

Aplicação de Métodos Multicriteriais ao Planejamento de Recursos Hídricos

Antonio Carlos Zuffo

FEC-UNICAMP – Campinas, SP - zuffo@fec.unicamp.br

Luísa Fernanda R. dos Reis

EESC-USP – São Carlos, SP - fernanda@sc.usp.br

Rozely Ferreira dos Santos

FEC-UNICAMP – Campinas, SP - roze@fec.unicamp.br

Fazal Hussain Chaudhry

EESC-USP – São Carlos, SP - fazal@sc.usp.br

Recebido: 17/10/01 - revisão: 20/12/01 - aceito: 25/02/02

RESUMO

Em planejamentos de recursos hídricos os cursos d'água devem ser avaliados sob uma perspectiva sistêmica e integrada ao seu meio. Para tanto há a necessidade de se analisar aspectos ambientais e sociais de difícil inserção e comparação com aspectos técnicos e econômicos, mais facilmente quantificados. Neste sentido, algumas experiências têm sido realizadas através do uso de alguns métodos multicriteriais. Este trabalho objetiva avaliar os resultados de diferentes métodos multicriteriais que incorporam características ambientais, sociais, técnicas e econômicas comumente utilizadas em estudos de planejamento de recursos hídricos supondo uma visão ecossistêmica do meio. A área de estudo adotada foi a bacia do Baixo Cotia, localizada na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), e o objetivo central foi o planejamento para a reabilitação, expansão e conservação do sistema produtor de água potável. Foram adotados 20 critérios e nove diferentes alternativas para o estudo do problema os quais foram aplicados cinco diferentes métodos de auxílio à tomada de decisão. Os cinco métodos utilizados foram: ELECTRE II, PROMETHEE II, Programação por Compromisso (CP), Teoria dos Jogos Cooperativos (CGT) e o método Analítico Hierárquico (AHP). Os métodos multicriteriais foram aplicados a quatro combinações distintas de pesos atribuídos aos critérios, obtidos através de consulta por questionário estruturado a especialistas. Dos cinco métodos utilizados quatro apresentaram resultados praticamente coincidentes. A inserção de critérios ambientais e sociais foi considerada viável, possibilitando a melhoria do processo de tomada de decisão para a escolha de alternativas.

Palavras-chave: planejamento e gestão de recursos hídricos; análise multicriterial; reuso de água; métodos multicriteriais; tomada de decisão.

INTRODUÇÃO

No Brasil, mais acentuadamente nas últimas duas décadas, períodos prolongados de secas ou de chuvas têm causado grandes prejuízos econômicos e sociais em várias regiões do país. Um exemplo foi o racionamento de energia elétrica na Região Sul, por falta de chuvas e, posteriormente, grandes áreas dos Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul atingidas pelas cheias, por abundância de chuvas no verão de 1982-83. Também a região metropolitana de São Paulo (RMSP), em 1992, viu-se às portas de um racionamento e corte no

abastecimento de água, pois os reservatórios Billings e Guarapiranga, que abastecem parte da RMSP, encontravam-se em níveis muito baixos. A região metropolitana de Curitiba, no Estado do Paraná, em 1997, assim como ocorrido na RMSP em 1992, após dois anos consecutivos de poucas chuvas viu-se às margens de um racionamento de água. O exemplo mais recente é o de racionamento de energia elétrica nas regiões Sudeste/Centro-Oeste/Nordeste em 2000, pois os reservatórios do sistema gerador de energia hidroelétrica estavam com níveis muito inferiores aos normais, por anos seguidos de poucas chuvas, e principalmente pelo

aumento do consumo de eletricidade. O prolongamento dessa estiagem agravou a situação dos reservatórios e em 2001 o Brasil inteiro viu-se obrigado ao racionamento de energia elétrica, com o risco de “apagões”. Nossa matriz energética continua sendo a hidroelétrica e um período prolongado de poucas chuvas, juntamente com a falta de investimentos no setor, levou o País a uma grave crise de energia.

Quando o problema não está na quantidade, ele está na qualidade da água disponível. Em julho de 1997, a SANASA – empresa municipal de saneamento da cidade de Campinas, São Paulo – alertou a população para não ingerir a água proveniente do sistema de abastecimento público. A SANASA não conseguia garantir a qualidade do tratamento das águas do principal manancial da cidade, o rio Atibaia, responsável por 90% de todo seu abastecimento. Esses problemas hídricos têm se repetido em diferentes locais e em períodos de tempo variados.

A RMSP, apesar de estar localizada sobre o vale de um rio de razoável porte, como é o caso do rio Tietê, não pode lançar mão de suas águas para o abastecimento urbano. A poluição do rio Tietê chegou a níveis tais que não se pode garantir um padrão mínimo de potabilidade sem que os custos de tratamento dessas águas sejam extremamente elevados. Isso mostra que, apesar do elevado crescimento da demanda hídrica ocorrido nos últimos anos, principalmente, no abastecimento urbano e industrial, irrigação e energia elétrica, o gerenciamento dos serviços correspondentes não parece ter amadurecido na mesma proporção. Pelo contrário, aparentemente, tornou-se complexo e confuso, através de demanda e oferta hídrica desorientadas.

O planejamento de recursos hídricos passa atualmente por um período de reformulação de seus procedimentos de avaliação de alternativas e no desenvolvimento de técnicas correspondentes. Essa mudança parte da tradicional análise benefício-custo para a análise multicriterial. A principal desvantagem da primeira em relação à segunda, é a impossibilidade de incluir outros objetivos, além da maximização dos benefícios econômicos ou minimização dos custos.

No Brasil, não se tem ainda o planejamento multiobjetivo formalizado, apesar de alguns esforços nessa área (Fricke et al., 1989; Braga et al., 1991; Gobetti, 1993; Barbosa e Gobetti, 1995; Barbosa et al., 1996; Zuffo, 1998 entre outros), e a análise de benefício-custo continua sendo a principal ferra-

menta de avaliação de projetos. Não são percebidas, portanto, as limitações de sua abrangência. Mais precário é o reconhecimento das possibilidades de associação entre o planejamento multiobjetivo e a valorização ambiental, para assegurar que tomadas de decisão, sobre recursos hídricos, sejam técnica e ambientalmente sustentáveis.

Este trabalho objetiva nessa direção, incorporando critérios sociais e ambientais, além dos técnicos e econômicos, para uma análise multicriterial de auxílio à tomada de decisão em planejamento de recursos hídricos.

Foram adotados cinco diferentes métodos multicriteriais para avaliar nove diferentes planos de ação no projeto de reabilitação, expansão e conservação do sistema produtor de água potável do Baixo Cotia, pertencente à SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo), analisando-se vinte diferentes critérios. O sistema produtor do Baixo Cotia é integrado ao sistema adutor metropolitano de São Paulo, atendendo, setorialmente, os municípios de Barueri, Jandira, Itapevi e Carapicuíba. O projeto visa implantar tecnologias ambientais no manancial através da implantação de áreas de alagadiços construídos, e tecnologias de tratamento de água e esgotos sanitários. Pretende-se, assim, ampliar a oferta de água pela substituição de vazão, ou reuso da água para a indústria, dentro de uma estratégia integrada de gerenciamento de riscos hidrológicos e de acidentes com cargas tóxicas ou produtos na bacia hidrográfica.

MÉTODOS MULTICRITERIAIS

A história da análise multicriterial teve início com o trabalho de Pareto (1896), que examinou um problema de agregação de critérios dentro de um critério simples, definindo o conceito da eficiência entre duas alternativas de decisão.

A pesquisa operacional ganhou grande impulso quando passou a ser utilizada como ferramenta de tomada de decisão no cenário militar inglês e norte americano durante a segunda grande guerra (Goicoechea et al., 1982; Hillier & Lieberman, 1988; Mays & Tung, 1992 entre outros). A partir de então, uma variedade de ferramentas matemáticas tem sido desenvolvidas e aplicadas à diferentes atividades.

Em 1951, Koopmans desenvolveu o conceito do vetor eficiência ou vetor não dominado, muito utilizado na programação matemática multiobjetivo, num trabalho sobre atividade de análise

de produção e alocação. Posteriormente, em 1952, Markowitz utiliza este conceito em seu trabalho sobre seleção de portfólio (Pardalos et al., 1995).

Charnes e Cooper (1961), desenvolveram o método multicritério conhecido como “Programação por Metas”, utilizando as idéias de Koopmans. O desenvolvimento do método de programação por metas continuou direcionado pelos trabalhos de Ijiri (1965), Lee (1972) e Ignizio (1976), citados por Pardalos et al. (1995). Keeney e Haifa (1976), desenvolveram a teoria e métodos para aplicação multiatributo. A partir de então, a tomada de decisão multicritério (MCDM – *Multiple Criteria Decision Making*) tornou-se uma das ferramentas mais utilizadas no campo da pesquisa operacional, aplicada a diferentes áreas do conhecimento (Korhonen et al., 1992).

Na década de 70, a pesquisa em MCDM caracterizou-se pelo desenvolvimento dos fundamentos teóricos da programação matemática múltiplo objetivo e dos procedimentos dos algoritmos para a resolução de cada problema. Destacam-se, nesse período, problemas envolvendo programação linear multiobjetivo (MOLP *MultiObjective Linear Programming*).

Já na década de 80, a maior preocupação, entre os pesquisadores americanos, foi a de enfatizar a otimização dos processos de análise multiobjetivo como suporte à Tomada de Decisão, auxiliando os Tomadores de Decisão (DM – *Decision Maker*). Nesse período, as pesquisas visavam, de certa forma, a captura do procedimento decisão/escolha do atual DM, ao invés de procurar resolver problemas bem estruturados e baseados em suposições hipotéticas e irrealista acerca da estrutura de preferência e procedimentos do DM (Korhonen et al., 1992).

Sobre essa linha de pesquisa referência algumas críticas de pesquisadores europeus, principalmente a de Bernard Roy, na França, levantaram duas preocupações cruciais sobre o MCDM. A primeira crítica dizia respeito ao objetivo principal da abordagem americana, que é a de descobrir ou descrever algo que é visto como uma entidade fixa ou sempre presente que é o DM. Esta entidade pode ser definida por uma forma analítica exata de uma função de utilidade, por um parâmetro “a” a ser buscado, ou ainda, por valores e ponderações sobre os “Pontos de Vista” a serem usados na agregação. A segunda preocupação levantada é quanto aos esforços dos pesquisadores em buscar a otimização das funções objetivo, baseando-se em teoremas, corolários, conceitos e axiomas, na procura da

tão esperada “Solução Ótima”. Isso poderia induzir ou impor um resultado ao Decisor, como sendo a “melhor solução” ou a “solução mais racional”, pois esta foi direcionada segundo as preferências consideradas. Em muitos casos, consideram ainda a existência de uma função de preferências que representaria o pensamento do decisor, podendo essas preferências serem divididas em três técnicas distintas:

- i. Técnicas que geram o conjunto das soluções não-dominadas - consideram um vetor função objetivo, utilizando-o para gerar um conjunto de soluções não dominadas, não considerando as preferências do decisor. Baseando-se, somente, nas restrições físicas do problema.
- ii. Técnicas que incorporam preferências do decisor - captam progressivamente as preferências do decisor, oferecendo uma sequência de soluções que convergem a uma solução final. As variáveis de decisão podem ser contínuas ou discretas, dependendo do tipo do problema. Algumas técnicas são aplicadas exclusivamente aos problemas contínuos, outros aos discretos, mas existem outras, ainda, agregando ambos.
- iii. Técnicas que utilizam uma articulação progressiva das preferências - constituem o conjunto de métodos que trabalham com uma função dinâmica de valor e param quando se atingiu uma situação em que o decisor está satisfeito com a solução encontrada. São conhecidos como “métodos não dirigidos”.

A maioria dos métodos de solução MCDM adota uma das três técnicas de resolução. Muito foi escrito sobre essas técnicas e, a cada ano, novos métodos são apresentados, com suas vantagens e desvantagens em relação aos anteriores, o que torna difícil a escolha do método a ser utilizado.

