

Comparação entre métodos de análise de sensibilidade, empregados na tomada de decisão com a avaliação multicriterial

Comparison between sensibility analysis methods, used in the decision-making process through the multicriteria evaluation

Roberta de Oliveira Aversa Valente¹ e Carlos Alberto Vettorazzi²

Resumo

No processo de tomada de decisão com a Avaliação Multicriterial, os resultados são, inevitavelmente, associados a uma variedade de incertezas, causadas por seus componentes: critérios, pesos e prioridades. Essas incertezas podem ser identificadas e avaliadas por meio de uma análise de sensibilidade que, por sua vez, determina a robustez das estratégias propostas no processo decisório. Neste contexto, o principal objetivo deste estudo foi comparar métodos de análise de sensibilidade, que permitissem a validação de processos decisórios estruturados em Sistemas de Informações Geográficas, em especial com o método da Média Ponderada Ordenada (de Avaliação Multicriterial). Foram comparados os métodos: Exploratório; da Simulação de Monte Carlo; e o disponível no módulo AHP-OWA (baseado na simulação estocástica) para um processo decisório, que promoveu a priorização de áreas à conservação florestal. O método Exploratório apresentou a vantagem de desenvolvimento de todo o processo de tomada de decisão em um Sistema de Informação Geográfica. O método disponível no módulo AHP-OWA, subsidiado por uma análise gráfica da influência dos critérios na prioridade de um determinado ponto, contribuiu para a diminuição da subjetividade do processo de definição dos pesos de ordenação dos critérios. A simulação de Monte Carlo, por sua vez, apresentou a vantagem de amenizar a influência do analista. Os três métodos de análise de sensibilidade permitiram a validação do processo decisório de maneira satisfatória. Nestas condições, os métodos apresentaram vantagens e desvantagens, permitindo estabelecer um padrão de análise de sensibilidade para trabalhos desenvolvidos com a Avaliação Multicriterial.

Palavras-Chave: Processo de tomada de decisão, Média Ponderada Ordenada, Métodos de Validação, Método Exploratório, Simulação de Monte Carlo, Simulação Estocástica

Abstract

Multicriteria Evaluation is one of the decision-making processes used in different areas of knowledge. Sensitivity analysis determines robustness of the strategies proposed in the decision-making process, as a consequence of identifying the uncertainties caused by their components: criteria, weights and priorities. In this context, the general purpose of this study was to compare some sensitivity analysis methods, aiming at the validation of the decision-making processes, especially the Ordered Weighted Averaging method, developed in a Geographical Information System (GIS) environment. The following methods were compared: Exploratory, Monte Carlo Simulation, and one ready to use in AHP-OWA module (based on stochastic simulation). In order to perform such comparison we used a decision-making process, with the purpose to defining priority areas for forest conservation. The Exploratory method permitted the development of all decision-making stages in a GIS environment. On the other hand, the AHP-OWA method module allowed a graphic analysis of the criteria influence on the local priority. This analysis contributes to decrease the subjectivity associate with the definition of the criterion order weights. Regarding the Monte Carlo simulation, one can highlight the decrease of the analyst influence on the setting of order weights. The three methods promoted a satisfactory validation of the decision-making process, presenting advantages and disadvantages and, mainly, they contributed to get a pattern of the sensitivity analysis, which can be used in the processes developed with Multicriteria Evaluation.

Keywords: Decision-making process, Ordered Weighted Averaging Method, Validation Methods, Exploratory Method, Monte Carlo Simulation, Stochastic Simulation.

¹Professora Adjunta do Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de São Carlos - Campus Sorocaba - Rod. João Leme dos Santos - km 110 - Caixa Postal 3031 - Sorocaba, SP - 18052-780 - E-mail: roavalen@ufscar.br

²Professor Associado do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo - Av. Pádua Dias, 11 - Caixa Postal 9 - Piracicaba, SP - 13418-900 - E-mail: cavettor@esalq.usp.br

INTRODUÇÃO

Os processos decisórios consideram a presença de tomadores de decisão e, em muitos casos, de diferentes objetivos a serem alcançados (KANGAS *et al.*, 2000). As opiniões dos tomadores de decisão são expressas por meio de critérios, que subsidiam a proposição de soluções para um problema, e.g., a definição de áreas prioritárias, de risco ou de maior suscetibilidade (PHUA e MINOWA, 2005). A Avaliação Multicriterial (MCEM) é uma das técnicas empregadas para a tomada de decisão, a qual tem a capacidade de incorporar a opinião de um grupo de tomadores de decisão em um mesmo processo decisório (MALCZEWSKI, 1999). De acordo com Malczewski (2006) existem dois grupos fundamentais de métodos de Avaliação Multicriterial (MCEM): os baseados nas operações matemáticas Booleanas e os baseados na Combinação Linear Ponderada (CLP). O segundo grupo é mais flexível em termos de produção de alternativas (i.e. diferentes alternativas para um mesmo problema), por considerar regras de combinação compensatórias. Existem, contudo, algumas limitações associadas ao uso deste método no processo decisório. Jiang e Eastman (2000) discutiram essas limitações e sugeriram o uso do método da Média Ponderada Ordenada (MPO), o qual pode ser considerado uma generalização dos métodos Booleano e da CLP (MALCZEWSKI, 1999; JIANG e EASTMAN, 2000; MALCZEWSKI *et al.*, 2003; MALCZEWSKI e RINNER, 2005).

O conceito do método da MPO foi desenvolvido no contexto da teoria fuzzy (YAGER, 1988) e envolve dois grupos de pesos: os pesos de fatores e os pesos de ordenação. O primeiro expressa a ordem de importância dos critérios no processo decisório, enquanto que o segundo controla o nível de compensação entre os critérios, além do risco assumido no processo (MALCZEWSKI, 1999). Jiang e Eastman (2000) ressaltam que esse método oferece um amplo espectro de estratégias de decisão ao longo das dimensões primárias do nível de compensação dos critérios envolvidos, assim como do nível de risco assumido no processo decisório. Muitos estudos vêm empregando os MCEM para obter soluções em seus processos de tomada de decisão. Malczewski (2006), baseado em uma revisão de literatura, classificou artigos referentes ao período de 1999 a 2004, que empregaram MCE (no ambiente SIG) em diferentes aplicações.

Dentre eles podem ser citados: Mendoza e Prabhu (2000), Gkaraveli *et al.* (2004), Sweeney e Czapka (2004) que priorizaram áreas para a restauração florestal; e Geneletti (2007) e Geneletti e Duren (2008), que determinaram áreas para a conservação florestal, em paisagens predominantemente agrícola.

Os componentes critérios, pesos e prioridades associam, contudo, uma variedade de incertezas aos resultados obtidos nos processos de tomada de decisão, realizados com a Avaliação Multicriterial (VOOGD, 1983). Essas incertezas podem ser identificadas e avaliadas por meio de uma análise de sensibilidade que, segundo Butler *et al.* (1997), determina a robustez das soluções obtidas no processo decisório. Malczewski (1999) define essa análise como o procedimento para determinar como o curso das soluções, que se obteve com a priorização de áreas, pode ser modificado com alterações no início do processo de tomada de decisão. Ainda segundo esse autor, se as alterações não afetarem significativamente as saídas (soluções), o ordenamento pode ser considerado robusto. Se os resultados encontrados forem insatisfatórios, podem-se utilizar as informações de saída na etapa de formulação do problema.

Para Store e Kangas (2001), o propósito geral dessa análise, no âmbito da MCEM, é avaliar a influência e a importância dos diferentes critérios e pesos no padrão de distribuição espacial da prioridade avaliada. Hyde *et al.* (2005) ressaltam a integração dos MCEM com os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) e que, por outro lado, existe dificuldade de adaptação da maioria dos métodos de análise de sensibilidade a esses sistemas. Neste contexto, Varma *et al.* (2000) utilizaram a teoria de evidência Dempster-Shaper para a análise de sensibilidade de um sistema decisório (ambiente SIG) para o manejo florestal. McIntyre e Wheeler (2004) e Hyde *et al.* (2004), que utilizaram MCEM para definir áreas florestais a serem restauradas, empregaram a simulação de Monte Carlo na análise de sensibilidade. Heuvelink (1998) e Crosetto *et al.* (2002) constataram que esse método é o mais comumente empregado na realização da análise de sensibilidade espacial. Fisher *et al.* (1997), Saltelli (2000), Moffet *et al.* (2006), dentre outros autores, utilizam esse termo "análise de sensibilidade espacial" para se referir a este tipo de análise, quando aplicada a variáveis que se caracterizam por apresentar um padrão de distribuição espacial.

