

## Laboratório de Análise Geoespacial (LAGE): Alguns exemplos de pesquisa em hidrologia e em bacias hidrográficas

### Silvio Jorge Coelho

#### Simões

Professor Livre Docente,  
Laboratório de Análise  
GeoEspacial (LAGE),  
UNESP, Guaratinguetá, SP.  
CEP 12516-410.  
simoes@feg.unesp.br

### George de Paula Bernardes

Professor Assistente  
Doutor, Laboratório de  
Análise GeoEspacial  
(LAGE), UNESP,  
Guaratinguetá, SP.  
CEP 12516-410.  
gpb@feg.unesp.br

### Resumo

Este trabalho tem como objetivo apresentar pesquisas realizadas no Laboratório de Análise Geoespacial (LAGE) que tem como seu principal foco de interesse as questões hidrológicas e do meio físicos relacionados a bacias hidrográficas com diferentes escalas. O laboratório recebe recursos de agências de fomento à pesquisa e de empresas privadas. O LAGE busca integrar várias ferramentas geotecnológicas como Sistema de Informação Geográfica (SIG), Geoestatística e Processamento Digital de Imagem (PDI). Neste trabalho são apresentadas duas pesquisas distintas: a) análise da espacialização da precipitação regional utilizando ferramentas da geoestatística; e b) obtenção de um mapa de capacidade de infiltração com base em elementos do meio físico e da precipitação utilizando ferramentas de análise espacial de um SIG. Nos próximos anos espera-se um maior aprofundamento e expansão do uso das ferramentas geotecnológicas, particularmente à interação entre SIG e sensoriamento remoto e o uso de ferramentas tais como o ArcHydro/ArcGIS®. O objetivo de se usar o ArcHydro é, principalmente, buscar integrar séries hidrológicas temporais com dados geoespaciais o qual se constitui um dos maiores desafios atuais da hidrologia.

**Palavras chave:** *Hidroclimatologia. Infiltração. Elementos do meio físico. Sistema de informação geográfica. Geoestatística*

### Abstract

This work presents some of the research developed by the Laboratory of Geospatial Analysis (LAGE). This laboratory has developed large expertise in the area of hydrology and hydrographic basin at the different scales. Brazilian research agencies and private companies sponsor the research undertaken at the LAGE. Several geotechnologies including GIS, geostatistics and digital image processing are used and integrated in the laboratory. This work presents two case studies: a) spatial analysis of the precipitation using geostatistics, b) production of an infiltration map using GIS. In the future, we intend to develop the integration between GIS and remote sensing and to explore the potential of ArcHydro/ArcGIS® to link time series data on water measurements to geospatial data, which is one of most critical challenges to hydrologists today.

**Keywords:** *Hydroclimatology. Infiltration. Physical element. Geographical information systems. Geostatistics.*

## 1 Introdução

As atividades relacionadas ao uso de ferramentas geotecnológicas relacionadas à hidrologia e bacias hidrográficas na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG), UNESP, teve início a partir de 1997/1998 através da participação de um grupo de pesquisadores desta instituição na Sub-rede 1 – “Monitoramento de Bacias Hidrográficas e Processamento de Dados”, programa RECOPE/REHIDRO, da FINEP. A participação da FEG/UNESP neste programa criou as condições adequadas para a criação do Laboratório de Análise GeoEspacial (LAGE) anteriormente designado Laboratório de Geoprocessamento e Recursos Hídricos o qual foi instalado nas dependências do Departamento de Engenharia Civil da FEG/UNESP. O LAGE possui grande interação com o laboratório de Mecânica dos Solos da FEG/UNESP estabelecendo as condições para que a análise geoespacial de bacias hidrográficas seja realizada a partir de trabalhos de campo, ensaios de laboratório e atividades relacionadas a geotecnologias. Ambos os laboratórios dão suporte ao Grupo de Pesquisas intitulado “Monitoramento e Gerenciamento de Bacias Hidrográficas” o qual está credenciado junto a UNESP e ao CNPq.

Nos últimos anos o LAGE tem recebido recursos oriundos do Programa de Políticas Públicas da FAPESP (processo 2000/13714-1), do CNPq (processos 484267/06-0, 303349/03-4 e 468891/00-5) e do FEHIDRO (processo 415/2000). Além disto tem fortalecido parcerias com empresas privadas tais como a Votorantim Celulose e Papel através de vários projetos de parcerias que iniciaram em 2004, com o objetivo de estudar vários aspectos relacionados à relação hidrologia e floresta e ao estudo dos impactos do plantio de eucaliptos sobre o meio físico e os recursos naturais em bacias hidrográficas.

Os trabalhos de pesquisa em hidrologia e bacias hidrográficas no LAGE utilizam principalmente os programas que compõem o ArcGIS® e o SPRING envolvendo análise espacial avançada (SIMÕES et al., 2007; SANTOS et al., 2007; SOARES et al., 2008; SOARES et al., inédito), geoestatística (CAMARINHA et al., 2008; SILVA; SIMÕES, inédito) e sensoriamento remoto (PAES; SIMÕES, 2006). Neste trabalho, procura-se apresentar duas diferentes pesquisas realizadas no LAGE envolvendo aplicações de análise geoespacial em hidroclimatologia e determinação de áreas com potencial de infiltração com base em elementos do meio físico natural e modificado.

