

Sensibilidade de Fatores para Valoração do Ambiente com o Uso de Avaliação Multicritério e Geoprocessamento Digital

Mario Luiz Trevisan

Departamento de Expressão Gráfica – UFSM
eletroduto@gmail.com

Geraldo Lopes da Silveira, Jussara Cabral Cruz

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFSM
geraldo.ufsm@gmail.com; jussaracruz@gmail.com

Rafael Cabral Cruz

Centro de Ciências Rurais – UNIPAMPA/São Gabriel
rafaelcabralcruz@gmail.com

Recebido: 23/03/09 - revisado: 11/09/10 - aceito: 24/05/11

RESUMO

Este estudo trata sobre a sensibilidade em fatores adotados para avaliação multicritério ambiental na análise de favorabilidades ou restrições na seleção de locais para implantação de obras de infraestrutura hídrica no contexto de bacias hidrográficas. A tecnologia do geoprocessamento aliada às propriedades da análise multicritério são o enfoque geral deste estudo. Tomando como estudo de caso o relatório “Análise de Fragilidades Ambientais da Bacia Hidrográfica dos Rios Apuaê-Inhandava, situada na Região Hidrográfica do Rio Uruguai” (UFSM/FEPAM, 2005), classificada no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, como Bacia U010, foi feita uma variação regular nos pesos dos critérios para compor novos cenários. Após esta variação dos pesos nos mapas, utilizou-se o coeficiente estatístico matricial V de Cramér, indicador da similaridade entre as imagens. Os valores de V de Cramér foram tabulados como matrizes quadradas calculando-se as distâncias matriciais para realizar o Teste de Mantel, que dá a correlação entre as matrizes. A partir desses coeficientes foi possível realizar a análise da sensibilidade consistindo na comparação entre as matrizes ponderadas em termos de similaridade e correlação. Foi possível discriminar quais os pesos mais e menos significantes na composição cenográfica da avaliação multicritério. Relativizando os pesos em forma de intervalos, a fase seguinte consistiu em otimizá-los matematicamente. Os resultados foram comparados com o método de Saaty (1977) e com os pesos do relatório de origem. Com o conjunto de pesos atualizado, processa-se novo cenário, agora otimizado, a fim de ser rediscutido e/ou aceito. A inclusão do teste de sensibilidade no equacionamento multicritério mostrou-se potencialmente valioso para comparação da relevância entre mapas de fatores geoprocessados, proporcionando maior embasamento para os tomadores de decisão.

Palavras-chave: gestão de recursos hídricos; fragilidades ambientais; análise multicritério ambiental; hidrelétricas; barragens.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda da água disponível na natureza para os diversos usos que a humanidade reserva para si sob o nome de recurso hídrico, quando equacionada, resulta em desigualdade. Não é difícil verificar que, subtraindo-se uma variável crescente – a quantidade de água demandada pela humanidade (h) – de uma constante – a quantidade de água disponível (QA) – o valor decresce. Este desequilíbrio leva à constatação de que se deve aten-

tar imediata e profundamente para caminhos que visem o retorno ao equilíbrio. Uma solução óbvia seria o decréscimo da taxa de natalidade humana. Isso contribuiria para resolver, não só o problema da água, mas todos os outros problemas contemporâneos do *homo sapiens*, como também das outras espécies animais e vegetais, e do planeta como um todo. Apesar da racionalidade desta vereda, ela é utópica, cuja discussão é exterior ao estudo em pauta. Portanto, se na equação [$QA - h = \text{valor decrescente}$] reduzir h estiver fora de questão e alterar QA é impossível uma vez que é constante, uma alternativa é

a redistribuição e o uso racional da água enquanto for possível, e daí extrair lições úteis e viáveis para o futuro.

Num universo conflitante em que as demandas sociais, a pressão econômica e o estado da arte tecnológico não primam pela harmonia com o ambiente natural há que se procurar soluções que comecem a satisfazer requisitos tanto quantitativos como qualitativos relativos aos usos da água de modo a distribuir as benesses e os ônus com a maior equanimidade possível.

A questão presente é: como tomar decisões quanto ao projeto e implantação de empreendimentos hídricos quando esses fatores são colocados ao mesmo tempo?

Um dos meios encontrados para atender necessidades do crescimento populacional é a acumulação artificial de água em forma de barragens para fins como geração de energia elétrica, abastecimento e produção agrícola, entre outros. No Brasil, país dotado de generosa quantidade de recursos hídricos, tais aproveitamentos vêm sendo larga e crescentemente utilizados. Ocorre que, ao longo do século 20, predominantemente no último quartel, verificou-se que a implantação de barragens atendendo apenas às crescentes necessidades humanas e à viabilidade técnico-econômica, sem outras visões, tornava-se um tanto insatisfatório. Assim, fez-se necessário acrescentar outras variáveis aos estudos de viabilidade dos barramentos: recentemente, além da abordagem ambiental, aspectos de caráter subjetivo e afetivo também passaram a ser incorporados ao planejamento inicial. De modo que, o que se constituía anteriormente em uma visão relativamente simples, ou seja, “verificada-uma-demanda-construa-se-uma-barragem”, atualmente e doravante deve ser tratado num nível maior de complexidade, em que as atenções sejam tantas quanto forem os sinais de alerta. Em momentos de transição de paradigmas, quando se testam outras abordagens em situações conhecidas a fim de verificar suas adequabilidades, é natural que se depare com um equacionamento complexo cuja solução também evidencia grau de complexidade compatível.