Ao distinguirem-se da corrente americana, quanto ao caráter do uso e ao conceito dos métodos multicritérios, os europeus passaram a denominar essas ferramentas como “Métodos Multicritérios de Auxílio à Decisão” (MCDA – *MultiCriteria Decision-Aid*), criando-se assim a chamada “Escola Européia”. Esta escola busca, com a utilização dos métodos multicritérios, a “Solução de Melhor Compromisso”, não necessariamente a solução mais racional como a pregada pela “Escola Americana”.

Os principais conceitos da “Escola Européia” são: 1) a não existência de um problema isolado; 2) cada observador vê o problema de forma diferente segundo seu sistema de valores; 3) sobre a elaboração e a estruturação do problema dependem do observador; 4) os elementos objetivos e os subjetivos não são segregados pois, dentro do processo decisório, eles possuem interconexão; 5) O decisor pode modificar os seus pontos de vista iniciais à medida que vai aumentando, durante o processo de seleção de alternativas, seu conhecimento sobre o problema.

Como discutido anteriormente, vários métodos em Análise Multicriterial (MA) são classificados, segundo a “Escola Americana”, de acordo com as técnicas de resolução do problema. A “Escola Européia” costuma classificá-los segundo o tipo de agregação, e admitem que os limites entre estas categorias sejam um tanto quanto vagos. Roy (1985) propôs as seguintes categorias de métodos: 1) critério de aproximação única de síntese, desconsiderando qualquer incompatibilidade; 2) aproximação hierárquica de síntese, aceitando incompatibilidades; 3) aproximação do julgamento local iterativo, com interações tipo tentativa e erro. Sharling (1985) denomina essas três categorias de acordo com os métodos de agregação utilizados: agregação completa, parcial e local, respectivamente. Vincke (1992) classifica-os por: 1) Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT – *Multi Attribute Utility Theory*); 2) Métodos de relações hierárquicas (*Outranking*); e 3) Métodos Iterativos. Zionts (1992), citado por Pardalos et al. (1995), classifica os métodos MA em quatro grupos: 1) Programação Matemática Multicriterial; 2) Alternativas Discretas Multicriteriais; 3) Teoria da Utilidade Multiatributo; e 4) Teoria da Negociação.

A existência de uma linha tênue que separa as diferentes categorias de métodos dificulta uma clara divisão entre eles. Esta linha, as vezes, pode ser considerada como sendo uma faixa de transição entre as famílias de métodos. Nesta interface um mesmo método poderia, por exemplo, estar baseado nos métodos de programação matemática, utilizando-se de procedimentos iterativos com a inclusão de algum tipo de função de utilidade que pode ou não ser aditiva.

Pardalos et al. (1995) também propõem outra estrutura, dividindo os métodos MA em quatro categorias distintas a saber: 1) Programação Matemática Multiobjetivo; 2) Teoria da Utilidade Multiatributo; 3) Relações das Aproximações Hierárquicas; e 4) Métodos baseados na desagregação de Preferências.

Métodos utilizados

No presente trabalho, foram adotados cinco diferentes métodos pertencentes às diferentes famílias, conforme proposto por Pardalos et al. (1995). Assim sendo, adotou-se, os seguintes métodos: Programação por Compromisso (CP) e Teoria dos Jogos Cooperativos (CGT) – família “Programação Matemática Multiobjetivo”. O método EXPERT CHOICE – família da teoria da utilidade multiatributo, e os métodos ELECTRE II e PROMETHEE II – família das aproximações hierárquicas.

Método Programação de Compromisso – Este método foi adotado por estar baseado no conceito de distância métrica (Teorema de Pitágoras), entre os dois pontos cujas coordenadas são conhecidas (Zeleny, 1982). O que motivou a utilização deste método é que ele procura minimizar a distância de todos os pontos factíveis em relação a um determinado ponto escolhido pelo DM, chamado de “Ponto Ideal”. A dificuldade na escolha do “Ponto Ideal” em relação a solução final é diminuída quando, por uma restrição, o “Ponto Meta” for menor ou igual ao “Ponto Ideal”, conforme ilustrado na Figura 1.

Uma Solução Ideal é definida pela maximização da função objetivo:

$$f_i^* = \text{Max} f_i(x) \quad (1)$$

O vetor f^* cujos elementos são todos máximos é chamado de vetor ideal:

$$f^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_n^*) \quad (2)$$

A obtenção da solução ideal não é possível pois dificilmente existe um vetor de decisões x^* que seja solução comum a todos os n objetivos. Porém, ela pode ser utilizada na avaliação das soluções alcançáveis. Esta distância é medida pela família métrica “ l_s ”, definida por:

$$l_s = \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i^s \left| \frac{f_i^* - f_i(x)}{f_i^* - f_{i,w}} \right|^s \right)^{1/s} \quad (3)$$

em que α_i é o peso atribuído ao critérios i subjetivamente pelo DM ou derivado de alguma estrutura de preferência; $f_{i,w}$ é o pior valor obtido pelo critério i ; $f_i(x)$ é o resultado da implementação da deci-

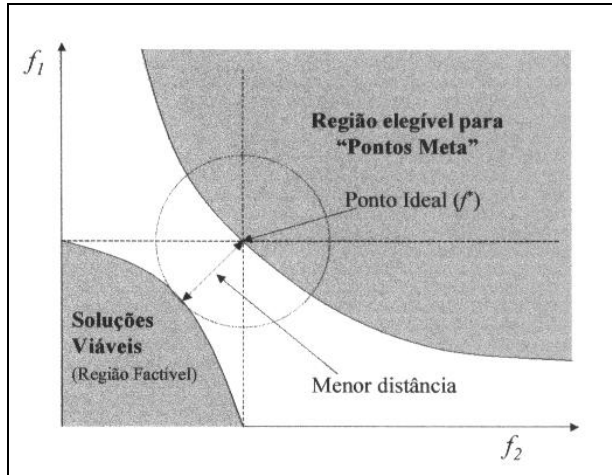


Figura 1. Seleção do "Ponto Meta". Modificado de Gershon e Duckstein (1983).

são x com respeito ao i ésimo critério; S reflete a importância que o DM atribui aos desvios máximos, e varia no seguinte intervalo: $1 < S < \infty$.

Para $S = 1$, todos os desvios de f_i^* são levados em consideração proporcionalmente à suas magnitudes. Para $2 < S < \infty$, desvios máximos têm a maior influência. Para $S = \infty$, o maior desvio é o único considerado (critério minimax). O problema é resolvido, geralmente, para um conjunto de pesos atribuídos $\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n\}$ e para $S = 1, 2$ e ∞ (Gershon e Duckstein, 1983).

Como a escolha de " S " reflete a importância que o DM atribui aos desvios máximos, pode-se dizer que existem dois esquemas de pesos: no primeiro o parâmetro " S " reflete a importância que os desvios máximos possuem e, no segundo o parâmetro " α_i " reflete a importância do critério i .

Quando as alternativas de solução estão discretizadas e cada um dos critérios está representado na matriz de avaliação (*payoff*), este método pode ser aplicado fazendo com que os melhores valores alcançados por cada um dos critérios sejam definidos como f_i^* , e os piores como $f_{i,w}$. Assim, para os parâmetros " α_i " (pesos) e " S " dados, calcula-se a distância de cada alternativa à solução ideal, e seleciona-se a alternativa de menor distância como sendo a de melhor compromisso.

Método Teoria do Jogos Cooperativos (Cooperative Game Theory - CGT) - No método da Teoria do Jogos Cooperativos, ao invés de minimizar a distância de um certo ponto ideal, a "melhor" solução é aquela que maximiza a distância de

algum ponto "*status quo*" de nível mínimo, em que a medida de distância utilizada é a geométrica (Gershon e Duckstein, 1983).

A teoria dos jogos, em geral, é um estudo matemático de resolução de conflitos. Um aspecto da teoria dos jogos é que os participantes têm a oportunidade de se comunicarem, formarem ligações e reforçar concordâncias e/ou acordos. O resultado de cada acordo resulta na formulação de uma matriz de avaliação (*payoff*). A função de distância utilizada é dada por:

$$I_s(x) = \prod_{i=1}^n |f_i(x) - f_i^*|^{\alpha_i} \quad (4)$$

em que α_i é o peso do i ésimo critério; f_i^* o i ésimo elemento do ponto "*status quo*" e; $f_i(x)$ o resultado da implementação da decisão x com respeito ao i ésimo critério.

Szidarovszky et al. (1980) (apud Gershon e Duckstein, 1988) generalizaram o método proposto por Nash para dois jogadores (Cooperative 2-person Game Theory) para o caso em que " n " jogadores estiverem envolvidos (Cooperative n -person Game Theory). Sete axiomas foram desenvolvidos definindo uma solução cooperativa. Baseados nesses axiomas, é possível demonstrar que existe uma única solução e esta pode ser encontrada através de métodos padrões da programação não linear. O que torna esta técnica interessante é que ela evidencia que a única solução existente é obtida através de um único caminho, para que o problema possa ser visto como multiobjetivo.

Ao invés de enfatizar a competição entre objetivos, ela considera que os objetivos estão trabalhando em cooperação para atingirem uma solução satisfatória. Outra vantagem é que qualquer solução intermediária obtida é factível, o que é uma característica desejável devido à natureza interativa dos algoritmos de programação não-linear (Gershon e Duckstein, 1983).

Métodos baseados na Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) - O método da análise hierárquica (AHP - Analytic Hierarchy Process, Saaty, 1977) foi adotado como representante da família baseada na Teoria Multiatributo, através de seu pacote comercial o *Expert Choice* (EC). O EC possibilita a determinação de uma função de utilidade baseada nos pesos atribuídos aos critérios, internamente ao pacote computacional, além de

adotar a matriz de “*payoff*”, comum aos outros métodos aplicados.

Método Analítico Hierárquico (AHP) - seleciona, ordena e pode ser utilizado para avaliação subjetiva de várias alternativas em termos de um ou mais objetivos. O AHP estabelece classes para as alternativas pela necessidade de avaliar uma alternativa com relação a uma outra (comparação par-a-par) ao invés de utilizar procedimentos mais complexos para avaliar todas simultaneamente. Inicialmente, os objetivos são comparados entre si por uma equipe multidisciplinar. Dessa análise resulta uma matriz de comparação A ($n \times n$), que pode ser visualizada na Tabela 1, em que o elemento s_{ij} indica o grau de superioridade do critério i sobre o critério j . Na Tabela 1 os números nas células indicam, proporcionalmente, o quanto o critério da linha é preferível ao critério da coluna, os números negativos indicam o inverso, por exemplo, o critério da coluna (*environmental*) é preferível ao da linha (*economic*).

$$s_{i,j} = \frac{\alpha_i}{\alpha_j} \quad (5)$$

em que: α_i (j) é o peso para o critério i (j).

Para melhor percepção da aplicabilidade da abordagem de autovalores, a matriz A pode ser interpretada como uma matriz de pesos relativos de cada alternativa para um determinado objetivo, ou melhor, esta matriz apresenta elementos positivos, além de ser uma matriz recíproca, isto é:

$$s_{i,j} = \frac{1}{s_{j,i}} \quad (6)$$

Para n critérios existirão n autovalores, cada qual com um autovetor correspondente.

Segundo Saaty (1977), matrizes de elementos positivos possuem maior autovalor positivo, sendo o vetor de pesos o autovetor correspondente. A matriz de comparação fornecerá o vetor de pesos dos n objetivos W . Este vetor é obtido através do seguinte equacionamento:

$$AW = \lambda W \quad (7)$$

$$(A - \lambda I)W = 0 \quad (8)$$

As Equações (7) e (8) apresentarão solução diferente de zero se e somente se λ for um autova-

Tabela 1. Matriz de comparação entre grupos de critérios (Zuffo, 1998).