## 2 Análise espacial da precipitação com base em krigagem

### 2.1 Introdução

Caracterizar a espacialização das chuvas explorando as ferramentas da geoestatística dentro de um ambiente de modelagem computacional de um SIG (Sistema de Informação geográfica). A interação entre GIS e geoestatística tem sido apontada como tendo um elevado potencial de benefícios os quais não tem sido suficientemente explorado (BAILEY, 1995; FELGUEIRAS, 1999).

A área selecionada para este estudo corresponde a bacia do Rio Paraíba do Sul na qual está inserida o “Vale do Paraíba”. Em face da base de dados 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 13.500 km<sup>2</sup> de área.

A bacia do Paraíba do Sul é caracterizada por uma grande diversidade geológica, geomorfológica e pedológica. A variação altimétrica da bacia se situa entre 450m na planície aluvionar do rio Paraíba do Sul e 2400 m no topo da Serra da Mantiqueira. A precipitação média é da ordem de 1400 mm/ano, mas exibe uma grande variabilidade inter-anual alcançando valores entre 1300 e 2000 mm/ano (SIMÕES; BARROS, 2007) e uma grande variabilidade espacial (SILVA, 1999).

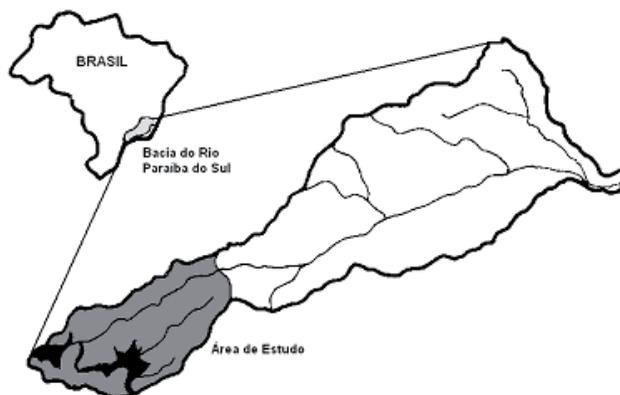


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo

### 2.2 Metodologia

Em face de sua importância regional, a Bacia do Rio Paraíba do Sul (setor paulista) dispõe de uma base de dados pluviométrica significativa, organizada e disponibilizada pelo Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo (SIGRH). Para esta bacia estão disponíveis cerca de 140 postos pluviométricos com dados de município, altitudes, coordenadas, além do período de dados.

Apesar da boa densidade relativa da rede de dados de precipitação para os padrões brasileiros (1 estação / 150 km<sup>2</sup>) ela não é distribuída homogeneamente pelos diferentes domínios geomorfológicos da bacia. Nas áreas constituídas por

morros e serras, a rede de postos pluviométricos não é suficientemente representativa da diversidade física observada na região. Desta maneira a utilização de métodos determinísticos – como Thiessen e mínimos quadrados – poderiam não ser apropriados, pois não levam em conta a variação topográfica a qual é significativa na região estudada.

A partir de critérios como a distância entre os pontos, o período de registro disponível (no mínimo 30 anos) e o nível de falhas nos registros (< 5%) foram selecionados 41 postos pluviométricos para os quais foram analisados os seus registros mensais considerando as quatro estações do ano: dezembro-janeiro-fevereiro (DJF), março-abril-maio (MAM), junho-julho-agosto (JJA), setembro-outubro-novembro (SON). Para cada posto pluviométrico foi realizado um sumário estatístico preliminar (média, mediana, desvio padrão e coeficiente de correlação).

Com base nos resultados da análise estatística temporal iniciou-se a geração de um semivariograma experimental para a posterior escolha de um variograma que se adequasse a um dos modelos teóricos. A partir do sistema SPRING, desenvolvido pelo INPE, foram gerados os diversos estágios com o objetivo de ajustar o semivariograma. Utilizando os dados de precipitação dos postos pluviométricos selecionados procurou-se adotar um *lag*, o qual se refere a uma distância pré-definida utilizada no cálculo do variograma. No primeiro ajuste, foi adotado um incremento de *lag* igual a 13000 metros com tolerância de 6500 metros e número de *lag* igual a 10. Desta forma a análise espacial considerou o retângulo correspondente à área da bacia do Paraíba do Sul (setor paulista) a qual possui, aproximadamente, 13.500 km<sup>2</sup>. O semivariograma unidirecional sobre as amostras foi definido considerando quatro direções em relação ao norte: 0°, 45°, 90° e 135°.

O variograma selecionado foi obtido através de um processo designado de “cross validation” (ISAAK & SIRIVASTAVA, 1998) no qual se procura adequar o modelo a ser utilizado com algum dos modelos teóricos existentes. Após uma análise dos diferentes tipos de modelos, o que melhor se ajustou ao comportamento dos dados de precipitação analisados foi o modelo exponencial. Em seguida passou-se para a modelagem no ambiente ArcGIS®, obtendo uma grade de valores a partir dos dados amostrados. O método de interpolação por krigagem foi desenvolvido também no ArcGIS®. A grande diferença entre a krigagem e outros métodos de inferência é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. No caso da interpolação por média simples, os pesos são todos iguais a 1/N (N = número de amostras); na interpolação baseada no inverso do quadrado das distâncias, os pesos são definidos como o inverso do quadrado da distância que separa o valor interpolado dos valores observados. Na krigagem, o procedimento é semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, exceto que aqui os pesos são determinados a partir de análises espaciais, baseadas no semivariograma experimental. Além disso, a krigagem fornece, em média, estimativas não tendenciosas e com variância mínima (ISAAK & SIRIVASTAVA, 1999).

