezas, profissionais com diversas formações se reuniram no sentido de se estabelecem os valores para cada uma das classes consideradas.

Um grupo de especialistas com experiências nas áreas de Geologia, Geotecnia, Engenharia Florestal e Agronomia procuraram interpretar e fornecer pontuação para cada elemento do meio físico mencionado na Figura 2. Este procedimento é frequentemente utilizado para refinar as informações e para a geração de novos dados e *insights*, através da interação direta entre os participantes, conforme descrito por Brooks et al. (2005). Desta maneira, cada especialista foi indagado, a partir da sua própria experiência e perspectiva, sobre os efeitos de cada elemento do meio físico, vistos regionalmente e sua influência sobre a potencialidade e vulnerabilidade da atividade de silvicultura. Dessa forma, para cada tipo de parâmetro do meio físico (ou elemento da paisagem) aplicou-se um fator de escala com números inteiros variando de 1 a 5, que correspondem ao mais favorável (5) até o menos favorável (1) para a atividade de silvicultura conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Lista de qualificadores e seus fatores

Significado	Pontuação
Pouco Adequada	1 – 2
Regular	2 – 3
Adequada	3 – 4
Muito Adequada	4 – 5

A Figura 3 mostra o resumo das principais etapas do procedimento metodológico adotado. Na *etapa 1*, os dados vetoriais obtidos no formato AutoCAD® foram migrados para o formato *shapefile* da ESRI® e, posteriormente, convertidos para o formato matricial utilizando-se a ferramenta *Convert to Raster* na caixa de ferramentas do ArcGIS®. Na *etapa 2*, a equipe de especialistas atribuiu valores numéricos (ponderações) para as

diferentes unidades geológicas, geomorfológicas e pedológicas. O passo seguinte, *etapa 3*, foi realizar operações de álgebra de mapas (soma) dos atributos empregando a ferramenta *Raster Calculator* da extensão *Spatial Analyst* do ArcGIS®. Na *etapa 4*, foi realizada a separação das classes a partir das médias dos fatores pontuados. Finalmente, na *etapa 5*, se obteve o Mapa de Potencialidade.

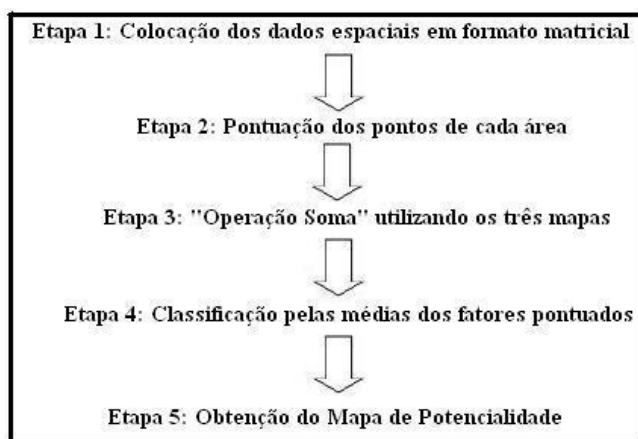


Figura 3. Principais etapas do procedimento metodológico para a obtenção do Mapa de Potencialidade

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Geologia

A análise das litologias (tipos de rochas) e das estruturas (principais lineamentos) foi realizada tomando como base o Mapa

Geológico do Estado de São Paulo, na escala 1:500.000 produzido pelo IPT em 1981 (Figura 4).