Voss *et al.* (2004) ressaltam a implementação do método da MPO e da análise de sensibilidade (método baseado em simulação estocástica) no SIG CommomGis (ANDRIENKO *et al.*, 2003), o qual foi empregado no desenvolvimento de diversos estudos. Pode-se citar Malczewski (1999), que o utilizou para a determinação de áreas adequadas à urbanização; Malczewski *et al.* (2003), que empregaram o CommonGis para a priorização de áreas a serem restauradas em uma bacia hidrográfica; e Chertov *et al.* (2005), que utilizaram esse SIG em estudo sobre sequestro de carbono. Dias e Clímaco (2000), Chen *et al.* (2001), Mustajoki *et al.* (2004) e Boroushaki e Malczewski (2008) são outros autores que desenvolveram SIGs, baseados nos MCEM e que incluem a análise de sensibilidade.

Store e Kangas (2001) e Moffett *et al.* (2006) também utilizaram a análise de sensibilidade para validar processos decisórios (MCEM-SIGs), contudo, tendo por base o método Exploratório. No primeiro estudo para identificar áreas críticas para uma espécie florestal e, no segundo, na definição de áreas prioritárias para a conservação da biodiversidade.

Neste contexto, o principal objetivo desse estudo foi comparar métodos de análise de sensibilidade, que permitissem a validação de processos decisórios estruturados em SIGs, com o método da Média Ponderada Ordenada (de avaliação multicriterial). Foram comparados os

seguintes métodos: Exploratório, da Simulação de Monte Carlo e o disponível no módulo AHP-OWA (baseado na simulação estocástica) para um processo decisório que promoveu a priorização de áreas à conservação florestal.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a comparação entre os métodos de análise de sensibilidade utilizaram-se os dados e resultados produzidos por Valente e Vettorazzi (2008), que definiram áreas prioritárias à conservação florestal na bacia do rio Corumbataí, SP.

Área de estudo

A bacia do rio Corumbataí (Figura 1) está localizada na porção centro-leste do estado de São Paulo, entre os paralelos 22° 04' 46" S e 22° 41' 28" S e os meridianos 47° 26' 23" W e 47° 56' 15" W, e possui aproximadamente 170.000ha. Ela representa muito bem a situação de grande parte do território brasileiro originalmente coberto pela Mata Atlântica e marcado por uma intensa fragmentação florestal. Na atualidade, as culturas agrícolas predominam nessa paisagem. Sua área é ocupada em aproximadamente 42% por pastagem e 28% por cana-de-açúcar, enquanto que seus remanescentes florestais (Floresta Estacional Semi-decidual) ocupam em torno de 12%.

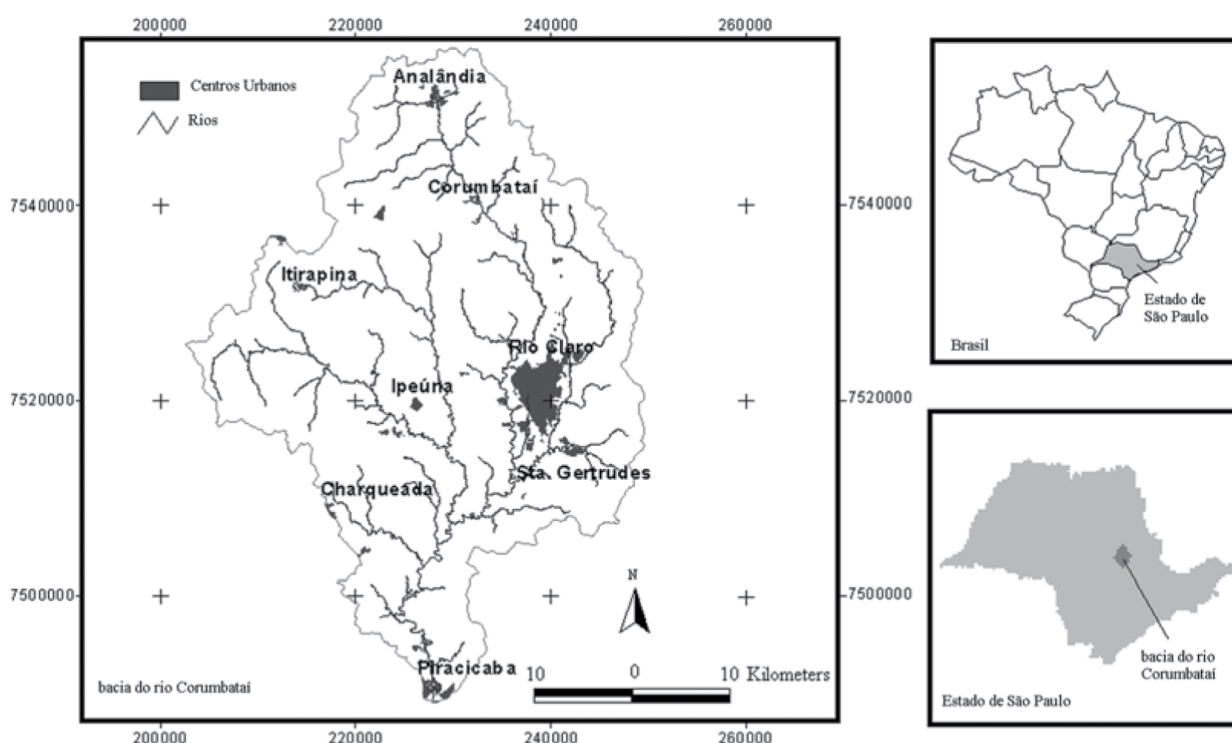


Figura 1. Localização da bacia do rio Corumbataí, SP.
Figure 1. Location of the Corumbataí river basin, SP.

Valente e Vettorazzi (2008) definiram áreas prioritárias à conservação florestal (método da MPO no SIG-IDRISI Kilimanjaro), considerando a importância da bacia do rio Corumbataí como representante de paisagem com Mata Atlântica, e como essa priorização de áreas influenciaria positivamente nos “bens e serviços oferecidos” por essa paisagem. Nesse caso, bens e serviços especialmente relacionados ao suprimento de água para consumo humano, visto que o rio Corumbataí é uma fonte estratégica de água para uma ampla região (incluindo municípios que estão fora dos limites da bacia).

Avaliação multicriterial

Valente e Vettorazzi (2008) utilizaram a Técnica Participatória e o método Hierárquico Analítico (AHP) nas etapas de definição dos critérios e de sua importância no processo decisório (expressa por pesos de fator), como proposto por Eastman (2001). Aplicou-se a Técnica Participatória por meio de consulta a especialistas das áreas de Ecologia da Paisagem, Conservação da Natureza, Hidrologia Florestal e Geoprocessamento. Os critérios considerados importantes aos objetivos do trabalho foram:

(1) Proximidade entre fragmentos de maior área nuclear: fragmentos maiores e conectados são tipicamente melhores, para a conservação da biodiversidade, do que os pequenos e isolados (NOSS *et al.*, 1997);

(2) Proximidade à cobertura florestal: com a conectividade restabelecida entre esses fragmentos (diretamente ou por meio de outros fragmentos), sub-populações passam a se interconectar em uma nova unidade (FARINA, 1998);

(3) Proximidade à rede hidrográfica: as áreas de floresta próximas aos corpos d’água têm uma importância ecológica na dinâmica da paisagem, pois possibilitam a movimentação da fauna e contribuem para a dispersão vegetal que, por sua vez, irá auxiliar na conexão florestal (HARPER *et al.*, 1992; FORMAN e COLLINGE, 1997);

(4) Distância dos centros urbanos: para o sucesso das ações é interessante que sejam priorizadas áreas distantes de fontes de distúrbio (centros urbanos e estradas). Os fragmentos próximos aos centros urbanos sofrem com a constante ameaça de redução de sua área ou mesmo de sua extinção total, em função do uso inadequado dessas áreas (GUTZWILLER e BARROW, 2003), aumento do risco de incêndios (CHEN *et al.*, 2001) e pela própria expansão das áreas urbanas (SAUNDERS *et al.*, 1991), dentre outros fatores;

(5) Distância da malha viária: ela é, segundo Geneletti (2003), uma causa direta (redução da área total do ecossistema) e indireta (fragmentação e degradação do ecossistema) da redução de habitats;

(6) Vulnerabilidade à erosão: por meio deste fator foi dada maior prioridade aos solos mais erodíveis e em maiores declividades. Sendo mais suscetíveis à erosão, podem ser uma ameaça à conservação e, sobretudo, à preservação florestal (ROSA *et al.*, 2000).