### 2.3 Resultados e discussão

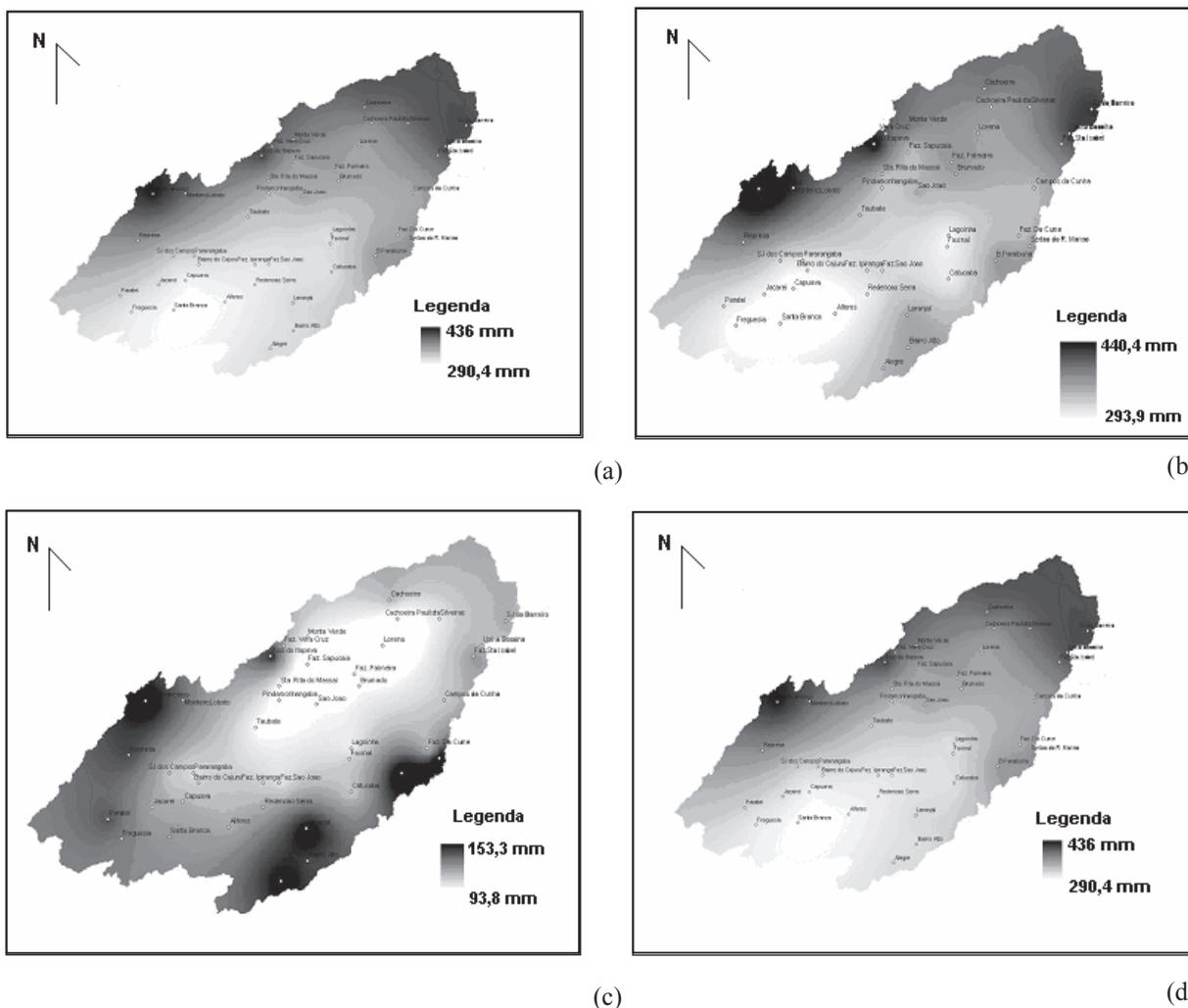
A regionalização espacial executada representa a espacialização das distribuições das precipitações médias para o período 1970 a 1999 para as quatro estações: DJF, MAM, JJA e SON. As imagens resultantes da espacialização dos dados de precipitação são representadas em níveis de cinza. Esse tipo de representação estabelece que o valor absoluto da variável representada esteja disposto em uma escala variando de 0 (preto) a 255 (branco). Os níveis mais claros representam as menores precipitações médias e os níveis mais escuros representam as maiores.