Neste contexto, as técnicas de geoprocessamento junto às técnicas de análise multicritério buscando um ou mais objetivos, já aplicadas em Economia, aliadas à grande capacidade de armazenagem, recuperação e processamento de dados e imagens digitais dos computadores permitem que se mapeiem inúmeras variáveis e delas se extraiam alternativas viáveis para o problema. Em gestão de recursos hídricos (GRH) a exposição dessas alternativas perante os membros de um comitê de gerenci-

amento de bacia hidrográfica – que, como organismo colegiado legalmente constituído, representativo da sociedade que, em uma instância social, delibera, entre outras, sobre a pertinência da implantação de obras de infra-estrutura hídrica no meio físico da bacia hidrográfica (Lei 9.433/97-BR e Lei 10.350/94-RS (Rio Grande do Sul, [2003]) – vem em auxílio na tomada de decisão quanto à implantação de obras em rios.

A finalidade de uma avaliação (ou análise) multicritério é retornar uma nota sobre determinado objetivo a ser alcançado. Para isto, basicamente, é feito um equacionamento no qual constam os fatores a serem considerados, os pesos dados a esses fatores e uma hierarquização entre eles. Os fatores são também chamados critérios ou parâmetros. Os pesos são valores, preferencialmente entre 0 e 1, multiplicadores dos fatores. A nota evidenciada pelo resultado, que em geoprocessamento é chamada de mapa-síntese, expressa uma *favorabilidade* a um objetivo. Obtêm-se, finalmente, *cenários* diferenciados em função dos fatores ponderados.

No contexto geral da análise multicritério, este estudo localiza-se na etapa da atribuição de pesos aos fatores, isto é, de posse de fatores previamente selecionados para comporem uma avaliação multicritério, fez-se uma variação sistemática nos pesos de cada fator, para melhorar esta ferramenta de auxílio na tomada de decisão na gestão de recursos hídricos.

No Rio Grande do Sul, a técnica de análise multicritério para seleção de barragens em escala de bacia hidrográfica adotando o enfoque ambiental é bastante recente e inovadora. Neste estudo, buscando o refinamento desta metodologia e fazendo-se uma discussão sobre sua aplicabilidade, tomou-se como referência de pesquisa o Relatório da Bacia Hidrográfica dos Rios Apuaê-Inhandava, (UFSM/FEPAM, 2005). Esta bacia é também referida como U010 em função de ser a primeira do sistema de drenagem do Rio Uruguai, localizando-se no lado esquerdo deste, a partir de sua nascente, em território do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. O estudo de sensibilidade foi feito a partir de uma variação sistemática dos mapas de fatores do referido relatório, simulando novas relações de pesos entre eles. Os novos diferentes cenários criados foram úteis para a discussão e apresentação de resultados, bem como apresentação de sugestões.

A hipótese a testar, portanto, referiu-se à análise da sensibilidade em cenários obtidos pelo método de Avaliação Multicritério por combinação linear ponderada em relação à variabilidade dos pesos atribuídos aos fatores. Procuraram-se respostas

que viessem esclarecer se o resultado do processamento depende dos pesos atribuídos aos fatores e qual a contribuição da análise de sensibilidade na composição do conjunto de fatores. Ou seja, uma vez que os softwares, por si só, não têm a capacidade de decidir, mas apenas apresentar resultados numéricos em forma de mapas e tabelas, a escolha final compete ao(s) decisor(es), sendo fundamental que todos envolvidos compreendam a importância de uma escolha.

Em face do exposto, os objetivos deste estudo consistiram, num âmbito geral, em avaliar a sensibilidade de variáveis indicadoras da fragilidade ambiental, ou da favorabilidade à implantação de obras de infra-estrutura hídrica em escala de bacia hidrográfica em subsídio ao processo de tomada de decisão. Especificamente, os objetivos foram: (i) testar a sensibilidade em mapas de fatores quanto a pesos prioritários; (ii) otimizar os pesos; e (iii) comparar dos resultados do teste de sensibilidade com modelos existentes: métodos do Autovetor de Saaty e do Consenso Multidisciplinar.

FUNDAMENTAÇÃO

A primeira constituição republicana brasileira (1889) apresentava-se ainda incipiente em relação ao uso das águas. Quanto a esse aspecto, em 1904, o Decreto presidencial 5.407 regula os contratos de concessões de aproveitamentos hidrelétricos. Em 1907, o Jurista Alfredo Valadão redige o que se considera o embrião do Código de Águas, considerando a distinção entre águas públicas e particulares. Em 1934, com a promulgação do Código de Águas (Decreto nº 26.234) o Governo Provisório faz sua contribuição mais importante em matéria de norma jurídica de intervenção do Estado no domínio econômico (Dias, 1988). Nas décadas seguintes observa-se uma expansão do setor elétrico, porém ainda regionalizado. A partir da década de 60, projetos e obras de grande porte foram levados à sociedade adotando uma visão desenvolvimentista – o “milagre brasileiro”. Com a Constituição Federal de 1988 o domínio da água pertence à União e aos Estados, ou seja, toda água disponível no território nacional passa a ser pública. Observando-se as disposições da lei e a crescente importância dos recursos hídricos, a década 1990/2000 assistiu a uma rápida e controversa evolução da política ambiental: de um lado, recrudescer o questionamento sobre decisões tomadas à revelia das devidas considerações ambientais e, de outro, não faltaram mecanismos e