<i>Best Fit</i>	Ambiental	Técnico	Social
Econômico	-5,8	-4,0	-5,7
Ambiental		1,5	1,0
Técnico			1,4

lor de A , visto que W é o autovetor correspondente a I (Matriz Identidade).

Segundo Palmer e Lund (1985), um outro produto deste procedimento é a medida da consistência dos julgamentos inerentes às comparações originais. Por exemplo: a alternativa 1 é melhor que a alternativa 2, que por sua vez é melhor que a alternativa 3, que é melhor que a alternativa 1 - as respostas não seguem a uma definição matemática de transitividade, comumente chamada de “consistência”. Intuitivamente, certos julgamentos são esperados ser mais consistentes do que outros. Isto depende, principalmente, do grau de conhecimento que o decisor (DM) tem do objeto em julgamento. A inconsistência pode ser vista como inerente a muitos julgamentos humanos e reflete as incertezas relativas das importâncias originadas nos julgamentos.

Saaty (1977) observou que se as comparações são cardinalmente consistentes, ou melhor, se elas são perfeitamente consistentes, então, $n - 1$ dos autovalores serão iguais a zero e o maior autovalor será igual ao número de itens avaliados n . Quando julgamentos inconsistentes são introduzidos, o maior autovalor torna-se maior que n e as inconsistências aumentam tanto em número quanto em magnitude.

Para se avaliar o grau de consistência da matriz, determina-se o índice de consistência C na seguinte equação:

$$C = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)} \quad (9)$$

em que λ_{\max} é o maior autovalor encontrado e, n o número de critérios.

Quanto mais próximo de zero o valor de C , maior será a consistência da “matriz comparação”. Se tal índice for pequeno, o autovetor correspondente será a solução procurada.

O método AHP, sugerido por Saaty (1977), é estruturado para aplicações multiobjetivo. Pela construção de um problema de avaliação como

uma hierarquia, esta técnica pode ser utilizada para resolver comparações em vários níveis e integrar essas soluções dentro de um resultado final, como ilustrado na Tabela 2.

O número de objetivos a serem comparados deve estar compreendido entre 5 e 9 (Saaty, 1977). O programa *Expert Choice* admite no máximo 9 critérios (ou objetivos), mas permite a existência de mais 9 subcritérios (ou sub-objetivos) para cada um dos critérios, apresentando, desta forma, níveis diferentes de critérios. Com esse artifício é possível utilizar mais de nove critérios, pela simples divisão em categorias, e depois proceder a correção dos pesos dados a cada uma das categorias.

O método AHP é comparável aos métodos baseados na teoria multiatributo (MAUT) por apresentar uma estrutura semelhante a uma função de valor aditiva. O método AHP foi comparado por Benton (1986) a um método que utiliza função aditiva simples conhecida por MAV (Multi-Attribute Value), do tipo:

$$V_i = \sum_j \alpha_j x_{ij} \quad (10)$$

em que V_i é o valor pleno da alternativa i ; α_i o peso associado ao critério i para refletir sua importância relativa sobre outros critérios e ; x_{ij} a pontuação da alternativa i segundo o critério j .

Benton (1986) comenta em suas análises que as maiores fraquezas do método AHP são os questionamentos ambíguos sobre os critérios de pesos e a forte suposição da escala para a medida dos valores, enquanto que a maior limitação da metodologia MAV é que ela é apropriada para um critério de nível simples. Se a hierarquia do critério possui mais de um nível, então seria apropriada a utilização de um modelo um pouco mais complexo.

Métodos baseados nas relações hierárquicas

Os métodos pertencentes a esta família são muito utilizados na escola européia, principalmente os métodos da família ELECTRE e PROMETHEE, pois possibilitam a adoção de critérios de diferentes naturezas, como por exemplo, quantitativos e qualitativos, booleanos ou nominais, etc. São métodos consagrados em problemas envolvendo recursos hídricos e/ou problemas que envolvam o meio ambiente. Desta forma, adotou-se os métodos ELECTRE II e PROMETHEE II, para a análise do presente caso de estudo.

Tabela 2. Estruturação de um problema de recursos hídricos com a consideração de critérios quantitativos e qualitativos (Zuffo, 1998).

Meta (1,000)			
Econômico (0,061)	Ambiental (0,353)	Técnico (0,291)	Social (0,296)
Benefício/ custo	Acid. perig. Mata	Qualidade da água	Atratividade Saúde física
	Planície	Vazão	Saúde mental
	Vegetação	Água	Emprego
	Fauna	Erosão	Reassentamento
	Fauna aquát. Legal	Enchente	Qual. vida Mudança ativ.

Método ELECTRE I - (ELimination Et Choix Traduisant la Réalité) foi apresentado por Benayoun et al., em 1966, e aperfeiçoado por Bernard Roy em 1968. O ELECTRE I tem por finalidade escolher os sistemas que são preferidos pela maioria dos critérios e não causam qualquer nível de descontentamento inaceitável para qualquer um dos critérios analisados, ou melhor, pode ser descrito como sendo um método de eliminação seqüencial. Os autores desenvolveram três conceitos metodológicos para a aplicação do método: concordância, discordância e valores limites (*Threshold values*).

Define-se $\alpha(1), \alpha(2), \dots, \alpha(i)$ como sendo os pesos atribuídos pelo DM, para todos os i critérios e para todas k alternativas, e assume-se que os pesos dos critérios não mudem durante o desenvolvimento do método. Pode-se afirmar que a concordância entre quaisquer duas alternativas i e j será a medida do número do critério para o qual a ação i é preferida à ação j ($i P j$) ou a ação i é igual a ação j ($i = j$).

Pode-se representar o índice de concordância através dos seguintes procedimentos:

Definindo-se I , representando um subconjunto de m critérios, e particionando-o em três subconjuntos distintos, obtêm-se:

$$I^+ = I^+(i, j) - \{k \in I: i > j\} \quad i \text{ é preferível a } j;$$

$$I^- = I^-(i, j) - \{k \in I: i = j\} \quad i \text{ é equivalente a } j; e$$

$$I^- = I^-(i, j) - \{k \in I: i < j\} \quad j \text{ é preferível a } i.$$

desta maneira:

$$W^+ = \sum_{i \in I^+} \alpha_i \quad (11)$$

$$W^- = \sum_{i \in I^-} \alpha_i \quad (12)$$

$$W^- = \sum_{i \in I^-} \alpha_i \quad (13)$$

Método ELECTRE II - Este método foi desenvolvido por Roy e Bertier (1971 e 1973) e é uma extensão do ELECTRE I (Benayoun et al., 1966), que utiliza, como dados de entrada, os dois gráficos produzidos pelo ELECTRE I, representando uma estrutura de preferência forte e outra fraca.

A idéia no ELECTRE II é escolher aqueles sistemas que são preferidos pela maioria dos critérios e que não ultrapassem um determinado nível de desconforto ou descontentamento aceito pelo DM, para nenhum dos critérios considerados. As preferências e as discordâncias são avaliadas por duas medidas distintas: a de concordância e a de discordância.

Essencialmente o ELECTRE II estabelece uma ordenação completa sobre um conjunto de alternativas, inicialmente consideradas, que satisfaça:

- o teste da concordância, em que a medida da concordância está acima de um nível mínimo de aceitabilidade;
- o teste da discordância, em que a medida da discordância está abaixo de um nível máximo tolerável de discordância.

A concordância entre dois planos de ação i e j é a medida dos pesos (W) do número dos planos de ação para os quais o critério i é preferido ao critério j .

$$c(i, j) = \frac{W^+ + W^-}{W^+ + W^- + W^-} (i, j) \quad (14)$$

Pela definição, o índice de concordância deve estar compreendido no intervalo entre 0 e 1.

O método ELECTRE II utiliza um outro índice, complementar ao de concordância, definido como índice de discordância. Ele mede o grau de insatisfação do DM em escolher uma dada alternativa i sobre a alternativa j . Para calcular a matriz de discordância, cada critério é fixado dentro de uma escala, definido pelo índice de discordância, compreendido entre 0 e 1 e calculado pela Equação (15):

$$d(i, j) = \frac{\max[z(i, k) - z(j, k)]}{R^*} \quad (15)$$

em que $z(i, j)$ é a avaliação normalizada da alternativa i em relação ao critério k , e R^* é a maior escala de todos os k critérios.

Para poder analisar as matrizes de concordância e discordância são definidos valores de referência "p" e "q", pertencendo ao intervalo de variação entre 0 e 1. Esses valores indicam que a concordância desejada deverá ser superior ou igual a "p" e que "q" definirá a máxima discordância tolerável. O ELECTRE II utiliza dois gráficos gerados pelo ELECTRE I, que representam as estruturas de preferência forte e fraca. O gráfico de preferência forte resulta do uso de valores limites rigorosos, ou melhor, o decisor é levado a selecionar um alto nível de concordância e um baixo nível de discordância. Para o gráfico de preferência fraca, o DM é levado a relaxar seus valores limites, diminuindo o valor de "p" e aumentando o valor de "q".

O procedimento de ordenação do método ELECTRE II é formado por dois estágios distintos de pré-ordenação. No primeiro estágio, define-se a classificação progressiva, no segundo a regressiva. As duas pré-ordenações obtidas, geralmente, são diferentes, porém próximas. Neste caso, o DM pode escolher a média entre elas, como definido pela Equação (16), caso contrário, deve-se redefinir o problema e reaplicar o método.

$$m(x) = \frac{v' + v''}{2}, \forall x \in X \quad (16)$$

Método PROMETHEE II - (Preference Ranking Organization Methods for Enrichment Evaluations) do mesmo modo que o ELECTRE, estabelece uma estrutura de preferência entre alternativas discretas, mas necessita de informações adicionais que consistem de:

1. Informações entre critérios: pode ser representada por uma estrutura de pesos (α_i) de importância relativa entre os critérios. Os pesos são assumidos positivos e o maior peso (de um particular critério) indica a maior importância deste critério sobre os demais. O somatório dos pesos α_i deve ser igual à unidade.
2. Informações internamente aos critérios (comparações par-a-par das alternativas): são observados desvios ou diferenças entre os valores do mesmo critério para as diferentes alternativas. Por menor que sejam esses desvios, o DM alocará uma pequena

preferência para a melhor alternativa. Quanto maior o desvio, maior a preferência. Não há objeções quanto as preferências assumirem números reais variando entre 0 e 1. Isto significa que, para cada critério $f_i(x)$, o DM tem em mente a seguinte função:

$$P_i(a, b) = P_i[d_i(a, b)] \quad (17)$$

$a, b \in X$, em que:

$$d_i(a, b) = f_i(a) - f_i(b) \quad (18)$$

e para o qual:

$$0 \leq P_i(a, b) \leq 1 \quad (19)$$

No caso do critério ser maximizado, dada a preferência de a sobre b , observa-se a diferença entre a e b segundo o critério i . Desta forma, a diferença pode ser expressa por uma função de preferência. Para o caso do critério ser minimizado, a diferença observada entre a e b pode ser representada pela função de preferência dada pela seguinte expressão:

$$P_j(a, b) = P_j[-d_j(a, b)] \quad (20)$$

O par $\{f_j(\cdot), P_j(\cdot, \cdot)\}$ é chamado critério generalizado associado ao critério $f_j(\cdot)$. A Figura 2 ilustra os diferentes tipos de critérios generalizados utilizados pelo Método PROMETHEE, representados pelos diferentes tipos de funções.

Para este trabalho foi adotada a função de preferência tipo 3, para todos os critérios, visto que todos possuem a mesma escala de valores (1 a 9). O valor de p adotado foi o valor 3, que corresponde a 1/3 do valor máximo na escala adotada para todos os critérios.

O método PROMETHEE está baseado em comparações par-a-par. O primeiro passo para sua aplicação é a definição dos índices de preferência agregados e fluxos de hierarquização.