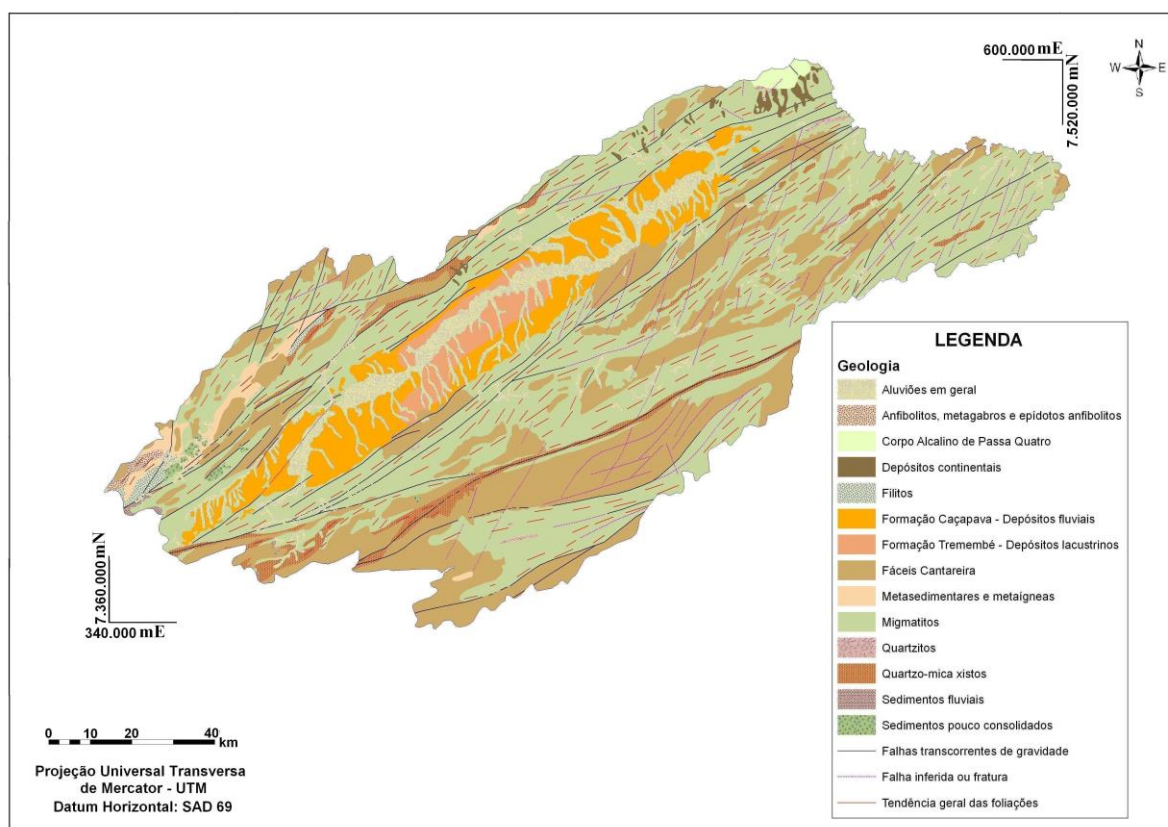


Figura 4. Mapa Geológico do Estado de São Paulo correspondendo a porção paulista da bacia do Rio Paraíba do Sul (IPT, 1981, modificado pelo autor).

Se deve ressaltar que o mapa da Figura 4 representa uma simplificação das diferentes unidades geológicas encontradas na região. Neste sentido, as pequenas unidades com litologias semelhantes foram reagrupadas e

reclassificadas para representar as maiores unidades geológicas.

As unidades *granitos*, *rochas metassedimentares*, *migmatitos* e *quartzitos* correspondem às unidades constituídas de

rochas cristalinas (ígneas e metamórficas) de idade precambriana (maior que 500 milhões de anos). As unidades *rochas sedimentares arenosas*, *rochas sedimentares argilosas*, *depósitos de colúvio e tálus* e *planícies aluvionares* correspondem à rochas sedimentares de idade Terciária-Quaternária (inferior a 60 milhões de anos) da Formação Caçapava (sedimentos arenosos) e Formação Tremembé (sedimentos argilosos) e sedimentos aluvionares quaternários conforme definidos por IPT (1981). Posteriormente, Ricomini (1989) identificou mais uma unidade sedimentar, o Grupo Pindamonhangaba.

Entretanto, não existem levantamentos cartográficos para a área de estudo que incluam o Grupo Pindamonhangaba a não ser para algumas folhas cartográficas no interior da bacia (IPT, 1990). Portanto, para este estudo se considera apenas aspectos texturais (predomínio de areia ou argila) baseados no mapa geológico produzido pelo IPT (1981) e não se entra em consideração quanto à detalhamentos relacionados a modelos de sistemas deposicionais.

A Tabela 3 mostra como ficaram as ponderações nesse atributo considerando as oito unidades geológicas observadas na figura 4.

Tabela 3. Ponderação definida para as classes de Geologia

Rochas sedimentares argilosas	5
Rochas sedimentares arenosas	4
Rochas metassedimentares	4
Migmatitos (migmatites)	3
Granitos (granites)	2
Depósitos coluvionares	1
Planícies aluvionares	1

Os sedimentos predominantemente argilosos formados em ambientes lacustrinos - antigos depósitos de lagos e lagoas - possuem bom potencial para a silvicultura e receberam pontuação máxima (5), pois sua textura argilo-arenosa fornece as condições adequadas tanto do ponto de vista textural quanto de drenagem vertical. Os sedimentos predominantemente arenosos (com intercalações de níveis de argila), correspondendo principalmente aos depósitos fluviais, também são favoráveis para o plantio, mas perdem um pouco na pontuação pelo elevado teor relativo de areia implicando condições relativamente mais altas de acidez e baixa retenção de água nas camadas superiores do solo (peso 4). Da mesma forma, as rochas metassedimentares, tais como *anfíbolitos* (rochas vulcânicas metamorfizadas) receberam pontuação alta (peso 4), por serem rochas formadas por minerais micáceos que geram solos ricos em argila. Este tipo de rocha produz solos avermelhados que caracterizam elevado potencial para o eucalipto. O tipo de rocha que possui pontuação intermediária (peso 3) é composto predominantemente por *migmatitos*. Estas rochas são formadas por misturas de rochas metamórficas foliadas (principalmente gnáissicas) e rochas ígneas homogêneas (principalmente granitos). As fácies gnáissicas

