Análise multicriterial aplicada à priorização para recuperação de Áreas de Preservação Permanente: uma implantação em Sistemas de Informações Geográficas

Samuel Fernando Adami
samuel.adami@unila.edu.br

Carlos Eduardo da Silva Francisco
carlos.f.ambiental@gmail.com

Ricardo Marques Coelho
rmcoelho@iac.sp.gov.br

Roseli Buzanelli Torres
rbtorres@iac.sp.gov.br

Resumo

São apresentados os resultados da aplicação de métodos de análise multicriteriais em ambiente de sistemas de informações geográficas para priorização de áreas de preservação permanente visando à recuperação da vegetação. Os dois métodos aplicados classificam as áreas de maneira semelhante, mas a programação por compromisso tende a acentuar as áreas de risco muito alto, enquanto a teoria dos jogos cooperativos apresenta maiores áreas nas classes de risco baixo e muito baixo. Ambos os métodos estabelecem maiores prioridades para áreas com maiores declividades, solos mais rasos e mais suscetíveis aos processos erosivos. Nos terrenos caracterizados por solos profundos recobrindo colinas e menor risco à erosão, o método da programação por compromisso tende a atribuir maior prioridade em relação aos resultados da teoria dos jogos cooperativos.

* * *

PALAVRAS-CHAVE: bacia do ribeirão das Anhumas; tomada de decisão; recursos hídricos; programação por compromisso; teoria dos jogos cooperativos.

Introdução

A manutenção e a recuperação das Áreas de Preservação Permanente (APP) são, atualmente, amplamente reconhecidas como necessárias para o desenvolvimento sustentável e a melhoria da qualidade dos recursos hídricos. Entretanto, devido a uma série de fatores econômicos e técnicos um plano de manejo e recuperação destas áreas deve passar necessariamente pela priorização de quais setores devem ser enfocados primeira ou mesmo emergencialmente. Os tomadores de decisão devem considerar que, para o planejamento territorial ter aceitação social, eles devem agir como mediadores, tentando evitar a oposição e diminuir a objeção coletiva, e que os projetos deveriam buscar manter o equilíbrio ecológico com desenvolvimento econômico (JOERIN et al., 2001, p. 154).

Conforme Malczewski (2006, p. 703), a análise multicriterial de suporte à decisão em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) pode ser considerada como um processo que transforma e combina dados geográficos e valores de julgamento (preferências dos atores sociais) para obter informação para a tomada de decisão. Em face à grande diversidade de áreas do conhecimento relacionadas ao meio ambiente e do papel desempenhado pelos vários atores sociais na tomada de decisões, a busca de metodologias que consigam integrar dados e informações aparentemente diversos em uma base comum torna-se importante para a efetiva gestão ambiental. Desse modo, compõe os objetivos deste trabalho a implantação de dois modelos multicriteriais de suporte à decisão em SIG visando à seleção de APPs prioritárias para a recuperação ambiental e a comparação dos resultados obtidos pelas duas abordagens.