Índice de preferência agregado: sejam $a, b \in A$, e:

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b) \alpha_j \quad (21)$$

$\pi(a, b)$ expressa como e com que grau " a " é preferível a " b " sobre todos os critérios e $\pi(b, a)$ expressa

como " b " é preferível a " a ". Usualmente tem-se $\pi(a, b)$ e $\pi(b, a)$ positivos, e com as seguintes propriedades:

$$\begin{cases} \pi(a, a) = 0 \\ 0 \leq \pi(a, b) \leq 1 \end{cases} \quad \forall a, b \in A$$

Fluxos de importância: o índice de preferência global possibilita a avaliação de cada alternativa a , face a $(n - 1)$ alternativas em A . Para tanto, define-se dois fluxos de importância, como seguem:

- Fluxo de importância positivo:

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x) \quad (22)$$

O fluxo de importância positivo expressa como uma alternativa a supera as demais, ou melhor, é o caractere de importância de a . O maior $\phi^+(a)$ corresponde à melhor alternativa.

- Fluxo de importância negativo:

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \quad (23)$$

O fluxo negativo de importância expressa como uma alternativa a é superada pelas outras. Em outras palavras, é o caractere que define a fraqueza da alternativa a . O mais baixo $\phi^-(a)$ corresponde a melhor alternativa.

A ordenação completa realizada pelo PROMETHEE, parte da soma dos fluxos de importância, definido-se cada $a \in A$, o fluxo de importância líquido definida por:

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (24)$$

O balanço entre os fluxos de importância positivo e negativo proporciona a escolha baseada no maior fluxo líquido de preferência. O maior valor corresponderá a melhor alternativa.

A ordenação completa para o método PROMETHEE II é então definido por:

$$a P^{II} b \quad \text{se} \quad \phi(a) > \phi(b)$$

$$a I^{II} b \quad \text{se} \quad \phi(a) = \phi(b)$$

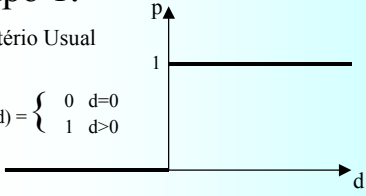
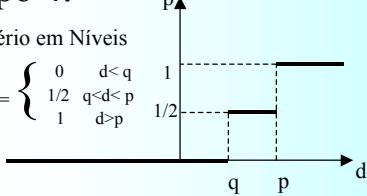
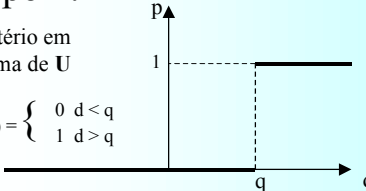
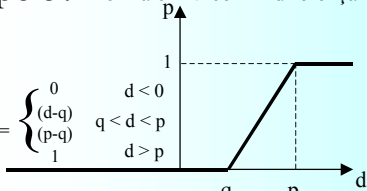
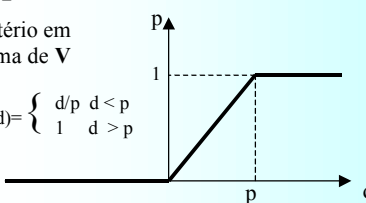
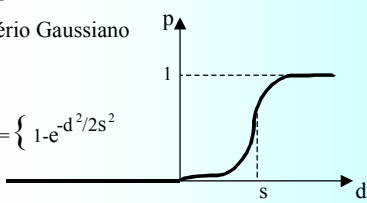
Critério Generalizado	Parâmetro a Fixar	Critério Generalizado	Parâmetro a Fixar
Tipo 1: Critério Usual $P(d) = \begin{cases} 0 & d=0 \\ 1 & d>0 \end{cases}$ 	-	Tipo 4: Critério em Níveis $P(d) = \begin{cases} 0 & d < q \\ 1/2 & q < d < p \\ 1 & d > p \end{cases}$ 	q, p
Tipo 2: Critério em forma de U $P(d) = \begin{cases} 0 & d < q \\ 1 & d > q \end{cases}$ 	q	Tipo 5: Forma em V com Indiferença $P(d) = \begin{cases} 0 & d < 0 \\ (d-q)/(p-q) & q < d < p \\ 1 & d > p \end{cases}$ 	q, p
Tipo 3: Critério em forma de V $P(d) = \begin{cases} d/p & d < p \\ 1 & d > p \end{cases}$ 	p	Tipo 6: Critério Gaussiano $P(d) = \begin{cases} 1 - e^{-d^2/2s^2} \end{cases}$ 	s

Figura 2. Critérios generalizados. Modificado de Brans e Marechal (1997).

Todas as alternativas são comparáveis. Não permanece o que não pode ser comparado, mas a informação resultante é mais contestável, visto que uma parte considerável das informações perdem-se pois consideram-se as diferenças.

ESTUDO DE CASO

O objeto deste estudo é a bacia do rio Cotia, afluyente do rio Tietê. Esta bacia pertence ao sistema produtor de água que abastece a região oeste da Região Metropolitana de São Paulo. Possui uma área aproximada de 240 km², junto à captação de água na represa Isolina Superior, a montante da Estação de Tratamento de Águas (ETA) do Baixo Cotia. Esta bacia possui dois sistemas produtores de água da SABESP. A Figura 3 ilustra a localização da bacia do rio Cotia na RMSP.

O Sistema do Alto Cotia capta as águas da Barragem Nossa Senhora das Graças, abastecendo os municípios de Cotia, Vargem Grande Paulista,

Embu Guaçu e parcialmente o município de Embu. Esse sistema regulariza uma vazão de 1,00 m³/s; o excedente hídrico é reintroduzido no rio Cotia e cai no Sistema do Baixo Cotia com a finalidade principal de diluição de esgotos.

A área de contribuição do Sistema do Alto Cotia é de aproximadamente 105 km², sendo 100 km² constituídos por Mata Atlântica. Essa área é totalmente protegida e preservada. As águas de contribuição natural do rio Cotia e de seus afluentes, a jusante da Barragem Nossa Senhora das Graças, recebem, ao longo de seu curso, cargas poluentes de esgoto doméstico, efluentes industriais e águas residuárias urbanas não tratadas, geradas na própria bacia, seguindo para a represa Isolina Superior de onde são captadas e tratadas na ETA.

Planos de ação propostos para a bacia

Com o programa do Estado de São Paulo para a despoluição do rio Tietê, muitas obras come-

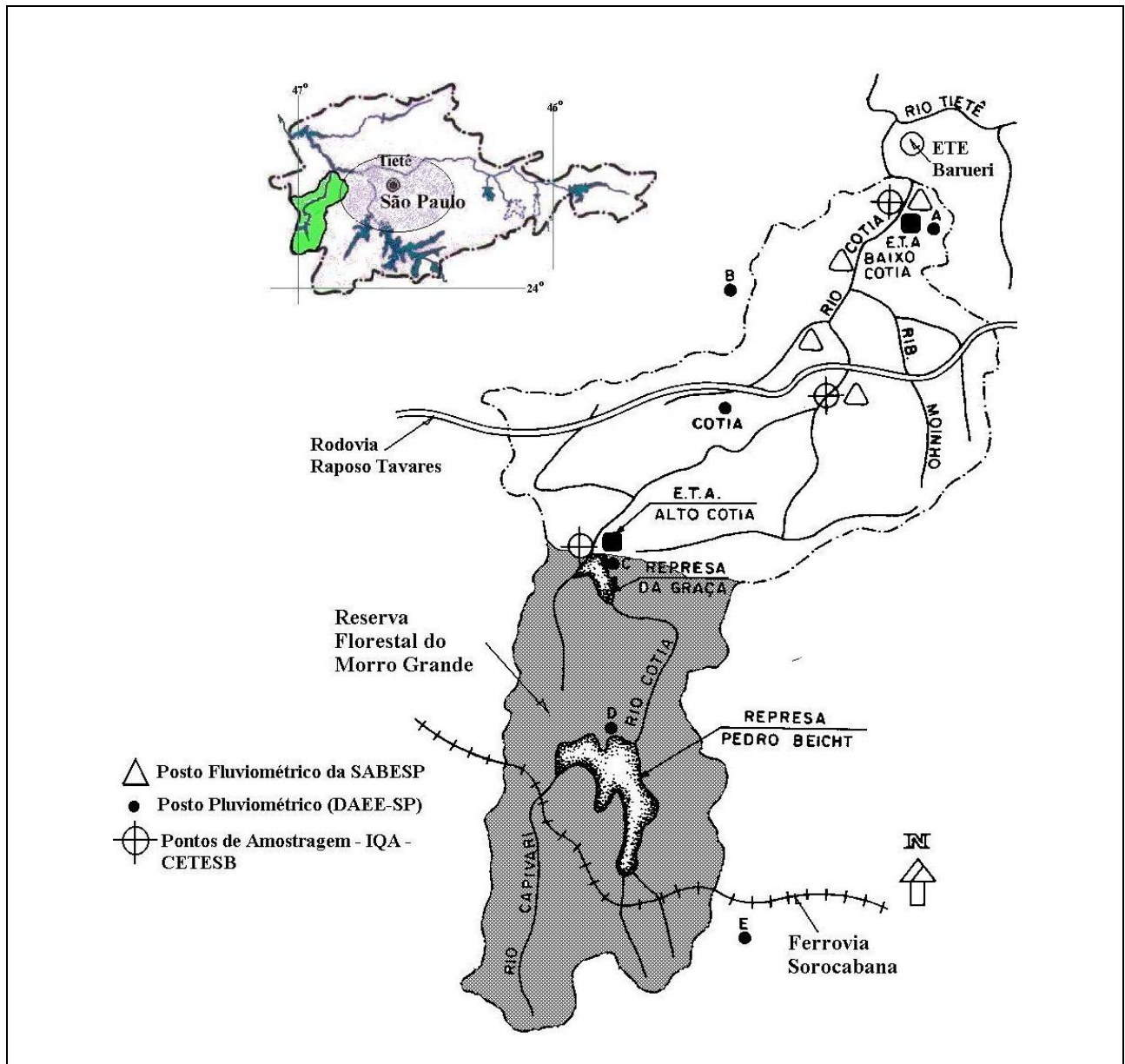


Figura 3. Localização da bacia do rio Cotia, dos sistemas Alto e Baixo Cotia, Isolinas superior e inferior e ETE-Barueri.

çam a ser estudadas, propostas e implementadas. Uma dessas obras está diretamente relacionada com a bacia do rio Cotia, pois se trata da construção de um coletor tronco de esgoto (TO-13), que possibilitou o recolhimento de todo o esgoto produzido nessa bacia para possibilitar a sua condução até a Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri (ETE-Barueri).

Esse coletor diminuiu a vazão do rio Cotia, visto que antes dele a descarga direta de esgotos correspondia a 180 l/s. Essa diminuição de vazão prejudicaria a operação do Sistema Produtor Baixo Cotia, SABESP (1997).

Em suma, esse sistema utilizava, como matéria prima, uma água de qualidade ruim para a produção de água potável.

Com a construção do TO-13, no Baixo Cotia, a SABESP decidiu ampliar o Sistema Produtor do Alto Cotia, aproveitando os excedentes da Barragem N. S. das Graças, pois esses não precisariam mais ser utilizados para diluir efluentes no Baixo Cotia. O Sistema, que até julho de 1997 produzia uma vazão tratada de 1,00 m³/s seria ampliado para 1,30 m³/s após essa data, o que provocaria uma redução de mais 300 l/s na vazão do Baixo Cotia (SABESP, 1997). Essas duas obras inviabiliza-

riam a manutenção do Sistema Produtor do Baixo Cotia, pois durante o período de estiagem ele não teria água suficiente para manter o abastecimento ($Q_{7,10} = 600 \text{ l/s}$).

O Sistema Baixo Cotia teria condições de manter 700 l/s durante 75% do tempo (ano), para o período seco, no entanto, a proposta da SABESP seria a de reintroduzir água, retirada da bacia pelo TO-13, através do bombeamento de parte do efluente da ETE-Barueri. A utilização do efluente da ETE-Barueri estaria prevista apenas para a complementação da vazão do rio Cotia, durante os períodos secos. A diluição desse efluente com a vazão natural do rio Cotia permitiria, ainda, a ampliação da capacidade de produção de água potável por este Sistema. Alguns planos de ação contemplam o tratamento terciário através de *wetlands* construídas (brejos ou áreas de alagados).