Para definição da importância dos fatores no processo decisório (pesos de fator), com o método Hierárquico Analítico (AHP), elaborou-se uma matriz de comparação entre os critérios, de acordo com a importância relativa entre eles, como proposto por Saaty (1980). Os valores associados aos critérios são, de acordo com o método, derivados de uma escala contínua com valores variando de um a nove. O valor um indica que dois critérios têm “igual” importância para o estudo, enquanto que o valor nove implica em que um critério é “extremamente” mais importante que outro. Como a matriz resultante dessa comparação é simétrica, preenche-se somente seu “triângulo superior”. A Taxa de Consistência (TC) avalia se os pesos foram gerados de maneira aleatória. De acordo com Saaty (1980), os valores de TC devem ser inferiores a 0,10 e, no caso de estarem acima deste valor, o autor sugere que se reorganize a matriz, alterando os valores de comparação entre critérios. No estudo de Valente e Vettorazzi (2008), após debates e análise dos critérios, os tomadores de decisão indicaram que a proximidade entre fragmentos de maior área nuclear é o critério mais importante, para esse processo decisório. Por outro lado, a vulnerabilidade à erosão foi considerada como critério de menor importância. Os critérios proximidade da rede hidrográfica e dos fragmentos florestais assumiram igual importância no processo e ocuparam a segunda posição, na ordem de importância dos critérios. Os outros dois critérios (distância da malha viária e dos centros urbanos) ocuparam a terceira posição, com mesma importância para os dois. O critério mais importante foi considerado aproximadamente quatro vezes mais importante do que aquele de menor importância. Os mapas de proximidades foram considerados, aproximadamente, três vezes menos importantes que o primeiro critério e duas vezes mais importantes do que o último deles. Os mapas de distância foram considerados duas vezes menos importantes do que aqueles que ocuparam a primeira e segunda posição e, ainda, duas vezes mais importantes do que o vulnerabilidade à erosão.

No que diz respeito ao nível de compensação entre os critérios, isto é, seus pesos de ordenação, foram definidos dentro do espaço de estratégia de decisão (Figura 2). Com diferentes grupos de pesos de ordenação pode-se gerar uma variedade de estratégias de decisão (MALCZEWSKI *et al.*, 2003). Esse grupo de pesos é que controla como o operador (MPO) agregará os critérios no continuum entre os extremos AND e OR. Se a maior parte dos pesos de ordenação for assinalada à esquerda, à direita ou ao centro, isto irá determinar a posição na dimensão do risco assumido e o nível de compensação no processo decisório (MALCZEWSKI, 1999). Quando se tem risco igual a zero (operador OR), isto implica na não compensação entre os critérios. O mapa que representa essa estratégia de decisão (solução) indicará que ao menos um critério não foi compensado, para cada local da bacia. Nestas condições não se tem a seleção de áreas à conservação (EASTMAN, 2001). O risco variando de 0 a 0,5 indica que ocorre compensação dos critérios. Como resultado, os tamanhos das áreas recomendadas para priorização tornam-se gradualmente maiores (maior risco, maior o tamanho da área) (MALCZEWSKI *et al.*, 2003). Já a estratégia resultante de risco igual a 0,5 representa uma atitude neutra, visto a total compensação dos critérios. Por outro lado, com o risco variando de 0,5 a 1 há um decréscimo no nível de compensação dos critérios. A estratégia com risco igual a 1 (operador AND), por sua vez, indica que toda a bacia deve ser priorizada à restauração florestal. Kangas e Kangas (2005) mencionam que se conhecendo a importância (expressa por pesos de fator) e a influência dos critérios no processo decisório é que se define o nível de compensação de cada um deles. Atribuindo-se todo peso de ordenação (total igual a 1) obtém-se essa influência dos critérios no processo decisório (MALCZEWSKI, 1999; EASTMAN, 2001).

De acordo com Jiang e Eastman (2000), o risco assumido (RISK) no processo e a compensação (TRADEOFF) caracterizam, dessa forma, a natureza da MPO. Eles podem ser calculados por meio das seguintes fórmulas:

$$RISK = (1/n-1) \sum [(n-1)Wi]; \quad (1)$$

$$TRADEOFF = 1 - \sqrt{\sum (Wi-1/n)^2 / n-1} \quad (2)$$

sendo: n: número total de critérios; i: ordem do critério; e W: peso associado ao critério.

De acordo com estudo de Valente e Vettorazzi (2008), na priorização de áreas à conservação florestal na bacia do rio Corumbataí, os pesos de or-

denação foram distribuídos de maneira a propor estratégias de decisão com riscos baixo, médio e alto (independente do nível de compensação obtido). Os autores consideraram duas vezes o intervalo de confiança de 10% a partir do risco médio (equivale a 0,5 no *continuum* de risco – Figura 2) para caracterizar os intervalos de risco e avaliaram essas três estratégias de decisão em conjunto com os mapas de critérios, concluindo que a solução com risco assumido alto (R = 0,4) e compensação (C) de critérios de 78% é, dentre as três, a estratégia mais adequada à priorização de áreas na bacia. Os critérios que foram agregados (método da MPO) para a produção desse mapa, bem como os pesos (de fator e ordenação) associados a eles, estão na Tabela 1, ordenados de acordo com a influência que exercem no processo decisório.

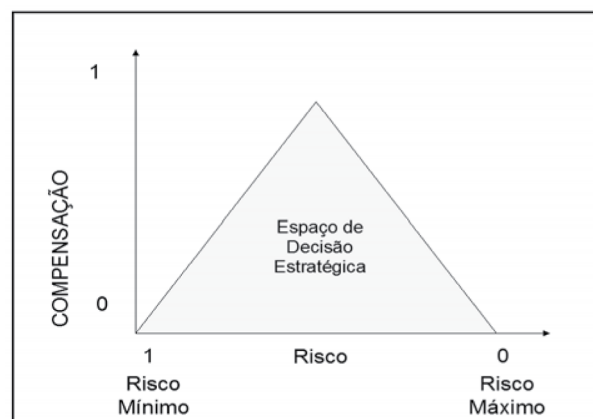


Figura 2. Espaço de estratégia para a tomada de decisão. (Adaptado de Eastman, 2001).

Figure 2. Decision strategy space to decision-making (Adapted from Eastman, 2001).

Tabela 1. Critérios e pesos para a priorização de áreas à conservação florestal na bacia do rio Corumbataí, SP.

Table 1. Criteria and weights used in the definition of priority areas for forest conservation in the Corumbataí river basin, SP.

Critérios (em ordem decrescente de influência)	Pesos	
	Fator	Ordenação
Prox. rede	0,1736	0,0800
Prox. frag.	0,1736	0,0800
Prox. nuclear	0,3462	0,4000
Vulner.	0,0725	0,0800
Dist. Urbanos	0,1171	0,1800
Dist. estradas	0,1171	0,1800
TC	0,0300	---
Risco	----	0,4600
Compensação	----	0,7800

Fonte: Valente e Vettorazzi (2008).

Sendo:

Prox. rede: proximidade à rede hidrográfica;

Prox. frag.: proximidade à cobertura florestal;

Prox. nuclear: proximidade entre fragmentos de maior área nuclear;

Vulner.: vulnerabilidade à erosão;

Dist. Urbanos: distância aos centros urbanos; e

Dist. Estradas: distância à malha viária.