instrumentos legais, aparatos técnicos e metodológicos e soluções operacionais para prevenir e resolver problemas críticos de degradação ambiental (Ministério do Meio Ambiente, 2002). A partir da década de 1980 pode-se observar um redirecionamento no planejamento das obras sobre os recursos hídricos, coadunando com a visão ambiental e com maior atenção aos problemas sociais. Os Estudos de Impacto Ambiental / Relatórios de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) alcançam muito maior relevância e tornam-se exigência para o encaminhamento de tais empreendimentos. Netherer, in Verdum (2006), escreve que “os setores estudados e enfocados para a composição de EIA/RIMAs são: *Meio físico*: climatologia, hidrologia, geologia, geomorfologia e pedologia; *Meio biótico*: limnologia, reologia, oceanografia, flora terrestre, flora aquática, ictiofauna, fauna terrestre, avifauna e entomologia, zoonoses; *Meio antrópico*: economia, demografia, desenvolvimento urbano, sociologia, antropologia, legislação, saúde pública e arqueologia.”

Quanto à fundamentação legal, são vigentes para o Estado do Rio Grande do Sul as Leis: Lei Federal 9.433/1997 e Lei Estadual 10.350/1994 as quais ditam, entre outras regulamentações, que:

- a água é um bem de domínio público;
- é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;
- as atividades humanas devem buscar meios que assegurem aos usuários atuais e às gerações futuras padrões quantitativa e qualitativamente adequados;

Assim, atualmente a gestão de recursos hídricos depara-se com o importante e crítico problema de equacionar interesses conflitantes. Partindo-se da premissa de que todo empreendimento em bacias hidrográficas deve ser discutido em instâncias geográficas, sociais, ambientais, técnicas, públicas e particulares, a tomada de decisão deve ter algumas garantias racionais.

Conforme INPE (2005), “o conceito fundamental dos vários modelos de tomada de decisão é o de *racionalidade*.” De acordo com este princípio, indivíduos e organizações seguem um comportamento de escolha entre alternativas, baseado em critérios objetivos de julgamento, cujo fundamento será satisfazer um nível pré-estabelecido de aspirações.

O modelo racional de tomada de decisão preconiza quatro passos que devem ser seguidos para uma escolha apropriada (INPE, 2005): *Definição*

do problema: formular o problema como uma necessidade de chegar a um novo estado; *Busca de alternativas*: estabelecer as diferentes alternativas (aqui consideradas como as diferentes possíveis soluções do problema) e determinar um critério de avaliação; *Avaliação de alternativas*: cada alternativa de resposta é avaliada; e *Seleção de alternativas*: as possíveis soluções são ordenadas, selecionando-se a mais desejável ou agrupando-se as melhores para uma avaliação posterior.

Este modelo pode ser adequado à tomada de decisão auxiliada por análise multicritério.

Cruz et al. in: Silveira e Cruz (2005) conceituam análise multicritério como “um procedimento que tem por objetivo atribuir um índice (nota final, valor síntese) a um processo (objetivo da valoração) em função de diferentes aspectos valorados por critérios pré-definidos.” Basicamente, os métodos desenvolvidos para processamento de análise multicritério poderiam se expressar mediante uma combinação linear ponderada, que pode ser melhorada sensivelmente com a adição de pesos aos fatores. Miranda (2005) explica que essa combinação, expressa pela Equação 1, **produz um mapa de aptidão** (sem grifo no original):

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i * \prod_j r_j \quad (1)$$

em que:

S é a aptidão;

w_i é o peso do fator i ;

x_i é o valor do fator i ;

r_j é o valor da restrição j .

Na Equação 1 existe um produtório, que deve ser usado se existirem fatores totalmente restritivos (ou atritantes) quando da combinação dos mapas. Tais fatores, na prática, podem ser as unidades de conservação previstas em lei, áreas de preservação cultural, etc.

Conforme Miranda (2005) “este método de avaliação consiste em fazer uma escolha entre alternativas levando em conta vários critérios. A manipulação de ‘vários critérios’ tornou popular o uso do termo ‘multicritério’ nessa metodologia.”

Para Ministério do Meio Ambiente (2002) a Análise Multicritério está “fundamentada nos conceitos e métodos desenvolvidos no âmbito de disciplinas como a economia, a pesquisa operacional, a teoria da organização e a teoria social das decisões, nasceu num contexto crítico ao modelo racional

clássico da teoria das decisões, deslocando a abordagem, de uma configuração na qual os decisores e os critérios são únicos, para uma configuração que considera a pluralidade dos atores e critérios e a imperfeição da informação. Aplica-se à tomada de decisão [...] que pressupõe realimentação, revisões e reformulações no curso do processo.”

