

ANÁLISE DAS METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE REDES FLUVIOMÉTRICAS

Wilde Cardoso Gontijo Júnior¹ e Sérgio Koide²

RESUMO --- Poucas são as regiões do planeta que não possuem qualquer estação de monitoramento nos cursos d'água principais. No entanto, as redes formadas por essas estações são, em sua maioria, conseqüência de locações para usos específicos dos recursos hídricos, realizadas sem o apoio de métodos científicos. A análise global de uma rede, que permita o atendimento dos demais usos, em quaisquer pontos de uma rede de drenagem, assim como a otimização da locação das estações, não tem sido regra. A razão dessa realidade encontra-se na ausência do gerenciamento integrado e sistêmico dos recursos hídricos e na priorização ao atendimento de setores hegemônicos. Este artigo apresenta análise de 10 alternativas, entre métodos e procedimentos, que podem ser utilizados para a avaliação e o dimensionamento de redes. São os mais freqüentes na literatura e apresentam aos gerentes de recursos hídricos (e de suas redes de monitoramento) ferramentas adequadas para que possa se estabelecer um modo racional e moderno de geração das informações necessárias à gestão das águas. Os métodos são, então, avaliados e classificados o que permite que sejam escolhidos aqueles mais adequados à geração das informações necessárias aos diversos usos assim como às necessidades requeridas para a aplicação de cada um.

ABSTRACT --- There are few regions on earth that don't have any kind of station for the management of the main rivers. However, the networks formed by these stations are most of the time consequences of the lease for specific uses of the water resources, carried out empirically and without support of scientific methods. The wide analysis of a network that allows the attendance of the others uses anywhere in a draining network just like the better and faster lease of the stations is not a reality. The causes of these facts can be found in the lack of an integrated and systematic management of the water resources and in the priority given to the attendance of the hegemonic sectors. These article presents 10 alternatives (methods and procedures) that can be used for the assess and forecasting of networks. They are the most frequent in literature and present to the managers of water resources appropriate tools for the establishment of a more rational and modern way of generation of information needed to the water management. These methods are evaluated and classified so as it can be chosen the most appropriated for the needs of each of the many uses.

Palavras-chave: Redes de monitoramento, redes fluviométricas, métodos.

¹ Especialista em Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas, Especialista em Gestão Ambiental pela UFSCar, Mestrando em Recursos Hídricos pela UnB, SQN 112 Bloco E Apartamento 505, CEP 70.762-050, Brasília, DF. E-mail wilde@ana.gov.br

² Professor do Programa de Pós-Graduação de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da UnB, PhD, Londres. E-mail skoide@unb.br

1 INTRODUÇÃO

O planejamento e o projeto das redes, principalmente aquelas fluviométricas, inicialmente inexistentes, foram internalizando processos e rotinas, na maioria das vezes, voltados ao atendimento exclusivo de determinado uso dos rios. A rede de monitoramento, instalada em áreas novas e com poucas informações sobre o comportamento hidrológico antecedente, constituía-se definida pela aplicação de parâmetros mundiais para locação das estações não podendo contar, até recentemente, com procedimentos científicos mais adequados para a sua contínua avaliação e seu redimensionamento.

Este artigo apresenta os procedimentos mais freqüentemente utilizados para o projeto de redes, assim como os métodos e técnicas aplicáveis para a melhor locação das estações. Objetiva-se a classificação dos métodos e procedimentos visando à orientação adequada para que, estabelecidas as finalidades a serem atendidas por uma rede de monitoramento e as condições existentes relativas às informações sobre as vazões ou outras variáveis relacionadas com estas medidas, possa ser escolhida a melhor maneira de projetá-la.

2 PROCEDIMENTOS E MÉTODOS

2.1 Procedimento OMM

O planejamento e o projeto de uma rede básica de monitoramento confundem-se em quase todos os países com a análise da rede existente. Dificilmente se depara com regiões onde não há qualquer informação hidrológica oriunda de estações já instaladas. A OMM propõe um procedimento para análise e rearranjo de uma rede, apresentada na Figura 1.