são mais favoráveis por serem ricas em minerais micáceos e de composição ferromagnésiana além de que, apresentam condições de maior estabilidade quando são recortadas para a instalação de estradas vicinais e outras intervenções antrópicas. Em face de sua textura grosseira e presença de feldspatos e quartzo, os *corpos graníticos* receberam pontuação 2, podendo gerar solos que possuem grande potencial para o desenvolvimento de processos erosivos acelerados. Diversos perfis de campo realizados na área de estudo têm constatado a elevada de condição de fragilidade destas rochas com intenso ravinamento associado. Os *quartzitos*, produzindo solos de composição muito arenosa, com elevada acidez, possuem pouca aptidão para ao desenvolvimento de plantios homogêneos de silvicultura, tendo também recebido a pontuação 2. Além disto, cortes de estradas executados nas formações superficiais relacionados aos quartzitos, tendem a apresentar problemas geotécnicos como erosão linear. Os *depósitos coluvionares* (depósitos recentes de solos em encostas) e de *tálus* (misturados com blocos de rochas) receberam pontuação 1 por serem áreas de elevada instabilidade. Os *aluviões* (depósitos sedimentares associados aos cursos d'água) formados por material, em geral, grosseiros,

mal selecionados e inconsolidados receberam também ponderação mínima (pontuação 1) devido ao baixo potencial de infiltração destes solos parcialmente saturados de água. Modelos recentes têm sugerido que a direção do fluxo da água vai do aquífero para o curso d'água (modelo influente) e que a planície do rio Paraíba do Sul funciona como área de descarga e possui baixas condições de infiltração (Soares et al., 2012).

Geomorfologia

O Estado de São Paulo dispõe de dois levantamentos geomorfológicos (Ponçano, 1981; Ross e Moroz, 1997); entretanto apenas o levantamento realizado pelo IPT (Ponçano, 1981) encontra-se disponível digitalmente para a área de estudo, tendo sido realizado pelo CEIVAP (2000) como subsídio para o Plano de Qualidade de Bacias (PQA) conforme já mencionado anteriormente. A Figura 5 apresenta o Mapa Geomorfológico correspondendo à porção paulista do rio Paraíba do Sul.

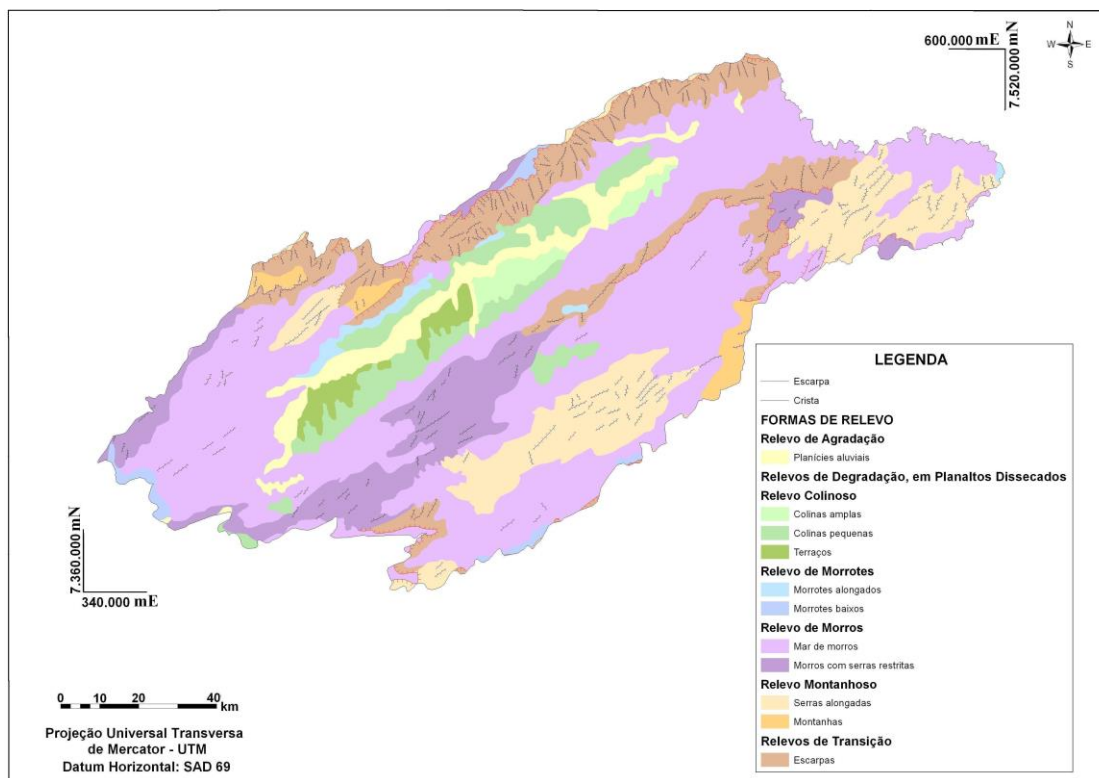


Figura 5. Mapa Geomorfológico da porção paulista da bacia do Rio Paraíba do Sul (Ponçano, 1981, modificado pelo autor)