Análise de sensibilidade

Para o mapa apontado por Valente e Vettorazzi (2008) como o mais adequado à priorização de áreas à conservação florestal ($R=0,4$; $C=78\%$) executou-se a análise de sensibilidade com os métodos Exploratório, da simulação de Monte Carlo e o disponível no módulo AHP-OWA (ambiente ArcGis 9), com o intuito de comparação desses métodos. No caso dos MCEM, em especial do método da MPO, a principal função da análise é avaliar a relevância dos critérios no processo decisório, além de definir o nível adequado de compensação deles, ou seja, os pesos de ordenação associados a eles.

O primeiro passo para sua execução foi a sucessiva eliminação dos critérios e a definição de seus novos pesos de fator. O método AHP pressupõe a elaboração de uma matriz a partir da comparação pareada dos critérios. Nesse caso, a matriz de comparação pareada foi sendo reorganizada à medida que se eliminava um fator, mantendo-se as relações de importância estabelecidas pelos tomadores de decisão (Técnica Participatória), desde que fosse respeitado o limite de TC. Garantiram-se, dessa maneira, pesos de fator proporcionais aos do mapa de áreas prioritárias com todos os critérios, os quais foram associados aos critérios, na execução da análise de sensibilidade com três métodos comparados. Os pesos de fator atribuídos aos critérios estão na Tabela 2. Ressalta-se que tanto esses pesos quanto as matrizes foram gerados no próprio SIG-IDRISI, utilizando o método AHP.

Numa segunda etapa da análise foram gerados os pesos de ordenação, considerando os métodos: Método Exploratório, Método da Simulação de Monte Carlo e Módulo AHP-OWA.

Método Exploratório

Para a análise de sensibilidade com o método Exploratório, como proposto por Malczewski (1999), o peso de ordenação antes associado ao critério excluído (Tabela 1) foi distribuído entre os demais critérios, independente do risco assumido no processo decisório e do nível de com-

pensação obtido. Para alguns casos foram avaliadas opções de pesos de ordenação para analisar se, com essa alteração, seria possível eliminar o critério do processo decisório. Essas opções de pesos de ordenação também foram empregadas nos casos em que o novo conjunto de pesos causava alterações no mapa de prioridades, em termos de alteração da ordem de importância dos critérios. Considerou-se, para compor essas opções de pesos de ordenação, a influência dos critérios no processo decisório (Tabela 1).

Smith e Zollner (2005) afirmaram que o método Exploratório requer conhecimento do analista sobre o problema em estudo, por consequência de seu elevado nível de influência no processo decisório.

Método da Simulação de Monte Carlo

A simulação de Monte Carlo é um método estatístico empregado em simulações estocásticas e que vem sendo empregado em diversas áreas de conhecimento. Hromkovic (2001) destaca que o método permite selecionar valores aleatoriamente, de maneira semelhante aos jogos de azar. Dessa forma, pode-se ter uma variável com valores conhecidos, mas que podem apresentar um valor incerto para qualquer evento particular.

Neste estudo, a análise de sensibilidade baseou-se na criação de cenários formados por diferentes grupos de pesos de ordenação, produzidos por meio da simulação de Monte Carlo por amostragem estratificada, com o software "Crystal Ball 7.2 Professional". Dessa forma foi possível estipular o intervalo de valores (aleatórios) a que cada variável poderia associar-se (Tabela 3), considerando a influência dos critérios no processo (Tabela 1), com um intervalo de confiança de 95% em torno da média. Para garantir que todos os valores (pesos) tivessem a mesma probabilidade de ocorrência, dentro dos limites estabelecidos, optou-se por uma função de probabilidade com distribuição uniforme. Para cada critério eliminado foram produzidos 20 cenários, porque a partir desse valor geravam-se valores muito semelhantes entre si, para diferentes grupos de pesos de fator, ou seja, cenários praticamente iguais.

Tabela 2. Pesos de fator gerados para a análise de sensibilidade com método Exploratório.

Table 2. Factor weights produced to sensitivity analysis with the Exploratory method.

Critérios	Pesos de fator					
Prox. rede	----	0,2198	0,2826	0,1890	0,1986	0,1986
Prox. frag.	0,2198	----	0,2826	0,1890	0,1986	0,1986
Prox. nuclear	0,3895	0,3895	----	0,3837	0,3589	0,3589
Vulner.	0,0867	0,0867	0,1092	----	0,0941	0,0941
Dist. urbanos	0,1520	0,1520	0,1628	0,1191	----	0,1498
Dist. estradas	0,1520	0,1520	0,1628	0,1191	0,1498	----
TC	0,0300	0,0300	0,0400	0,0400	0,0400	0,0400

Tabela 3. Simulação de Monte Carlo: limites de valores para os pesos de ordenação os critérios.**Table 3.** Monte Carlo Simulation: value limits of the criteria order weights.

Critérios	Limites de valores para os pesos de ordenação					
Prox. rede	----	0,09 – 0,20	0,15 – 0,30	0,09 – 0,18	0,10 – 0,18	0,10 – 0,18
Prox. frag.	0,09 – 0,20	----	0,15 – 0,30	0,09 – 0,18	0,09 – 0,18	0,09 – 0,18
Prox. área	0,35 – 0,45	0,35 – 0,45	----	0,38 – 0,45	0,36 – 0,45	0,36 – 0,45
Vulner.	0,05 – 0,15	0,05 – 0,15	0,10 – 0,20	----	0,10 – 0,15	0,10 – 0,15
Dist. urb.	0,15 – 0,20	0,15 – 0,20	0,16 – 0,30	0,10 – 0,20	0,15 – 0,25	----
Dist. malha	0,15 – 0,20	0,15 – 0,20	0,16 – 0,30	0,10 – 0,20	----	0,15 – 0,25

Produzidos os cenários, o próximo passo foi calcular o risco (R) assumido no processo decisório e a compensação entre os critérios (C) (Fórmulas 1 e 2). Selecionou-se apenas um dentre aqueles mapas que apresentaram valores de risco e compensação iguais ou muito semelhantes. Isto porque, como mencionado por Valente e Vettorazzi (2005), mapas com risco e compensação semelhantes propõem a mesma solução, ou seja, a mesma espacialização de áreas prioritárias.

Módulo AHP-OWA

O módulo AHP-OWA (BOROUSHAKI e MALCZEWSKI, 2008) é executado no ambiente ArcGIS e segue a mesma fundamentação teórica do SIG CommonGIS (ANDRIENKO *et al.*, 2003), i.e., baseado em simulação estocástica, com ferramentas gráficas. Sua principal vantagem, em relação ao CommonGIS, é permitir as análises com mapas de critérios no formato matricial. Para a realização da análise de sensibilidade foi necessário, contudo, produzir o mapa de áreas prioritárias no próprio módulo. Com a sucessiva eliminação dos critérios, gerava-se uma nova matriz de comparação pareada para se chegar aos pesos de fator (método AHP) e, em seguida atribuíam-se os pesos de ordenação. Utilizou-se, portanto, o mesmo procedimento empregado para o método Exploratório.

O módulo tem a vantagem da análise gráfica do comportamento do mapa de prioridades e critérios, com a alteração dos pesos de ordenação e, conseqüentemente, do risco e compensação obtidos para o processo decisório. Pode-se avaliar como a prioridade de um determinado ponto é afetada pela importância e influência dos critérios. Após essa análise e a definição do grupo de pesos, que fornecem uma melhor estratégia para o processo, é que os critérios são agregados. Para a análise de sensibilidade com AHP-OWA propuseram-se três grupos de pesos de fator, com a sucessiva eliminação dos critérios. Isto tendo por base a avaliação gráfica do comportamento dos mapas de prioridades e critérios.

Estratégias de decisão

A agregação dos critérios (método da MPO), considerando os pesos de fatores, propostos com os métodos Exploratório e da simulação de Monte Carlo, realizou-se no SIG-IDRISI. Quando se consideraram os pesos de ordenação obtidos no módulo AHP-OWA, a produção das estratégias de decisão ocorreu no próprio módulo, também com o método MPO. Para todas as “alternativas” geradas definiram-se cinco classes de prioridade: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta. Determinaram-se os intervalos de classe a partir da avaliação dos histogramas dos mapas (na escala 0 a 255 bytes) referentes a essas alternativas propostas.