O conjunto de medidas e ações, estabelecidos pela SABESP, no estudo de reabilitação, expansão e conservação do Baixo Cotia seriam:

- reuso do efluente tratado da ETE-Barueri, para o suprimento industrial;
- utilização da mistura entre efluente tratado ETE-Barueri com as águas de contribuição natural da bacia hidrográfica do rio Cotia, como escopo de uma estratégia de reuso potável indireto de efluentes de estações de tratamento de esgoto, para fins de abastecimento público;
- desenvolvimento de tecnologia para tratamento adicional do efluente da ETE-Barueri, caso necessário, para utilização industrial e reuso potável indireto.

Para atender a estas diretrizes, foram estabelecidas nove alternativas. Seis alternativas contemplariam o tratamento terciário natural através de áreas de alagadiços, três não. A Figura 4 ilustra um esquema geral das alternativas e a Tabela 3 as especifica.

Definição dos critérios

Foram adotados vinte critérios divididos em quatro diferentes grupos a saber: econômico, ambiental, técnico e social. A Tabela 4 elenca os critérios utilizados neste trabalho.

Pesos dos critérios - Os critérios ambientais e sociais, para cada alternativa, foram valorados com a utilização das informações espacializadas, elabo-

radas para o projeto de Reabilitação Expansão e Conservação do Sistema Produtor do Baixo Cotia, com o auxílio de SIG, conforme apresentado por Zuffo (1998). Neste trabalho considerou-se que o problema seja de natureza determinística, ou melhor, não foram consideradas incertezas.

Para definir os pesos para os critérios foi realizada uma consulta a vários profissionais especialistas de diversas áreas ligadas aos recursos hídricos, todos de nível superior. O objetivo deste questionário foi de estabelecer, de forma isenta de tendências, o grau de importância relativa que os critérios teriam em relação aos demais.

A adoção de questionários estruturados visa a definição dos pesos para os critérios antes da aplicação dos métodos multicriteriais. A gestão de recursos hídricos através dos comitês de bacias hidrográficas, adotados pelo Brasil, necessitará de ferramentas que ajudem a tomada de decisão e esta deverá ser negociada entre todos os DM que integram esses comitês e têm direito a voto. A adoção de diversos cenários de pesos obtidos pelos questionários visa avaliar a variabilidade das soluções apresentadas pelos métodos multicriteriais com diferentes pesos para os critérios.

Foram enviados 75 questionários, dos quais 32 foram respondidos, o que significa uma taxa de 42,7% de retorno. Os questionários foram enviados para biólogos, ecólogos, geógrafos, geólogos e engenheiros (civis, agrícolas, florestais, sanitaristas e agrônomos), todos da área de pesquisa e tecnologia, envolvidos com a questão "água". Responderam também aos questionários alguns técnicos que atuam na área administrativa de superintendências de órgãos oficiais do Estado de São Paulo, também ligados aos recursos hídricos. Observou-se, para este seletivo grupo, uma grande variação nos pesos atribuídos aos critérios estabelecidos por cada um dos profissionais consultados. Isso reflete uma divergência de opiniões devido, provavelmente, às diferentes áreas de atuação, e domínio de informação, devido a multidisciplinaridade dos consultados (Zuffo, 1998).

Sabe-se, pela literatura, que a taxa de retorno desse tipo de questionário é pequena, assim, recomenda-se sempre o envio um número maior que o desejado. Os motivos do não retorno das respostas aos questionários podem ter diferentes naturezas particulares, tais como: falta de tempo ou interesse, esquecimento, incompatibilidade de *softwares*, entre outros.

Dos 32 questionários respondidos observou-se que os critérios que mais apresentaram dis-

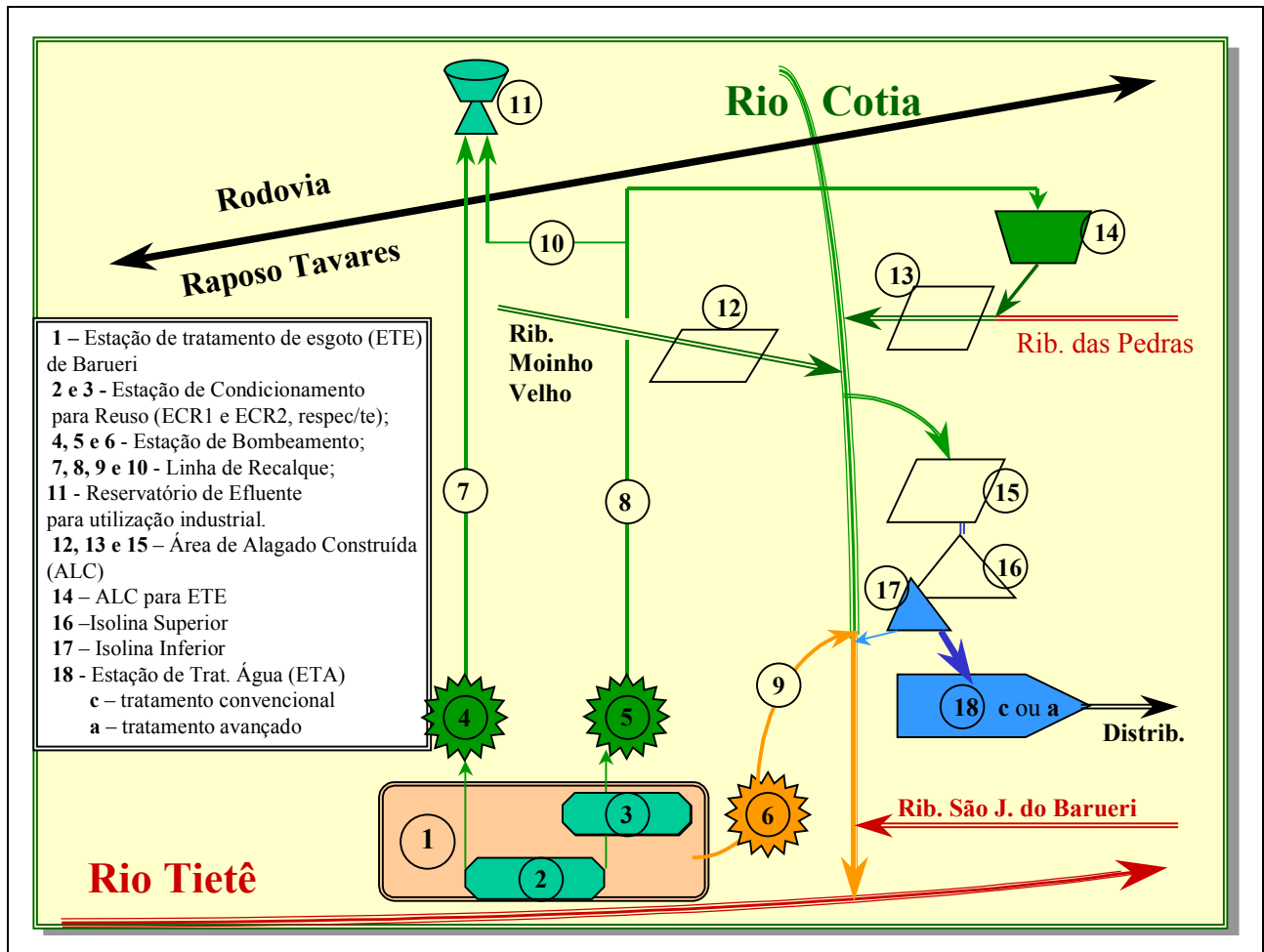


Figura 4. Esquemas das alternativas propostas de 1 a 9.

persões foram aqueles em que havia subjetividade ou falta de conhecimento do assunto na valoração do critério, tais como: água subterrânea, fauna ou área protegida. Os critérios mais conhecidos, como a qualidade da água, a saúde física da população e o econômico foram os que apresentaram menor dispersão, o que caracteriza uma maior firmeza quanto à estimativa do grau de importância, quase consensual, obtidos para esses critérios (Zuffo, 1998).

Após tratamento estatístico dos questionários obteve-se quatro cenários relativos de pesos para utilização pelos métodos multicriteriais: cenários correspondentes às médias dos pesos, às modas, aos mínimos valores obtidos e o de pesos iguais. A escala de valores dos pesos encontravam-se em uma faixa compreendida entre os valores 1 a 10.

A Tabela 5 mostra os critérios com seus respectivos pesos e cenários adotados.

Na avaliação dos pesos máximos, 18 dos 20 critérios receberam nota máxima igual a 10 e apenas dois critérios receberam notas 9 e 8.

Dessa forma, optou-se pela criação do cenário de pesos iguais.

Resultado da aplicação dos métodos multicriteriais

Foram aplicados os cinco métodos multicriteriais a partir da matriz de “payoff”, apresentada pela Tabela 5, juntamente com os quatro cenários, obtidos pela análise dos questionários, para os pesos dos critérios.

ELECTRE II

Os resultados obtidos pela aplicação do ELECTRE II podem ser visualizados através das Tabelas 6 a 9. Observa-se através dessas que os resultados fornecidos pelo método ELECTRE II não apresentaram alterações, para todos os cenários

Tabela 3. Alternativas adotadas segundo estruturas, sistemas e operações previstas.

Estruturas, sistemas e operações previstas, segundo nomenclatura da Figura 4	Alternativa								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
01 - ETE-Barueri (utilização de efluente)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
02 - ECR1	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗
03 - ECR2	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗
04 - EB	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗
05 - EB	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗
06 - EB	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
07 - Linha de recalque	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗
08 - Linha de recalque	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗
09 - Linha de recalque	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
10 - Linha de recalque	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
11 - Reservatório de água para reuso	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗
12 - Área de Alagado Construída (ALC)	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗
13 - Área de Alagado Construída (ALC)	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗
14 - ALC para ETE	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗
15 - Área de Alagado Construída (ALC)	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗
16 - Represa Isolina Superior	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
17 - Represa Isolina Inferior	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
18 - Estação de Tratamento de Água (ETA)	C	A	C	A	A	C	C	A	C

✓ - Previsto; ✗ - Não Previsto; C - Tratamento Convencional e; A - Tratamento Avançado.

aplicados. Este método foi insensível a qualquer mudança de cenários dos pesos.

Analisando-se os resultados fornecidos pelo método observa-se, através das Tabelas de 6 a 9, que a melhor solução, apresentada como resposta, foi a alternativa de número 2, logo em seguida, empatadas na segunda posição estão as alternativas 4, 6 e 7. Porém, levando em consideração que o objetivo principal do projeto em discussão é o da reabilitação, conservação e ampliação do sistema produtor do Baixo Cotia, julga-se incoerente que duas alternativas que apresentam qualidade e quantidade de água inferiores às apresentadas pelas cinco primeiras alternativas, além da apresentada pela alternativa de número 8, fossem classificadas entre as melhores. Essas seis alternativas (1 a 5 e 8) possuem quantidade e qualidade de água superiores às alternativas 6, 7 e 9.

Reconhecia-se, previamente, que as alternativas 6, 7 e 9 eram inferiores às demais alternativas analisadas, porém elas foram introduzidas na análise para possibilitar a avaliação do desempenho dos métodos em fornecer, como resultado, as outras alternativas em detrimento destas três.

A razão desse resultado do ELECTRE II pode ser atribuída à não representação ideal do

problema para o método em questão. O sistema de análise das preferências e indiferenças do método ELECTRE não relativiza as pequenas diferenças entre os critérios, fato este que prejudicou os resultados deste método para o problema em questão. Duas das melhores alternativas foram classificadas em último lugar, as alternativas 1 e 3, além da 8, que fornecem melhor qualidade e maior quantidade que as alternativas 6, 7 e 9.