O mapa geomorfológico observado na Figura 5 está dividido em cinco unidades de relevo as quais receberam distintas pontuações observadas na tabela 4. Da mesma forma que

para o Mapa Geológico (Figura 4), as unidades de relevo similares foram agrupadas e reclassificadas para que o mapa refletisse as unidades realmente distintas.

Tabela 4. Pontuação definida para as classes da geomorfologia

Relevo de Colinas Amplas e Suaves	5
Relevo de Morros com Serras Restritas	4
Relevo de Morrotes	3
Serras Alongadas e Relevos de Escarpas	2
Planícies Aluvionares	1

As *colinas amplas*, juntamente com as *colinas suaves*, receberam a pontuação máxima (5) por serem regiões que possuem topos

amplos e arredondados com declividades normalmente inferiores a 15%. Na região, as áreas colinosas estão principalmente associadas

às rochas sedimentares. Os relevos de *morros com serras restritas* com declividades elevadas (30% a 50% em média), foram também considerados áreas adequadas para o plantio de eucalipto (peso 4) devido aos seus topos arredondados e drenagem relativamente menos densa quando comparados com outros tipos de relevo encontrados no ambiente de morros e serras existente na região. Os relevos de *morrotes com encostas íngremes* receberam uma menor pontuação (peso 3) devido a uma maior declividade (20 a 30% em média) que tendem a favorecer o escoamento superficial em detrimento dos processos de infiltração, com evidências de processos erosivos lineares associados. As unidades de relevo *serras alongadas e relevos de escarpas* foram agrupadas em uma única unidade. Elas foram classificadas com pontuação 2 devido as elevadas declividades médias (30 a 50%) e amplitude superiores a 300 metros, que

favorecem a evolução de processos do meio físico como a erosão linear e os escorregamentos. Portanto, nestas áreas, o potencial para o desenvolvimento de processos erosivos é muito grande quando ocorre intervenção antrópica na paisagem como a abertura de estradas vicinais em áreas de plantio. As *planícies aluviais* receberam a pontuação 1 por serem propícias a inundações e, portanto, não se constituem em áreas potenciais para silvicultura.

Pedologia

No atributo *solo* se considerou as classes existentes no Mapa Pedológico do Estado de São Paulo, escala 1:500.000 (Oliveira et al., 1999) conforme se pode observar na Figura 6. Deve-se ressaltar que a região leste do Estado de São Paulo não possui outros levantamentos pedológicos disponíveis, em escala regional.

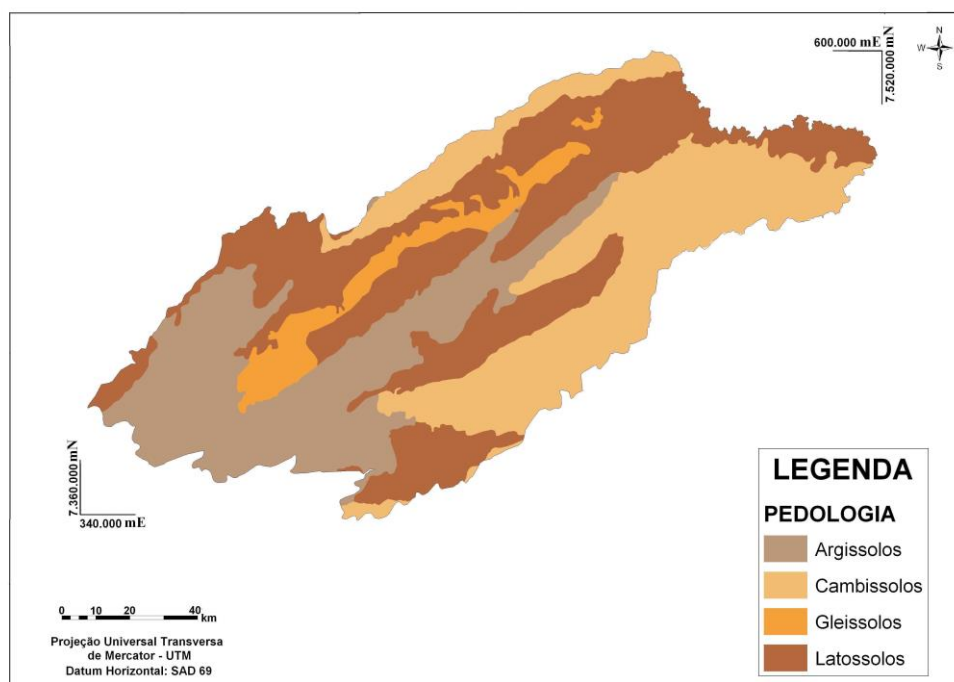


Figura 6. Mapa Pedológico da Bacia do Rio Paraíba do Sul (Oliveira et al., 1999, modificado pelo autor)