Segundo Braga e Ribeiro (2006), “a análise por múltiplos critérios, em geral denominada de multicritério ou multiobjetivo, permite levar em consideração, simultaneamente, objetivos social, econômico, ambiental e político.”

Partindo-se dessa fundamentação, construiu-se este estudo de análise de sensibilidade de fatores usados em avaliação multicritério visando o uso racional das águas para o desenvolvimento regional integrado.

METODOLOGIA

Modelagem conceitual

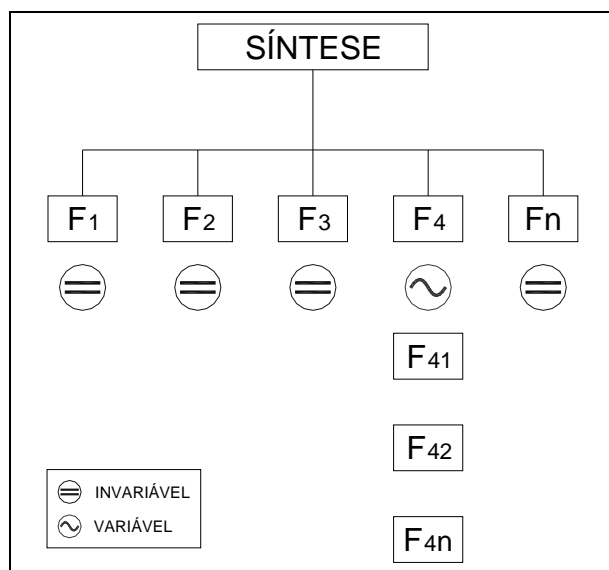


Figura 1 – Esquema da modelagem da sensibilidade

A construção de um cenário a partir de fatores variáveis consiste no objetivo maior de uma avaliação multicritério. A palavra avaliação aqui remete à atribuição de valores – ou valoração – de mapas temáticos, denominados fatores, de modo a que se construa um conjunto de mapas cujos pesos somam 1, formando um vetor de valores, resultando num cenário (ou mapa-síntese) particular e único

para aquele contexto. Variando-se os pesos dos fatores, haverá uma modificação final no mapa-síntese.

O conceito de sensibilidade – para este estudo – considera as diferenças entre cenários resultantes de processamento da avaliação multicritério quando se faz a variação do peso de um fator mantendo-se os demais iguais. A Figura 1 exemplifica de modo genérico este processo. Nela são mostrados fatores (F_1 a F_n), esquematizando-se uma variação do peso de F_4 enquanto os demais são mantidos com pesos iguais para cada etapa.

A variação dos pesos é arbitrária. Para o estudo estipulou-se a variação sistemática decimal para o vetor de pesos, que deve somar 1, por meio da Equação 2:

$$w + \sum w_{df} = 1 \quad (2)$$

em que:

w = peso decimal atribuído ao fator (w varia de 0,1 a 0,9 com intervalo de 0,1)

w_{df} = peso de cada um dos demais fatores (calculado por $(1-w)/(nf-1)$, sendo nf o número total de fatores)

O termo w_{df} da Equação 2 determina o valor do peso dos demais fatores. Assim, por exemplo, se o peso atribuído ao fator em variação for 0,3 e o número total de fatores for 5, então o peso para os outros fatores será 0,175, resultante do cálculo de $[(1 - 0,3) / (5 - 1)]$.

A explanação geral do método é feita a seguir, observando-se a Figura 2, que mostra o fluxograma completo da modelagem conceitual da metodologia.

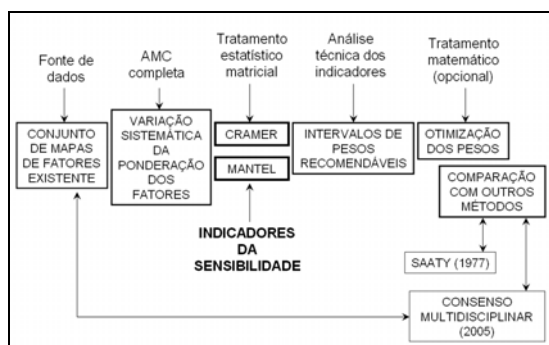


Figura 2 – Modelagem conceitual da metodologia

A partir de um conjunto de mapas de fatores processa-se uma avaliação multicritério (AMC) completa variando-se sistematicamente os pesos de cada fator. Comparam-se os resultados obtidos das ponderações com o resultado em que os pesos são iguais. As comparações são submetidas a tratamento estatístico matricial, através dos índices V de Cramér (Cramér, 1999) e do Teste de Mantel (Mantel, 1967; Hood, 2006), obtendo-se valores em de pesos em intervalos recomendáveis para cada fator, consistindo na fase enfática do método. Neste estudo foi feita a comparação com o Método de Saaty (1977), por ser de uso consagrado, e com o Método do Consenso Multidisciplinar utilizado no relatório de origem dos dados (UFSM/FEPAM, 2005).