A pior alternativa, sem qualquer dúvida, é a alternativa número 9, porém ela foi classificada em quarto lugar pelo ELECTRE II, e colocada entre as seis melhores alternativas, o que seria inaceitável. Por estas razões, considera-se que o método ELECTRE II não conseguiu escolher, de forma satisfatória, as melhores alternativas para o estudo de caso em questão. No entanto não se quer afirmar, neste trabalho, que o método não pode ser utilizado para este tipo de problema, apenas que para o problema formulado ele não conseguiu responder às expectativas.

Talvez com uma reformulação no problema o método possa fornecer melhores resultados. Uma reformulação possível seria a adoção de escalas diferenciadas para os critérios, visto que, neste trabalho, as escalas utilizadas foram iguais para todos os critérios abordados.

Tabela 4. Descrição dos critérios técnicos, econômicos, ambientais e sociais adotados.

Critério	Descrição do critério
Econômico	
Benefício/custo	Resultante do somatório dos subcritérios econômicos: custos de investimentos, custo de manutenção e operação, benefícios, etc.
Ambiental	
Acidentes	Definição das áreas críticas à acidentes (especializadas em mapa de criticidade à acidentes) e coincidentes com áreas abrangidas pelo Plano de Ação.
Mata ciliar	Definição do corredor necessário para a formação, recuperação e manutenção da mata ciliar em áreas abrangidas pelas obras.
Planície de inundação	Área de planície de inundação alterada, pelos Planos de Ação.
Vegetação natural	Área de vegetação natural provavelmente alterada pelas obras propostas
Fauna	Área de ecossistemas naturais provavelmente alterados pelas obras previstas.
Aquático	Área de ecossistemas naturais aquáticos provavelmente alterados pelas obras propostas.
Área protegida (legal)	Áreas protegidas por atos legais que serão atingidas pelas obras.
Técnico	
Qualidade água	Representado por um conjunto de subcritérios definidos por alguns parâmetros indicativos da qualidade da água.
Vazão	Alteração da vazão natural dos cursos d'água previstos pelos diferentes Planos de Ação (vazão introduzida).
Água subterrânea	Baseado no número de poços particulares operados na região devido à implementação das obras previstas para cada uma das alternativas.
Erosão	Definido pelo potencial de erosão do meio físico atingido pelas obras (relevos e solos).
Enchentes	Determinado a partir das mudanças esperadas no comportamento das enchentes dos cursos d'água atingidos pelas obras
Social	
Atratividade	Alteração do potencial de atração de atividades humanas na região. Os subcritérios adotados são: atratividade residencial, agrícola e industrial.
Saúde física	Avaliado pelas condições sanitárias da área em estudo e suas prováveis relações com o cenário atual das doenças de veiculação hídrica.
Saúde mental (lazer)	Relacionado com a disponibilidade de áreas verdes e infra-estrutura recreacional e turística atual e potencial prevista junto à implantação de cada Plano de Ação.
Empregos	Definido pelas novas posições resultantes da implementação das alternativas (homens empregados) e geração de empregos diretos e permanentes (homens empregados).
Reassentamento	Número de pessoas deslocadas das áreas ribeirinhas afetadas pelas obras em função das diferentes alternativas.
Qualidade de vida	Avaliado de acordo com as expectativas dos resultados esperados após a construção das obras.
Mudanças de atividades	Definido pelas perdas ou ganhos de áreas para atividade ou usos antrópicos.

O motivo da adoção de escalas iguais foi para possibilitar a manutenção dos pesos estabelecidos através dos questionários, conforme discutido anteriormente. A adoção de escalas diferenciadas propicia a alteração dos pesos, pois, na maioria dos métodos é considerada, de certa forma, a multiplicação do valor do critério pelo valor de seu peso.

Pelos motivos apresentados, os resultados fornecidos pelo método ELECTRE II foram descon-

siderados para cômputo final da ordenação das alternativas.

PROMETHEE II

Assim como no método ELECTRE II, também foi aplicado para o PROMETHEE II os quatro cenários de pesos. Observou-se que para os três primeiros cenários aplicados (Média, Moda e Pesos

Tabela 5. Matriz “payoff”.

Critérios	Cenários de pesos				Valores das alternativas								
	Média	Moda	Min*	Igual	01	02	03	04	05	06	07	08	09
Econômico	8,63	10	10	10	4	3	3	2	4	9	2	3	1
Atratividade	6,52	7	2	10	9	9	9	9	9	3	8	5	1
Saúde física	9,42	10	10	10	7	9	7	9	7	1	1	7	1
Saúde mental (lazer)	8,21	8	3	10	9	9	9	9	9	2	2	9	1
Empregos	6,78	7	3	10	9	9	8	8	7	2	4	7	1
Acidentes perigosos	7,71	8	5	10	1	1	1	1	1	9	9	1	9
Mudanças atividades	5,96	7	5	10	1	1	1	1	1	9	9	1	9
Reassentamento	6,71	8	3	10	1	1	1	1	1	9	9	1	9
Vazão acrescida	7,04	8	2	10	9	9	9	9	9	2	3	8	1
Água subterrânea	6,50	7	2	10	9	9	9	9	9	1	9	1	1
Mata ciliar	7,75	9	5	10	9	9	9	9	9	2	2	9	1
Erosão/assoreamento	7,17	8	2	10	1	1	1	1	1	9	9	1	9
Planícies inundação	7,08	8	2	10	1	1	1	1	1	9	9	1	9
Enchentes	7,42	7	2	10	9	9	9	9	9	1	1	9	1
Vegetação natural	6,58	8	5	10	1	1	1	1	1	9	9	1	9
Fauna	6,63	7	3	10	9	9	9	9	9	5	5	9	5
Ecossistemas aquáticos	7,50	8	3	10	9	9	9	9	9	5	5	9	5
Leis	8,04	10	3	10	9	9	9	9	9	5	5	9	1
Qualidade da água	9,67	10	8	10	5	9	5	9	9	1	1	9	1
Qualidade de vida	9,04	10	5	10	9	9	9	9	9	5	5	9	5

* Valores modificados: todos os valores foram divididos pela décima parte do maior valor dentre os mínimos obtidos (/0,6).

Iguais) não houve modificação na ordenação final das alternativas. Somente para o quarto cenário, o dos pesos “mínimos” modificados, algumas alternativas inverteram suas colocações. A alternativa 4, que ocupava a 2ª colocação, trocou de posição com a alternativa 5, que ocupava a 3ª colocação. O que beneficiou a alternativa 5 em relação a alternativa 4 foi o critério econômico, que neste cenário tem um peso muito alto e a alternativa cinco possui o dobro do valor da alternativa 4 para este critério.

A alternativa 3 trocou de posição com a alternativa 8, sendo que ocupavam a 5ª e 6ª posição nos primeiros cenários (Média, Moda e Pesos Iguais), respectivamente. Para esta situação, a melhoria da ordenação para a alternativa 8 foi definida pelo critério “qualidade da água”, que para este cenário também possui um peso maior em relação aos demais critérios, e o valor deste critério para a alternativa 8 é igual a 9 e para a alternativa 3, igual a 5.

As alternativas 7 e 6 também trocaram suas posições, pois nos primeiros cenários ocupavam a 7ª e 8ª posição, respectivamente. Com o aumento do peso econômico, a alternativa 6 sobe para a 7ª colocação rebaixando a alternativa 7 para a 8ª posição na ordenação final.

Os resultados apresentados pelo método PROMETHEE II foram coerentes com os resultados esperados para as alternativas analisadas, ou melhor, a classificação resultante beneficiou as melhores alternativas, para quaisquer cenários de pesos analisados.

As alternativas que não contemplavam nem qualidade nem quantidade de água obtiveram as últimas posições na classificação geral, e correspondem às alternativas de números 7, 6 e 9.

Programação por Compromisso

O método CP (Programação por Compromisso), assim como os demais, analisou os quatro cenários estipulados para os pesos e em diferentes valores de S. O parâmetro S corresponde ao expoente aplicado aos pesos no equacionamento do método. A finalidade deste parâmetro é o de aumentar a importância dos critérios de maior peso, conforme abordado anteriormente.

O valor de S igual a 2 significa que os pesos são tomados ao quadrado, para o valor igual a 3 os pesos são tomados ao cubo e assim por diante. Para o valor de S igual a ∞ somente o critério de maior

Tabela 6. Resultado da aplicação dos métodos multicriteriais ao cenário Média dos Pesos.

Método	Classificação das alternativas								
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª
Electre II		4			1				
	2	6	5	9	3				
		7			8				
Promethee II	2	4	5	1	3	8	7	6	9
CP (S = 1)	2	4	5	1	3	8	7	6	9
(S = 2)	5	2	4	3	8	7	6	9	
			1						
CGT	2	5	4	1	3	8	7	6	9
EC	2	4	5	1	3	8	7	6	9

Tabela 7. Resultado da aplicação dos métodos multicriteriais ao cenário Moda dos Pesos.

Método	Classificação das alternativas								
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª
Electre II		4			1				
	2	6	5	9	3				
		7			8				
Promethee II	2	4	5	1	3	8	7	6	9
CP (S = 1)	2	4	5	1	3	8	7	6	9
(S = 2)	5	2	1	4	3	8	7	6	9
CGT	2	5	4	1	3	7	8	6	9
EC	2	4	5	1	3	8	7	6	9

peso é considerado. Desta maneira, para manter a equidade entre os resultados fornecidos pelos diferentes métodos, deve-se manter iguais as magnitudes atribuídas aos pesos para cada um dos critérios analisados para todos os métodos. Isto é possível adotando-se o valor de S igual ao valor 1. Desta forma, os resultados fornecidos por este método pela adoção de S = 2 não foram considerados para o cômputo final da ordenação das melhores alternativas.

Observa-se que, nos resultados obtidos, há ocorrência do mesmo tipo de resposta fornecido pelo método PROMETHEE II, ou melhor, não houve alteração da ordenação final das alternativas para os três primeiros cenários dos pesos analisados, o que corresponde aos cenários: média, moda e de pesos iguais. Somente para o último cenário (mínimo modificado) houve inversões de posições, como observado entre a 5ª e 6ª além da 7ª com a 8ª posições, que correspondem às mesmas mudanças verificadas no método PROMETHEE II, devido às mesmas alterações nos pesos dos critérios.

Tabela 8. Resultado da aplicação dos métodos multicriteriais ao cenário Pesos Iguais.

Método	Classificação das alternativas								
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª
Electre II		4			1				
	2	6	5	9	3				
		7			8				
Promethee II	2	4	5	1	3	8	7	6	9
CP (S = 1)	2	4	5	1	3	8	7	6	9
(S = 2)	2	1	4	3	8	7	6	9	
		5							
CGT	2	5	4	1	3	7	8	6	9
EC	2	1	4	5	3	7	8	6	9

Tabela 9. Resultado da aplicação dos métodos multicriteriais ao cenário Pesos Mínimos.

Método	Classificação das alternativas								
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª
Electre II		4			1				
	2	6	5	9	3				
		7			8				
Promethee II	2	5	4	1	8	3	6	7	9
CP (S = 1)	2	4	5	1	8	3	6	7	9
(S = 2)	5	2	1	8	4	3	6	7	9
CGT	2	5	1	4	3	8	6	7	9
EC	2	4	5	1	8	3	6	7	9

As quatro primeiras posições não se alteraram, o que evidencia que para qualquer um dos cenários analisados as quatro melhores alternativas estão entre os cinco primeiros planos de ação analisados, correspondendo, assim, às expectativas dos resultados.

As últimas posições foram ocupadas pelas alternativas consideradas como sendo as piores elaboradas, que correspondem as alternativas 7, 6 e 9, sendo a pior a 9. Outra observação importante que se deve fazer é quanto a classificação final. Ela é idêntica a do método PROMETHEE II, o que corrobora os resultados anteriormente obtidos.