Para a região foram definidas cinco unidades conforme se pode observar na tabela 5. Ao contrário do que foi realizado para os mapas geológico e geomorfológico não foi necessário reclassificar as unidades. Na abordagem do solo

prevalece a noção que quanto mais desenvolvido e homogêneo mais apropriado o solo seria para a silvicultura. Os pesos para cada classe foram estipulados conforme indicado na Tabela 5.

Tabela 5. Pontuação definida para as classes pedológicas

Gleissolos	1
Cambissolos Háplicos	2
Cambissolos Húmicos	3
Argissolos	4
Latossolos	5

Os *latossolos* são os mais adequados para a silvicultura (peso 5) por serem bem desenvolvidos, bem formados, possuem boa drenagem e baixa erodibilidade. Em seguida vêm os *argissolos*, solos bem desenvolvidos e com horizonte B texturado. A pontuação menor dos argissolos (peso 4) foi devido à sua heterogeneidade vertical, com níveis enriquecidos em argila que dificultam a drenagem para os níveis inferiores. Ao contrário dos latossolos e argissolos, os cambissolos possuem horizonte B incipiente, deixando em evidência o horizonte C com estruturas reliquias da rocha original e elevado potencial de erodibilidade. Os *cambissolos húmicos* receberam peso 3 enquanto os *cambissolos háplicos* receberam peso 2. O peso relativamente maior atribuído aos primeiros é devido à presença de maior conteúdo de matéria orgânica, que funciona como proteção aos processos erosivos. Os cambissolos, de uma maneira geral, estão associados a relevos normalmente íngremes e não são recomendados para a agricultura; entretanto, apesar dos problemas mencionados

acima, a silvicultura associada a estes solos se constitui uma alternativa econômica, desde que aplicadas boas técnicas de manejo. Os *gleissolos* (solos orgânicos de várzea) receberam peso 1 (um) por serem adaptados apenas às espécies hidromórficas, apresentando sérias limitações devido ao fato de serem saturados em água e com baixas condições de infiltração.

Mapa de Potencialidade

Com os fatores selecionados e definidos tornou-se possível a caracterização e delimitação das áreas favoráveis à silvicultura da Porção Paulista da Bacia do Rio Paraíba do Sul, ou seja, aquelas em que teriam, potencialmente, menor chance de ocorrerem processos erosivos acelerados ou feições de escorregamento de maior magnitude. O resultado final obtido pode ser observado na Figura 7, que apresenta o mapa de potencialidade para a silvicultura e a figura 8 apresenta as porcentagens para cada classe de potencialidade.

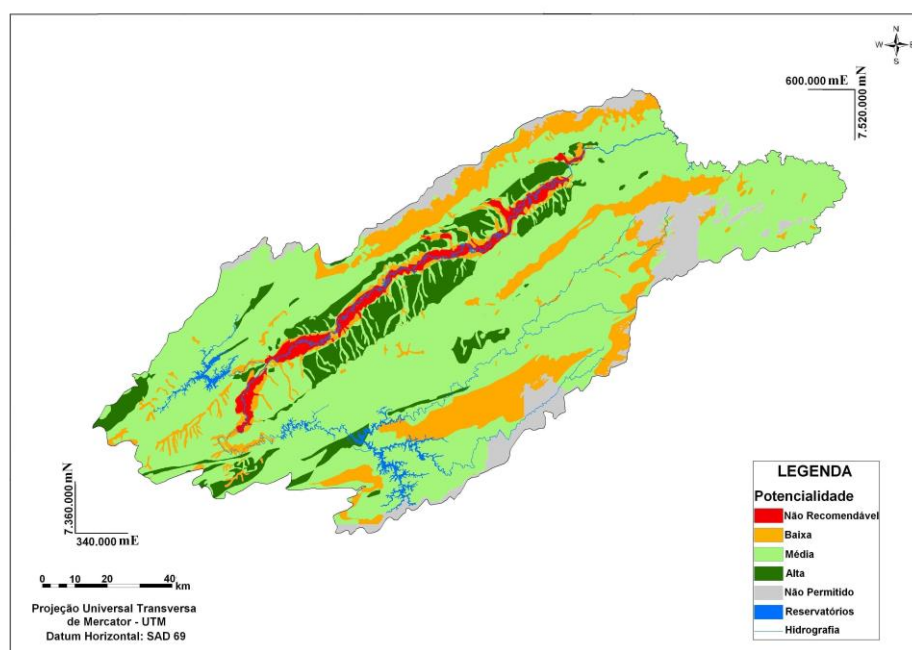


Figura 7. Mapa de potencialidade para a silvicultura da Porção Paulista da Bacia do rio Paraíba do Sul.