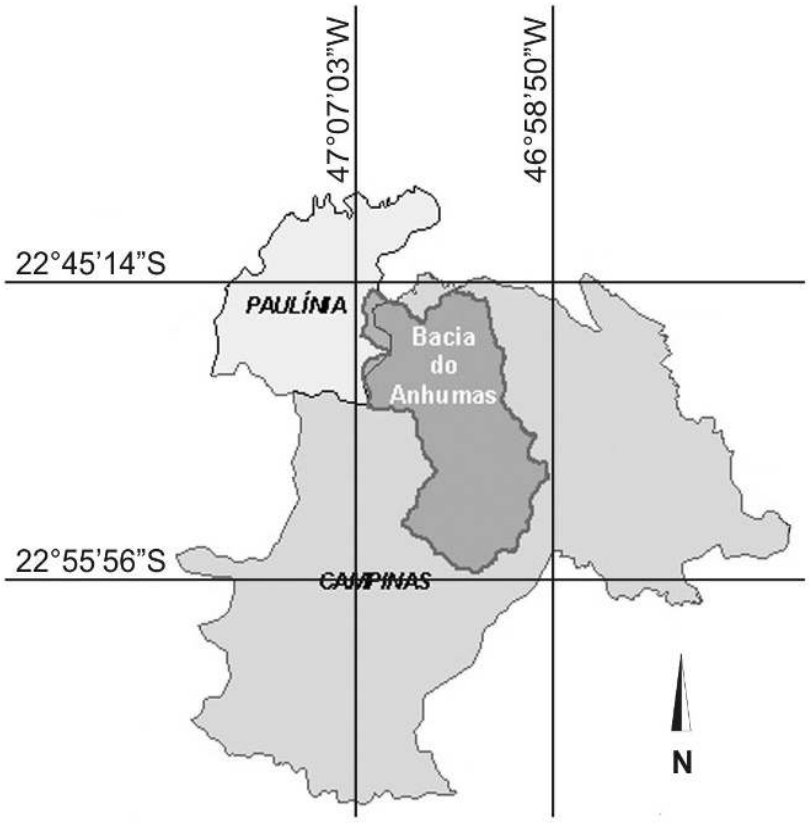
Material e Métodos

Área de estudo

A bacia hidrográfica do ribeirão das Anhumas, afluente da margem esquerda do rio Atibaia, drena áreas dos municípios paulistas de Campinas e Paulínia e localiza entre as coordenadas geográficas 22°45'14" e 22°55'56" de latitude sul e 46°58'50" e 47°07'03" de longitude oeste (Figura 1). Em linhas gerais, a bacia está localizada na transição entre o Planalto Atlântico e a Depressão Periférica paulista, desse modo, estende-se por terrenos de rochas cristalinas na sua porção sudeste e sedimentares associadas com magmáticas alcalinas no restante de sua área. Grande parte do sítio urbano da cidade de Campinas está dentro dos divisores desta bacia hidrográfica, além de importantes áreas industriais e de comércio deste município paulista. A vegetação nativa remanescente corresponde a apenas 2,55% da área da

bacia, distribuída na forma de pequenos fragmentos isolados na paisagem. Vários remanescentes estão em bosques urbanos e as APPs estão quase totalmente desmatadas (FRANCISCO, 2006; www.iac.sp.gov.br/projetoanhumas).

Figura 1. Localização da área de estudo



Fonte: Elaboração própria

Métodos

O desenvolvimento da metodologia aplicada neste trabalho foi exposto por Francisco (2006) e Francisco et al. (2007) para a sub-bacia do córrego São Quirino, afluente da margem direita do ribeirão das Anhumas. O presente estudo aplica os mesmos procedimentos para a totalidade da bacia que foi foco de projeto de pesquisa em políticas públicas. Alguns Planos de Informação (PI) são diferentes entre a base empregada no desenvolvimento da metodologia para bacia do São Quirino e aquela utilizada na pesquisa agora apresentada.

Os métodos multicriteriais de auxílio à decisão são, em comparação com a tradicional análise custo-benefício, caracterizados principalmente pela possibilidade de inclusão de outros objetivos que não apenas a maximização dos benefícios

econômicos ou redução dos custos, conforme Zuffo et al. (2002, p. 82). Foram empregados dois métodos de análise multicriterial. O primeiro método aplicado é conhecido como Programação por Compromisso (PC) e procura minimizar a distância entre todos os pontos de ocorrência possível e um "ponto ideal" considerado pelo tomador de decisão em um espaço de decisão com *n* dimensões. Esse ponto representaria a confluência de todos os objetivos (ZUFFO et al., 2002, p.84). A sua formulação matemática é:

$$l_s(x) = \left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i^S \left| \frac{f_i^{i} - f_i(x)}{f_i^{i} - f_{i,w}} \right|^S \right)^{1/S} \qquad (1)$$

Onde:

$l_s\ (x)$ – distância ao ponto-meta;

α_i – peso atribuído a cada critério i;

$fi_{i,w}$ – pior valor obtido para o critério i;

fi_i^* – melhor valor obtido para o critério i;

$fi_i\ (x)$ – resultado da implementação da decisão "x" considerando o critério i;

S – é uma proporcionalidade aplicada aos desvios, sendo $1 \leq S \leq \infty$. Neste trabalho foi escolhido $S = 1$, para manter todos os desvios de fi_i^* proporcionais às suas magnitudes.