A representação por meio de krigagem permitiu observar que, além da variação intra-anual, ocorre uma significativa variação espacial da precipitação na área considerada. No período mais chuvoso (DJF), as maiores precipitações médias se concentram na região oeste da bacia correspondendo à região da Serra da Mantiqueira (Figura 2) com altitudes que chegam a alcançar 2400m. Uma outra região de concentração de chuvas se situa na porção nordeste da bacia correspondendo aos relevos de morros e serras da região da Serra da Bocaina com cerca de 1400m. A região de menor concentração de chuvas se situa a sul da bacia correspondendo as regiões de Santa Branca e Jacareí (altitudes em torno de 780 m) e, em menor dimensão, nas regiões Pindamonhangaba e Lorena (altitudes variando entre 580 e 540m), situadas na porção centro-norte e nordeste da bacia (Figura 2).

Durante o período do outono (MAM), o padrão é relativamente semelhante ao que se observa durante o verão principalmente no que se refere às áreas de maior concentração de precipitação as quais estão concentradas nas serras da Mantiqueira e da Bocaina. Quando comparado com o padrão espacial de verão, as áreas com menores precipitações médias tiveram um pequeno deslocamento para sul: da região de Lorena e Pindamonhangaba para a região de Lagoinha (Figura 3).

Durante o período menos chuvoso (JJA) ocorre uma mudança significativa dos padrões espaciais da precipitação em relação às demais estações. Ainda que ocorra uma faixa chuvosa na região da Mantiqueira (porção leste), as maiores concentrações de precipitação na bacia estão agora concentradas na porção oeste correspondendo a região da Serra do Mar (vertente Vale do Paraíba). A região com menores índices de precipitação média durante este período se deslocou de sul para norte e agora cobre uma área mais extensa envolvendo a região compreendida entre Taubaté e Cachoeira Paulista. (Figura 4).

Durante o período da primavera (SON), o padrão espacial das chuvas é muito semelhante ao padrão que ocorre durante o verão (DJF) e o outono (MAM). As maiores taxas de precipitação se concentram na região da Serra da Mantiqueira (oeste) e da região da Bocaina (leste). As menores concentrações voltam a ocupar a porção sul da bacia (região compreendida entre Santa Branca e Jacareí) conforme se pode observar na Figura 5.



**Figura 2 :** Mapas de espacialização das chuvas. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON

De uma maneira geral os resultados produzidos através de krigagem corroboram a espacialização das chuvas produzida através do método de Thiessen realizado por SILVA (1999) para grande parte da bacia do Rio Paraíba do Sul. Entretanto o processo de krigagem foi capaz de identificar áreas – de maior ou menor precipitação - que não foram detectadas a partir daquele método. Entre estas se pode destacar as áreas de menores precipitações nas regiões de Pindamonhangaba e Cachoeira Paulista situados no centro-oeste da bacia e que não tinham sido detectadas pelo método de Thiessen para o período DJF. O mesmo ocorreu com a área de Lagoinha no centro-leste da bacia para o período SON.

Os resultados também mostraram a variabilidade intra-anual dos padrões espaciais de precipitação. Estas diferenças estão relacionadas a passagens de frentes frias no inverno e a presença da Zona de Convergência Tropical durante o verão e durante as estações intermediárias. A topografia acidentada da região favorece o aumento das precipitações devido ao efeito orográfico das serras da Mantiqueira e do Mar principalmente durante a passagem das frentes frias no inverno. As técnicas de krigagem mostraram ser uma ferramenta com grandes recursos para análise espacial da precipitação principalmente em uma região de grande complexidade climática e geomorfológica como é o caso da Bacia do Rio Paraíba do Sul.

### 3 Caracterização de áreas de infiltração com base em elementos do meio físico e uso da terra

#### 3.1 Introdução

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia que possibilite definir áreas potenciais de infiltração com base em elementos do meio físico natural e modificado (rochas, relevos, solos e uso e cobertura da terra) e sua interação com a variação espacial da precipitação. O trabalho procurou ainda avaliar a capacidade de integração e interação de um sistema de informação geográfico no sentido de se obter um mapa de potencialidade à infiltração. A região de estudo corresponde a parte da bacia do rio Paraíba do Sul compreendendo uma área de cerca de 7.600km<sup>2</sup> (Figura 3).