Processamento

Para o tema proposto neste estudo foi selecionada a bacia hidrográfica dos rios Apuaê-Inhandava (bacia U010), com área de 10.000 km², localizada na cabeceira do Rio Uruguai, a norte-nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. O rio também serve como indicação da divisão político-administrativa com o Estado de Santa Catarina, da federação brasileira. O mapeamento básico temático já processado consta no relatório intitulado “Análise de Fragilidades Ambientais da Bacia Hidrográfica dos Rios Apuaê-Inhandava, situada na Região Hidrográfica do Rio Uruguai” (UFSM/FEPAM, 2005). Neste, agruparam-se as restrições (atritos) em um único bloco (Tabela 1) e os mapas dos fatores ponderáveis foram agrupados em cinco grandes blocos temáticos, conforme mostra a Tabela 2.

É importante observar que a composição mostrada nas Tabelas 1 e 2 pode sofrer modificações em função das restrições e variáveis sob análise que serão definidas para cada bacia.

Tabela 1 – Composição das restrições temáticas

TIPO DE MAPA (BLOCO)	ATRITO (EXCLUDENTE)
Restrição	Áreas indígenas
	Unidades de conservação
	Zona núcleo da reserva biológica da mata atlântica

Tabela 2 – Composição dos mapas de blocos temáticos e mapas de fatores

BLOCO TEMÁTICO	FATOR
Meio antrópico	Áreas urbanas
	Índice fundiário
	Marcos de fronteiras
	Rodovias
	Rotas de tropeiros
Meio aquático	Ângulo de confluências entre rios
	Densidade de confluências na drenagem
	Distância entre tributários
	Endemismo
	Fauna íctica
Meio biótico terrestre	Áreas de alto valor para a biodiversidade
	Fauna terrestre
	Reserva biológica da mata atlântica
	Vegetação
Meio físico: qualidade da água	Áreas agrícolas
	Áreas de mineração
	Carga metal
	DBO esgotos urbanos
	DBO indústria
Meio físico terrestre	DBO rebanhos
	Declividades
	Geologia,
	Geomorfologia
	Solos

Para a análise da sensibilidade fez-se o processamento de todos os fatores, bloco a bloco, atribuindo-se pesos que variam de 0,1 a 0,9 num dos fatores e mantendo-se os demais iguais, ou seja, distribuindo-se igualmente para os outros fatores a diferença entre o peso atribuído ao fator sob variação e a unidade. Também foi feita a composição homogênea (todos os pesos iguais cujo somatório atinge 1).

Foi processada uma composição Saaty (processo hierárquico analítico) para cada conjunto que, juntamente com os cenários do relatório-fonte, permitiram a comparação dos resultados.

Análise de sensibilidade

Considerando-se no geoprocessamento que os citados fatores são mapas na forma raster, logo,

matrizes numéricas digitais, buscaram-se índices estatísticos adequados. A resposta sensível relativa à ponderação dos mapas de fatores foi analisada por intermédio de dois indicadores: V de Cramér e Teste de Mantel. O primeiro é um índice que se obtém através da similaridade de imagens, variando de 0 a 1, indicando respectivamente ausência de correlação e total correlação entre imagens rasterizadas. Quando comparada ao mapa homogêneo, onde todos os pesos são iguais, a relevância desta informação reside na maior importância para os *menores* valores de V, uma vez que são mais discriminantes. Foram tabuladas em forma de matriz quadrada todas as combinações da ponderação dos fatores prescrita pela Equação 2.

O teste de Mantel, que pode variar de -1 a 1, também indica uma correlação entre matrizes. Em síntese, este teste calcula a correlação entre duas matrizes previamente distanciadas. Desta forma, fez-se o processamento das distâncias entre todas as matrizes do V de Cramér de todos os fatores e em seqüência fez-se a comparação, duas a duas, a fim de obter a correlação entre elas.

Assim, a sensibilidade foi enfocada sob estes indicadores:

- V de Cramér, por ser o indicador direto da similaridade entre duas imagens;
- Correlação de Mantel, por comparar os índices de similaridade das diversas imagens.

Quanto ao V de Cramér foram observadas cinco situações gerais quando se comparou os mapas ponderados com o mapa homogêneo: 1) Regular com pouca variação nos valores; 2) Regular crescente; 3) Regular decrescente; 4) Regular, porém distanciada entre os fatores; e 5) Irregular.

A interpretação destas situações é da maior relevância e pode servir de “chave interpretativa” para qualquer conjunto de fatores, considerando-se os seguintes comentários:

- 1) *Regular com pouca variação nos valores*: indica que o índice de Cramér não é suficiente para mostrar diferenças significantes nos cenários. Em outras palavras, a variação dos pesos dos fatores não conduz a uma discriminação entre os mesmos. Agrava-se este quadro se os valores deste índice forem altos, tornando-se menos úteis para a análise da sensibilidade. Neste caso, a análise deve prosseguir utilizando-se o Teste de Mantel;