Para comparação dos resultados empregou-se o método da Teoria dos Jogos Cooperativos (*Cooperative Game Theory* – CGT). Nesta abordagem a melhor solução é aquela que maximiza a distância de algum ponto de nível mínimo, segundo Zuffo et al. (2002, p.85). Ainda de acordo com estes autores, a teoria dos jogos é um estudo matemático para a resolução de conflitos. Este método ressalta a cooperação entre os vários atores com diversos objetivos para chegar a uma decisão aceitável. Matematicamente:

$$l_s(x) = \prod_{i=1}^{n} |f_i(x) - f_i^{i}|^{\alpha_i} \qquad (2)$$

Onde:

$l_s\ (x)$ – distância entre a solução obtida com o cenário "x" e a solução ideal;

fi_i^* – menor valor obtido para o critério i;

α_i – peso atribuído a cada critério i;

$fi_i\ (x)$ – resultado da implementação da decisão "x" considerando o critério i;

Esses métodos multicriteriais de auxílio à tomada de decisão foram implementados em SIG, e foram utilizados dois programas devido à migração da base de dados do projeto Anhumas do ILWIS 3.3 para o ArcGIS 9.0.

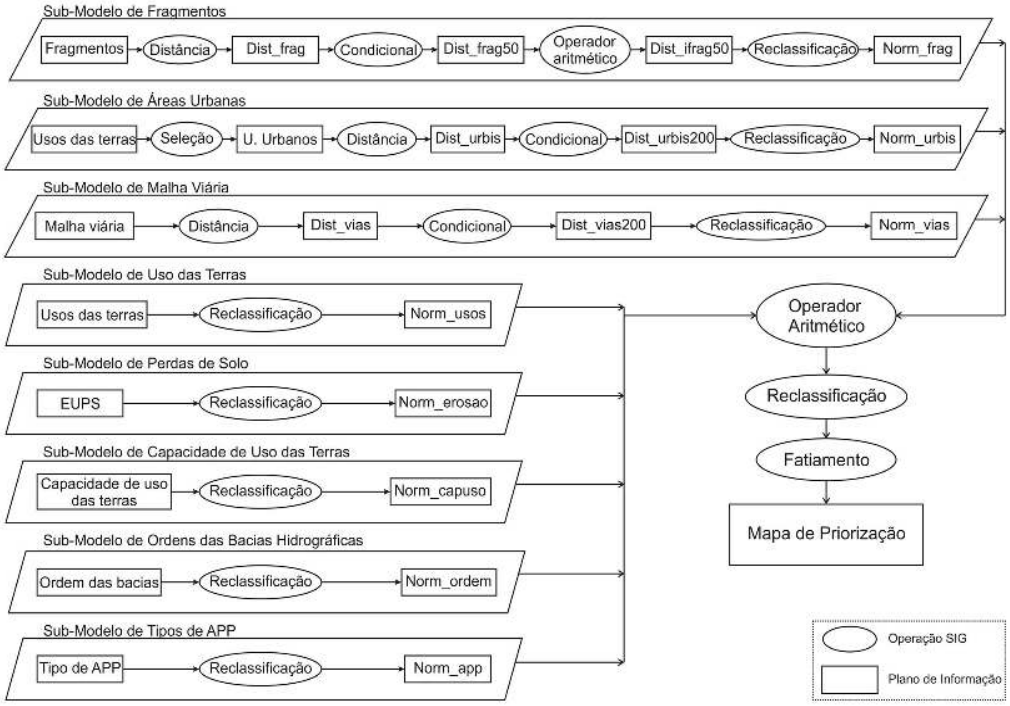
Malczewski (2006, p. 705) descreve um crescimento no número de artigos científicos tratando da integração entre SIG e análises multicriteriais e estabelece três fatores responsáveis por esta característica. Em primeiro lugar, figura o reconhecimento da importância do suporte a decisão, seguido pela disponibilidade de programas e a integração de módulos multicriteriais em pacotes SIG comerciais como, por exemplo, o Idrisi.

Existem vários exemplos de estudos que se utilizaram de métodos multicriteriais e SIG, com vários níveis de integração entre estes, dentre estes o de Valente (2005) apresenta objetivos semelhantes aos do presente trabalho, mas, para a definição das prioridades para a conservação de áreas florestais o autor empregou o "processo analítico hierárquico" (AHP).

Procedimentos

O tratamento dos dados seguiu a mesma sequência na aplicação dos dois métodos, as diferenças residem na normalização dos fatores e na aplicação final dos operadores aritméticos. Na figura 2 estão representados os procedimentos empregados para a aplicação dos métodos multicriteriais programação por compromisso e teoria dos jogos cooperativos em SIG.

Figura 2. Fluxograma dos procedimentos para o estabelecimento de prioridades para a recuperação de APPs na bacia do ribeirão das Anhumas



Fonte: Elaboração própria

Os planos de informação que serviram de base para o projeto foram: perdas de solos, capacidade de usos das terras, ordem das bacias, tipo de APP, usos e coberturas das terras, fragmentos de vegetação nativa e malha viária.