Para a avaliação desses mapas, em conjunto com os mapas de critérios, produziu-se uma malha de pontos estratificada ao acaso, sendo o número amostral (52 pontos) definido estatisticamente, considerando-se a área de estudo, como proposto por Eastman (2001). Considerando essa malha de pontos foi possível gerar matrizes de confusão e comparar, dois a dois, os mapas de prioridades (referentes aos três métodos de análise de sensibilidade).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de sensibilidade, por meio dos métodos Exploratório, da simulação de Monte Carlo e o disponível no módulo AHP-OWA, indicou que os critérios distância da malha viária, distância dos centros urbanos, vulnerabilidade à erosão, proximidade entre fragmentos florestais com maior área nuclear e proximidade entre fragmentos florestais, são essenciais para a priorização de áreas à conservação florestal na bacia do rio Corumbataí. Por outro lado, de acordo com essa análise, o critério proximidade da rede hidrográfica deve ser eliminado do processo decisório. As estratégias de decisão, propostas para a análise de sensibilidade com esse critério, promoviam a priorização de áreas, predominantemente em função dos corpos d'água.

Nestas estratégias, os maiores níveis de prioridade estavam associados às regiões da bacia onde se localizam seus maiores remanescentes florestais, visto que o critério proximidade entre fragmentos de maior área nuclear recebeu os maiores pesos de fator e ordenação (Tabela 1). Mesmo nessas regiões favoreciam-se, no entanto, locais próximos aos corpos d'água. Um local próximo da rede hidrográfica possui, muitas vezes, maior nível de prioridade do que outro entre dois remanescentes florestais (mesmo de maior área nuclear).

No caso da bacia do rio Corumbataí, o principal problema da priorização em função, principalmente, da rede hidrográfica, está em algumas de suas regiões onde corpos d'água não possuem vegetação ciliar ou então somente fragmentos pequenos e distantes uns dos outros. Pode-se, assim, dizer que o fator proximidade da rede hidrográfica não é importante, nesse caso específico, em função da distribuição dos corpos d'água na bacia, podendo ser eliminado desse processo de decisão.

Com a eliminação do critério, passou-se a priorizar as regiões associadas à presença dos fragmentos florestais, principalmente daqueles com maior área nuclear. Por outro lado, com a eliminação sucessiva dos demais critérios, a análise de sensibilidade (três métodos) indicou que houve alteração nas relações de importância estabelecidas para critérios (Técnica Participatória) em relação à prioridade avaliada. As maiores alterações ocorreram com a eliminação dos dois critérios relacionados à presença dos remanescentes florestais na bacia, ou seja, dos mapas de proximidades.

Neste contexto, na priorização de áreas sem o mapa de proximidade da rede hidrográfica, os maiores níveis de prioridade foram associados às regiões onde há concentração de fragmentos

florestais e, conseqüentemente, à presença dos maiores remanescentes da bacia. Os mapas sem o referido critério propuseram, portanto, que as ações de conservação iniciem-se por regiões onde há vegetação, como sugerido por Forman (1997) e Geneletti (2004).

Avaliando-se conjuntamente esses mapas e os referentes aos critérios, ressaltam-se outras duas características. A primeira é que as classes de maior prioridade estão localizadas nas regiões ambientalmente mais sensíveis da bacia, ou seja, com maiores valores de erodibilidade do solo. A segunda é que nessas regiões, de maior prioridade, existe menor concentração de fontes de distúrbio, como estradas e centros urbanos. Pode-se dizer, assim, que os critérios e pesos permitiram propor estratégias que estão de acordo com o pré-estabelecido para o processo decisório.

Os pesos de critérios, sem o mapa de proximidade da rede hidrográfica e, que propuseram a melhor estratégia de priorização de áreas na bacia, de acordo com os três métodos de análise de sensibilidade, estão na Tabela 4. Os mapas correspondentes a essas estratégias, assim com o produzido por Valente e Vettorazzi (2008) com todos os critérios, podem ser observados na Figura 3.

A análise de sensibilidade pelos métodos Exploratório, da simulação de Monte Carlo e do módulo AHP-OWA propuseram estratégias com risco para o processo decisório de 0,46 (duas primeiras) e 0,44. A compensação entre os critérios foi de, respectivamente, 73%, 75% e 74%. Os três mapas, assim como aquele produzido por Valente e Vettorazzi (2008), apresentaram, portanto, risco médio-alto para o processo decisório. Malczewski (1999) afirma que nem sempre a melhor estratégia de decisão é aquela associada ao menor risco assumido. Devem-se avaliar as características da paisagem e as alternativas propostas para determinar qual a melhor estratégia de ação.

Tabela 4. Pesos de critérios gerados com a análise de sensibilidade, por meio dos métodos Exploratório, da Simulação de Monte Carlo e o disponível no módulo AHP-OWA.

Table 4. Criterion weights produced with the sensitivity analysis through the methods Exploratory, the Monte Carlo simulation and one ready to use in the AHP-OWA module.

Critérios	Método Exploratório		Simulação de Monte Carlo		Módulo AHP-OWA	
	Pesos		Pesos		Pesos	
	fator	Ordenação	fator	ordenação	fator	ordenação
Prox. frag.	0,2198	0,1600	0,2198	0,16050	0,201	0,1789
Prox. área	0,3895	0,4000	0,3895	0,3873	0,392	0,3974
Vulner.	0,0867	0,0800	0,0867	0,0847	0,089	0,0777
Dist. urb.	0,1520	0,1800	0,1520	0,1805	0,159	0,173
Dist. malha	0,1520	0,1800	0,1520	0,1870	0,159	0,173
TC	0,0300	---	0,0300	---	0,03400	---
R	---	0,4600	---	0,4600	--	0,4400
C	---	0,7300	---	0,7500	--	0,7400

