

## **Análise Multicritério para a Avaliação de Sistemas de Drenagem Urbana Proposição de Indicadores e de Sistemática de Estudo**

**Leonardo Mitre Alvim de Castro, Márcio Benedito Baptista**

Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos – EE-UFMG – Belo Horizonte, MG  
leomitre@hotmail.com , marbapt@ehr.ufmg.br

**Oscar de Moraes Cordeiro Netto**

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – UnB – FT/ENC - Brasília, DF  
cordeiro@unb.br

Recebido: 13/06/03 revisado: 08/01/04 aceito: 13/12/04

---

### **RESUMO**

*O processo de urbanização ocorrido nos últimos tempos vem trazendo mudanças no ciclo hidrológico, levando os sistemas clássicos de drenagem urbana a operarem em seus limites e com uma freqüente ocorrência de falhas. Para atenuar esses efeitos, estão sendo desenvolvidas técnicas alternativas de drenagem urbana, que se baseiam, principalmente, na retenção e na infiltração das águas precipitadas. Assim, tendo em vista as diferentes possibilidades de concepção de sistemas de drenagem atualmente disponíveis, tornou-se importante a comparação da eficiência técnica, ambiental e social dos diversos arranjos de projeto possíveis para a drenagem de uma área.*

*O presente trabalho tem como objetivo principal a proposição de indicadores para a avaliação de sistemas de drenagem urbana. Estes indicadores foram aplicados e verificados, por meio de dois métodos de análise multicritério, o Electre III e o Programação de Compromisso, em três estudos de caso, para áreas escolhidas cujos projetos de drenagem incluíam arranjos bastante diversos com a utilização de sistemas clássicos, intermediários e alternativos.*

*Uma conclusão importante desse trabalho foi a constatação da melhor performance dos sistemas dotados de técnicas alternativas ao incluírem na análise os aspectos ambientais, sanitários e sociais, além dos aspectos hidráulicos e hidrológicos usualmente empregados.*

**Palavras-chave:** drenagem urbana, indicadores, análise multicritério.

---

### **A EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA**

As cidades e os cursos de água sempre tiveram uma ligação muito importante ao longo da história da humanidade. Desde as primeiras aglomerações, pode ser verificada a localização das cidades preferencialmente junto aos cursos de água. Isto se deu em virtude da facilidade de seu suprimento para o consumo e higiene das populações, bem como para a evacuação dos dejetos. Essa proximidade era considerada, ainda, como um importante fator de produção para atividades agrícolas ou artesanais, favorecendo as comunicações, o comércio e o transporte. No entanto, apesar desses benefícios, periodicamente ocorriam inundações, levando a perdas em vários setores da comunidade. Esse risco era, entretanto, relativamente bem aceito até meados do século XIX, sendo considerado como “um preço a pagar” pelas vantagens representadas pela disponibilidade da água junto à cidade.

Na Europa, na Idade Média, a estratificação social do uso do solo urbano e a ausência de implantação de

novos sistemas de evacuação e de manutenção dos sistemas antigos, muitas vezes construídos pelos romanos, que acabaram por cair em desuso, levaram a condições de vida bastante insalubres nas cidades, com a presença constante de lama e esgotos junto ao sistema viário (Baptista e Nascimento, 2002).

Esses problemas, hidráulicos e sanitários, foram ampliados com a primeira revolução industrial, que levou à intensificação da urbanização. Em função de grandes epidemias de cólera e tifo que assolaram a Europa no século XIX e dos conseqüentes avanços da epidemiologia, surgiram os princípios do *higienismo*. Esses princípios, base dos chamados *sistemas clássicos de drenagem*, preconizavam a evacuação rápida das águas pluviais, através de condutos, preferencialmente subterrâneos, permitindo melhoria das condições sanitárias e da circulação viária.

Desse período datam, segundo Chocat (1997), os primeiros estudos em hidrologia urbana, destacando-se os trabalhos de Kuilching, Burkli-Ziegler e Belgrand ao final do século XIX e Lloyd-Davis no início do século XX.

A partir da década de 1950, a revolução dos modos de produção agrícola e o crescimento da produção industrial levaram a uma explosão demográfica urbana nos países industrializados, conduzindo ao agravamento da poluição dos corpos receptores e provocando mudanças no ciclo hidrológico, com a redução da infiltração e o conseqüente aumento do volume de escoamento superficial.

Esses efeitos hidrológicos, associados à aceleração do escoamento ocasionada pela concepção dos sistemas de drenagem urbana, levaram ao aumento da magnitude dos picos de cheia e das crises de funcionamento dos sistemas coletores, com o conseqüente aumento da frequência das inundações urbanas, com seus impactos sociais, sanitários, econômicos e ambientais.

A partir da evidência das diversas limitações dos sistemas clássicos, o meio técnico vem direcionando suas pesquisas em drenagem urbana para o desenvolvimento das chamadas *técnicas alternativas* ou *compensatórias*. Essas novas técnicas buscam neutralizar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos, beneficiando a qualidade de vida e a conservação ambiental.

As novas tecnologias podem ser consideradas como alternativas em relação às clássicas por considerarem os impactos da urbanização de forma global, permitindo a continuidade do desenvolvimento urbano, sem gerar custos excessivos e possibilitando o tratamento conjunto das questões de drenagem pluvial com outras questões urbanísticas.

Essas tecnologias baseiam-se, principalmente, na infiltração e retenção das águas precipitadas, acarretando a diminuição do volume escoado e o rearranjo temporal das vazões. Quando adequadamente concebidas, elas podem exercer importante papel na melhoria da qualidade das águas pluviais. Elas podem assumir múltiplas formas, podendo ser utilizadas em diferentes escalas, desde pequenas parcelas até o projeto de sistemas de drenagem para cidades inteiras, além de poderem ser facilmente integradas ao meio ambiente, permitindo usos diversos pela população, como áreas de estacionamento, áreas para a prática de esportes, áreas de parques ou de lazer inundáveis.

Essas técnicas podem ser classificadas em três tipos distintos, segundo a forma de controle de vazões:

- Técnicas para controle na fonte: poços de infiltração, micro-reservatórios individuais, valas, valetas ou áreas de armazenamento e/ou infiltração, telhados armazenadores, *etc.*;
- Técnicas para controle nos sistemas viário e de drenagem: pavimentos porosos, valas e valetas de armazenamento e/ou infiltração, áreas de armazenamento em pátios ou estacionamentos, *etc.*;
- Técnicas para controle centralizado: Bacias de retenção e/ou infiltração.

No entanto, conforme Barraud *et al.* (2000), mesmo parecendo ricas em potencialidades, essas soluções são freqüentemente pouco ou mal utilizadas. Um dos fatores preponderantes para esse fato reside não no conhecimento técnico propriamente dito das tecnologias alternativas, pois estas já estão razoavelmente bem estudadas e entendidas individualmente, mas sim na dificuldade da escolha do melhor arranjo de projeto a ser utilizado para uma dada situação. Geralmente, para uma mesma área a ser estudada, podem ser propostas diversas alternativas de projeto a partir de múltiplos pontos de vista (hidráulico, hidrológico, ambiental, sanitário, urbanístico, paisagístico, social, *etc.*). Assim, cada uma das diversas alternativas de projeto tem características específicas de atendimento aos diferentes aspectos relacionados com o sistema de drenagem.

Nesse contexto, desenvolveu-se o presente trabalho, que visa à proposição de uma metodologia que permita a comparação global das alternativas de projeto de sistemas de drenagem urbana, à luz do conjunto dos aspectos intervenientes, além dos critérios puramente técnicos – hidrológicos e hidráulicos – usualmente considerados.

## **BASES PARA A AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE PROJETO**

### **Critérios para a avaliação de alternativas**

O termo *avaliação* pode ser definido, segundo Lichfield *et al.* (1975), como o processo de análise de um determinado número de planos ou projetos, com a finalidade de definir suas vantagens e desvantagens, colocando-as de uma forma que possam ser comparados. Nesse sentido, a análise de alternativas de projeto deve ser muito mais que apenas a comparação de critérios técnicos ou econômicos. Questões políticas, sociais e ambientais, além de outras que forem relevantes ao processo, devem ser consideradas, de forma a torná-lo mais abrangente e consistente.