A distância dos fragmentos é um fator importante para a recuperação da vegetação devido ao efeito da chuva de sementes, entretanto, o limite de 50 metros das bordas do fragmento é considerado como máximo de atuação deste fenômeno (FRANCISCO, 2006). A partir dos limites dos fragmentos foi gerada uma superfície de distância. Esta distância foi limitada a 50 metros e esse valor foi invertido, pois quanto mais perto do fragmento, maior a probabilidade de ocorrer chuva de sementes. Essa camada de dados foi reclassificada por meio do aumento linear de contraste, gerando o valor normalizado para este fator.

Os usos das terras foram empregados duas vezes no processamento. Na primeira, para se determinar a distância das áreas urbanas; neste tratamento, foram selecionadas as áreas de usos urbanos, calculada a distância destes e o limite de 200 metros foi arbitrariamente selecionado como máximo para a influência deste uso. Essa camada foi reclassificada por aumento linear de contraste, gerando a camada normalizada de distância de usos urbanos. O mapa de classes usos e ocupações das terras também foi reclassificado em valores normalizados de importância para a recuperação; esta foi a outra utilização desta camada.

Outra variável de interesse na priorização é a distância das vias de circulação. Seu processamento foi semelhante ao empregado para a distância das áreas urbanas. A partir malha viária, foi calculada uma superfície de distâncias e aplicou-se o limite arbitrário de 200 metros. No aumento linear de contraste, obtiveram-se os valores normalizados para esta variável.

As camadas de dados de capacidade de usos das terras, ordem das bacias, perdas de solo e tipo de APP foram reclassificados em valores normalizados conforme sua importância para as prioridades de recuperação.

Esses processamentos foram desenvolvidos no SIG ILWIS (WESTEN & FARIFTEH, 1997). Na linha de comando deste programa foram digitadas as fórmulas relacionadas aos dois métodos multicriteriais. Para as camadas de dados normalizadas, foram aplicados os pesos oriundos dos questionários respondidos pelos especialistas e outros atores sociais. Estes pesos normalizados estão discriminados na Tabela 1. Os especialistas são de várias áreas do conhecimento, envolvendo geografia, pedologia, botânica, engenheiros civis e agrônomos. Nestes

questionários, cada profissional fornecia uma nota para cada fator estabelecido como interessante para o estabelecimento da priorização.

Tabela 1. Critérios empregados e respectivos pesos

Critérios	Peso
1. Proximidade de remanescentes de vegetação nativa	0,168
2. Proximidade de núcleos urbanos	0,087
3. Usos das terras	0,150
4. Perdas de solos	0,154
5. Proximidade de malha viária	0,084
6. Capacidade de uso das terras	0,146
7. Ordem das bacias hidrográficas	0,078
8. Categoria de APP	0,132