Teoria do Jogo Cooperativo

O método CGT, diferentemente dos métodos anteriores, apresentou maior sensibilidade quanto a mudança dos cenários dos pesos. Para os cenários média e moda, que apresentam poucas diferenças entre si, os resultados mostraram pe-

quenas variações. Foi observada a inversão entre as posições de 6º e 7º lugares, ocupadas pelas alternativas 8 e 7, para o cenário média e, 7 e 8 para o cenário moda.

Não foi observada qualquer alteração nas posições das alternativas para os cenários moda e pesos iguais, ou melhor, elas foram coincidentes.

Para o cenário média e pesos iguais (e/ou moda), observou-se a inversão das alternativas que ocupavam a 6ª e 7ª posições, que para o cenário média correspondia às alternativas 8 e 7. Esta mudança de colocações foi devida ao aumento dos pesos relativos de um conjunto de critérios, que possuem valores maiores para a alternativa 7 que para a alternativa 8. No caso do cenário pesos iguais são eles: atratividade, perigo a acidentes, mudança de atividades, reassentamento, água subterrânea, erosão e assoreamento, planície de inundação e vegetação nativa. No caso do cenário moda, além desses listados para o cenário pesos iguais, acrescenta-se os critérios saúde mental e enchentes, que diminuíram seus pesos relativos e prejudicaram o desempenho da alternativa 8, que contava com melhores valores em relação a alternativa 7.

Para os cenários média e mínimos (modificado) também foram verificadas inversões para as posições 3ª com a 4ª e 7ª com a 8ª. Essas posições eram ocupadas no cenário média pelas alternativas de números 4, 1, 7 e 6, respectivamente, enquanto que no cenário mínimos a ordem era 1, 4, 6 e 7, respectivamente. Em ambas as inversões o critério econômico foi o responsável pela alteração, pois a alternativa 1 possui o dobro do valor da alternativa 4 e o valor da alternativa 6 corresponde a 4 vezes e meia o valor do mesmo critério para a alternativa 7.

Para os cenários moda e mínimos houve a alteração nas posições 3ª e 4ª, entre as alternativas 1 e 4, como observado na análise anterior, entre os cenários média e mínimos. Observou-se, ainda, alterações entre as alternativas classificadas nas 6ª, 7ª e 8ª colocações, ocupadas para o cenário moda pelas alternativas 7, 8 e 6, que para o cenário mínimos estas posições estão sendo ocupadas pelas alternativas 8, 6 e 7. Os critérios responsáveis por esta mudança foram: econômico - cuja a alternativa 6 é melhor que a alternativa 8, que por sua vez é melhor que a 7; saúde física - cuja a alternativa 8 é melhor que as alternativas 6 e 7, que por sua vez são iguais, e qualidade da água - em que as alternativas 6 e 7 possuem o mesmo valor, mas bem inferiores que o valor da alternativa de número 8.

O importante a ser observado é que para todas as alterações verificadas elas sempre ocorreram

entre as últimas classificações, sendo que para os quatro cenários dos pesos aplicados as primeiras duas posições permaneceram inalteradas. Além do mais, as cinco alternativas consideradas como sendo as melhores foram sempre classificadas entre as cinco primeiras posições, o que vem contribuir para aumentar a confiança quanto aos resultados obtidos.

A única diferença entre as classificações fornecida pelo CGT e pelos outros dois métodos, o PROMETHEE II e o CP (Programação por Compromisso), está no fato de que para o CGT a 2ª posição estaria ocupada pela alternativa 5, enquanto que para os outros dois métodos, esta posição corresponderia a alternativa 4, que ocupa a 3ª posição na classificação pelo CGT. Ou seja, houve apenas uma inversão dessas posições pelas alternativas 4 e 5. A alternativa 5 é mais atraente do ponto de vista econômico, pois o valor atribuído a este critério para a alternativa 5 corresponde ao valor 4, enquanto que para a alternativa 4 o valor corresponde a 2. Por outro lado, os critérios saúde física e empregos são mais favoráveis à alternativa 4 do que para a alternativa 5. O valor do critério saúde física para a alternativa 4 corresponde ao valor 9 enquanto para a alternativa 5 este valor é igual a 7. Quanto ao valor do critério “empregos” o critério possui valor 8 para a alternativa 4 e valor 7 para a alternativa 5. As diferentes formas de resolução do problema pelos métodos utilizados é que permitem que uma ou outra alternativa melhore seu desempenho em relação às demais alternativas.

O método CGT apresentou resultados coerentes com os resultados apresentados pelos métodos PROMETHEE II e CP, que indicaram as alternativas 1 a 5 nas primeiras posições da hierarquização.

AHP (Processo de Hierarquização Analítica)

O método AHP, juntamente com o CGT, foram os métodos que apresentaram maior sensibilidade quanto às mudanças dos cenários dos pesos analisados.

Para a análise dos dois primeiros cenários, correspondentes à média e à moda, não foram observadas quaisquer alterações e, portanto, as respostas para estes dois cenários foram coincidentes.

Comparando-se os cenários dos pesos correspondentes à média e ao de pesos iguais, verifica-se que houve inversão em duas situações, a primeira entre as 2ª a 4ª posições e a outra entre as posições de 6ª e 7ª. Na primeira situação, para o cenário

média, essas colocações estavam sendo ocupadas pelas alternativas 4, 5 e 1, mas para o cenário pesos iguais passaram a ser ocupadas pelas alternativas de 1, 4 e 5, respectivamente. Essas mudanças foram causadas principalmente por três critérios: o critério econômico beneficiou a alternativa 1 em relação a alternativa 4, mas não influenciou na posição da alternativa 5 pois eram iguais; o critério empregos, destacou a alternativa 1 em relação as alternativas 4 e 5 e também da 4 em relação a 5; o critério saúde física, melhora a alternativa 4 em relação a 5 e 1, neste caso o valor deste critério para as alternativas 5 e 1 é igual.

Para a segunda situação a alternativa 7 foi beneficiada por um conjunto de critérios. São eles: atratividade, perigo à acidentes, mudança de atividades, reassentamento, água subterrânea, planícies inundáveis e vegetação nativa, cujos os valores para a alternativa 7 são bem maiores que os apresentados pela alternativa 8.

Para os cenários moda e mínimos observase inversões nas posições entre as alternativas 3 e 8, que ocupavam a 6ª e 7ª posição e entre as alternativas 7 e 6 que ocupavam a 7ª e 8ª posição, respectivamente. O critério que definiu a inversão na classificação das alternativas 3 e 8 foi o da qualidade da água que beneficiou a alternativa 8 em relação a alternativa 3. Para a inversão das alternativas 6 e 7, o critério econômico foi quem definiu a alteração verificada.

O importante a ser observado neste método é que para as cinco primeiras colocações os resultados são coincidentes aos resultados fornecidos pelo método CGT, a menos da quinta posição para o cenário mínimos. Para os dois primeiros cenários analisados, os resultados foram coincidentes com aqueles fornecidos pelos métodos PROMETHEE II e CP, o que reforça a confiança nos resultados obtidos por todos os métodos.

Em todos os métodos aplicados, inclusive para o método ELECTRE, a melhor alternativa apontada foi a alternativa 2, enquanto que as alternativas 4 e 5 se alternavam na segunda e terceira colocações em função do método e do cenário analisado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia apresentada para a aplicação em problemas de tomada de decisão, utilizando enfoque multicriterial, possibilitou incorporar, sistematicamente, aspectos sociais, econômicos, técnicos

e ambientais. Considerou-se 20 diferentes critérios entre nove alternativas, ultrapassando a tradicional análise técnico-econômica.

A metodologia adotada mostrou-se apropriada visto que quatro dos cinco métodos testados apresentaram respostas semelhantes (Promethee II, CP, CGT e AHP), em que apenas um não atendeu às expectativas para este trabalho (ELECTRE II). A utilização de diferentes técnicas de análise multicriterial para a tomada de decisão de um projeto de caráter ambiental mostrou ser muito importante.

Baseado nos resultados obtidos neste trabalho, considerou-se que o método ELECTRE II não atendeu as expectativas porque a hierarquização das alternativas, por ele realizada, não contemplou as alternativas de melhor proposta tecnológica, a da recuperação ambiental. A inclusão de alternativas ruins, juntamente com as alternativas boas pareceu ser bem interessante, visto que permitiu aferir as respostas fornecidas pelos diferentes métodos.

A adoção de diferentes cenários de pesos, por este trabalho, objetivava analisar as possíveis alterações das escolhas das alternativas pelos diferentes métodos multicriteriais. Esse procedimento permitiria simular as possíveis diferenças nas respostas fornecidas pelos métodos, para o mesmo problema, pela simples alteração dos cenários dos pesos, que representaria os interesses de diferentes grupos. Observou-se que algumas alternativas realmente trocavam de posições com a mudança dos cenários de pesos, porém, sempre mantendo as cinco alternativas mais parecidas e de melhor proposta tecnológica entre as melhores classificadas, independente do cenário adotado. Em suma, não houve alterações radicais nas respostas dos métodos com a troca dos cenários. A adoção dos cenários Média e Moda dos valores atribuídos pelos opinadores pareceu ser bastante razoável.

A metodologia utilizada possibilitou a obtenção de resultados que eram esperados a priori, ou seja, de que as alternativas analisadas fossem divididas em dois grupos. O primeiro grupo, das cinco melhores alternativas, possuíam poucas diferenças entre si, o que dificultava uma avaliação direta de qual das cinco alternativas seria considerada a melhor. Essas pequenas diferenças foram responsáveis pelas alterações na classificação das alternativas com a mudança dos cenários dos pesos, para todos os métodos. Essa alteração não foi observada para o segundo grupo de alternativas.

O segundo grupo, composto de quatro alternativas, possuía apenas uma alternativa (número

8), que contemplava o tratamento terciário natural para o efluente da ETE-Barueri, ou seja, de melhor solução tecnológica que as alternativas 6, 7 e 9, porém inferior às cinco primeiras. Não se conhecia, previamente, qual seria a classificação final obtida pelas alternativas; essa resposta foi fornecida pelos métodos multicriteriais aplicados. Desta forma, os resultados fornecidos pelos métodos multicriteriais contemplaram as melhores alternativas, ou melhor, apenas um dos cinco métodos aplicados não forneceu as respostas coerentes com as expectativas.

A utilização de diferentes técnicas de análise multicriterial para a tomada de decisão de um projeto de caráter ambiental mostrou ser muito importante. Assim, neste trabalho foram considerados, para efeito de ordenação final das alternativas, somente os resultados de quatro dos cinco métodos analisados: PROMETHEE II, CP (Programação por Compromisso), CGT (Teoria do Jogo Cooperativo) e o AHP. Esses quatro métodos apresentaram os resultados praticamente idênticos, podendo então ser assumido, como resultado final, a média entre seus resultados. Desta forma a Figura 5 apresenta a classificação final obtida por este trabalho para o estudo de caso realizado.

É importante observar que se a análise tivesse sido feita através da relação benefício/custo os resultados finais teriam sido completamente diferentes dos obtidos através da análise multicriterial. A Figura 6 ilustra qual teria sido a classificação final por essa relação, conforme apresentado na Tabela 5 (Matriz *payoff*) na avaliação do critério econômico. Caso a análise benefício/custo desprezasse as alternativas provenientes dos cenários já abandonados nos estudos da FBDS (alternativas 6, 7, 8 e 9), as melhores alternativas seriam: 5, 1, 2, 3 e 4.

Em análises que envolvam múltiplos critérios é muito difícil isentar um critério da influência de outros. Na natureza o equilíbrio é estabelecido pela harmonia das interrelações entre os diversos fatores e agentes que a compõe. A cada mudança de um desses agentes ou fatores segue-se um novo ponto de equilíbrio, provocado pelo desequilíbrio. As interrelações existentes entre os critérios possuem diferentes ordens de grandeza. Neste trabalho não se orientou a análise no sentido de eliminar essas sobreposições, assim, algumas vezes, um critério pode ter sido considerado, direta ou indiretamente, em outros critérios. Caso essas sobreposições tivessem sido eliminadas os resultados obtidos pela análise multicriterial, certamente, seriam diferentes.