As áreas ocupando os relevos colinosos associados por rochas sedimentares de composição argilosa e latossolos foram consideradas de *potencialidade alta*, do ponto de vista físico, para a atividade de silvicultura. Entretanto, deve-se ressaltar que a boa pontuação destas áreas ocorreu devido ao fato de se considerar apenas o meio físico isoladamente e não se levar em conta fatores de outra natureza como o uso da terra e variáveis

ambientais. Convém lembrar que estas áreas com relevos colinosos, representam a única alternativa para a expansão urbana na região, em face do pouco estoque de terrenos compatíveis para o crescimento das cidades no Vale do Paraíba. Estas áreas correspondem a cerca de 10% da área total (Figura 8) e ainda que tenham elevado potencial para a silvicultura, estas áreas deveriam ser prioritariamente utilizadas para outros fins.

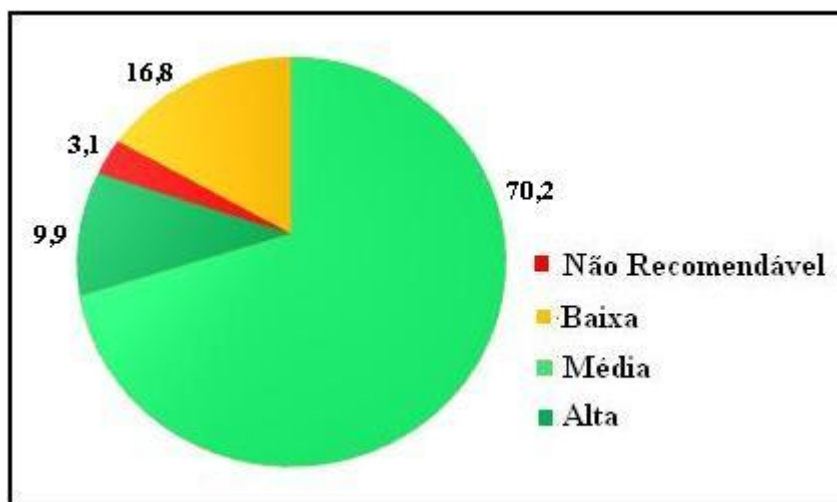


Figura 8. Classes de potencialidade para a silvicultura em porcentagem (%)

As áreas de *potencialidade média* correspondem às regiões onde se associam relevos de morros, rochas metamórficas ricas em minerais de composição ferro-magnésiana e predomínio de latossolos. Estas áreas ocupam uma extensa porção da bacia, equivalente a cerca de 70% da área (Figura 8). Na história mais recente desta bacia, boa parte de sua área tem sido ocupada por pastagens mal manejadas e com fragmentos descontínuos de floresta natural. Portanto, a atividade de silvicultura, substituindo estas áreas de pastos mal manejados, é compatível com as características e a dinâmica do meio físico observadas na associação entre relevos de morros, rochas gnáissicas e latossolos, nos quais a evolução morfogenética (evolução dos processos) e a evolução pedogenética (formação dos solos) estão em equilíbrio dinâmico.

As áreas *com potencialidade baixa* correspondem à associação entre relevos de morros e serras, rochas graníticas ricas em quartzo e presença de solos texturados

(argissolos) e rasos (cambissolos) de composição areno-siltosa. Este quadro favorece o desenvolvimento e o avanço dos processos erosivos acelerados (sulcos e ravinas). Estas áreas equivalem a quase 17%, conforme se observa na Figura 8. A sua ocupação para a atividade de silvicultura depende de práticas de manejos especiais ou poderiam ser utilizadas para projetos florestais com um período de corte maior do que sete anos, como é o caso dos plantios tradicionais de eucalipto. Portanto, nestas áreas os processos morfogenéticos superam os processos pedogenéticos com grande potencial para erosão e diferentes formas de movimentos de massa.

As áreas *não recomendáveis* correspondem às regiões de várzea com nível freático próximo à superfície, associados com solos hidromórficos (gleissolos melânicos) e passíveis de serem inundadas. Estas áreas acompanham o rio Paraíba do Sul e equivalem a aproximadamente 3% da área de estudo.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho evidencia-se a necessidade de um melhor planejamento nas atividades de operação e manejo das áreas de silvicultura, levando-se em conta a complexidade e a diversidade do meio físico considerada neste trabalho, como a integração entre geologia, geomorfologia e pedologia. A importância de se considerar a análise integrada do meio físico aumenta nas áreas de relevos acidentados, as quais não podem ser de forma alguma consideradas como homogêneas. Este estudo mostrou que as áreas com relevo colinoso (declividades inferiores a 15%) associadas às rochas sedimentares argilosas possuem as melhores condições do meio físico para a implantação de atividade de silvicultura (*potencialidade alta*). Entretanto, estas áreas correspondem às regiões de perímetro urbano ou podem se constituir estoques de áreas para expansão urbana na região. As áreas consideradas como tendo *potencialidade média* correspondem à maior parte da região de estudo (cerca de 70% da superfície total). De fato, estas áreas têm sofrido significativos processos degradacionais e, correntemente, representam uma mistura de áreas de pastos e fragmentos descontínuos de florestas. Estas áreas são formadas por relevos de morros, rochas metamórficas (migmatitos e gnaisses)