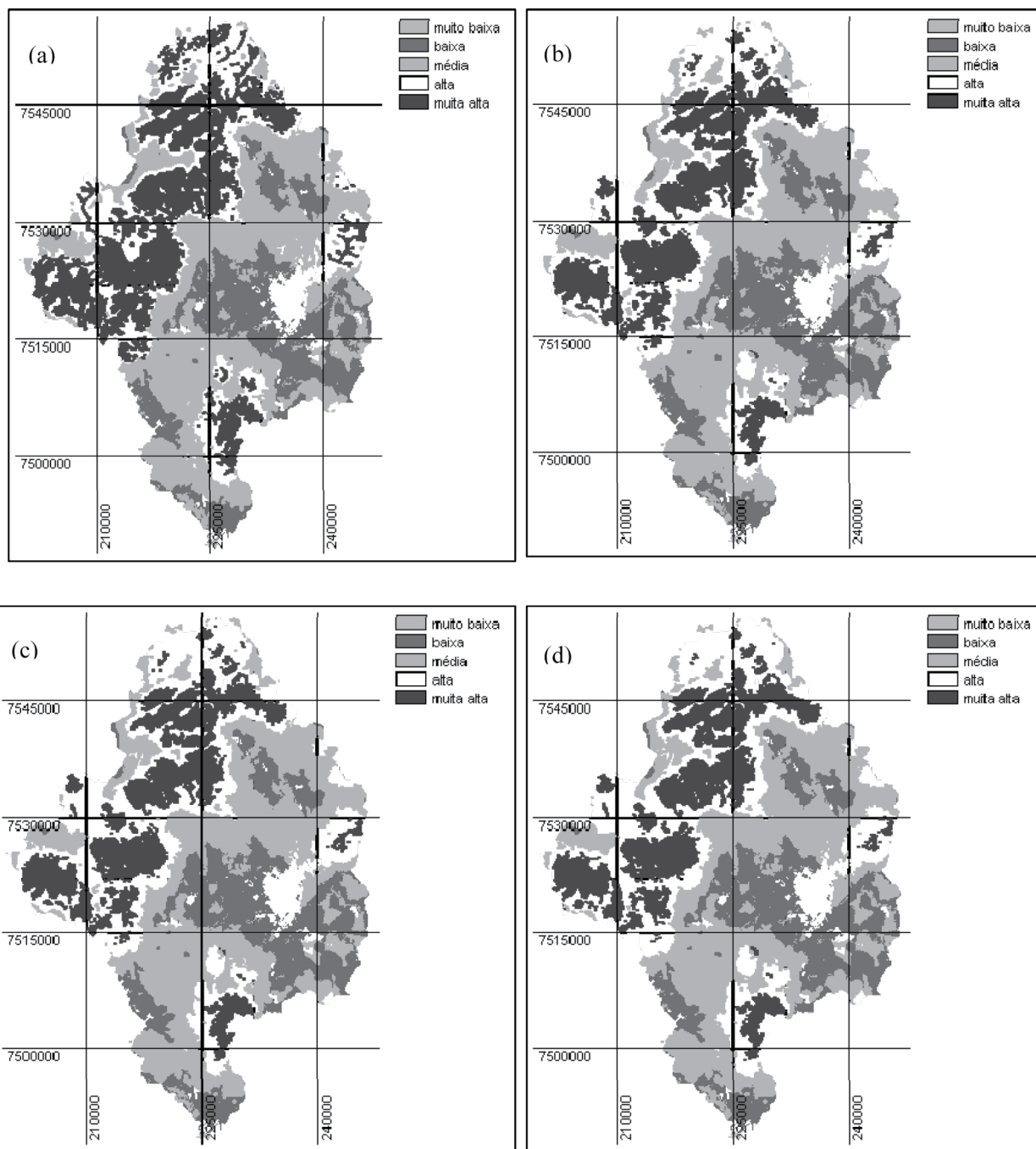


Figura 3. Estratégias à priorização de áreas prioritárias à conservação florestal, na bacia do rio Corumbataí, proposta por (a) Valente e Vettorazzi (2008) e obtidas com os métodos de análise de sensibilidade: (b) Exploratório; (c) simulação de Monte Carlo; e (d) disponível no módulo AHP-OWA.

Figure 3. Strategies for the prioritization areas for forest conservation of the Corumbataí river basin, proposed by (a) Valente and Vettorazzi (2008) and; obtained through the follow sensibility analysis methods: (b) Exploratory; (c) Monte Carlo simulation; and (d) ready to use in the AHP-OWA module.

Valente e Vettorazzi (2005) citam que mapas com iguais pesos de fator e, ainda, com valores de riscos iguais ou muito próximos entre si, tendem a ser muito semelhantes. Nessa situação estão os mapas de áreas prioritárias, produzidos para a análise de sensibilidade com os métodos Exploratório e da Simulação de Monte Carlo (Figura 3a e 3b). Para esses dois mapas, as classes de prioridades apresentaram semelhanças quanto à sua espacialização (Figura 3a e 3b) e área ocupada (Tabela 5).

As diferenças em área foram em torno de 0,5% a aproximadamente 1% (classe alta – Tabela 5). A matriz de confusão entre eles (Tabela 6) indicou que apresentam 96,15% de coincidência global. As diferenças existentes entre classes de mesma prioridade, nos dois mapas, são locais e, consequentes de pequenas variações na maneira de compensar seus respectivos critérios, i.e., os pesos de ordenação propostos para o método Exploratório diferenciam muito pouco daqueles propostos para a simulação de Monte Carlo

(Tabela 4). O mapa de proximidade entre fragmentos com maior área florestal, por exemplo, foi compensado em aproximadamente 1,2% a menos para produzir o mapa usado na análise de sensibilidade com a simulação de Monte Carlo, do que quando se produziu o mapa referente ao método exploratório (Tabela 4). Para obter o primeiro mapa de prioridades, por consequência, compensaram-se mais o critério vulnerabilidade à erosão e, em especial, os critérios distâncias das estradas e dos centros urbanos. No mapa de prioridades, gerado para a simulação de Monte Carlo, essa menor compensação do segundo fator mais influente fez com que alguns locais não fossem associados aos maiores níveis de prioridade, mesmo com a presença de grandes remanescentes florestais (muitos locais com alguns dos maiores fragmentos da bacia). Como indicado na matriz de confusão (Tabela 4), pontos associados às classes de prioridade muito alta e alta, no mapa gerado para a análise de sensibilidade com

o método Exploratório, foram classificados como de prioridades alta e média, respectivamente, no outro mapa (simulação de Monte Carlo).

O mesmo padrão de compensação de critérios foi seguido para o mapa de prioridades, produzido no módulo AHP-OWA, o qual apresentou valor de compensação de critérios (C=74%; Tabela 4) semelhante aos obtidos para os mapas gerados, para a análise de sensibilidade, com os métodos Exploratório (C=73%) e da Simulação de Monte Carlo (C=75%). Mesmo nestas condições houve diferenças no valor do percentual de coincidência global desses três mapas (Tabelas 6 a 8) e, assim, na espacialização de suas classes de prioridade (Figura 3). Os mapas de prioridades, gerados para a análise de sensibilidade, pelos métodos Exploratório e da Simulação de Monte Carlo, apresentaram percentual de coincidência de, respectivamente, 92,31% (Tabela 7) e 96,15% (Tabela 8) em relação aquele gerado pelo módulo AHP-OWA.

Tabela 5. Área ocupada (%) pelas classes de prioridade nos mapas produzidos, com três métodos de análise de sensibilidade.

Table 5. Area occupied by priorities classes in the maps produced through the three sensitivity analysis methods.

Classe de prioridade	Método Exploratório	Simulação de Monte Carlo		Módulo AHP-OWA
		Área (%)		
Muito baixa	1,33	1,24	1,22	
Baixa	19,24	18,67	18,26	
Média	34,52	34,70	33,89	
Alta	28,51	29,56	30,48	
Muito Alta	16,40	15,84	16,15	
Total	100,00	100,00	100,00	

Tabela 6. Matriz de confusão entre os mapas propostos pelos métodos de análise de sensibilidade: Exploratório e da simulação de Monte Carlo.

Table 6. Confusion matrix between the maps proposed by sensitivity analysis methods: Exploratory and Monte Carlo simulation.

Exploratório	Simulação de Monte Carlo					Total	Coincidência (%)
	Muito baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta		
Muito baixa	--					0	---
Baixa		6				6	100,00
Média			18			18	100,00
Alta			1	18		19	94,74
Muito alta				1	7	8	87,50
Total	0	6	19	19	7	52	96,15

Pontos Coincidentes

Tabela 7. Matriz de confusão entre os mapas propostos pelos métodos de análise de sensibilidade: Exploratório e disponível no módulo AHP-OWA.

Table 7. Confusion matrix between the maps proposed by sensitivity analysis methods: Exploratory and ready to use in AHP-OWA module.

Exploratório	módulo AHP-OWA					Total	Coincidência (%)
	Muito baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta		
Muito baixa	---					0	---
Baixa		6				6	100,00
Média			17	1		18	94,45
Alta				18	1	19	94,74
Muito alta				1	7	8	87,50
Total	0	7	17	20	8	52	92,31

Pontos Coincidentes

Tabela 8. Matriz de confusão entre os mapas propostos pelos métodos de análise de sensibilidade: simulação de Monte Carlo e disponível no módulo AHP-OWA.

Table 8. Confusion matrix between the maps proposed by sensitivity analysis methods: Monte Carlo simulation and ready to use in the AHP-OWA module.

Simulação de Monte Carlo	módulo AHP-OWA					Total	Coincidência (%)
	Muito baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta		
Muito baixa	---					0	---
Baixa		6				6	100,00
Média		1	17			18	94,44
Alta				21	1	22	94,45
Muito alta					6	6	100,00
Total	0	7	17	21	7		96,15

■ Pontos Coincidentes

As diferenças no primeiro par de mapas (métodos Exploratório e módulo AHP-OWA) são consequências, mais uma vez, dos pesos de fator. Mesmo utilizando o método AHP, nos dois casos, para a valoração da importância dos critérios, obtiveram-se diferentes pesos de ordenação (Tabela 4). Como a influência dos critérios não se altera, eles foram compensados de maneira um pouco distinta (Tabela 4). Os mapas de proximidades foram menos compensados (menor diferença de valores entre seus pesos de fator e ordenação) para se gerar o mapa de prioridade no módulo AHP-OWA do que para a análise com o método Exploratório. Isso foi o mesmo que ocorreu na geração do mapa de prioridades referente à simulação de Monte Carlo (Tabela 4) resultando, assim, no maior percentual de coincidência entre o segundo par de mapas de prioridades (simulação de Monte Carlo e AHP-OWA).