Acredita-se que a possibilidade de inclusão/exclusão de critérios, assim como a própria-

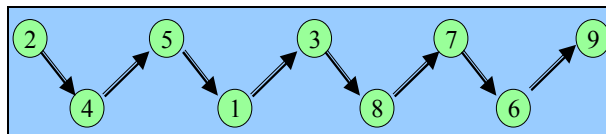


Figura 5. Classificação final, para as melhores alternativas, obtidas através dos resultados dos métodos PROMETHEE II, CGT e CP e AHP, pela análise multicriterial.

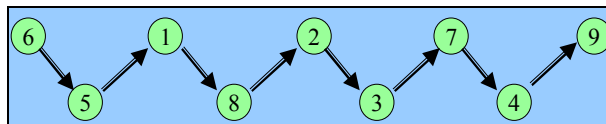


Figura 6. Classificação final, para as melhores alternativas, obtidas através da relação benefício/custo.

definição de seus pesos, poderá ajudar a diminuir conflitos em processos de tomada de decisão, inclusive com a criação de novos cenários a serem avaliados. Essa versatilidade permite a incorporação de características singulares dos locais envolvidos no processo de tomada de decisão. Desta forma, é possível incorporar o conhecimento adquirido das características locais, tais como culturais, técnicas e ambientais, contribuindo até mesmo para a diminuição da subjetividade de algum(s) critério(s), pela representação da vontade, do conhecimento e/ou da “sabedoria” da comunidade local.

Uma vez negociados os critérios e seus pesos, as alternativas seriam, automaticamente, hierarquizadas. O processo final da tomada de decisão seria bastante simplificado, uma vez que os métodos multicriteriais reduziram, substancialmente, o número de alternativas, restando apenas algumas de melhor compromisso a serem negociadas, ou melhor, qualquer alternativa seria uma escolha aceitável.

Outros aspectos relevantes também devem ser abordados como por exemplo a existência da necessidade da simplificação da entrada de dados para a valoração de alguns critérios, bem como a transformação dos dados para a definição da escala final de valores que, apesar de ser lógica, é também subjetiva. É extremamente necessário salientar a importância dos dados disponíveis para a valoração dos critérios. Não somente a quantidade e qualidade dos dados foram importantes, como também de que maneira essas informações foram traduzidas nos valores para os critérios. A disponibilidade de dados por si só não garantiu que a valoração dos critérios fugisse da análise booleana, mas garantiu, entretanto, que seus valores fossem considerados robustos.

Essas situações sugerem a necessidade de algumas adaptações no sistema de peso dos critérios. Seria necessário dois sistemas distintos de ponderação para os critérios: o primeiro corresponderia ao peso relativo que um determinado critério tem com relação aos outros, da mesma maneira como foi adotado neste trabalho. O segundo sistema seria quanto à necessidade da diferenciação das escalas de valores dos critérios, que para este trabalho foi assumido como sendo iguais. As escalas dos valores devem ser proporcionais à confiança que se tem nas informações utilizadas para a valoração dos critérios, que poderiam variar em uma faixa entre zero e 100. Esta escala poderia ser fornecida pela equipe multidisciplinar que analisa e levanta o banco de dados, pois somente ela conhece a robustez ou fragilidade das informações levantadas. Este segundo sistema de ponderação não deverá estar sujeito à interferência do tomador de decisões.

Adotando esses dois sistemas de ponderação o critério baseado em dados robustos terá uma escala de valor superior à escala de valor de um critério baseado em dados frágeis e isto deverá se refletir no resultado final da escolha das alternativas pelos métodos multicriteriais. Os critérios frágeis também poderiam ser representados através de probabilidades ou de incertezas que podem ser incorporados através da inclusão da metodologia nebulosa (*fuzzy sets*) nos arcabouços dos métodos multicriteriais.

Uma última consideração deve ser feita e está relacionada com o ganho político dos projetos que visam a incorporação de critérios ambientais e sociais. Esta estratégia aproxima as questões técnicas dos projetos aos anseios da sociedade e contribui na implementação do desenvolvimento sustentável, conforme os conceitos definidos pela Agenda 21.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a SABESP pela colaboração na execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, P. S. e GOBETTI, L. E. C. (1995). *Multiplean: modelo multiojetivo para seleção de alternativas do plano integrado para aproveitamento e controle dos recursos hídricos das bacias do Alto Tietê, Piracicaba, Baixada Santista e Sorocaba*. Relatório Técnico nº2, São Paulo: Consórcio Hidroplan, setembro.
- BARBOSA, P. S. F.; BRAGA Jr., B. P. F. & GOBETTI, L. E. C. (1996). Water supply management in the São Paulo Metropolitan Area, formulated using an integrated Approach. *J. Water SRT - Aqua*, 45(6), p.299-307.
- BENAYOUN, R.; ROY, B. & SUSSMAN, B. (1966). ELECTRE: *Une methode pour guider le choix en presence de points de vue multiples*. Direction Scientifique. Note de travail n°49, SEMA Paris.
- BENTON, V. (1986). A comparison of the analytic hierarchy process and a simple multiattribute value function. *European Journal of Operational Research*, 26, p.7-21.
- BRAGA Jr., B. P. F.; MARCELINI, L.; BARROS, M. T. L. e ALMEIDA, S. B. (1991). Análise de decisão multiobjetivo: o caso do vale do rio Doce. In: XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Rio de Janeiro. *Anais II*, p.501-510.
- BRANS, J. P. & MARECHAL, B. (1997). *Multicriteria decision and the PROMETHEE gaia solution*. Vrije Universiteit Brussel, Centrum Voor Statistiek en Operationeel Onderzoek, STOOTW/278, May.
- CHARNES, A. & COOPER, W. W. (1961). *Management models and industrial applications of linear programming*, vol. 1, Wiley, New York.
- FRICKE, G. T.; NOUR, E. A. A. e SINGER, E. M. (1989). Análise multicriterial da bacia do rio Piracicaba através das metodologias ELECTRE I e ELECTRE II. In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belém, PA. *Anais II*, p.193-213.
- GERSHON, M. & DUCKSTEIN, L. (1983). Multiobjective approaches to river basin planning. *Journal of Water Planning and Management*, 109(1), jan., p.13-28.
- GOBETTI, L. E. C. (1993). *Análise multiobjetivo aplicada ao planejamento de sistemas de recursos hídricos*. Dissertação de Mestrado Apresentada à EPUSP, para a Obtenção de Título de Mestre em Engenharia. São Paulo, p.132.
- GOICOECHEA, A.; HASEN, D. R. & DUCKSTEIN, L. (1982). *Multiobjective decision analysis with engineering and business*. John Wiley & Sons, Inc. Canada. 519 p.
- HILLIER, F. S. e LIEBERMAN, G. J. (1988). *Introdução a pesquisa operacional*. Editora Campus Ltda e Editora da USP. Tradução: Lemos, H. L. São Paulo, p.805.
- IGNÍZIO, J. (1976). *Goal programming and extentions health* (Lexington Books), Lexington Massachusetts.
- IJIRI, Y. (1965). *Management goals and accounting for control*. Rand McNally, Chicago Illinois.
- KEENEY, R. L. & HAIFA, H. (1976). *Decision with multiple objectives: preferences and value tradeoffs*. John Wiley & Sons, Inc.
- KOOPMANS, T. C. (1951). *Activity analysis of production and allocation*, Cowles commission for research in economics, Monograph n°13, Wiley, New York.
- KORHONEN, P.; MOSKOWITZ, H. & WALLENIUS, J. (1992). Multiple criteria decision support - A

- review. *European Journal of Operational Research*, 63, p.361-375.
- LEE, S. M. (1972). *Goal programming for decision analysis*, Auerbach Publishers, Philadelphia.
- MAYS, L. W. & TUNG, Y. K. (1992). *Hydrosystems engineering & management*. McGraw-Hill, New York, 530 p.
- PALMER, R. N. & LUND, J. R. (1985). Multi-objective analysis with subjective information. *Journal of Water Resources, Planning and Management*, 111(4), p.399-416.
- PARDALOS, P. M.; SISKOS, Y. & ZOPOUNIDIS, C. (1995). (eds) - *Advances in multicriteria analysis*. (Non-convex optimization and its application; V.5). Kluwer academic publishers. Netherlands. p.249.
- PARETO, V. (1896). *Course d'economy politique*. Lausanne, Rouge.
- ROY, B. (1968). *Classement et choix en presence de points de vue multiples (la methode ELECTRE)*. *Revue d'Informa-tique et de recherché opérationelle*, 6(8), p.57-75.
- ROY, B. (1985). *Méthodologie multicritère d'aide la décision*. Economica, Paris.
- ROY, B. & BERTIER, P. (1971). *La Méthode ELECTRE II*. Working paper 142, SEMA.
- ROY, B. & BERTIER, P. (1973). *La ELECTRE II: une application au media-planning*. VII ème Conférence internationale de recherché opérationelle, Dublin (Ross, M. ed.) OR. 72. North Holland, Amsterdam, p.291-302.
- SAATY, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierachical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15, p.234-281.
- SABESP (1997). *Programa de Conservação do Sistema Cotia*. Projeto de reabilitação, expansão e conservação do Baixo Cotia. Relatórios técnicos FBDS (contrato 079/96-A).
- SHARLING, A. (1985). *Decider sur plusiers critieres*. Colletion diriger l'enterprise, Presses Polytechniques Romandes.
- SZIDAROVSZKY, F.; DUCKSTEIN, L. & BOGARDI, I. (1980). *Multiobjective management of a karstic aquifer by game theory*. Working paper # 80-22, department of systems and industrial engineering, University of Arizona, Tucson, Ariz.
- VINCKE, Ph. (1992). *Multicriteria decision aid*. John Wiley & Sons Ltd. Baffins Lane. Chichester e New York. 154 p.
- ZELENY, M. (1982). *Multiple criteria decision making*. McGraw-Hill Book Company. New York. 563 p.
- ZIONTS, S. (1992). The state of multiple criteria decision making: Past, present and future. In: Goicoechea, A.; Duckstein, L. e Zionts, S. (eds) *Multiple Criteria Decision Making*, Springer-Verlag, New York.
- ZUFFO, A. C. (1998). *Seleção e Aplicação de Métodos Multicriteriais ao Planejamento Ambiental de Recursos Hídricos*. Tese de doutorado apresentada à EESC-USP para obtenção de título de doutor em engenharia. São Carlos-SP, p.301.

Application of Multicriteria Methods in Water Resources Planning

ABSTRACT

In water resources planning streams should be appraised under a systemic perspective, integrated in their environment. In order to do so it is necessary to analyze the environmental and social aspects that are difficult to insert, as compared with technical and economic ones that are more easily quantified. In this sense, several experiences have been performed using multicriteria methods. This work aims to evaluate the results of different multicriteria methods that incorporate environmental, social, technical and economical characteristics, commonly used in water resources planning studies, based on an ecosystemic view of the environment. The study case adopted was the Baixo Cotia basin, located in the Metropolitan Area of Sao Paulo (RMSP) Brazil. The central objective consisted of planning the rehabilitation, expansion and conservation of the drinking water production system. Twenty criteria and nine different alternatives were adopted to study the problem to which 5 different methods to help in decisions-making were applied. The five methods used were: ELECTRE II, PROMETHEE II, Compromise Programming (CP), Cooperative Game Theory (CGT) and the Hierarchical Analytical Process (AHP). The multicriteria methods were applied to 4 different scenarios of weights attributed to each criterion, obtained from experts, through consultation by structured questionnaire. Four different methods presented practically coinciding results. The inclusion of environmental and social criteria was considered feasible, enabling the improvement of the decision-making process to choose alternatives.

Keywords: water resources planning and management; multicriteria analysis; water reuse; multicriteria methods; decision-making.