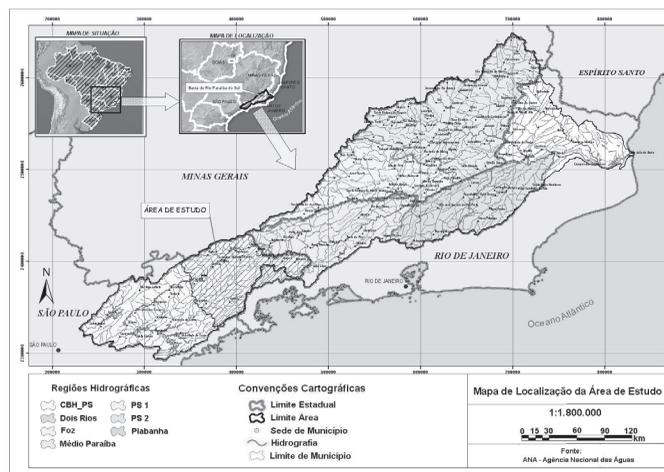


Figura 3 : Mapa de localização da área de estudo

#### 3.2 Metodologia

No caso de áreas de grandes dimensões (a partir de centenas de km<sup>2</sup>) a produção de um mapa de infiltração, a partir de ensaios quantitativos pontuais, torna-se inviável. Logo, deve-se buscar alternativas, com base em elementos do meio físico, que possam refletir, espacialmente, os processos de infiltração tornando-os procedimentos qualitativos ou semi-quantitativos. Uma proposta seria estabelecer mapas de infiltração com base na “classificação hidrológica de solos” (WARD e ELIOT, 1995, THOMPSON, 1999), onde se define uma capacidade mínima de infiltração (em mmh<sup>-1</sup>) em função da sua textura. Um exemplo deste tipo de mapa foi aquele construído por CIVITA; DE MAIO, (1997) com base nos tipos de solos utilizando as ferramentas de um sistema de informação geográfico. Outro caminho seria associar áreas de maior ou menor infiltração a partir do que foi designado por Brito et al. (2006) como “parâmetros hidrogeológicos”. Estes autores consideraram quatro parâmetros (geologia, solo, declividade e áreas de inundação) e definiram diferentes pesos para cada um deles.

Portanto, este trabalho busca desenvolver uma metodologia com base em diferentes mapas temáticos os quais são muitas vezes disponíveis em diversas regiões do país. Para a produção do mapa de infiltração se levou em conta a base cartográfica existente no levantamento realizado durante a execução do Plano de Qualidade de Água para a porção paulista da bacia do Paraíba do Sul (CEIVAP, 2000). Infelizmente, existe discrepância de escala entre os levantamentos básicos efetuados. Para a região de estudo a situação mais crítica são os levantamentos pedológicos e geomorfológicos. Em face disto, a escala de representação do mapa final de integração corresponde a mesma destes dois mapas (1:500.000). A figura 4 mostra parte da base cartográfica utilizada para este estudo

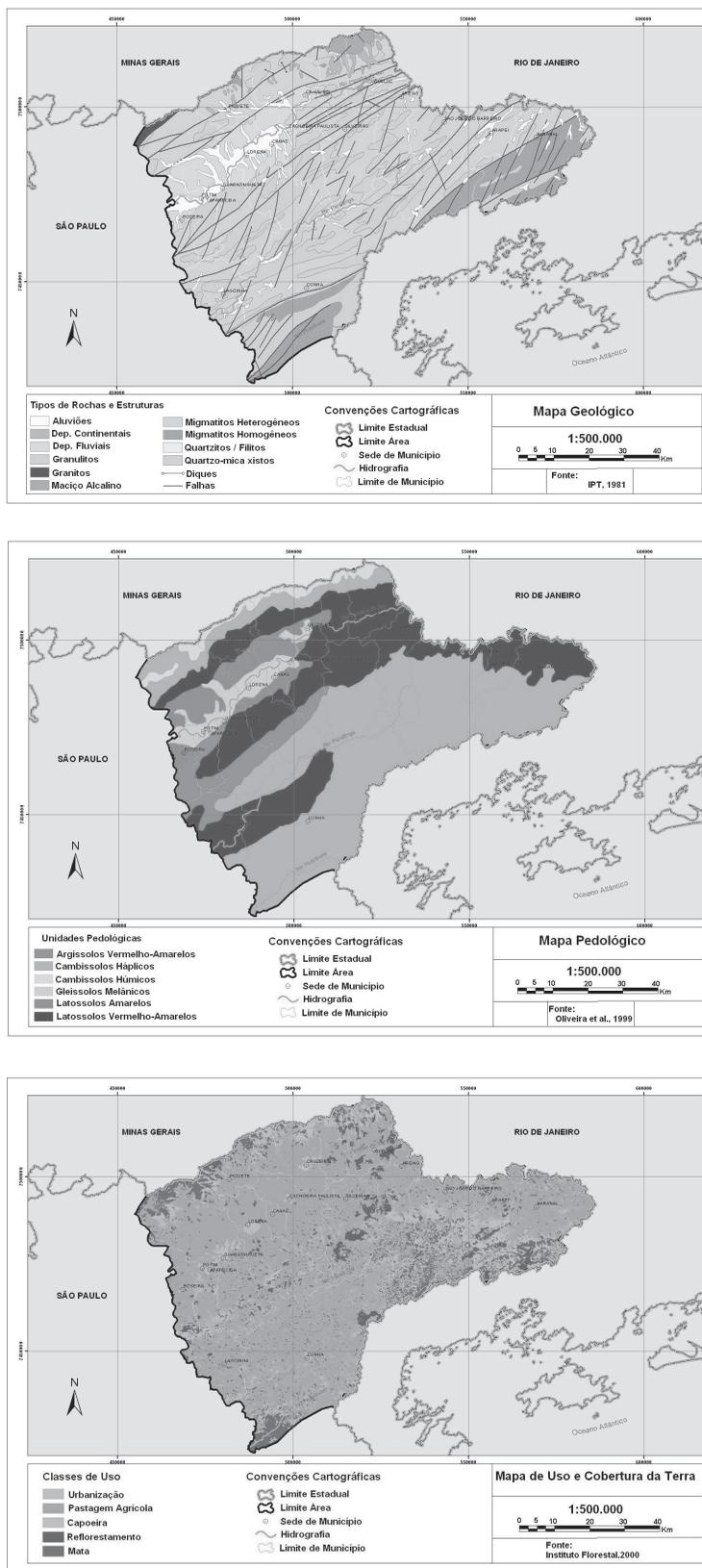


Figura 4 : Exemplos de mapas regionais utilizados para este estudo. De cima para baixo: mapa geológico, mapa pedológico e mapa de uso da terra