A avaliação deve ser desenvolvida a partir de conjuntos de atributos definidos para os diversos aspectos a serem comparados dentre as possíveis alternativas de projeto. Esses aspectos vão depender tanto dos objetivos da obra como do sistema de valores dos participantes e decisores intervenientes no processo. No caso da avaliação de empreendimentos privados, por exemplo, cujo objetivo principal é uma boa alternativa de investimento, devem ser considerados, principalmente, segundo Harada e Cordeiro Netto (1999), critérios econômicos e financeiros. A alternativa a ser escolhida deverá ser, dentre as que atingirem os critérios técnicos de projeto, a que obtiver maior rentabilidade, além de melhor se adaptar à conjuntura vivida pelo investidor. Para empreendimentos governamentais, em que

a maior importância deve ser dada aos aspectos sociais, o processo de avaliação se mostra mais complexo; a rentabilidade torna-se apenas uma vantagem, dentre outras importantes a serem obtidas com o investimento, como a distribuição de renda na sociedade e os impactos sociais e ambientais gerados.

### Utilização de indicadores como parâmetros de comparação

*Indicadores* são, atualmente, componentes essenciais em processos de tomada de decisão envolvendo múltiplos critérios, permitindo agregar informações consideradas relevantes. pelos decisores e pela comunidade.

Moldan e Bilharz (1997) afirmam que os indicadores desejáveis são aqueles que resumem ou simplificam informações, quantificando, medindo ou comunicando dados, de forma a tornar um determinado fenômeno compreensível por todos. Conforme Tunstall (1992), os indicadores podem desempenhar várias funções, sendo as principais:

- estudar condições e tendências;
- comparar lugares, situações ou alternativas;
- proporcionar antecedência ao advertir sobre algum efeito ou impacto de uma ação;
- prever futuras condições e tendências.

Uma das dificuldades que se apresenta para uso dos indicadores consiste na integração de variáveis, uma vez que elas frequentemente envolvem grandezas de natureza distintas.

### Análise de critério único e multicritério

Segundo Harada e Cordeiro Netto (1999), a estrutura de análise do tipo *critério único* é aquela baseada no princípio da agregação dos diferentes efeitos analisados e a consideração dos ganhos em um único critério. Isso significa a busca do maior valor ou do valor mais próximo a um máximo desejado para uma função  $z(x)$ . Essa função é o principal parâmetro utilizado para a comparação entre as alternativas.

Segundo esse modelo,  $z(x) > z(y)$  significa que a alternativa  $x$  é preferível à  $y$ . Ele leva em conta ainda, o princípio da transitividade, o que significa dizer que, se  $z(x) > z(y)$  e  $z(y) > z(w)$ , então,  $z(x) > z(w)$ . A igualdade ou a inexistência de preferência entre alternativas só é admitida, quando houver valores iguais para suas avaliações.

Os principais tipos de avaliação de alternativas, a partir da análise de critério único, são: custo-efetividade, custo-benefício e risco-benefício.

As avaliações de alternativas de projeto não devem ser forçosamente efetuadas a partir do atendimento a apenas um critério. Em alguns casos, é importante que sejam considerados, ao mesmo tempo, aspectos econômicos, sociais, ambientais e políticos bem como quaisquer outros que se mostrarem relevantes à comparação de um determinado conjunto de alternativas. Intervêm, também, freqüentemente, múltiplos decisores, com conflitos de interesses e diferentes pontos de vista. Para a realização de uma análise global, são necessários, nestes casos, métodos baseados na otimização da agregação de um grupo de funções.

Ainda, segundo Harada e Cordeiro Netto (1999), a grande vantagem desses métodos, denominados *multicritério*, é poder integrar, na análise, diversos critérios que não o seriam nas análises de critério único. Com isso, podem ser mais bem percebidas e comparadas as particularidades de cada alternativa de projeto proposta.

Nesse tipo de análise, segundo Braga Junior e Gobetti (1997), é verificada uma nova nuance para o conceito de otimização, uma vez que não existe apenas um único ótimo em um problema com o atendimento a múltiplos critérios. Há sempre um conjunto ótimo de soluções, atendendo de formas diferentes aos critérios envolvidos na análise. Esse conjunto é chamado de *Conjunto Ótimo de Pareto*, no qual só é possível a melhoria em relação a um critério, com a degradação em relação a outro.

No entanto, esses métodos apresentam a desvantagem de necessitar de um grande número de informações para a avaliação de cada alternativa. Além disso, os decisores e a escolha dos critérios a serem avaliados têm bastante relevância no processo, tornando a análise às vezes muito subjetiva.

Muitos são os métodos de análise multicritério e a escolha do melhor deles para a resolução de um determinado problema não é trivial. Conforme Zuffo *et al.* (2002), muito foi escrito sobre as diferentes técnicas de resolução, sendo continuamente apresentados novos métodos, com suas vantagens e desvantagens em relação aos anteriores, tornando difícil a escolha daquele a ser utilizado. Segundo Generino e Cordeiro Netto (1999), a utilização de um deles irá depender do problema a ser analisado, da familiaridade do analista com determinado método e da existência dos recursos necessários à sua aplicação.

### A avaliação de alternativas de projeto em drenagem urbana

Para o presente trabalho, que visa, especificamente, a avaliação de sistemas de drenagem urbana, tendo em vista a multiplicidade dos aspectos intervenientes, optou-se pela adoção de uma sistemática baseada em análise multicritério, sendo esta fundada sobre um certo número de

indicadores considerados pertinentes. A descrição dos indicadores e das metodologias de análise multicritério utilizadas é efetuada ulteriormente.

## MÉTODOS DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO

A escolha dos métodos de análise multicritério a serem utilizados foi determinada pela adequação desses ao tipo de problema em análise.

Nesse sentido, julgou-se interessante a utilização de dois métodos diferentes, baseados em formas distintas de análise, com o objetivo de poder verificar possíveis variações na ordenação de alternativas de projeto e identificando o interesse da adoção de uma ou outra abordagem. Os métodos escolhidos foram a Programação de Compromisso e o Electre III.

### Programação de Compromisso

O método de Programação de Compromisso, do inglês *Compromise Programming* busca, segundo Zeleny (1973), *apud* Harada (1999), a identificação de soluções não-dominadas, nesse caso, as mais próximas de uma solução ideal. Segundo Souza (1998), esse trabalho é realizado por meio do emprego de uma medida chamada de *grau de proximidade*. Para a análise, é definida, em um primeiro momento, a solução ideal, sendo ela:

$$f^* = (f_1^*, f_2^*, f_3^*, \dots, f_n^*) \quad (1)$$

Em que  $f_i^*$  é o melhor valor no conjunto finito dos  $f^*(x)$  para cada critério  $i$ . A solução ideal corresponde, então, ao vetor dos melhores valores possíveis para cada critério, na matriz de avaliação. Da mesma forma, é definida a solução mais desfavorável, sendo ela determinada pelo vetor  $f^{**}(x)$ , com os piores valores encontrados para cada critério.

O grau de proximidade pode ser determinado de várias maneiras, sendo sugerido por Goicoechea *et al.* (1982) *apud* Harada (1999), por meio da expressão:

$$I_p = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \left[ \frac{(f_i^* - f_i(x))}{(f_i^* - f_i^{**})} \right] \quad (2)$$

em que  $\lambda_i$  são os pesos de cada critério  $i$ . A melhor alternativa é a que tiver menor valor de  $I_p$ , sendo a mais próxima da solução ideal.

### Electre III

Dentre os métodos existentes da família Electre, do francês *Elimination et Choix Traduisant Réalité* são verifi-

casadas diversas variações determinando diferenças importantes na forma de análise. Em função das suas características e da sua adequação à análise proposta, o método escolhido foi o Electre III. Suas principais características se referem ao fato de utilizar pseudo-critérios tendo como resultado de sua análise uma classificação difusa das alternativas.

Segundo Roy (1978), o método Electre III fundamenta-se na comparação de cada duas ações a partir de uma relação chamada de *sobreclassificação*. Dizer que a ação  $a_i$  sobreclassifica a ação  $a_j$ , por exemplo, significa afirmar que  $a_i$  é pelo menos tão boa quanto  $a_j$ . Essas duas ações podem ser indiferentes ou uma poderá ser preferida em relação à outra em relação a algum critério. Conforme Maystre *et al.* (1994), *apud* Azzout (1996), a utilização de um pseudo-critério permite a percepção de uma nuance entre a *indiferença* e a *preferência estrita*, com a introdução do conceito de *preferência fraca*. As relações de indiferença, preferência fraca e preferência estrita são simbolizadas respectivamente pelas letras I, Q e P.