Segundo a OMM, um completo desenho (ou redesenho) de uma rede deve responder às seguintes perguntas relativas aos dados a serem coletados: a) que variáveis hidrológicas necessitam serem observadas? b) onde deverão ser locados os postos de observação? c) qual a freqüência necessária para as observações? d) qual a duração do programa de observações? e) quão precisas devem ser as observações? Propõe a OMM que as respostas a essas questões poderiam ser obtidas segundo as atividades presentes na Figura 2.

O procedimento da OMM sugere uma avaliação preliminar na qual são propostas densidades mínimas para a locação das estações fluviométricas, considerando diferentes condições fisiográficas de relevo. Foi acrescentada à tabela proposta pela OMM uma linha de corte visando definir correntes de água principais e pequenas em uma bacia de drenagem (LLAMAS, 1996). As correntes principais são aquelas cuja área é maior que a área “A” da Tabela 1, sendo as demais correntes consideradas pequenas. Essa orientação adicional é importante porque “*para uma amostragem*

adequada deve haver pelo menos tantas estações nas correntes pequenas como nas correntes principais”, ressalta Llamas.

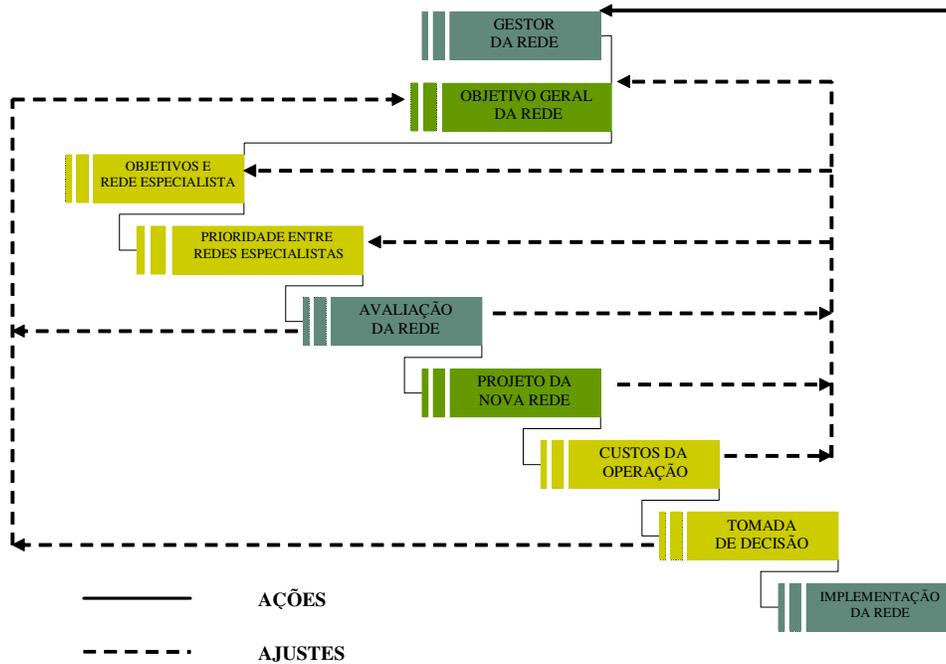


Figura 1 – Procedimento OMM³ para redesenho de redes (WMO, 1994)



Figura 2 – Blocos para construção de uma rede hidrometeorológica (WMO, 1994)

Tabela 1 – Densidade mínima para redes fluviométricas (WMO, 1994; LLAMAS, 1996)

Condições fisiográficas de relevo	Densidade mínima de estações (estação / km ²)	Área que divide as correntes principais das pequenas (km ²)
Zona costeira	2.750	-
Relevo montanhoso	1.000	100
Planícies interiores	1.875	3.000 a 5.000
Ondulações leves	1.875	3.000 a 5.000
Pequenas ilhas	300	-
Área polar ou árida	20.000	10.000

³ A Figura 1 foi adaptada daquela apresentada em (WMO, 1994) na página 266, item 20.1.5.