- 2) *Regular crescente*: a dependência direta entre peso-Cramér indica que Cramér é baixo nos baixos pesos. Esta alta discriminância contribui positivamente para a análise. É a melhor situação, tendo-se em vista que se deseja distribuir pesos sem excessos particulares;
- 3) *Regular decrescente*: a dependência inversa entre peso-Cramér mostra que Cramér é baixo nos altos pesos. Caso se opte por seguir a discriminância dada por este indicador, estar-se-á supervalorizando o(s) fator(es). A continuidade da sensibilidade neste caso impõe que se adote um limite superior para o(s) peso(s), na ordem de 0,5, e se observe os padrões do Teste de Mantel;
- 4) *Regular, com distância entre um ou mais fatores*: na busca dos menores valores de V, a observação deste gráfico indica que se deve prosseguir a análise com os outros indicadores para os fatores que estiverem mais próximos entre si. Se um fator estiver distinto dos demais e apresentando regularidade “horizontal” com altos valores de V, este fator é de pouca relevância para a análise. Sob este índice, é um fator consideravelmente descartável ou, na hipótese de sua permanência, ser minimizado no processo;
- 5) *Irregular*: a irregularidade na curva de um fator indica que se deve atentar intensamente na atribuição de pesos, uma vez que a variabilidade de peso pode, ora aumentar, ora diminuir, a importância discriminante do índice de Cramér. Os pesos devem ser buscados em função das regiões onde se observam flexões nos baixos valores de V.

Quanto ao Teste de Mantel, se Cramér apresenta uma similaridade entre matrizes, Mantel mostra a correlação advinda de um relacionamento espacial entre as células de duas matrizes distanciadas (distance matrix), de modo que, ao processar o Teste de Mantel nas matrizes dos valores de V de Cramér transpostos simetricamente, obtém-se uma correlação espacial numa matriz quadrada onde a diagonal principal se anula (pois em Cramér elas são todas iguais a 1).

O intervalo da correlação varia de -1 a 1, associando-se os valores próximos a zero à baixa correlação.

Baixas correlações de Mantel significam que as matrizes de V de Cramér e, conseqüentemente, os respectivos mapas de fatores são menos dependentes entre si. Os pesos atribuídos a um serão tão menos “aditivos” a outro quanto menor sua correlação.

As altas correlações de Mantel significam maior dependência entre os mapas de fatores. Em outras palavras, atribuir pesos a um e a outro concomitantemente resulta em efeitos sinérgicos entre eles. Para este caso, o teste permite verificar a redundância entre fatores.

De modo que, em ambos os casos, baixa ou alta correlação, há que se tomar redobrado cuidado quanto aos seus efeitos – respectivamente independentes para as baixas correlações ou aditivos (sinérgicos) para as altas correlações – no enfoque estatístico do geoprocessamento digital matricial.

Quanto aos fatores medianamente correlacionados – aproximadamente entre 0,4 e 0,8 – estes merecem maior atenção (maior discussão) relativa à importância do tema do fator no caso em que haja dúvidas acerca da atribuição de pesos. Ou seja, enfatiza a necessidade do conhecimento específico no contexto da multidisciplinaridade.

Cenários otimizados

Dado o exposto, verificou-se a necessidade de redimensionar e redistribuir os pesos.

A busca pelo refinamento da avaliação multicritério, com a finalidade de melhor aproveitar o efeito discriminante de cada mapa/fator, leva ao que neste estudo se denominou *otimização dos pesos*, considerado como um processo matemático que faz ajustes de valores, adequando-os a possibilidades alternativas. Observando-se e interpretando-se esses indicadores quanto à estatística matricial é possível melhorar o processamento da avaliação multicritério. A otimização foi feita a partir de *intervalos de pesos* advindos dos indicadores de sensibilidade – Cramér e Mantel – condicionando-se também o somatório final da ponderação em 1, obtendo-se um (ou mais) cenário otimizado. Este foi comparado com o cenário processado pelo método de Saaty e com os cenários apresentados pelo método consensual do Relatório UFSM/FEPAM.

RESULTADOS

A sobreposição das correlações de Cramér para os cinco blocos temáticos é mostrada no Gráfico 1. Observou-se que as tendências correlacionais decresceram com o aumento dos pesos. A partir do peso 0,4 os blocos dos meios antrópico, aquático e físico qualidade da água demonstraram decréscimo acentuado, enquanto os blocos dos meios biótico terrestre e físico terrestre mantiveram-se relativa-

mente constantes. Considerando-se que o somatório dos pesos dos cinco blocos deve igualar a unidade, é recomendável distribuir os mesmos de modo que nenhum exceda este limite de 0,4 para não supervalorizar um tema.

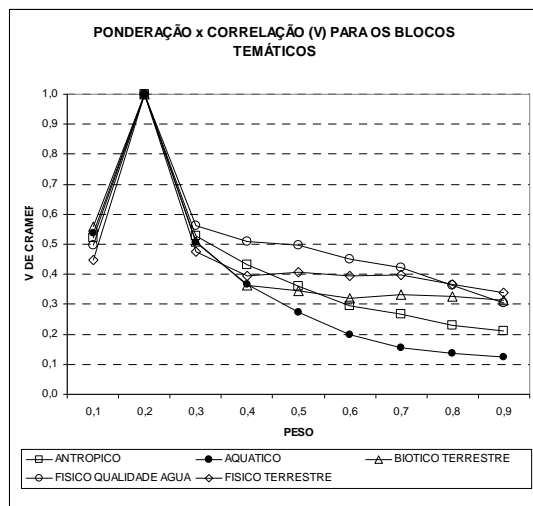


Gráfico 1 – Ponderação x correlação entre blocos

Assim, a ponderação dos cinco blocos foi distribuída como segue: antrópico: 0,1, aquático: 0,35, biótico terrestre: 0,35, físico qualidade da água: 0,1, e físico terrestre: 0,1. Na Tabela 3 são mostradas as ponderações derivadas dos três métodos: Consenso Multidisciplinar (UFSM/FEPAM, 2005), Saaty (1977) e do presente trabalho.