O pseudo-critério é caracterizado pela introdução de dois limiares: o limiar de indiferença  $q_i$  e o limiar de preferência estrita  $p_i$ . O limiar  $q_i$  representa um valor julgado como insignificante para diferenciar duas ações em relação ao critério  $i$ . O limiar  $p_i$  tem a função de transmitir a margem máxima de incerteza associada à garantia de que um resultado é melhor que outro. Esses limiares podem ser constantes ou dependentes da ação considerada. Eles são definidos por uma relação do tipo:

$$p_i(g_i(a)) = \alpha + \beta \cdot g_i(a) \quad (3)$$

Em que  $g_i(a)$  é a avaliação da ação  $a$  segundo o critério  $i$ .

Por meio do Electre III, é constituída uma relação de sobreclassificação difusa entre cada duas ações ( $a_i$  e  $a_j$ ). Essa relação apóia-se nos conceitos de *concordância* e *discordância*. A idéia principal é que, se uma ação  $a_i$  é melhor que uma ação  $a_j$  sobre a maioria dos critérios (concordância), e não existindo critério algum em que  $a_i$  é muito pior que  $a_j$  (discordância), então é muito possível que  $a_i$  seja ao menos tão boa quanto  $a_j$  (relação de sobre-classificação). A noção de discordância é consolidada por meio de um *limite de veto*. A relação de sobreclassificação se torna difusa por intermédio de um *limite de credibilidade*. Essas relações de sobreclassificação são exploradas de forma a construir duas ordenações completas, chamadas de destilação ascendente e descendente, ou pré-ordenações parciais (Simos, 1990).

## PROPOSIÇÃO DOS INDICADORES

Para a proposição dos indicadores a serem utilizados na avaliação de sistemas de drenagem urbana, foram

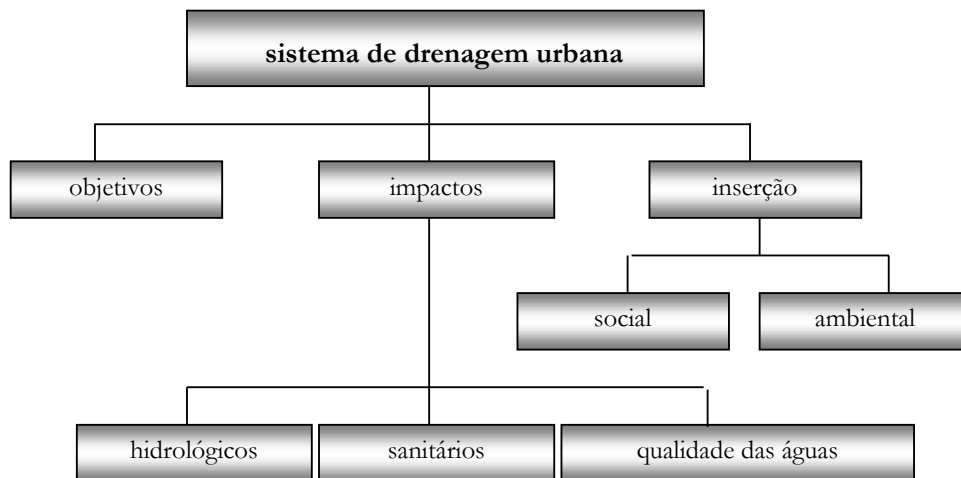


Figura 1 – Esquema sintético da estrutura da análise.

definidos, em um primeiro momento, os principais critérios a serem avaliados e comparados nas diferentes alternativas de projeto. A definição desses critérios foi realizada a partir de estudos e consulta à bibliografia existente referente à hidrologia urbana e aos sistemas de drenagem urbana. Os critérios propostos relacionam-se com os *objetivos* da obra, seus *impactos* e sua *inserção* local.

Em seguida, tornou-se necessário definir para esses critérios, quais seriam os indicadores pertinentes à avaliação. Esses indicadores deveriam englobar parâmetros passíveis de permitir a comparação entre as diversas técnicas de drenagem urbana. Eles deveriam, ainda, ser simples para que os participantes do processo decisório possam compreender seu significado e, ao mesmo tempo, coerentes, pertinentes e consistentes, de forma a fazer com que todos os aspectos relevantes sejam avaliados. Além disso, seus valores devem poder ser obtidos por meio de cálculos, medições, observações, ou estudos do comportamento das estruturas de drenagem a serem propostas pelas diversas alternativas de projeto.

Sendo assim, foi estudada a possibilidade da definição de expressões de cálculo para todos, de forma que sua determinação fosse mais clara e consistente. No entanto, nem todos os aspectos analisados apresentam caráter quantitativo. Alguns indicadores, no entanto, são fundamentados em avaliações subjetivas, implicando na participação criteriosa do decisor ou de um analista por ele indicado.

No caso dos indicadores quantitativos, cuja avaliação é feita por meio de cálculos, seus valores estarão sempre contidos dentro do intervalo padronizado de -1,0 a 1,0. Nesse caso, os valores inferiores a zero significam impactos julgados negativos e os valores superiores a zero, impactos julgados positivos. O valor nulo para esses indi-

cadores significa que o projeto não causa impacto em relação àquele aspecto avaliado.

Quanto aos indicadores de caráter qualitativo, foi estabelecida uma escala de 7 níveis, sendo eles, em ordem crescente: *Grande Piora*, *Sensível Piora*, *Pequena Piora*, *Indiferente*, *Pequena Melhor*, *Sensível Melhor*, *Grande Melhor*.

Posteriormente, para todos os indicadores, chegou-se a uma base numérica única, com valores variando de 1 a 7, possibilitando sua utilização em sistemática de análise multicritério, como será discutido à frente.

Assim, de acordo com sistemática proposta, a estrutura de análise proposta é representada na Figura 1.

### Critério “Atendimento ao Objetivo”

Para a avaliação desse critério, propõe-se o indicador de atendimento ao objetivo principal para o qual a obra está sendo projetada, definido como sendo a drenagem e o controle de inundações de uma dada área. O cálculo desse indicador seria fundamentado no nível de proteção proporcionado, quantificado pela relação entre o tempo de retorno previsto da alternativa em questão e o tempo de retorno desejável para a obra:

$$\begin{aligned} \text{Se } T_R \geq T_{RD} &\Rightarrow I_o = 1,0 \\ \text{Se } T_R < T_{RD} &\Rightarrow I_o = \frac{T_R}{T_{RD}} \end{aligned} \quad (4)$$

Em que:

- $T_R$  = Tempo de retorno de projeto;
- $T_{RD}$  = Tempo de retorno desejável.

É importante ressaltar que este indicador se refere à proteção da área objeto do projeto. O impacto no regime hidrológico a jusante será contemplado através de outro indicador, como será visto ulteriormente.

### Critério “Impactos da Obra”

O critério referente aos impactos da obra foi dividido em três aspectos a serem avaliados: hidrológicos, sanitários e os referentes à qualidade das águas. São propostos indicadores referentes a cada um desses aspectos, como apresentado a seguir.

#### Impactos hidrológicos

Os impactos hidrológicos a serem avaliados concernem às vazões a jusante do sistema de drenagem a ser projetado e à recarga de aquífero.

##### a) Impacto sobre as vazões a jusante

Esse indicador terá a finalidade de avaliar os impactos do sistema de drenagem proposto em relação à vazão desejável de ser mantida a jusante. Essa vazão, denominada “vazão alvo”, será comparada às vazões escoadas a jusante por cada uma das alternativas de projeto propostas, de forma a verificar o atendimento a um determinado valor considerado adequado. Esse valor poderá ser, por exemplo, uma vazão mínima para manter alguma captação existente ou uma vazão máxima, limitando inundações a jusante. Assim, as formulações propostas para avaliar esse critério são as seguintes:

**a.1)** Caso a vazão a ser mantida a jusante deva ser superior a um dado valor alvo mínimo, ou seja, deseja-se resguardar uma vazão mínima a jusante

$$\begin{aligned} \text{Se } Q_{\text{jusmin}} \geq Q_{\text{alvo}} &\Rightarrow I_{H1} = 1,0 \\ \text{Se } Q_{\text{jusmin}} < Q_{\text{alvo}} &\Rightarrow I_{H1} = \frac{Q_{\text{jusmin}}}{Q_{\text{alvo}}} \end{aligned} \quad (5)$$

Em que:

- $Q_{\text{jusmin}}$  = Vazão mínima a jusante segundo a alternativa estudada;
- $Q_{\text{alvo}}$  = Vazão alvo a ser mantida a jusante.