As estratégias de decisão propostas com os três métodos, i.e., os critérios e seus pesos, estão de acordo com os objetivos do processo decisório, apesar das diferenças observadas entre elas. Com as três soluções houve coerência entre os pesos de fator e os pesos de ordenação e, sendo possível que os critérios menos influentes no processo (mapas de distâncias e de vulnerabilidade à erosão) contribuíssem na definição das classes de prioridade, ou seja, essas classes não foram estabelecidas somente em função dos mapas de proximidades. Isto, mesmo sendo os mapas de proximidades entre fragmentos florestais e entre fragmentos com maior área nuclear, respectivamente, o primeiro e segundo critérios mais influentes desse processo de tomada de decisão.

O método Exploratório apresenta, contudo, como principal vantagem, a possibilidade de todo o processo de tomada de decisão ser desenvolvido no próprio SIG escolhido para desenvolvimento do estudo. Por outro lado, seu sucesso está intrinsecamente relacionado ao conhecimento do analista sobre a paisagem es-

tudada, os critérios selecionados e a influência deles no processo (SMITH e ZOLLNER, 2005). Isso porque é o analista quem propõem as alternativas de cenários (pesos de ordenação) para a análise de sensibilidade, subsidiado apenas por sua experiência a respeito dos componentes do processo. Malczewski (1999) ressalta que o ideal seria a participação de diferentes especialistas na realização dessa etapa. Chen *et al.* (2001), Phua e Minowa (2005) e Moffet *et al.* (2006) destacam que, apesar do alto nível de influência dos analistas, é possível, por meio desse método, validar o processo decisório.

O método disponível para a análise de sensibilidade no módulo AHP-OWA assemelha-se muito ao Exploratório, mesmo sendo sua base conceitual distinta (simulação Estocástica). Em AHP-OWA a análise gráfica, da influência dos critérios na prioridade de um determinado ponto, contribui para diminuir a subjetividade do processo de definição dos pesos de ordenação (BOROUSHAKI e MALCZEWSKI, 2008). Os autores destacam, ainda, a facilidade de avaliação concomitante do risco e compensação obtidos no processo decisório. Jankowski *et al.* (2001) e Voss *et al.* (2004) empregaram a simulação estocástica na validação de processos decisórios, contudo utilizando o SIG-CommonGis. Os autores destacam a flexibilidade e a amigabilidade conferida ao processo, em relação ao método Exploratório, além da confiabilidade.

A análise de sensibilidade pelo método da simulação de Monte Carlo, por sua vez, tem a vantagem de amenizar a influência do analista. O analista define as restrições para a produção dos cenários a partir de seu conhecimento sobre a paisagem, os critérios e a influência deles no processo decisório. As opções de cenário serão, contudo, produzidas por simulação. Elas podem, assim, representar alternativas não avaliadas com o método Exploratório. Neste estudo, por exemplo, observaram propostas de priori-

zação de áreas mais coerentes com os objetivos do processo, com esse método do que com o exploratório, quando se eliminaram os critérios vulnerabilidade à erosão e distâncias das fontes de distúrbio (malha viária e centros urbanos). A desvantagem do método, neste estudo, é não estar integrado ao SIG e, dessa forma, não ter sido estruturado para a execução de uma análise de sensibilidade espacial. Por consequência, tornou-se mais trabalhoso, requerendo operar concomitantemente um programa matemático e um SIG. Nestas mesmas condições, empregaram a análise autores como Saltelli *et al.* (1999), Hyde *et al.* (2004) e Smith e Zollner (2005). McIntyre e Wheeler (2004), Chow *et al.* (2005) e Moffet *et al.* (2006) ressaltaram a possibilidade de incorporação da simulação de Monte Carlo em SIGs, visto a confiabilidade do método e os resultados satisfatórios obtidos em seus estudos.

CONCLUSÃO

Os MCEM, em especial o método da MPO, são flexíveis, fáceis de serem implementados e, principalmente, permitem considerar a opinião de tomadores de decisão, expressas por meio dos critérios e de seus pesos. Os componentes do processo (critérios, pesos e prioridades) conferem, contudo, incertezas ao processo decisório, as quais podem ser avaliadas pela análise de sensibilidade. É essa análise que confere robustez ao processo, por meio da verificação da coerência entre os pesos de fator, de ordenação e da estratégia de decisão proposta. Necessita-se para isso de um método confiável de análise de sensibilidade.

Os três métodos de análise de sensibilidade avaliados, o Exploratório, da Simulação de Monte Carlo e o disponível no módulo AHP-OWA, permitiram a validação do processo decisório de maneira satisfatória. Neste trabalho apresenta-se o estudo de um processo estruturado dentro de um SIG e empregando o método da MPO, para a agregação dos critérios. Nestas condições, os métodos apresentaram vantagens e desvantagens, contudo, permitem estabelecer um padrão de análise de sensibilidade para trabalhos desenvolvidos com a Avaliação Multicriterial. Padrão que, em muitos estudos, pode ser a associação de dois desses métodos, em especial do método Exploratório e da Simulação de Monte Carlo. Uma das vantagens da simulação de Monte Carlo é a estruturação de um processo decisório com menor dependência do “conhecimento” de

seus analistas, principalmente, com a possibilidade de adaptação do método ao ambiente dos Sistemas de Informações Geográficas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de estudos concedida à primeira autora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRIENKO, G.L.; ANDRIENKO, N.V.; VOSS, H. GIS for everyone: the CommonGIS project and beyond. In.: PETERSON, M. (Ed). **Maps and the Internet**. Amsterdam: Elsevier Science, 2003. p.131-146.
- BOROUSHAKI, S.; MALCZEWSKI, J. Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operator with fuzzy. **Computer and Geosciences**, London, v.34, n.4, p.399-410, 2008.
- BUTLER, J.; JIA, J.; DYER, J. Simulation techniques for the sensitivity analysis of multi-criteria decision models. **European Journal of Operational Research**, London, v.103, p.531-546, 1997.
- CHEN, K.P.; BLONG, R.; JACOBSON, C. MCE-RISK: integrating multicriteria evaluation and GIS for risk decision-making in natural hazards. **Environmental Modelling & Software**, Kidlington, v.16, n. 4, p 387-397, 2001.
- CHERTOV, O.; KOMAROV, A.; MIKHAILOV, A.; ANDRIENKO, G.; ANDRIENKO, N.; GATALSKY, P. Geovisualization of forest simulation modeling results: a case study of carbon sequestration and biodiversity. **Computers and Electronics in Agriculture**, London, v.49, p.175-191, 2005.
- CHOW, T.E.; GAINES, K.F.; HODGSON, M.E.; WILSON, M.D. Habitat and exposure modeling for ecological risk assessment: A case of study for the raccoon on the Savannah River Site. **Ecological Modelling**, Kidlington, v.189, p.151-167, 2005.
- CROSETTO, M.; CROSETTO, F.; TARANTOLA, S. Optimized resource allocation for GIS-based model implementation. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Falls Church, v.68, n.3, p.225-232, 2002.