tendendo a formação de solos avermelhados bem espessos. Ao contrário, as áreas formadas pela integração entre serras, rochas graníticas e cambissolos são aquelas designadas como tendo *potencialidade baixa* devido a facilidade com que se desenvolvem os processos do meio físico. Estas áreas deveriam ser evitadas devido à facilidade de desenvolverem erosões aceleradas (tipo ravinas e voçorocas) e escorregamentos localizados. Estes processos ocorrem particularmente quando associados às intervenções humanas como a construção de estradas vicinais. Caso estas áreas sejam utilizadas para a atividade silvicultural necessitariam de detalhamento geológico-geotécnico e pedológico, além de levantamentos da drenagem superficial no sentido de se estabelecer os cuidados especiais na execução de cortes e obras de drenagem associadas.

Desta maneira, as informações contidas no Mapa de Potencialidade à Silvicultura podem contribuir para o planejamento da área em questão, mostrando as áreas potenciais e críticas ao cultivo do eucalipto podendo, dessa forma, contribuir na melhor adaptação desta atividade ao meio ambiente e reduzir os impactos ocasionados por intervenções na paisagem como o traçado de estradas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fibria Celulose S.A. que disponibilizou para este estudo várias áreas de fazenda de eucalipto na região do Vale do Paraíba.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BROOKS N., ADGER W.N., KELLY P.M. The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. **Global Environmental Change**, v. 15, p. 151-165, 2005.
2. 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, Ouro Preto, 1976. **Anais...** Belo Horizonte: SBG, v. 4, p. 247-256, 1978.
3. COMITÊ PARA A INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (CEIVAP) **Projeto Qualidade das Águas e Controle da Poluição Hídrica (PQA)**. Relatório Executivo, São Paulo, CEIVAP, 122p, 2000.
4. CHAGAS, C.; CARVALHO JUNIOR, W.; BHERING, S.B.; AMARAL, F.C.; PEREIRA, N.; SILVA, E.; ZARONI, M.; GONÇALVES, A.; FEVRIER, P.; PINHEIRO, T.; FERNANDES, T. **Zoneamento agro-ecológico do município de Bonito. In: Zoneamento Agro-Ecológico do Estado do Mato Grosso do Sul**. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2008.
5. CHANG, K-T **Introduction to Geographic Information Systems**. Boston: McGraw Hill, 448p, 2010.
6. DEMERS, M.N. **GIS modeling in raster**. New York: John Wiley, 203p, 2002.
7. DOERR, S.H.; SHAKESBY, R.; WALSH, R. Spatial variability of soil hydrophobicity in fire-prone eucalyptus and pine forests, Portugal. **Soil Science**, v. 163, n. 4, p. 313-324, 1998.