O valor desse indicador estará sempre compreendido no intervalo [0;1], prevendo-se sempre resultados positivos da alternativa proposta em relação a esse aspecto.

**a.2)** Caso a vazão a ser mantida a jusante seja limitada a um valor alvo máximo, uma vazão de restrição:

$$\text{Se } Q_{\text{jusmax}} \leq Q_{\text{alvo}} \Rightarrow I_{H1} = 1,0$$

$$\text{Se } Q_{\text{jusmax}} > Q_{\text{alvo}} \Rightarrow I_{H1} = \frac{Q_{\text{alvo}}}{Q_{\text{jusmax}}} \quad (6)$$

Em que:

- $Q_{\text{jusmax}}$  = Vazão máxima a jusante segundo a alternativa estudada.

**a.3)** Se a vazão alvo a ser mantida a jusante tiver um limite mínimo e máximo, a avaliação referente às vazões a jusante corresponde à média entre os indicadores dos itens A e B, mantendo-se no mesmo intervalo [0;1].

##### b) Recarga do aquífero

Segundo Barraud *et al.* (2001), para que uma obra de drenagem possa contribuir para a recarga de um aquífero, o volume total infiltrado sobre a área considerada deverá ser superior ao volume infiltrado caso a área estivesse inteiramente “natural”, ou seja, não urbanizada.

Na análise em questão, foi arbitrado que o sistema que propusesse a infiltração de vazão igual ou superior a duas vezes a vazão natural, tratando-se de uma situação ideal desejável, teria pontuação máxima na avaliação. Com esse intuito, o indicador proposto para avaliar a recarga do aquífero é dado pela expressão a seguir, sendo limitado ao valor 1,0:

$$I_{H2} = \frac{Q_{\text{inf}} - Q_{\text{nat}}}{Q_{\text{nat}}} \quad (7)$$

Em que:

- $Q_{\text{inf}}$  = Vazão infiltrada segundo a alternativa estudada;
- $Q_{\text{nat}}$  = Vazão infiltrada caso a área não estivesse urbanizada.

O cálculo desse indicador pode ser simplificado, em situações em que as áreas de infiltração forem homogêneas e as cargas hidráulicas forem iguais. Nesses casos, o cálculo do indicador pode ser feito a partir das áreas de infiltração, ao invés das vazões infiltradas, com a seguinte expressão, sendo também limitado ao valor 1,0:

$$I_{H2} = \frac{A_{\text{inf}} - A_{\text{nat}}}{A_{\text{nat}}} \quad (8)$$

Em que:

- $A_{\text{inf}}$  = Área de infiltração segundo a alternativa estudada;
- $A_{\text{nat}}$  = Área de infiltração caso a área não estivesse urbanizada.

#### Impactos sanitários

**a)** Possibilidade de transmissão de doenças

A ocorrência de inundações, o empoçamento de águas pluviais, o carreamento de lixo pelo sistema de drenagem, além da poluição das águas pluviais pelo lançamento de esgotos, são fatores potenciais para a disseminação de doenças em áreas onde o sistema de drenagem é inexistente ou ineficaz. Além disso, a existência de epidemias de veiculação hídrica na área do empreendimento pode ser um aspecto desfavorável, implicando em uma avaliação negativa para determinada alternativa de projeto.

Em função da multiplicidade e complexidade dos aspectos envolvidos na análise do indicador em questão, difíceis de serem quantificados, não foi possível desenvolver uma expressão de cálculo. Sendo assim, a avaliação desse indicador foi proposta de forma qualitativa, variando, então, segundo os sete níveis apresentados anteriormente.

#### b) Possibilidade da proliferação de insetos

Para avaliar esse indicador, devem ser considerados quaisquer fatores que possam aumentar ou reduzir a possibilidade de proliferação de insetos. Esses fatores podem ser a presença de insetos vetores de doenças na área do empreendimento, a eficiência de serviço de coleta de lixo, a existência de interceptores de esgotos e a possibilidade de formação de poças d'água.

Assim, como para o item anterior, a avaliação desse aspecto deve ser feita pelo decisor ou pelo analista, a partir de análise dos principais fatores intervenientes, variando na escala proposta de uma *grande piora* a uma *grande melhora*, conforme as possibilidades associadas a cada alternativa analisada.

### Impacto sobre a qualidade das águas

#### a) Impacto nas águas superficiais

A avaliação proposta para esse critério deve ser realizada considerando quaisquer fatores que possam causar poluição ou depuração das águas pluviais. Como fatores negativos, podem ser citados a presença de ligações de esgotos no sistema de drenagem, lixo despejado nas ruas, a existência de empreendimentos produtores de poluentes na área de drenagem e o tráfego de cargas perigosas na área do empreendimento. Quanto a fatores positivos, pode ser avaliada a previsão de implantação de estruturas de tratamento como filtros, decantadores ou, ainda, a utilização de alguma técnica centrada na retenção das águas.

Também aqui, a avaliação do impacto deve ser feita pelo decisor ou pelo analista, valendo-se da escala qualitativa, a partir dos impactos previstos pela estrutura de drenagem na qualidade das águas superficiais.

#### b) Impacto nas águas subterrâneas

De forma similar ao caso das águas superficiais, no que diz respeito ao impacto na qualidade das águas infiltradas, devem ser observados quaisquer fatores existentes na área

de drenagem que possam causar poluição ou melhorar a qualidade da água do lençol. A presença de ligações de esgotos, despejos de resíduos sólidos ou de empreendimentos produtores de poluentes pode impactar negativamente as águas a ser infiltradas. De forma contrária, estruturas de depuração previstas na alternativa de projeto ou a adoção de técnicas de retenção temporária antes da infiltração podem levar à melhoria na qualidade das águas subterrâneas.

Assim, o impacto em questão deve ser avaliado pelo decisor ou analista, a partir da escala qualitativa, observando a presença de quaisquer fatores causadores de poluição ou de depuração.

### **Critério “Inserção da Obra”**

Para a avaliação desse critério, serão analisados os aspectos referentes à inserção ambiental ( $I_A$ ) e social ( $I_{SC}$ ) de cada alternativa de projeto de sistema de drenagem.

#### Inserção Ambiental

##### a) Criação, conservação e preservação de habitats

Segundo Ortolano (1997), um ecossistema pode ser definido como uma comunidade biótica e seu ambiente abiótico. Ele deve ser considerado como a unidade básica utilizada ao avaliar impactos biológicos associados a algum projeto a ser empreendido. Qualquer modificação em uma parte da área alterará o seu ecossistema. Coerente com esse princípio, a conservação de áreas é um aspecto importante a ser considerado no tocante à inserção ambiental. Quanto maiores forem as áreas impactadas devido à obra e à ocupação do sistema da drenagem, maior será o impacto em relação a esse critério.

Sendo assim, a avaliação proposta para esse critério, realizada por meio de expressão de cálculo, considera a relação entre o que se denominou *área ecologicamente apta* antes e após a intervenção relativa ao empreendimento:

$$I_{A1} = \frac{A_{\text{apta2}} - A_{\text{apta1}}}{A_{\text{apta1}}} \quad (9)$$

Em que:

- $A_{\text{apta1}}$  = Área ecologicamente apta antes da implementação do sistema de drenagem;
- $A_{\text{apta2}}$  = Área ecologicamente apta após a implantação do sistema de drenagem proposto.

Limita-se o valor superior do indicador a 1,0, implicando na adoção da hipótese de que uma alternativa que dobre a área ecologicamente apta corresponderia à avaliação máxima.

**b) Quadro cênico**

Esse critério concerne aos aspectos cênicos e paisagísticos, associados a cada alternativa de projeto em sintonia com a vocação da área e as características urbanas determinadas pelos planos de uso e ocupação do solo. Para avaliar esse critério, deve-se analisar os princípios existentes para a organização e as tendências urbanísticas da região do empreendimento, verificando a adequação de cada alternativa de projeto.

Por ser de difícil quantificação por meio de expressões de cálculo, a avaliação proposta para o indicador em questão deve ser fundada na análise subjetiva do decisor ou analista.