Para os diferentes atributos do meio físico (rocha, relevo, solo e de uso e cobertura do solo) e faixas de precipitação uma equipe de especialistas foi formada com o intuito de atribuir pesos as diferentes feições/unidades existentes em cada atributo. Desta maneira foram atribuídos pesos que variaram de um (1) a cinco (5) onde são analisados os comportamentos individuais de cada elemento aos processos de infiltração. Os pesos simbolizam a importância de cada tema (classes) para o sistema de análise conforme a sugestão da equipe de especialista e a partir de informações bibliográficas. Estes números identificam o tipo de classe de um determinado mapa temático que ocorre em uma determinada unidade de terreno no interior da área de estudo. Quanto mais importante for uma classe em relação a determinado requisito, maior será seu peso para o referido requisito indicando, portanto, condições mais favoráveis à infiltração (Tabela 1).

**Tabela 1:** Relação de qualificadores e seus respectivos pesos relativos

Qualificadores	Pesos Relativos
Muito Baixa	1
Baixa	2
Regular	3
Boa	4
Muito Boa	5

Para executar a interação dos elementos do meio físico com seus respectivos pesos foram utilizadas as ferramentas de integração de dados do programa ArcGIS®. O procedimento para a geração do mapa de infiltração constou da aplicação de pesos segundo a característica específica de cada tema. O mapa final contém todos os cruzamentos espaciais realizados. No arquivo digital deste mapa foi calculada a média dos valores obtidos em todos os polígonos gerados somando-se, para cada polígono, os pesos de infiltração dos temas e dividido pelo número total de temas cruzados. Em seguida, foram definidos os intervalos entre os valores mínimos e os valores máximos encontrados na área de estudo. Desta forma foi possível definir áreas homólogas em função da capacidade de infiltração tornando possível a espacialização e visualização de um mapa temático final.

O procedimento metodológico utilizado fundamenta-se no pressuposto de que é possível a identificação e a avaliação da capacidade de infiltração em bacias hidrográficas a partir da integração entre os elementos da paisagem com base no conceito de *Áreas Homólogas*. O método utilizado para definição destas áreas fundamenta-se na criação de *patches*, agrupando algumas propriedades do terreno, as quais são capazes de armazenar água e manter a dinâmica hidrológica da bacia. Os elementos da paisagem utilizados na classificação destas áreas são: rochas, estruturas, relevo, solo, precipitação e uso da terra.

Inicialmente, procedeu-se ao levantamento e estruturação da base cartográfica (cartas topográficas e mapas temáticos) que subsidiaram a elaboração e a composição do banco de dados georreferenciados da área de estudo. O levantamento do material analógico teve como finalidade avaliar e definir a escala de análise, em função das variações escalares encontradas nos diferentes produtos cartográficos adquiridos e orientar na indicação da escala do mapa de infiltração. A maior parte dos mapas temáticos foram obtidos a partir do projeto CEIVAP (2000), em formato AutoCad, e posteriormente foram compatibilizados e ajustados em ambiente ArcGIS®.

Para se estabelecer as *Áreas Homólogas*, para cada tipo de elemento da paisagem se aplicou um fator de escala compreendido entre 1 a 5 que por sua vez corresponde a maior (5) e a menor (1) influencia deste elementos na capacidade de infiltração. A sobreposição dos mapas com os elementos da paisagem sendo estes devidamente ponderados resultou em classes de capacidade de infiltração que varia de muito baixa a muito alta (tabela 1).

### 3.3 Resultados

Na área de estudo destacam-se duas grandes unidades geológicas: o embasamento cristalino representado pelos granitos, migmatitos homogêneos, quartzitos, filitos, quartzo-mica-xistos (metasedimentos), migmatitos heterogêneos e a Bacia de Taubaté representado por um conjunto diverso de rochas sedimentares. As rochas sedimentares constituídas pelos depósitos fluviais com predominância de arenito foi a unidade geológica com melhores condições de infiltração (peso 5). Em seguida vêm as rochas graníticas, com seu manto de alteração composto de sedimentos areno siltsosos (saibros) e com elevado grau de fraturamento (peso 4). Os migmatitos homogêneos com seu manto arenoargiloso tiveram peso 3 e os migmatitos heterogêneos com seu paleossoma xistoso e manto de alteração argiloso tiveram peso 2. As rochas com

piores condições de infiltração foram os aluviões, constituídos de sedimentos inconsolidados e nível freático próximo a superfície.

Na área de estudos são encontrados relevos de serras, morros e morrotes alongados e arredondados, colinas sedimentares, terraços e planícies aluviais. Em face de suas características morfológicas, as unidades geomorfológicas foram reagrupadas em cinco classes de infiltração. Os relevos colinosos receberam o maior peso para infiltração (5) enquanto os relevos de morros e morrotes vieram logo em seguida (peso 4). Os relevos de serra alongadas e escarpas receberam pesos 3 e 2 respectivamente. As planícies inundacionais receberam peso 1, tendo as piores condições de infiltração.