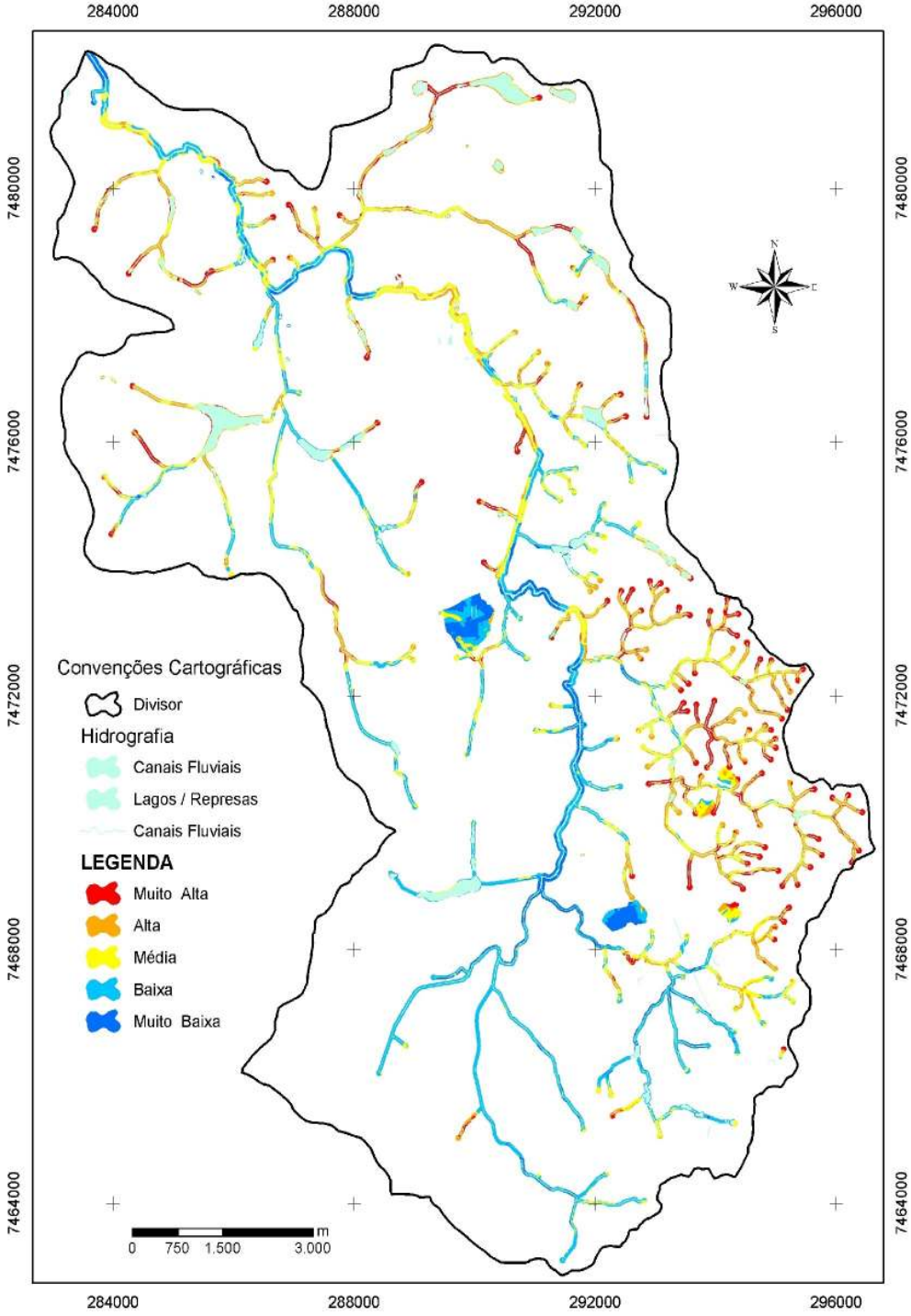
Fonte: Adaptado de Francisco (2006)

Os resultados da aplicação dos dois métodos foram normalizados por meio do aumento linear de contraste, e essas camadas de dados foram classificadas em uma escala ordinal de prioridades para a recuperação.