Tabela 3 – Comparação das ponderações dos blocos a partir dos três métodos

BLOCO TEMÁTICO		PESO		
		UFSM/FEPAM (2005) – Cenário 1	SAATY (1977)	APLICAÇÃO DA SENSIBILIDADE
ANTRÓPICO		0,05	0,2197	0,1
AQUÁTICO		0,4	0,0344	0,35
BIÓTICO TERRESTRE		0,2	0,4732	0,35
FÍSICO	QUALIDADE DA ÁGUA	0,2	0,1919	0,1
	TERRESTRE	0,15	0,0808	0,1
	Σ	1,00	1,00	1,00

Os valores tabulados mostram que as maiores diferenças entre os métodos encontram-se no bloco do Meio Aquático, em que o método de Saaty praticamente não prioriza, enquanto os outros enfatizam. Para o bloco do Meio Biótico Terrestre inverte-se esta situação. Uma situação intermediária pode ser observada para o bloco do Meio Antrópico. As

maiores aproximações relativas foram encontradas para os blocos dos meios Físico Terrestre seguido do Meio Físico Qualidade da Água.

Quanto à correlação de Mantel entre pares de blocos (Gráfico 2) todos apresentam dependência entre si, uma vez que a menor correlação é 0,67. As altas correlações, maiores que 0,8, observadas em seis pares de blocos demonstram uma acentuada interrelação, em outras palavras, um efeito sinérgico entre blocos. Ou seja, deve-se atentar para altas ponderações entre esses pares a fim de evitar efeitos aditivos excessivos no conjunto.

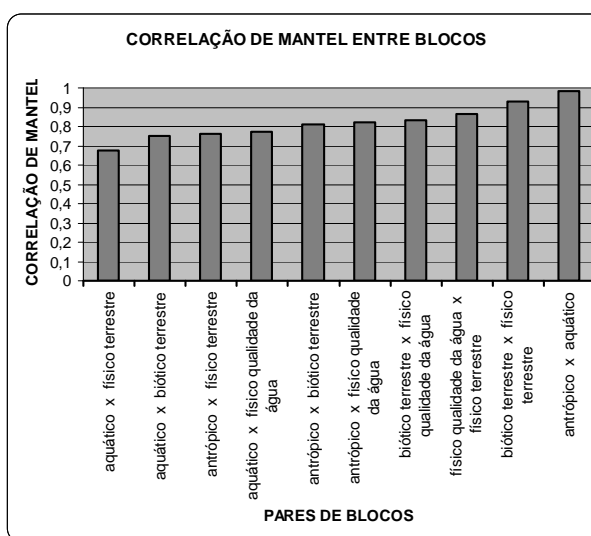


Gráfico 2 – Correlação de Mantel entre blocos

CONCLUSÕES

A inclusão do teste de sensibilidade no processo da avaliação multicritério, em que se obtiveram cenários a partir da reponderação sistemática dos fatores, do refinamento oriundo dos indicadores estatísticos e da otimização multidisciplinar dos pesos, permitiu algumas observações conclusivas, bem como sugestões para outros estudos.

O teste de sensibilidade proposto evoluiu significativamente o processo de seleção de fatores para avaliações multicritério, ou seja, sua inclusão revelou redundâncias entre fatores e evidenciou a importância digital dos mesmos, reduzindo discussões supérfluas quando de sua ponderação.

A comparação do modelo proposto pela análise de sensibilidade com os cenários do relatório UFSM/FEPAM (2005) levou à constatação da necessidade de aplicação do teste de sensibilidade numa

etapa intermediária do processo, proporcionando sua depuração.

O índice estatístico V de Cramér e o Teste de Mantel foram adequados para a realização da análise de sensibilidade.

Os intervalos de pesos extraídos da *discriminância* revelada pelos índices estatísticos V de Cramér e Teste de Mantel foram adequados para a análise de sensibilidade.

A comparação com o Método de Saaty evidenciou as diferenças entre um método puramente matemático (Saaty) e um método mais flexível que permita a interferência humana em fases intermediárias do processo.

A experiência adquirida no presente estudo permite algumas sugestões. Em termos numéricos, sugere-se que a ponderação dos fatores seja limitada no intervalo entre 0,05 e 0,5 (variando de 0,05 em 0,05) em vez de 0,1 a 0,9 (variando de 0,1 em 0,1). Justifica-se esta recomendação pelo fato de que ponderar um mapa acima de 0,5 em relação aos demais consiste em exagerar ou supervalorizar o critério em foco.

Ao iniciar o processo de uma avaliação multicritério seu objetivo deve ser claramente especificado a fim de que a modelagem do problema contemple suas necessidades em função das especificidades.

O mapeamento temático dos fatores é de substancial importância e deve ser bastante conhecido para a composição do processamento da avaliação multicritério.