Em linhas gerais, os solos da região podem ser divididos em três domínios: solos oriundos de rochas precambriana, solos oriundos de rochas sedimentares terciária e os solos existentes nas áreas de várzea do rio Paraíba. Na região precambriana predominam os cambissolos e argissolos, nas regiões sedimentares terciárias os latossolos e nas várzeas ocorrem os gleissolos melânicos. Os latossolos vermelho-amarelo e amarelo correspondem aos solos com melhores condição de infiltração (peso 5). Os cambissolos háplicos, em face de sua textura grosseira receberam peso 4. Os cambissolos húmicos com elevado teor em matéria orgânica e os argissolos, enriquecidos em argila tiveram, respectivamente, pesos 3 e 2. Os gleissolos melânicos ricos em matéria orgânica e com nível freático próximo a superfície tem as piores condições de infiltração (peso 1).

A análise dos dados pluviométricos tomou como base as isoietas regionais e teve como princípio a idéia de que as maiores alturas médias de precipitação possuem maiores possibilidades de infiltração. A espacialização das isoietas mostra que elas acompanham o relevo indicando que o efeito orográfico é determinante para a gênese das chuvas na região. As regiões com maiores ponderações estão associadas com as serras da Mantiqueira e do Mar, com precipitação média anual entre 2500 a 2000 milímetros (peso 5); as de menor ponderação situam-se nas proximidades das cidades de Paraíba e Santa Branca com precipitações entre 1200 e 1400 mm (peso 1). As regiões de relevos intermediários tiveram precipitações entre 1400 e 1900 mm com pesos variando entre 2 e 4.

Na avaliação do uso da terra foram consideradas as principais classes de uso e cobertura vegetal natural das terras: Urbanização, Pastagem, Capoeiras/Campos, Reflorestamento, Mata. A classe de infiltração a qual apresenta áreas mais favoráveis são, obviamente, formadas pela vegetação natural (peso 5) vindo em seguida os plantios homogêneos de espécies exóticas (peso 4). As florestas em estágio de recuperação receberam peso 3 e as atividades agrícolas extensivas e mal manejadas receberam peso 2. As áreas urbanizadas de diferentes portes, conurbadas e impermeabilizadas tem a pior condição para infiltração (peso 1).

O Mapa de Capacidade de Infiltração resultante mostrou que as áreas com alta capacidade de infiltração estão situadas em uma estreita faixa de direção NE-SW entre os contrafortes da Serra da Mantiqueira e a planície aluvionar do rio Paraíba do Sul e na porção leste da bacia próximo a divisa com o Rio de Janeiro (figura 5).

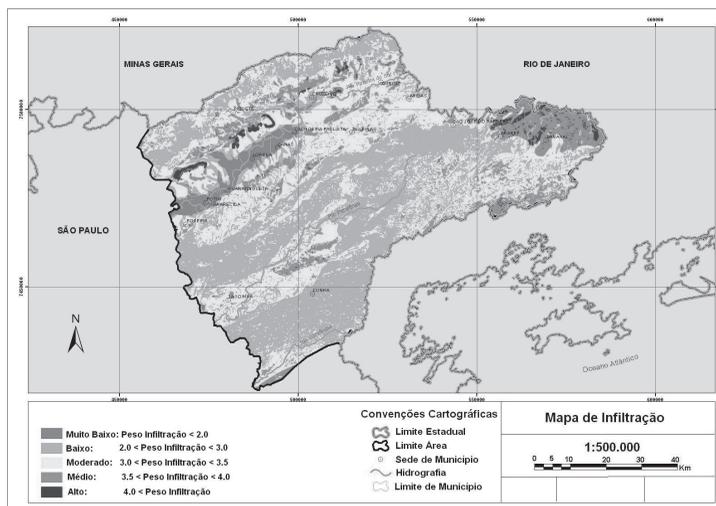


Figura 5 : Mapa de Capacidade de Infiltração (Soares et al., no prelo)

Os resultados apontam que os elementos do meio físico naturais e modificados interferem fortemente no processo de infiltração e, na maioria dos casos, necessitam ser avaliados integradamente e não de maneira isolada. Espera-se que os resultados obtidos neste trabalho possam contribuir como uma ferramenta de gestão e de planejamento territorial visando à preservação dos recursos hídricos na bacia do rio Paraíba do Sul assim como, orientar na implementação de medidas estruturais (como obras de engenharia de drenagem) e medidas não estruturais (como o melhor planejamento do uso da terra no interior da bacia).

## 5 Conclusão

O Laboratório de Análise Geoespacial (LAGE) tem se constituído em um núcleo de formação de alunos, particularmente de graduação, e no desenvolvimento de pesquisas em bacias hidrográficas abrangendo um leque variado de temas. A busca da interdisciplinaridade tem sido uma constante na maioria dos projetos desenvolvidos procurando integrar disciplinas das geociências (hidrologia, climatologia, geologia, pedologia e geomorfologia) e da engenharia (geotecnia) com as mudanças provocadas pela atividade humana na paisagem.

Os exemplos descritos neste trabalho mostram resultados desta integração. O primeiro exemplo mostra a integração entre hidrologia e clima utilizando ferramentas de geoestatística contidas em um SIG para representar a variabilidade espacial da precipitação nas quatro estações do ano. O segundo exemplo, mostra a integração entre elementos do meio físico natural e modificado buscando desenvolver um método que possibilite estabelecer um mapa regional de infiltração utilizando as ferramentas de análise espacial de um SIG.