2.2 Procedimento DNAEE

O procedimento elaborado pelo DNAEE para o planejamento de redes (DNAEE/MME, 1983) visa responder a três questões: a) quantas são as estações necessárias para a obtenção dos dados? b) onde localizá-las? c) qual a duração da coleta dos dados?

Vê-se na simplificação dessa proposta frente àquela da OMM uma preocupação objetiva com a elaboração de arranjos de rede (que deve ser subsidiada pela resposta às duas primeiras questões) e com a operação dessa rede (para a qual a resposta à terceira questão se mostra importante insumo). A documentação existente não detalha os objetivos e, tampouco, o embasamento que norteou a elaboração dessa proposta pelo DNAEE.

Segundo essa proposta, para avaliar ou projetar uma nova rede, o número de estações a serem locadas deve respeitar às orientações da OMM, apresentadas na Tabela 1. Em uma segunda etapa, o procedimento do DNAEE sugere a utilização de três técnicas: mapeamento da bacia de drenagem visando relacionar as características fisiográficas com as variáveis hidrológicas; regionalização das características hidrológicas visando identificar regiões homogêneas⁴; e análise sistêmica para a identificação do melhor custo-benefício na instalação das estações.

Em texto produzido pelo DNAEE (1995) sobre aspectos relevantes da rede hidrológica brasileira são apresentados dois métodos expeditos utilizados pelo DNAEE para a locação de estações: o primeiro é resumido na Tabela 2 e estabelece uma orientação para a locação da estação considerando a área de drenagem a ser monitorada e as condições operacionais para instalação (e operação); o segundo método, apresentado na Tabela 3, propõe critérios para a locação de estações primárias, de longo tempo de observação, entre 25 e 30 anos, em cursos d'água principais das bacias, e secundárias, com tempo de coleta entre 5 e 10 anos, em cursos d'água secundários, área menor que 1.000km², com o objetivo de complementar as informações coletadas nas estações principais, tanto em cursos d'água com fluxos naturais (ou não regularizados) quanto para bacias cujas vazões são regularizadas por reservatórios ou outras obras hidráulicas.

Nas bacias com vazões regularizadas “o programa de coleta de dados deverá estar voltado para a aquisição das informações relativas à operação dos reservatórios, registros sobre derivações existentes, etc” (DNAEE/MME, 1983). Essas bacias contam com o apoio de legislação normativa que regula a instalação de estações para monitoramento dos cursos d'água, como se verifica no Código das Águas (art. 153, alínea d) e na Resolução ANEEL n° 396, de 1998.

Estabelece o DNAEE, também, que a coleta de dados deve ser feita durante período mínimo ininterrupto de 25 a 30 anos para as estações primárias e de 5 a 10 anos para as estações secundárias.

⁴ Considera-se região homogênea aquela área da bacia onde há uma forte correlação entre as variáveis hidrológicas observadas por diferentes estações fluviométricas ou pluviométricas.

Tabela 2 – Locação de estações fluviométricas (DNAEE, 1995)

Condições relativas à instalação e operação da estação	Área à montante da primeira estação (km ²)	Critério para locação das demais estações
Normais	200	Estações a jusante da primeira com o dobro da área de drenagem da estação à sua montante
Difíceis	1.000	
Muito difíceis	5.000	

Tabela 3 – Locação de estações fluviométricas (DNAEE, 1983)

Classificação das estações	Critérios para locação das estações
Secundárias	Em função de processos de regionalização
Primárias	1º A primeira estação com área de drenagem de 1.000 km ²
	2º As estações seguintes dobrando-se a área de drenagem da estação à montante (2.000, 4.000, 8.000 km ² , etc.)
	3º Inclusão de uma estação quando de bifurcação de tributário importante (conceito do nó hidrológico)