Inserção Social**a) Criação de áreas de recreação, lazer e equipamentos urbanos**

Além de seus objetivos de drenagem e de controle de inundações, uma obra de drenagem urbana pode, ainda, impactar o tecido urbano, com a criação ou redução de áreas de recreação, lazer e equipamentos urbanos. A avaliação proposta para o indicador em questão se dá por meio de expressão de cálculo relacionando as áreas referentes a recreação, lazer e equipamentos urbanos antes e depois da implantação do sistema de drenagem, limitada ao valor superior 1,0:

$$I_{SCI} = \frac{A_{RL2} - A_{RL1}}{A_{RL1}} \quad (10)$$

Em que:

- $A_{RL1}$  = Área referente a recreação, lazer e equipamentos urbanos, antes da implementação do sistema de drenagem;
- $A_{RL2}$  = Área referente a recreação, lazer e equipamentos urbanos, após a implementação do sistema de drenagem proposto.

De forma consistente com raciocínio empregado anteriormente, em relação às águas subterrâneas e inserção ambiental, considera-se que uma alternativa que dobre a área disponível corresponde à avaliação máxima.

Nos casos em que a área  $A_{RL1}$  for igual a zero, ou seja, a área referente a recreação, lazer e equipamentos urbanos antes da implantação do sistema de drenagem for nula, os impactos serão sempre positivos, variando na escala de 0 a 1. Propõe-se, nesses casos, que a avaliação tome como base, a alternativa em que a área total criada para recreação, lazer e equipamentos urbanos tenha seu maior valor. Esta será considerada a de maior impacto positivo. O impacto das outras alternativas será a partir da relação entre essas áreas criadas, segundo a expressão:

$$I_{SCI} = \frac{A_{RL}}{A_{\max RL}} \quad (11)$$

Em que:

- $A_{RL}$  = Área criada referente à recreação e lazer e equipamentos urbanos, associada à alternativa de projeto de sistema de drenagem;
- $A_{\max RL}$  = Maior área, dentre as diversas alternativas, referente à recreação, lazer e equipamentos urbanos, associada à alternativa de projeto de sistema de drenagem.

**b) Impacto nas condições de circulação**

A utilização de diferentes técnicas de drenagem urbana pode causar um impacto benéfico ou prejudicial às condições de circulação de veículos e pessoas. Esse impacto é difícil de ser quantificado por meio de expressões matemáticas, por depender de diversos fatores que não podem ser inter-relacionados diretamente. Sua avaliação, portanto, deve ser feita de forma qualitativa, considerando os principais fatores intervenientes.

Os principais fatores benéficos às condições de circulação podem ser a redução do efeito de aquaplanagem e dos níveis sonoros de tráfego e a melhoria da aderência dos pneus à superfície do pavimento durante eventos de chuva, associados à implantação de estruturas com pavimentos porosos.

Por outro lado, pode ser citado como principal fator prejudicial a redução das vias de circulação de veículos ou de pedestres, com a previsão de travessias como passarelas. Isso pode ocorrer devido à utilização de determinadas técnicas alternativas de drenagem que, para sua implementação, necessitarão da ocupação de maiores áreas.

**c) Possibilidade da utilização para o desempenho de outras funções técnicas**

Determinadas técnicas utilizadas em sistemas de drenagem podem desempenhar outras funções técnicas importantes. Ao identificar as técnicas propostas para cada alternativa de projeto, é possível determinar outras funções, além daquelas inicialmente previstas. Como exemplo, pode ser citada a possibilidade de reúso, com a utilização da água pluvial para regar jardim, lavagem de veículos ou imóveis, reserva de incêndio, *etc.*

Esse indicador deve ter sua avaliação realizada de forma subjetiva, atribuindo-se ao decisor ou ao analista a verificação do potencial de cada alternativa de projeto.

**d) Desapropriação de áreas**

Para a utilização de determinadas técnicas alternativas de drenagem urbana, algumas áreas necessitam ser desapropriadas de forma a serem utilizadas pelo sistema proposto. Isso causa um impacto social negativo já que a negociação para desapropriação dessas áreas raramente é efetuada de



forma fácil ou natural; há sempre um desgaste por parte dos administradores no momento de qualquer desapropriação a ser feita. Para avaliar esse critério, propõe-se uma expressão de cálculo considerando uma relação entre as áreas a serem desapropriadas associadas a cada alternativa de projeto e a maior dentre elas.

$$I_{SC4} = \frac{A_{\max des} - A_{des}}{A_{\max des}} - 1,0 \quad (12)$$

Em que:

- $A_{des}$  = Área total a ser desapropriada pelo sistema de drenagem proposto;
- $A_{\max des}$  = Maior valor, dentre as alternativas estudadas, para a área a ser desapropriada pelo sistema de drenagem.

## ANÁLISE DE IMPORTÂNCIA DOS INDICADORES PROPOSTOS

Uma etapa de grande relevância no processo de avaliação de alternativas, podendo ter forte influência nos resultados, corresponde à análise de importância relativa dos diversos aspectos envolvidos.

Em qualquer processo decisório é importante que todos os participantes tenham participação ativa, exprimindo suas opiniões sobre os diversos critérios. Cada um dos decisores, pelas funções distintas no processo, apóia-se em diferentes convicções ou sistemas de valores, resultando na dificuldade de se encontrar um consenso ou um compromisso entre eles.

Segundo Azzout (1996), a ponderação dos critérios de decisão pode traduzir uma vontade política mais ou menos pronunciada, fazendo aparecer diferentes estratégias: estratégia econômica, com a intenção de escolher alternativas de menor custo; estratégia ecológica, favorecendo a preservação de ecossistemas; estratégia de praticidade, com a opção por cenários de mais fácil realização ou manutenção, etc.

No estabelecimento da metodologia específica para avaliação de sistemas de drenagem, objeto deste trabalho, duas etapas se apresentam: a identificação dos decisores e o estabelecimento de critérios de ponderação das suas avaliações.

No que diz respeito à identificação das formas de ponderação dos diversos critérios de decisão envolvidos, segundo as óticas dos diferentes decisores, dentre as diversas técnicas de ponderação disponíveis, podem ser citadas as seguintes (adaptado de Simos, 1990):

- Hierarquização: os critérios devem ser colocados em categorias pré-definidas, como “muito importante”, “medianamente importante” e “pouco importante”;

- Classificação: os critérios são classificados, do mais importante ao menos importante, de forma ordinal;
- Notação: a cada um dos critérios é dada uma nota em uma escala pré-definida;
- Atribuição de pesos: define-se um valor para a soma dos pesos, que deve ser distribuído entre os diversos critérios.

Segundo Simos (1990), todos eles têm suas vantagens, constituindo um dos pontos mais fracos dos métodos de ajuda à decisão. Assim, para o presente trabalho, a escolha foi pela utilização de dois métodos em conjunto. Em um primeiro momento, foi sugerido aos participantes do processo decisório, conforme apresentado a seguir, que ordenassem os indicadores do mais importante ao de menor relevância, em sua opinião. Logo após, feita a ordenação, deveriam ser atribuídos os valores dos pesos dos indicadores, mantendo a soma dos pesos igual a 100.

A etapa seguinte no desenvolvimento metodológico foi a identificação dos principais atores participantes do processo decisório. Segundo Roy e Bouyssou (1993), *“um indivíduo ou grupo de indivíduos é ator de um processo de decisão se, em primeiro grau por suas intenções ou em segundo grau por meio de intervenções de outros indivíduos, ele influencia direta ou indiretamente a decisão”*.

Assim, foram identificados os seguintes grupos de atores:

- órgãos e agências ambientais, responsáveis pela avaliação e aprovação de empreendimentos de drenagem urbana;
- serviços técnicos municipais, responsáveis pelas obras e manutenção desses empreendimentos no meio urbano;
- empresas de consultoria, responsáveis pelo estudo e projeto de sistemas;
- pesquisadores, efetuando estudos para inovação tecnológica em sistemas de drenagem urbana.

Para a definição da importância relativa dos diversos indicadores propostos pelo presente trabalho, foram escolhidos três representantes de cada um dos quatro grupos de atores. Esses representantes foram escolhidos em função de sua experiência em projetos de drenagem urbana e no conhecimento e entendimento dos princípios das técnicas clássicas e alternativas de drenagem urbana.