Resultados e Discussões

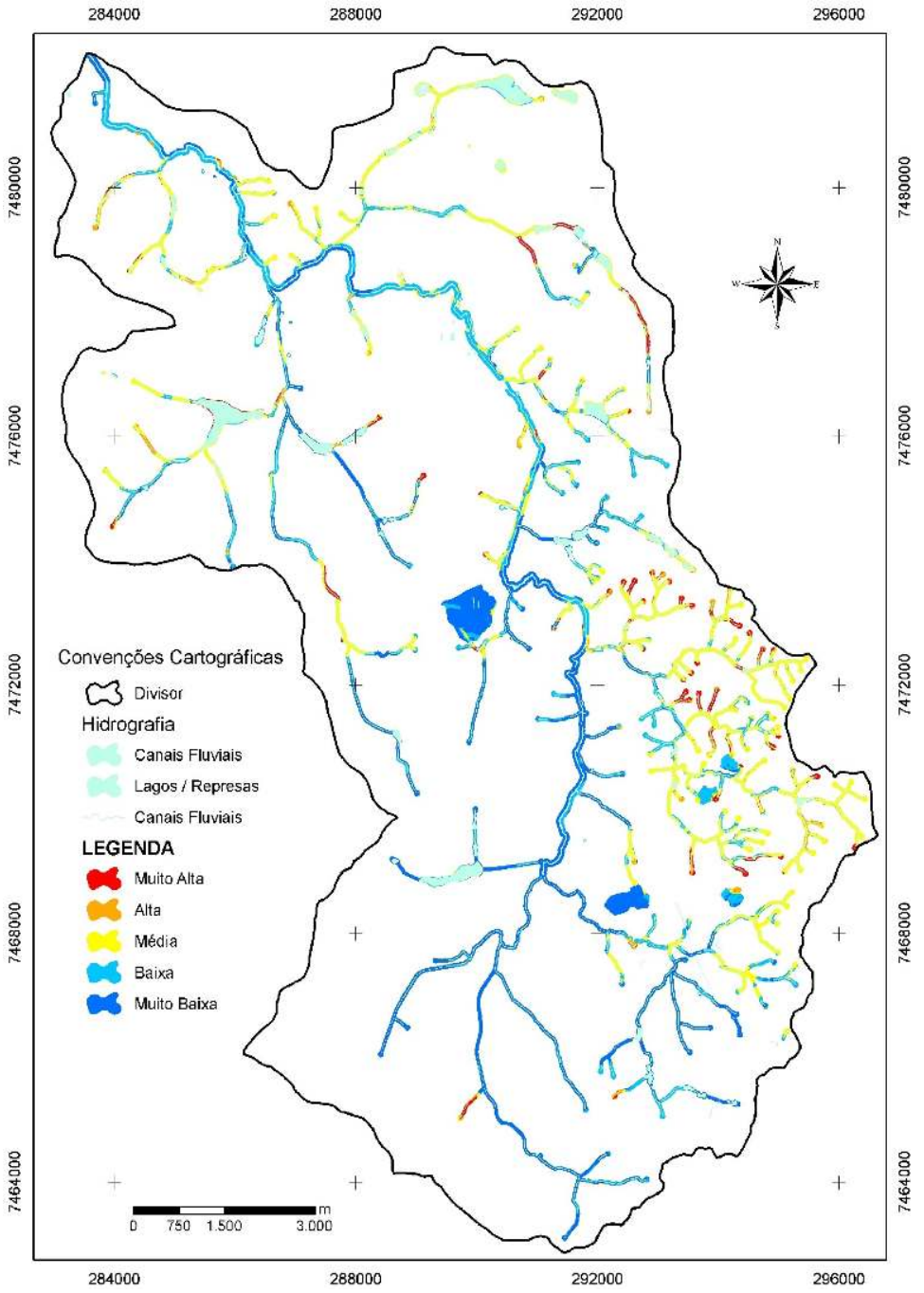
Nas figuras 3 e 4, são apresentados os mapas resultantes da aplicação do método PC e CGT, respectivamente.

Figura 3. Resultado do método programação por compromisso para a recuperação de APPs da bacia do ribeirão das Anhumas (Campinas, SP)



Fonte: Elaboração própria

Figura 4. Resultado do método teoria dos jogos cooperativos para a recuperação de APPs da bacia do ribeirão das Anhumas (Campinas, SP)



Fonte: Elaboração própria

As áreas consideradas prioritárias para a recuperação ambiental são semelhantes nos dois. A principal diferença está na classificação e suas prioridades. O setor sudeste da bacia, caracterizado por usos rurais, elevados valores de

declividades, solos mais rasos e maior risco de erosão, está associado aos terrenos cristalinos do planalto atlântico. Tanto o método PC quanto o CGT impõem nesta área a classe de muito alta prioridade para a recuperação, com o primeiro estabelecendo maior área nessa categoria em relação ao segundo.

Toda a área urbana, nos setores centro e sul da bacia, apresenta baixa ou muito baixa prioridade nos dois métodos, em decorrência dos pesos atribuídos aos usos urbanos em relação à conservação e à regeneração da vegetação nativa. Entretanto, nos dois mapas, a drenagem que nasce no interior do Bosque dos Jequitibás, encravado numa área de densa ocupação urbana, apresenta prioridade alta e muito alta, provavelmente por sua característica de ser uma cabeceira.

Nos setores norte e nordeste da bacia, nos quais predominam usos rurais, solos profundos em vertentes longas e baixo risco de erosão, em terrenos sedimentares da depressão periférica paulista, ocorre maior variedade de níveis de prioridades, mas o método PC tende sempre a estabelecer prioridades maiores para as APPs.