2.3 Procedimento Galvão

Com o avanço das tecnologias para tratamentos das informações surgiram os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) que vêm promovendo muitas facilidades para o cruzamento de dados que possam ser representados graficamente. Galvão (2004) propõe utilizar esses sistemas para definir o que chamou de “*mapa de potencial à locação de estações ... fluviométricas*”, por meio do procedimento apresentado a seguir:

a) identificação e seleção de variáveis geoambientais⁵ utilizadas nos processos de locação de estações fluviométricas: por intermédio de pesquisa junto aos planejadores de redes são verificados os principais critérios utilizados nos projetos e, assim, selecionadas, com base em pesos estatísticos, aquelas mais diretamente relacionadas com processos empíricos de locação de estações;

b) digitalização das informações geoambientais em SIG, visando à utilização das ferramentas disponíveis para o tratamento dessas informações;

c) aplicação da técnica de inferência espacial para a geração do mapa de potencial locação de estações fluviométricas: a técnica “classificador neural supervisionado – função de base radial” é aplicada ao conjunto das variáveis selecionadas, no ambiente SIG, visando determinar classes regionais para a melhor locação das estações.

Esse procedimento foi aplicado por Galvão à rede fluviométrica da bacia do rio São Francisco, apresentou resultados convergentes com os processos empíricos e mostrou-se uma ferramenta com grande potencial de contribuição ao processo de planejamento de redes. Galvão propõe, no entanto, que a técnica seja aplicada a outras bacias buscando sua melhor validação.

⁵ Variável de natureza fisiográfica, hidrológica, meteorológica ou socioeconômica.

2.4 Procedimento do *Federal Institute of Hydrology* (Alemanha)

A Alemanha possui desde a metade do século XIX completa⁶ (sic) rede de monitoramento dos seus rios, que vem gerando informações praticamente ininterruptas até os dias atuais (BELZ; ENGEL, 2003). Em virtude de demandas do governo alemão, visando à otimização de custos de manutenção dessa rede, foi elaborado um procedimento que busca identificar a significância das estações para a geração das informações hidrológicas e para a gestão dos recursos hídricos naquele país.