- DIAS, L.C.; CLÍMACO, J.N. Additive aggregation with variable interdependent parameters: the VIP analysis software. **Journal of the Operational Research Society**, Dordrecht, v.51, p.1070-1082, 2000.
- EASTMAN, J.R. **Decision support: decision strategy analysis: Idrisi 32 release 2: guide to GIS and image processing**. Worcester: Clark Labs, Clark University, 2001. v.2, 22p.
- FARINA, A. **Principles and methods in landscape ecology**. London: Chapman & Hall, 1998. 235p.
- FISHER, P.R.; ABRAHART, R.J. HERBINGER, W. The sensitivity of two distributed non-point source pollution models to the spatial arrangement of the landscape. **Hydrological Processes**, Wallingford, v.11, p 241-252, 1997.
- FORMAN, R.T.T. **Land mosaics: the ecology of landscapes and regions**. New York: Cambridge University, 1997. 632p.
- FORMAN, R.T.T.; COLLINGE, S.K. Nature conserved in changing landscapes with and without spatial planning. **Landscape and Urban Planning**, Amsterdam, v.37, p.129-135. 1997.
- GENELETTI, D. An approach based on spatial multicriteria analysis to map the nature conservation value of agricultural land. **Journal of Environmental Management**, New York, v.83, p.228-235, 2007.
- GENELETTI, D. Biodiversity impact assessment of roads: an approach based on ecosystem rarity. **Environmental Impact Assessment Review**, Amsterdam, v.23, p.343-365, 2003.
- GENELETTI, D. A GIS-based decision support system to identify nature conservation priorities in an alpine valley. **Land Use Policy**, Amsterdam, v.21, p.149-160, 2004.
- GENELETTI, D.; DUREN, I.V. Protected area zoning for conservation and use: a combination of spatial multicriteria and multiobjective evaluation. **Landscape and Urban Planning**, Amsterdam, v.85, p. 97-110, 2008.
- GKARAVELI, A.; GOOD, J.E.G.; WILLIAMS, J.H. Determining priority areas for native woodland expansion and restoration in Snowdonia National Park, Wales. **Biological Conservation**, Kidlington, v.115, p.395-402, 2004.
- GUTZWILLER, K.J.; BARROW JÚNIOR, W.C. Influences of roads and development on bird communities in protected Chihuahuan Desert landscapes. **Biological Conservation**, Kidlington, v.113, p.225-237, 2003.
- HARPER, K.T.; SANDERSON, S.C.; MCARTHUR, E.D. Riparian ecology in Zion National Park, Utah. **USDA. Forest Service. INT General Technical Report**, Ogden, n.298, p.32-42, 1992.
- HEUVELINK, G.B.M. **Error propagation in environmental modeling with GIS**. Londres: Taylor & Francis, 1998. 127p.
- HROMKOVIC, J. **Algorithms for hard problems: introduction to combinatorial optimization, randomization, approximation, and heuristics**. New York: Springer-Verlag, 2001.
- HYDE, K.M.; MAIER, H.R.; COLBY, C.B. A distance-based uncertainty analysis approach to multi-criteria decision analysis for water resource decision making. **Journal of Environment Management**, New York, v.77, p.278-290, 2005.
- HYDE, K.M.; MAIER, H.R.; COLBY, C.B. Reability-based approach to Multicriteria Decision Analysis for water resources. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Dordrecht, v.130, n.6, p.429-438, 2004.
- JANKOWSKI, P.; ANDRIENKO, N.; ANDRIENKO, G. Map-centred exploratory approach to multiple criteria spatial decision making. **International Journal of Geographical Information Science**, London, v.15, n.2, p.101-127, 2001.
- JIANG, H.; EASTMAN, J.R. Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. **International Journal of Geographical Information Science**, London, v.14, n.2, p.173-184, 2000.
- KANGAS, J.; KANGAS, A. Multiple criteria decision support in forest management: the approach, methods applied, and experiences gained. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.207, p.133-143, 2005.
- KANGAS, J.; STORE, R.; LESKINEN, P.; MEHTÄTALO, L. Improving the quality of landscape ecological forest planning by utilizing advanced decision-support tools. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.132, p.157-171, 2000.

- MALCZEWSKI, J. **GIS and multicriteria decision analysis**. New York: John Wiley, 1999. 362p.
- MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. **International Journal of Geographical Information Science**, London, v.20, n.7, p.703-726, 2006.
- MALCZEWSKI, J.; RINNER, C. Exploring multicriteria decision strategies in GIS with linguistic quantifiers: a case study of residential quality evaluation. **Journal of Geographical System**, Norman, v.7, n.2, p.49-268, 2005.
- MALCZEWSKI, J.; CHAPMAN, T.; FLEGEL, C.; WALTERS, D.; SHRUBSOLE, D.; HEALY, M. A. GIS-multicriteria evaluation with Ordered Weighted Averaging (OWA): developing management strategies for rehabilitation and enhancement projects in the Cedar Creek watershed. **Environment and Planning**, London, v.35, n.10, p.1769-1784, 2003.
- McINTYRE, N.R.; WHEATER, H.S. A tool for risk-based management of surface water quality. **Environmental Modelling & Software**, Kidlington, v.19, p.1131-1140, 2004.
- MENDOZA, G.A.; PRABHU, R. Multiple criteria decision making approaches to assessing forest sustainability using criteria and indicators: a case study. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.131, p.107-126, 2000.
- MOFFET, A.; DYER, J.S.; SARKAR, S. Integrating biodiversity representation with multiple criteria in North-central Namibia using non-dominated alternatives and a modified analytic hierarchy process. **Biological Conservation**, Kidlington, v.129, p.181-191, 2006.
- MUSTAJOKI, J.; HÄMÄLÄINEM, R.P.; MARTTUNEN, M. Participatory multicriteria decision analysis with Web-HIPRE: a case of lake regulation policy. **Environmental Modelling & Software**, Kidlington, v.19, p.537-547, 2004.
- NOSS, R.F.; O'CONNELL, M.A.; MURPHY, D.D. **The science of conservation planning: habitat-based conservation under the endangered species**. Washington: Island, Press, 1997. 154p.
- PHUIA, M.; MINOWA, M.A. GIS-based multi-criteria decision making approach to forest conservation planning at a landscape scale: a case study in the Kinabalu Area, Sabah, Malaysia. **Landscape and Urban Planning**, Amsterdam, v.71, p.207-222, 2005.
- ROSA, D.; MORENO, J.A.; MAYOL, F.; BONSON, T. Assessment of soil erosion vulnerability in Western Europe and potential impact on crop productivity due to loss of soil depth using the ImpelERO model. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.81, p.179-190, 2000.
- SAATY, T. **The analytic hierarchy process**. New York: McGraw-Hill, 1980. 287p.
- SALTELLI, A. What is sensitivity analysis? In.: SALTELLI, A.; CHAN, K.; SCOTT, E.M. **Sensitivity analysis**. Singapore: John Willey, 2000. p.3-27.
- SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; CHAN, K. A role for sensitivity analysis in presenting the results from MCDA studies to decision makers. **Journal of Multicriteria Decision Analysis**, London, v.8, n.3, p.139-145, 1999.
- SAUNDERS, D.A.; HOBBS, R.J.; MARGULES, C.R. Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review. **Conservation Biology**, Kidlington, v.5, p.18-32, 1991.
- SMITH, W.P.; ZOLLNER, P.A. Sustainable management of wildlife habitat and risk of extinction. **Biological Conservation**, Kidlington, v.125, p.287-295, 2005.
- STORE, R.; KANGAS, J. Integrating spatial multi-criteria evaluation and expert knowledge for GIS-based habitat suitability modelling. **Landscape and Urban Planning**, Amsterdam, v.55, p.79-93, 2001.
- SWEENEY, B.W.; CZAPKA, S.J. Riparian forest restoration: why each site needs an ecological prescription. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.192, p.361-373, 2004.
- VALENTE, R.O.A.; VETTORAZZI, C.A. Avaliação da estrutura florestal na Bacia do Rio Corumbataí, SP. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.68, p.45-57, 2005.

- VALENTE, R.O.A; VETTORAZZI, C.A. Definition of priority areas for forest conservation through the Ordered Weighted Averaging method. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.256, p.1408-1417, 2008.
- VARMA, V.K.; FERGUSON, I.; WILD, I. Decision support system for the sustainable forest management. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.128, p.49-55, 2000.
- VOOGD, H. **Multicriteria evaluation for urban and regional planning**. London: Pion, 1983. 125p.
- VOSS, A.; DENISOVICH, I.; GATALSKY, P.; GAVOUCHIDIS, K.; KLOTZ, A; ROEDER, S.; VOSS, H. Evolution of a participatory GIS. **Computers, Environment and Urban Systems**, London, v.28, p.635-651, 2004.
- YAGER, R.R. On Ordered Weighted Averaging aggregation operator in multicriteria decision-making. **IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics**, New York, v.8, n.1, p.183-190, 1988.

Recebido em 24/10/2008

Aceito para publicação em 22/06/2009