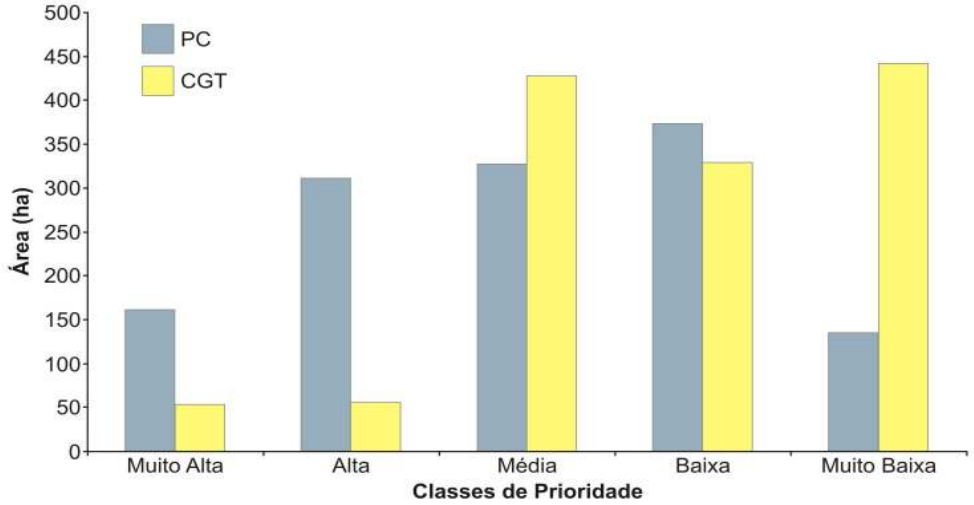
Esta tendência ao estabelecimento de classes de maior prioridade para as mesmas áreas pelo método PC em relação ao CGT é evidenciada pela Tabela 2 e pela Figura 5. A abordagem de programação por compromisso estabelece uma distribuição mais próxima da normalidade com maior proporção de valores das classes centrais em relação aos extremos, enquanto a teoria dos jogos cooperativos tendeu a concentrar os valores nas classes de baixa e muito baixa prioridade para recuperação.

Tabela 2. Áreas das classes de priorização segundo o modelo empregado

Classes	PC		CGT	
	área (ha)	%	área (ha)	%
Muito Alta	161	12,34	53	4,08
Alta	310	23,76	55	4,25
Média	327	25,01	428	32,73
Baixa	373	28,55	329	25,15
Muito Baixa	135	10,33	441	33,79
TOTAL	1.307	100,00	1.307	100,00

Fonte: Elaboração própria

Figura 5. Distribuição de áreas das classes de prioridade entre os métodos PC e CGT, para a recuperação de APPs da bacia do ribeirão das Anhumas



Fonte: Elaboração própria

Esses resultados são compatíveis com aqueles encontrados por Francisco (2006) e Francisco et al. (2007). Os resultados do método PC seriam adequados para cenários de recuperação emergencial e com razoável disponibilidade de recursos, enquanto o quadro estabelecido pela aplicação do método CGT poderia ser empregado num quadro administrativo com recursos escassos ou de lenta liberação visando a uma recuperação efetuada de forma gradual e contínua.

Considerações Finais

A integração de sistemas de informações geográficas e métodos multicriteriais para suporte a tomada de decisões se mostrou eficiente e efetiva neste estudo. Uma das vantagens desta abordagem é a possibilidade de utilização de várias fontes de dados, desde atributos do meio físico e biótico até variáveis sócio-econômicas, e esta diversidade ser tratada em uma base comum.

Neste trabalho, os questionários foram enviados e respondidos por profissionais técnicos. Entretanto, em um processo real de tomada de decisão, estes seriam apenas alguns dos atores sociais envolvidos, ao lado de representantes de entidades civis, eventuais proprietários das áreas sendo analisadas e dos tomadores de decisão governamentais.

Outros fatores espaciais não foram considerados no estudo, mas, como o enfoque foi direcionado ao sistema bacia hidrográfica, poderiam ser relevantes, tais

como as bacias à montante têm a mesma prioridade que áreas mais próximas à foz do rio principal. Além de fatores temporais, como, por exemplo, áreas que atualmente estão em processo de regeneração natural e que anos atrás foram ocupadas por culturas anuais devem ter a mesma prioridade que áreas em regeneração atual que eram ocupadas por populações de baixa renda? Esses são apenas alguns elementos que demandam maiores estudos e reflexões para serem integrados nos métodos de análise multicriterial em ambiente SIG.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi desenvolvida como parte do projeto de pesquisa em políticas públicas "Recuperação ambiental, participação e poder público: uma experiência em Campinas", financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (processo 01/02952-1). Maiores detalhes: http://www.iac.sp.gov.br/projetoanhumas.

Bibliografia

FRANCISCO, C.E.S. *Recuperação de áreas de preservação permanente na bacia do ribeirão das Anhumas*: seleção de sub-bacias e estabelecimento de prioridades com o uso de análise multicriterial. 2006. 87p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Instituto Agronômico, Campinas, SP, 2006.