Cada caso, cada bacia, independentemente de tamanho, é singular no espaço e mutante no tempo, motivo pelo qual cumpre que se registre nossa reserva quanto a otimizadores e modelos temáticos para fins ambientais. Dada a novidade, considera-se temerário estabelecer neste momento algum modelo desta natureza, por isso sugerem-se mais experimentos na mesma linha no intuito de estabelecer aproximações, conexões e tendências.

Enfim, esta abordagem deve ser compreendida como um auxílio para a tomada de decisão. As ferramentas de sistemas de informação geográfica, geoprocessamento e avaliação multicritério em meio digital enfocadas neste estudo não devem ser vistas como um substitutivo em qualquer das instâncias do processo da gestão dos recursos hídricos e ambientais. Portanto, qualquer decisão final não deve prescindir da consideração de valores afetivos, culturais, éticos e morais da sociedade, pautando-se pela racionalidade científica e pelo bom-senso conduzidos democraticamente.

REFERÊNCIAS

- BRAGA, C. F. C., RIBEIRO, M. M. R., **Avaliação por múltiplos critérios e decisores de alternativas de gerenciamento da demanda de água**, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 11, n. 1, p. 37-49, Porto Alegre, 2006.
- CRAMÉR, H., **V de Cramér**, Mathematical methods of statistics, Princeton University Press, 1999. Disponível em: <http://planetmath.org/encyclopedia/CramersV.html> Acesso em 17 jan. 2011.
- DIAS, R. F. (coord.), **Panorama do setor de energia elétrica no Brasil**, Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, Rio de Janeiro, 1988, 333p.
- HOOD, G. M., **PopTools versão 2.7.5**, Austrália, 2006. Disponível em: <http://www.cse.csiro.au/poptools>. Acesso em 20 out. 2007.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Software SPRING v.4.3**. São José dos Campos: INPE, 2005.
- MANTEL, N., **The detection of disease clustering and a generalized regression approach**, Cancer Research 27 (2), p. 209-220, 1967. Disponível em http://en.wikipedia.org/wiki/Mantel_test Acesso em 21 jan. 2011.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, **Avaliação ambiental estratégica**, MMA/SQA, Brasília, DF, 2002, 92p.
- MIRANDA, J. I., **Fundamentos de sistemas de informações geográficas**, EMBRAPA, Brasília, DF, 2005, 425p.
- RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Meio Ambiente – SEMA, **Legislação de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, RS, [2003].
- SAATY, T. L., **A scaling method for priorities in hierarchical structures**, Journal Mathematics and Psychology, v. 15, n. 1, p. 234-281, 1977.
- SILVEIRA, G. L. da, CRUZ, J. C., (org.), **Seleção ambiental de barragens: análise de favorabilidades ambientais em escala de bacia hidrográfica**, UFSM, AB-RH, RS, 2005.
- UFSM/FEPAM, **Análise de fragilidades ambientais da bacia hidrográfica dos rios Apuaê-Inhandava, situada na região hidrográfica do rio Uruguai**, Relatório Técnico Final, FEPAM/FATEC/UFSM, 2005.
- VERDUM, R., MEDEIROS, R. M. V. (org.s), **RIMA: Relatório de impacto ambiental – legislação, elaboração e resultados**, 5 ed., UFRGS, Porto Alegre, RS, 2006.

***Sensitivity of Factors Used to Value the Environment
With Multicriteria Evaluation and Digital
Geoprocessing***

ABSTRACT

This study concerns the sensitivity of factors adopted for environmental multicriteria evaluation during the analysis of favorable aspects or restrictions when selecting sites to implant hydric infrastructural public works in the context of hydrographic basins. The study focuses on the geoprocessing technology connected with multicriteria analysis characteristics. The case study is a report on the Analysis of Environmental Fragilities in the Hydrographic Basin of the rivers Apuaê-Inhandava, located in the Hydrographic Region of Uruguay River (Portuguese - “Análise de Fragilidades Ambientais da Bacia Hidrográfica dos Rios Apuaê-Inhandava, situada na Região Hidrográfica do Rio Uruguai”) (UFSM/FEPAM, 2005), classified as Basin U010 in Rio Grande do Sul State. A regular variation of the criteria values was performed to create new scenarios. It was carried out a regular variation of the criteria values to set the new scenarios. After this value variation in the maps, the statistical matrix coefficient Cramer's V was used, to indicate similarity among the images. The Cramer's V values were tabulated as square matrixes, calculating the matrix distances to perform the Mantel Test which gives the correlation among the matrixes. Based on these coefficients the sensitivity analysis was carried out according to the comparison among the weighted matrixes analyzing similarity and correlation terms. The more or less significant values were recognized in the scenographic composition of the multicriteria evaluation. Organizing the relative values as intervals the next phase consisted of optimizing them mathematically. The results were compared with the Saaty (1977) method and with the values from the original report. Once the set of values was updated, the new and optimized scenario was processed for the purpose of discussing it or making it acceptable. The inclusion of the sensitivity test in the multicriteria equation was potentially important to compare the relevance of maps of geoprocessed factors providing a base for decision-making.

Keywords: hydric resources management, environmental fragilities, environmental multicriteria analysis, power plans, dams.