A escolha de três representantes de cada grupo foi feita de forma a buscar uma avaliação mais rica, incorporando um maior número de dados, com a finalidade de aumentar a confiabilidade e o comprometimento das opiniões. Com os resultados da realização de três análises de cada grupo, pode ser percebida com maior clareza a tendência para os valores dos pesos atribuídos.

Assim, foi desenvolvido um questionário-padrão, com todas as informações referentes aos indicadores

**Tabela 1 – Resultado da análise de tendência dos pesos arbitrados pelos especialistas.**

Critério	Sub-critério	Indicador	Peso Atribuído (%)
Objetivo		Atendimento ao objetivo	10,0
Impactos da Obra	Impactos Hidrológicos	Impacto sobre as vazões de jusante	14,1
		Recarga do aquífero	4,9
	Impactos Sanitários	Possibilidade de transmissão de doenças	8,1
		Possibilidade de proliferação de insetos	7,9
	Impactos da qualidade das águas	Impacto das águas superficiais	10,9
		Impacto das águas subterrâneas	7,7
Inserção	Inserção Ambiental	Criação e preservação de habitats	9,4
		Quadro cênico	5,9
	Inserção social	Criação de áreas de recreação e lazer e equipamentos urbanos	6,2
		Impacto nas condições de circulação	5,1
		Possibilidade da utilização para o desempenho de outras funções técnicas	4,2
		Desapropriação de áreas	5,6

propostos de forma a que o analista pudesse ter subsídios para sua determinação de pesos. Com os pesos atribuídos para cada um dos indicadores pelos especialistas, foi realizada uma análise de tendência, de forma a permitir determinar os valores a serem utilizados na análise multicritério. A análise foi procedida com a comparação dos valores dados pelos especialistas para cada indicador. Os valores que estivessem mais discrepantes foram eliminados e a tendência considerada foi a média dos valores mais próximos.

Esse procedimento foi realizado para cada indicador, primeiramente entre cada grupo de especialistas. Com o resultado de cada grupo de especialistas a análise foi procedida novamente, permitindo determinar os pesos dos indicadores utilizados na avaliação realizada por meio dos métodos de análise multicritério. O resultado das análises de tendência realizadas está mostrado na Tabela 1.

## ESTUDOS DE CASO

Para validação da metodologia proposta, considerou-se que seria necessária sua aplicação em projetos de drenagem urbana que contemplassem alternativas distintas e utilizando sistemas clássicos e alternativos. Sendo assim, foram efetuados três estudos de caso, correspondentes a projetos reais, desenvolvidos para áreas e situações distintas. Esses estudos são apresentados a seguir

### Loteamento “Vivendas de Santa Mônica”

Essa área corresponde a um loteamento no município de Igarapé, Região Metropolitana de Belo Horizonte. Conforme Baptista *et al.* (1998), o loteamento “Vivendas

de Santa Mônica” abrange uma área total de 71,53ha, com a previsão de implantação de 430 lotes com área média de 1.000m<sup>2</sup>.

A região faz parte da bacia hidrográfica do ribeirão Serra Azul, pertencente à bacia hidrográfica do rio Paraopeba. A área corresponde a uma encosta suave da Serra do Itatiaiuçu e possui solos predominantemente argilo-arenosos com elevada permeabilidade.

A região, à época da realização do projeto em questão, encontrava-se de forma natural, sem a presença de urbanização. Sendo assim, foram contratados dois projetos para a drenagem da área. O primeiro, realizado por Costa Filho (1996), previu um sistema clássico de drenagem urbana. Posteriormente, o segundo arranjo de projeto, idealizado por Baptista *et al.* (1998), baseou-se em estruturas de infiltração, com vistas à redução de custos e melhoria da inserção ambiental.

Para o presente trabalho, foram então considerados dois arranjos projetados, sendo eles:

- Cenário I – Sistema clássico, com a previsão de sarjetas em concreto conduzindo as águas pluviais superficiais até as bocas de lobo e em seguida através de galerias até os pontos de deságüe;
- Cenário II - Sistema alternativo, com a previsão de trincheiras de infiltração ao longo do sistema viário.

### Região da cidade de Goiânia-GO

A segunda área escolhida para desenvolvimento do estudo de caso é uma região intensamente urbanizada na cidade de Goiânia-GO, estudada por Milograna (2001).

A região, com cerca de 17ha de área, faz parte de uma sub-bacia da bacia hidrográfica do córrego Vaca Brava, o afluente mais extenso do córrego Cascavel. A maior parte de sua extensão está situada em área residencial nobre. O córrego em questão teve, por algum tempo, suas nascentes comprometidas por lançamentos das redes de esgoto sanitário, erosão e desmatamento.

A bacia compreende parte de seis bairros e o parque do Vaca Brava, espaço de lazer para a população. A área compreende, ainda, duas praças T-25 e a rótula de encontro das avenidas T-65 e 85, que foram opções de estruturas de retenção estudadas.

Conforme afirmado anteriormente, a região encontra-se com alto índice de urbanização, sendo comum encontrar lotes com 100% de sua área impermeabilizada, ocupados por edifícios residenciais e comerciais. Durante eventos de precipitação intensa é comum a ocorrência de problemas na circulação de veículos e pedestres em diversos pontos da bacia.

Na análise realizada, Milograna (2001) considerou três alternativas para a drenagem no período futuro para a área em questão. O estudo foi realizado para um cenário futuro, com a ocupação prevista para a região a partir da Lei de Zoneamento e Uso do Solo, aprovada no ano de 1994. O presente trabalho considerou todas as três alternativas, sendo elas:

- Cenário I – Sistema clássico, com a adoção de uma rede separativa clássica, sem respeitar as restrições de vazão máxima a jusante;
- Cenário II – Sistema intermediário, com a incorporação ao sistema clássico de duas bacias de retenção em áreas públicas;
- Cenário III – Sistema intermediário, com a incorporação ao sistema clássico de bacias de retenção na saída de cada parcela.

### Technopolis (Bordeaux – França)

O terceiro estudo de caso refere-se à área Technopolis de Bordeaux-Montesquieu, escolhida em função da grande amplitude e diversidade das alternativas de projeto estudadas, com a utilização de diferentes combinações de técnicas.

A área possui 22,6ha, sendo situada na periferia da cidade de Bordeaux, região sudoeste da França. Ela faz parte de um complexo de cerca de 1.200ha em uma região plana e ainda não inteiramente urbanizada. O empreendimento tem a finalidade de acolher empresas de alta tecnologia, com lotes de área mínima de 2.000m<sup>2</sup>.

Para o desenvolvimento do sistema de drenagem, foram estudadas as restrições ambientais e sociais associadas à área do empreendimento. Do ponto de vista hidrológico, procurou-se não alterar a situação de pré-

urbanização, a jusante (Certu, 1998). Assim, as restrições impostas ao desenvolvimento do projeto são:

- Restrições topográficas: área muito plana, com uma drenagem deficiente,
- Restrições hidrogeológicas: subsolo predominantemente argiloso, com baixa capacidade de infiltração e lençol subflorante;
- Restrições hidrográficas: drenagem por rede ramificada e com baixa capacidade, convergindo a diversos pequenos cursos de água, adjacentes a sítios históricos e reservas ecológicas, convergindo a jusante em áreas aglomeradas vulneráveis, em termos de inundação.

O projeto urbanístico gerou, também, outras restrições, tais como o risco de poluição ambiental associada às atividades industriais previstas e a necessidade de conciliação de múltiplos aspectos em pequena área: tráfego, espaços verdes, áreas industriais e de lazer, *etc.*

Sendo assim, em função das diversas restrições existentes, foram estudadas diversas alternativas de projeto de sistema de drenagem, identificando-se os seguintes cenários possíveis:

- Cenário I – Sistema clássico, com a adoção de uma rede separativa clássica, sem respeitar as restrições de vazão máxima a jusante;
- Cenário II – Sistema intermediário, com a incorporação de uma bacia de retenção ao sistema clássico, de forma a respeitar os limites de vazão a jusante;
- Cenário III – Sistema alternativo, com a utilização de pavimentos com estruturas de reservação, valas e uma bacia de retenção, assegurando uma proteção em cascata da área, além de estar respeitando os limites de vazão a jusante;
- Cenário IV – Sistema alternativo com infiltração, com a utilização de pavimentos com estruturas de reservação, valas e bacias, todos com a possibilidade de infiltração assegurando uma vazão nula a jusante da área.