FRANCISCO, C.E.S.; COELHO, R.M.; TORRES, R.B.; ADAMI, S.F. Espacialização de análise multicriterial em SIG: prioridades para recuperação de Áreas de Preservação Permanente. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, Florianópolis, 2007. *Anais.* Florianópolis: cd-rom. p. 2643-2650.

JOERIN, F.; THÉRIAULT, M.; MUSY, A. Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment. *International Journal of Geographical Information Science.* London, v. 15, n. 2, p. 153-174, 2001.

MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of literature. *International Journal of Geographical Information Science.* London, v. 20, n. 7, p. 703-726, 2006.

VALENTE, R.O.A. *Definição de áreas prioritárias para conservação e preservação florestal por meio da abordagem multicriterial em ambiente SIG.* 2005. 121 p. Tese (Doutorado em Agronomia), ESALQ, USP, Piracicaba, SP, 2005.

ZUFFO, A.C.; REIS, L.F.R.; SANTOS, R.F.; CHAUDHRY, F.H. Aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento dos recursos hídricos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos.* v. 7, n. 1, p. 81-102, 2002.

WESTEN, C.; FARIFTEH, J. *ILWIS-Integrated Land and Water Information System.* User's Guide. Enschede: ITC-International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, 1997.

Sobre os autores

Samuel Fernando Adami: geógrafo e mestre em Geografia Física pela Universidade de São Paulo (USP) e doutor em Ciências pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Atualmente é professor adjunto da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA). Tem experiência em geoprocessamento, mormente com sistemas de informações geográficas e sensoriamento remoto voltados para estudos de usos das terras e diagnósticos do meio físico em bacias hidrográficas.

Carlos Eduardo da Silva Francisco: agrônomo pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) e mestre em Agricultura Tropical e Subtropical pelo Instituto Agronômico de Campinas (IAC). Atualmente é consultor ambiental, atuando principalmente nos seguintes temas: legislação florestal, áreas de preservação permanente, responsabilidade socioambiental, agrofloresta e planejamento ambiental.

Ricardo Marques Coelho: agrônomo pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), mestre em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) e doutor em Ciência do Solo pela North Carolina State University. Atualmente é pesquisador do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), onde também atua como professor e orientador do programa de pós-graduação em Agricultura Tropical e Subtropical.

Roseli Buzanelli Torres: bióloga, mestre em Biologia Vegetal e Doutora em Ciências pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Atualmente é pesquisadora do Instituto Agronômico de Campinas (IAC).

ABSTRACT

Multicriteria analysis prioritization applied to restoring permanent preservation areas: deployment in geographic information systems

The current paper describes an application of GIS-based multicriteria decision analysis for establishing priorities for natural vegetation recovery in permanent preservation areas. The two methods presents similar results to one another, but the areas of very high priority are larger with the compromise programming method, on other hand the cooperative game theory method increase area of low and very low priority for recovery. Both methods provide top priorities for areas with greater slopes, shallow soils and susceptible to erosion. Terrains characterized by deep soils over hills and lower risk to erosion the compromise programming method tends to higher priority compared to the results of cooperative game theory.

KEYWORDS: Anhumas creek drainage basin; decision making; water resources; compromise programming; cooperative game theory.

RESUMEN

Análisis multicriterio aplicada al establecimiento de prioridadades recuperación de áreas de preservación permanente: implementación en sistemas de información geográfica

Se presentan los resultados de la aplicación de métodos de análisis multicriterio y los sistemas de información geográfica para la priorización de la recuperación de la vegetación en áreas de preservación permanente. Los dos métodos empleados clasifican las áreas de manera similar, pero la programación de compromiso tiende a acentuar las áreas de alto riesgo, mientras que la teoría de juegos cooperativos tiene más clases en las áreas de riesgo bajo y muy bajo. Los dos métodos proporcionan las más altas prioridades para las áreas con mayores gradientes, suelos poco profundos y más susceptibles a la erosión. Las áreas caracterizadas por suelos profundos que cubren las colinas y menor riesgo a la erosión el método de la programación de compromiso tienden a dar mayor prioridad sobre los resultados de la teoría de juegos cooperativos.

PALABRAS CLAVE: Cuenca del arroyo Anhumas; toma de decisiones; recursos hídricos; programación de compromiso; teoría de juegos cooperativos.

BCG: http://agbcampinas.com.br/bcg

Artigo recebido em dezembro de 2012. Aprovado em fevereiro de 2013.