No processo atual de consolidação do LAGE espera-se trabalhar na integração entre sensoriamento remoto e SIG assim como explorar o potencial de ferramentas contidas no ArcGIS®, como o ArcHydro®, o qual possibilita a caracterização do escoamento superficial com base em elementos cartográficos e também a integração de séries temporais de dados hidroclimatológicos com dados geoespaciais em bacias hidrográficas.

### Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo / FAPESP pelos recursos obtidos através do Programa de Políticas Públicas (Processo 2000/13714-1) e ao CNPq pelos recursos obtidos através do Edital Universal 2006 (processo 484267/-7) e Edital Universal 2000 (00/11099-8). Finalmente, nossos agradecimentos a empresa Votorantim Celulose e Papel pela parceria e significativo apoio financeiro ao nosso laboratório.

## Referências

- BAILEY, T. C., A review of statistical spatial analysis in geographical information systems. In: FOTHERINGHAM, S.; ROGERSON P. (Ed.). *Spatial Analysis and GIS*. London: Taylor & Francis, 1995. p. 13-44.
- BRITO, M. G. et al. Characterization of maximum infiltration using GIS tools. *Engineering Geology*, Amsterdam, v. 85, p. 14-18, 2006.
- CAMARINHA, P.; SIMOES, S. J. C.; BERNARDES, G. P. Variabilidade espacial de propriedades físicas dos solos em áreas de relevos acidentados: o médio Vale do Paraíba do Sul, Sudeste do Brasil. Trabalho apresentado no *4º Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia*, Coimbra, 2008.
- CEIVAP. *Projeto qualidade das águas e controle da poluição hídrica na Bacia do Rio Paraíba do Sul*: relatório final. São Paulo, 2000. 256 p. CD-ROM.
- CIVITA, M. V.; MAYO, M. Mapping groundwater vulnerability in areas impacted by flash food disasters. *XIII ESRI Users Conference*. Disponível em: <[http://www.wca-infonet.org/servlet/BinaryDownloaderServlet?filename=1066722282491\\_wdse12.pdf](http://www.wca-infonet.org/servlet/BinaryDownloaderServlet?filename=1066722282491_wdse12.pdf)>. Acesso em: 20 jan. 2008.
- FELGUEIRAS, C. A. *Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em sistemas de informação geográfica: o paradigma geoestatístico por indicação*. 1999. 212 f. Tese (Doutorado em Computação)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.
- ISAACS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford University Press, 1989. 560 p.
- PAES, N. S.; SIMÕES, S. J.C. Evolução espacial de áreas irrigadas com base em sensoriamento remoto: a bacia do rio Paraíba do Sul (porção paulista). *Revista Ambiente & Água*, Taubaté, v. 1, n. 1, p. 72-83, 2006.

SIMÕES, S. J. C. et al. Variabilidade espacial da precipitação do potencial de erosão e seus efeitos na sedimentação de um pequeno reservatório. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 177-187, 2007.

SOARES, P. V. et al. Evaluation of spatial infiltration and its role on the water resources management. *Hydrogeology Journal* Em preparação para o *Hydrogeology Journal*, Reston. No prelo.

SOARES, P. V. et al. Mapa de infiltração do Alto e Médio Vale do Paraíba do Sul com base em elementos do meio físico e da precipitação. *Revista Ambiente & Agua*, Taubaté, v. 3, n. 1, p. 26-42, 2008.

SILVA, J. U. L. *A dinâmica atmosférica e a distribuição das chuvas na região "lesnordeste" paulista*. 1999. 206 f. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1999.

SILVA, W. M.; SIMÕES, S. J.C. Spatial precipitation analysis using kriging in a GIS environment: the Paraíba basin, Southeast of Brazil. *Journal of Spatial Hydrology*, Miami. No prelo.

SIMÕES, S. J. C.; BARROS, A. P. Regional hydroclimatologic variability and Brazil's 2001 energy crisis. *Management Environmental Quality*, Bradford, UK, v. 18, n. 3, p. 263-273, 2007.

SIMÕES, S. J. C. et al. Variabilidade espacial do potencial de erosão e seus efeitos no reservatório de sedimentos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 12, p. 177-187, 2007.

THOMPSON, S. *Hydrology for water management*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1999.

WARD, A. D.; ELLIOT, W. J. *Environmental hydrology*. Boca Raton: Lewis, 1995.

## SOBRE OS AUTORES

### **Silvio Jorge C. Simões**

Professor Livre Docente do Departamento de Engenharia Civil e coordenador do Laboratório de Análise GeoEspacial (LAGE), Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá. Pós-doutorado em hidrologia (Harvard University), doutorado em geografia (USP) e mestrado em geociências (Unicamp). As áreas de atuação incluem hidrologia, geologia ambiental e análise e modelagem geoespacial.

### **George de Paula Bernardes**

Professor Assistente Doutor do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá. Graduação e mestrado em Engenharia Civil (PUC-Rio), doutorado em Geotecnia pela Norwegian University of Science and Technology (Noruega). Bolsista de produtividade em Pesquisa do CNPq – Nível 2. As áreas de atuação incluem, investigação e monitoramento geo-ambiental e hidrologia.