A alternativa efetivamente projetada e implantada corresponde ao cenário III (Certu, 1998). Posteriormente, foram desenvolvidos os cenários I, II e IV por Baptista *et al.* (2000), de forma a permitir a comparação de uma gama mais significativa de alternativas. Em função das restrições hidrogeológicas, o Cenário IV seria inviável tecnicamente, apresentando apenas interesse no quadro comparativo do presente estudo.

Todos os cenários foram estudados para tempos de retorno de 10, 30 e 100 anos.

## Resultados

Da aplicação da metodologia proposta nos três estudos de caso, resultados relevantes puderam ser verificados, conforme Castro (2002).

No estudo de caso realizado para o loteamento “Vivendas de Santa Mônica”, em Igarapé, na Região Metropolitana de Belo Horizonte, a alternativa que previa as técnicas alternativas se mostrou melhor ou igual à alternativa com sistema clássico segundo todos os indicadores avaliados. Não foi, portanto, necessária a aplicação da análise multicritério.

Quanto ao caso de Goiânia, as duas soluções prevendo sistemas alternativos de drenagem com a implantação de bacias de retenção nos lotes ou nas parcelas se revezaram na primeira colocação em todas as análises realizadas.

Também no caso de Technopolis, dois cenários, III e IV, se mantiveram nos primeiros lugares em todas as análises realizadas, com pequenas modificações nos valores dos indicadores e em seus pesos. Esses dois cenários previam a adoção de técnicas alternativas de drenagem, sendo que a diferença entre essas duas soluções consiste na adoção de técnicas de infiltração.

Tanto no caso de Goiânia como no caso de Technopolis, não foi possível determinar apenas uma solução que fosse absolutamente melhor. Para isso, seria talvez necessária a inclusão de outros indicadores na análise ou a melhoria na precisão dos valores calculados para os indicadores. Entretanto, como a metodologia proposta objetiva apenas o auxílio ao processo de decisão, a indicação de apenas uma alternativa apresenta interesse relativo.

### Análises de Sensibilidade e Robustez

A análise de sensibilidade, indispensável à finalização do trabalho de análise multicritério, permite a verificação da estabilidade da classificação proposta, principalmente das primeiras posições dentre as alternativas, em função dos diferentes parâmetros.

Ela consiste, essencialmente, na realização da análise multicritério com a variação controlada de determinados parâmetros, verificando quais são os mais sensíveis e influentes na classificação final. No presente trabalho, os parâmetros estudados foram aqueles com baixa precisão ou controvertidos, que poderiam ser objeto de contestação por decisores. Foram eles:

- as avaliações de determinadas alternativas segundo alguns critérios;
- os pesos de alguns critérios;
- os limiares de indiferença, preferência e veto, no caso do Electre III.

A análise de robustez procura determinar o domínio de variação de determinados parâmetros que não modifiquem as primeiras colocações da ordenação inicial. Essa ordenação é chamada de *solução de base*. A análise de robustez permite ao decisor verificar a capacidade da solução de base de resistir a determinadas modificações. Os parâmetros variados nessa análise foram os mesmos referentes à análise de sensibilidade.

As análises foram realizadas para cada estudo de caso e por método de análise multicritério, alterando um ou dois pontos para mais ou para menos nos pesos ou valores de cada um dos critérios de forma a verificar possíveis mudanças na ordenação de alternativas referente à solução de base. Em todas as análises de sensibilidade realizadas, as duas primeiras alternativas se revezaram na primeira posição para os dois métodos Electre III e Programação de Compromisso, tanto para o caso de Goiânia como Bordeaux.

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise dos resultados da aplicação da metodologia aqui proposta nos três estudos de caso permitem a identificação de alguns aspectos interessantes, apresentados a seguir.

### Estudos de Caso

Em todos os três estudos de caso realizados, pôde ser verificado o melhor desempenho das técnicas alternativas, concluindo por sua escolha em todos eles. Os sistemas projetados com a utilização dessas técnicas se tornaram vantajosos nas análises multicritério realizadas comparando os indicadores propostos.

Os sistemas prevendo soluções clássicas de drenagem urbana foram classificados em último lugar nos três estudos de caso. Isso decorre do fato desses sistemas simplesmente cumprirem suas funções técnicas de transferir as águas precipitadas para jusante, sem trazer ganhos ambientais ou sociais. Sendo assim, ao se efetuar uma comparação mais abrangente, global, era esperado que sistemas incorporando técnicas alternativas se mostrassem mais bem classificados uma vez que trazem maiores ganhos no propósito geral.

Vale ressaltar que não foram considerados critérios financeiros na análise realizada. Sendo assim, pode ser estudada a complementação da metodologia de análise com a inclusão de um critério financeiro com indicadores referentes a custos de construção, manutenção e durabilidade dos sistemas de drenagem.

### Indicadores propostos

O indicador  $I_o$ , de atendimento ao objetivo da obra, mostrou-se relevante apenas para os casos em que forem estudadas alternativas com tempos de retorno dife-

rentes. Sendo assim, percebe-se a necessidade de ajustes no indicador, de forma a englobar o nível de atendimento, o risco de falha e a vulnerabilidade prevista em cada tipo de sistema.

No que diz respeito aos indicadores referentes aos impactos, podem ser constatadas variações na avaliação de sua pertinência e forma. Inicialmente, quanto aos impactos hidrológicos sobre as vazões de jusante e de recarga de aquífero, os indicadores propostos parecem ser pertinentes na análise, mostrando-se úteis na comparação das alternativas.

Em relação à avaliação dos impactos sanitários, fundada nos indicadores de possibilidade de transmissão de doenças e proliferação de insetos, foi observado que, em grande parte das vezes, eles se confundiram. Isso ocorreu em função dos fatores intervenientes à transmissão de doenças de veiculação hídrica serem, em grande parte das vezes, semelhantes aos referentes à proliferação de insetos. Além disso, na análise dos pesos dados pelos especialistas em sua análise, não foram constatadas grandes variações. Pode ser considerada, portanto, a conveniência da sua integração em um único indicador sanitário.

No tocante aos indicadores de impacto do sistema na qualidade das águas escoadas ou infiltradas, percebe-se a conveniência de se aprofundarem os estudos, com vistas a possibilitar o estabelecimento de critérios numéricos, efetivamente quantitativos.

Os indicadores de inserção ambiental e social também se mostraram úteis, cumprindo seus papéis principais, apesar de seu caráter subjetivo. Essa característica parece ser de difícil alteração em face da ausência de estudos ou avaliações que dessem subsídios numéricos à comparação de alternativas.

A análise de pertinência e importância dos indicadores propostos, realizada por especialistas na área da drenagem urbana, foi uma etapa de grande importância no trabalho. Os pesos atribuídos pelos especialistas aos indicadores propostos apresentaram algumas variações, de acordo com as funções de cada especialista e sua área de experiência. No entanto, observando-se as ordenações dadas como resultado dos estudos de caso com os pesos arbitrados por cada grupo de especialistas, pôde ser concluído que seus valores não influenciaram, significativamente, as primeiras e as últimas colocações. Esse aspecto demonstra a robustez das soluções de base obtidas. No entanto, a adoção de um método do tipo Delphi, para obtenção dos pesos, poderia assegurar uma maior integração entre os especialistas com a possibilidade de cada um deles ter acesso às análises realizadas pelos outros, permitindo a discussão e eventual reavaliação dos valores. Além disso, o número de especialistas que participou do trabalho poderia ser aumentado uma vez que, quanto maior o número de participantes do processo, maior é a chance de que a análise de tendência realizada determine valores mais

realistas. Finalmente, poderia ser considerada, ainda, a inclusão de representantes da sociedade civil no universo dos decisores.

#### Métodos de Análise

Dentro da gama de métodos de análise multicritério existentes, foram escolhidos dois, com formas distintas de comparação de alternativas, de forma a permitir comparar seus resultados e, sendo assim, obter uma ordenação mais clara das alternativas. O Electre III e a Programação de Compromisso pertencem a famílias diferentes de métodos de análise multicritério, apresentando princípios distintos para tratar o problema.

A utilização de aplicativos desenvolvidos especificamente para cada um desses métodos tornou sua aplicação simples. O método da Programação de Compromisso teve aplicação mais fácil, com necessidade de atenção para a definição dos vetores de melhor e pior resultado para cada indicador. O Electre III apresenta maiores condições de representar particularidades do problema sendo, entretanto, de aplicação mais complexa em função da maior dificuldade de definição dos limiares de indiferença e preferência estrita.