8. EPRON, D.; Nouvellon, Y.; Rouspard, O; Mouvondy, W.; Mabiala, A.; Saint-Andre, L.; Joffre, R.; Jourdan, C.; Bonnefond, J-L.; Berbigier, P.; Hamel, O. Spatial and temporal variation of soil respiration in a Eucalyptus plantation in Congo. **Forest Ecology and Management**, v. 202, n. 1-3, p. 149-160, 2004.
9. FERNANDES, M.C.; ROSAS, R.; COELHO NETO, A.M. Potencialidade de ocorrência de queimadas no maciço da Tijuca/RJ: uma abordagem utilizando geoprocessamento. **Anais...Santos, IX Simpósio de Sensoriamento Remoto**, p. 537-548, 1998.
10. FIORI, P.; DEMATTE, J.; MELÉM JUNIOR, N.; MAZZA, J.A. Potencialidade do uso da terra na microbacia hidrográfica do córrego do Ceveiro na região de Piracicaba. **Scientia Agricola**, v. 56, n. 4, p. 1273-1280, 1999.
11. FORMAN, R.T. **Land mosaic. The ecology of landscape and regions**. Nova York: Cambridge University Press, 623p, 1995.
12. FORMAN, R.T.; GODRON, M. **Landscape ecology**. Nova York: John Wiley, 619p, 1986.
13. FÚLFARO, V.J.; BJOMBERG, J.S. Geologia. In: A.A. Ferreira; A. Negro Jr.; J.H. Albiero; J.C.A. Cintra (orgs.) **Solos do Interior de São Paulo**. São Carlos, ABMS/EESC-USP, p. 1-44, 1993.
14. 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.
15. GAMA-RODRIGUES, A.C.; BARROS, N.F. Ciclagem de nutrientes em floresta natural e em plantios de eucalipto e de dandá no Sudeste da Bahia. **Revista Árvore**, v. 26, n.2, p.193-207, 2002.
16. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO **Mapa de Água Subterrânea do Estado de São Paulo**, escala 1:1.000.000, Nota Explicativa, São Paulo, DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005.
17. HASUI, Y.; SADOWSKI, G. Evolução geológica do precambriano na região sudeste de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 6, p. 187-200, 1976.
18. INSTITUTO TECNOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT) **Mapa Geológico do Estado de São Paulo. Escala 1:500.000**. Volume I. Governo de São Paulo, IPT, 1981.
19. IPT (INSTITUTO TECNOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO) **Geologia das Folhas Jacareí, Tremembé, Taubaté e Pindamonhangaba**. Escala 1:50.000. Relatório 28732/1990, Secretaria da Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico/Governo de São Paulo, 1990.
20. LANDIM, P.M.B. (coord.) **Mapa Geológico de Estado de São Paulo**. Escala 1:250.000, São Paulo: IGCE/UNESP, 1984.
21. LIMA, W.P. **Impacto ambiental do eucalipto**. Piracicaba, EDUSP, 301p, 1993.
22. LONGLEY, P.A.; GODCHILD, M.F.; MAGUIRE, D.J.; RHIND, D.W. **Geographic information system & science**. New York, John Wiley, 539p, 2011.
23. MARTORANO, L.G. **Zoneamento agroecológico da quadrícula de Ribeirão Preto com base em características de solo, relevo e clima**. Piracicaba, USP/ESALQ, 77p, 1998.
24. OLIVEIRA, J.B.; CAMERGO, M.N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. – **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:500.000, Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1999.
25. PONÇANO, W.L. (coord) - **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:500.000. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 94p, 1981.
26. RICOMMINI, C. **O rift continental do Sudeste do Brasil**. São Paulo. (Tese de Doutorado), Instituto de Geociências, USP, 256p, 1989.
27. RICOMINI, C.; SANT'ANNA, L.G.; FERRARI, A.L. Evolução geológica do rift continental do Sudeste do Brasil. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C. Carneiro, B. Brito Neves (orgs.) **Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo, Beca, p. 383-405, 2004.
28. ROSS, J.L.S.; MUROZ, **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:500.000, São Paulo, USP/Fapesp, 1997.
29. SALAS, G. Suelos y ecosistemas forestales: com énfasis em America Tropical. San Jose, IICA, 450p, 1987.
30. SANCHEZ, R.O. **Zoneamento Agroecológico do Estado do Mato Grosso. Ordenamento ecológico-paisagístico do meio natural e rural**. Cuiabá, Fundação de Pesquisas Cândido Rondon, 1992.
31. SECRETARIA DE ESTADO E DO MEIO AMBIENTE (SMA) – **Mapa de Uso e Ocupação do Solo do Estado de São Paulo**. Escala 1:50.000. São Paulo, SMA, 2009.
32. SILVA, F.B.; RICHÉ, G.R.; SOUZA NETO, N.C.; CORREIA, R.C.; CAVALCANTI, A.C.; SILVA, F.H.; ARAUJO FILHO, J.C. – **Zoneamento agroecológico do Nordeste: diagnóstico do quadro natural e agrosocioeconômico**. Petrolina, EMBRAPA, 1993.
33. SILVA, J.M.; VALENTE, M.; RODRIGUES, T.; SANTOS, E.; ROLIM, P.; COSTA FILHA, C.; **Zoneamento agroecológico do município de Bom Jesus do Tocantis, Estado do Pará**. Rio de Janeiro, EMBRAPA, 2002.
34. SOARES, P.V.; PEREIRA, S.Y.; SIMOES, S.J.; BERNARDES, G.P.; BARBOSA, S.; TRANNIN, I.C. The definition of potential areas of infiltration in Guaratinguetá watershed, Paraíba do Sul basin, Southeast of Brazil – an integrated approach using physical and land use elements. **Environmental Earth Sciences**, v. 67, n.6, p. 1685-1694, 2012.
35. TOMLIN, C.D. **Geographic Information Systems and cartographic modeling**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 249p., 1990.
36. VIANA, L.G.G.; SATO, A.M.; FERNANDES, M.C.; COELHO NETO, A.L. Fronteiras de expansão dos plantios de eucaliptos nos geossistemas do Médio Vale do Paraíba do Sul (SP/RJ). In: I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico, Taubaté, 2007. **Anais...** Taubaté, IPABHi, p. 367-369.

*Manuscrito recebido em: 25 de abril de 2012
Revisado e Aceito em: 13 de dezembro de 2013*