A aplicação desses dois métodos aos estudos de caso gerou ordenações com algumas diferenças, principalmente em função das diferentes formas de abordagem do problema, como as relações de incomparabilidade e preferência existentes no Electre III. No entanto, as primeiras e últimas colocações não variaram entre eles. Além disso, em todas as análises de sensibilidade realizadas as duas primeiras alternativas se revezaram na primeira posição para os dois métodos e para os dois estudos de caso realizados.

#### CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

A análise dos resultados obtidos permitiu formular algumas conclusões e perspectivas, apresentadas a seguir.

A primeira conclusão prende-se à evidência do interesse da utilização de indicadores para a comparação de alternativas de projeto de sistemas de drenagem urbana. Eles mostraram-se potencialmente úteis, como importante ferramenta de auxílio à tomada de decisão. Constatou-se, também, a conveniência da adoção de ajustes e complementações, com a introdução de novos indicadores, contemplando aspectos jurídicos, ecológicos, culturais, econômico-financeiros e outros julgados pertinentes, de forma a tornar mais eficiente o uso da metodologia.

Em relação aos métodos multicritério utilizados, concluiu-se que a sua escolha não foi um fator essencial na ordenação de alternativas, mas sim a determinação dos critérios e pesos utilizados nas análises. Os resultados sugerem, então, a possibilidade de desenvolvimento de aplicativos com estrutura formal mais simples, de acesso

mais fácil à comunidade técnica, possibilitando a disponibilização de uma ferramenta útil de auxílio à decisão.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), do Estado de Minas Gerais, pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho. Agradecem, ainda, aos especialistas que contribuíram na construção dos indicadores propostos.

## REFERÊNCIAS

- AZZOUT, Y. *Aide a la décision appliquée au choix des techniques alternatives en assainissement pluvial*. Tese de doutorado – L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Lyon, França. 245p. 1996.
- BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O. *Aspectos institucionais e de financiamento dos sistemas de drenagem urbana*. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. pp 29-49, vol. 7, n.1. Porto Alegre. 2002.
- BAPTISTA, M. B.; BARRAUD, S.; ALFAKIH, E. *Analyse comparative des coûts de réalisation d'aménagements avec solutions classique d'assainissement et avec l'utilisation de techniques alternatives – Le cas de Bordeaux – Technopolis*. Relatório Técnico INSA de Lyon. 2000.
- BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O.; SOUZA, V. C. B.; COSTA, L. S. G. M. Utilização de tecnologias compensatórias no projeto de um sistema de drenagem urbana. Anais do XVII Congresso Nacional del Água e II Simpósio de Recursos Hídricos del Conosur. Santa Fé, Argentina. pp. 248-257. Agosto de 1998.
- BARRAUD, S.; BARDIN, J. P.; ALFAKIH, E. *Construction d'indicateurs de performances techniques, économiques et environnementales des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales em milieu urbain*. – Relatório Técnico INSA de Lyon, 65p., 2001.
- BARRAUD, S.; MIRAMOND, M.; LE GAUFFRE, P. *Méthode d'aide au choix multicritère de scénarios alternatifs em assainissement pluvial: analyse a posteriori de la pertinence d'une famille de critères*. Second international conference on decision making in urban and civil engineering. pp 329-340. Lyon, França. 20-22, novembro de 2000.
- BRAGA JUNIOR, B. P. F.; GOBETTI, L. E. C. Análise Multiobjetivo. In: Porto, R. L. (Org.) *Técnicas quantitativas para gerenciamento de recursos hídricos*. Ed. Universidade, UFRGS, Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre. 420p. 1997.
- CASTRO, L. M. A. *Proposição de indicadores para a avaliação de sistemas de drenagem urbana*. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG. Belo Horizonte, 118p. 2002.
- CERTU (Centre d'études sur les reseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques). *Techniques alternatives aux reseaux d'assainissement pluvial*. Collections du Certu, 155p. 1998.
- CHOCAT, B. (Coord.) *Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*. Lavoisier. Paris, França. 1124 p. 1997.
- COSTA FILHO, J. M. M. *Projeto de drenagem "Loteamento Vivendas de Santa Mônica"*. 1996.
- GENERINO, R. C. M.; CORDEIRO NETTO, O. M. *Métodos multicritério Electre*. Texto de disciplinas do mestrado em tecnologia ambiental e recursos hídricos do departamento de engenharia civil e ambiental da Universidade de Brasília. Brasília. 13p. 1999.
- GOICOECHEA, A.; HANSEN, D. R.; DUCKSTEIN, L. *Multiobjective decision analysis with engineering and business applications*. Ed John Wiley & Sons. 1982.
- HARADA, A. L. *Metodologias para a seleção de soluções para coleta, tratamento e disposição de esgotos em condomínios do Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado em tecnologia ambiental e recursos hídricos. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília. 186p. 1999.
- HARADA, A. L.; CORDEIRO NETTO, O. M. *Métodos Multicritério de auxílio à decisão*. Texto de disciplinas do mestrado em tecnologia ambiental e recursos hídricos do departamento de engenharia civil e ambiental da Universidade de Brasília. Brasília. 13p. 1999.
- LICHFIELD, N.; KETTLE, P. WHITBREAD, M. *Evaluation in the planing process*. Oxford: Pergamon. 1975.
- MAYSTRE, L. Y.; PICTEC, J.; SIMOS, J. *Méthodes multicritères Electre: description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne, Suíça. 323p. 1994.
- MILOGRANA, J. *Estudo de medidas de controle de cheias em ambientes urbanos*. Dissertação de Mestrado em tecnologia ambiental e recursos hídricos. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília. 106p. 2001.
- MOLDAN, B.; BILHARZ, S. (Ed.) *Sustainability indicators: report of the project on indicators of sustainable development*. Ed John Wiley & Sons. Chichester, Reino Unido. 415p. 1997.
- ORTOLANO, L. *Environmental regulation and impact assessment*. Ed. John Wiley & Sons inc. 604p. 1997.

- ROY, B.; BOUYSSOU, D. *Aide multicritère à la décision: méthodes et cas*. Ed. Economica, collection Gestion. Paris, França. 695p. 1993.
- ROY, B. *Electre III: un algorithme de classements fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critère multiple*. Cahier du CERO, vol. 20, n°1. Paris, França. pp3-24. 1978.
- SIMOS, J. *Evaluer l'impact sur l'environnement: une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation*. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne, Suíça. 261p. 1990.
- SOUZA, M. A. A. *Um modelo para seleção de processos de tratamento de águas residuárias municipais*. Anais do XXVI Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitária y Ambiental, AIDIS. Lima, Peru. 19p. 1-5 de novembro, 1998.
- TUNSTALL, D. *Developing environmental indicators: definitions, framework and issues*. Workshop on global environmental indicators. Washington D. C., Estados Unidos. 1992.
- ZELENY, M. *Multiple criteria decision making*. University of South Carolina Press. Columbia, Estados Unidos. 1973.
- ZUFFO, A. C.; dos REIS, L. F. R.; dos SANTOS, R. F.; CHAUDHRY, F. H. *Aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento de recursos hídricos*. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. pp 81-102, vol. 7, n.1. Porto Alegre. 2002.
- Several important conclusions were reached, such as the preference for alternative techniques over classic ones, when comparing environmental and social aspects with the hydraulic and hydrologic ones.*
- Key Words: urban drainage, indicators, multicriteria analysis.*

### ***Multicriteria Process to Evaluate Urban Drainage Systems Proposal of Indicators and Study System***

#### ***ABSTRACT***

*The urbanization process that has occurred in the last few years has been causing changes in the hydrologic cycle. These changes are making the classic systems work to the limit leading to some crises. To reduce these effects, some alternative techniques (BMPs) are being developed based mainly on stormwater retention and infiltration. For this case, there several different possible conceptions of drainage systems currently available, and it is important to have tools to compare the technical, social and environmental efficiency of these alternatives.*

*The main purpose of this paper was to propose indicators that can be used to evaluate different types of urban drainage systems. These indicators were used and verified by utilizing two different methods of multicriteria analysis, Electre III and Compromise Programming, in three case studies of chosen areas whose drainage projects included differently conceived systems with classic, intermediaries and alternative techniques (BMPs).*