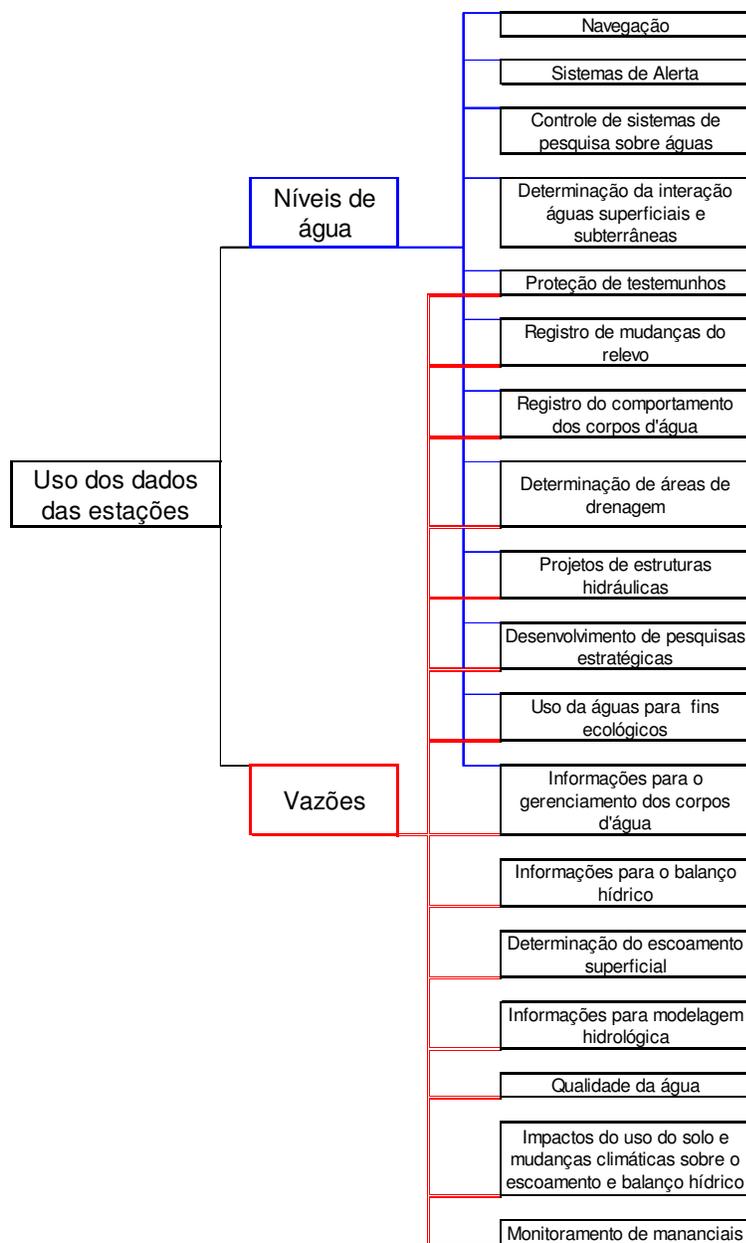


Figura 3 – Usos das informações da rede hidrometeorológica (BELZ; ENGEL, 2003)

⁶ Avaliação dos autores Jörg Belz e Heinz Engel

A abordagem desse procedimento vem ao encontro da legislação brasileira quanto ao fundamento da garantia dos múltiplos usos da água: a sua premissa principal é que uma rede de monitoramento deve ser compartilhada pelos diversos usuários assim como as informações oriundas desta rede. A proposta metodológica é descrita a seguir:

a) mapeamento dos usos das informações produzidas pela rede de monitoramento, dividido em dois tipos básicos de dados: níveis da água nos corpos d'água e vazões verificadas (Figura 3);

Os dados das estações ...		
1	São necessários à navegação	sim ou não
2	São necessários para sistemas de alerta	sim ou não
3	São importantes para a gestão integrada com outros países ou bacias	sim ou não
4	São necessários para o conhecimento hídrico da bacia e ações de gerenciamento	sim ou não
5	São utilizados por pelo menos 5 dos usos da Figura 6.3	sim ou não
6	São a base para a determinação do escoamento superficial	sim ou não
7	São estações primárias situadas em pontos característicos dos cursos d'água	sim ou não
8	São estações com longo período de observação	sim ou não
9	Podem ser substituídas por estações próximas	sim ou não

Figura 4 – Critérios para avaliação da locação das estações (BELZ; ENGEL, 2003)

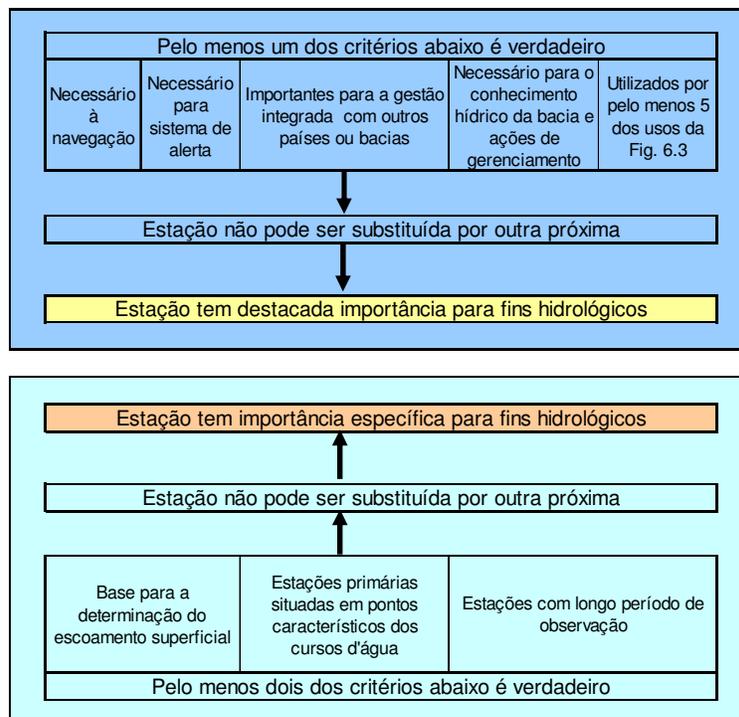


Figura 5 – Diagrama de avaliação das estações (BELZ; ENGEL, 2003)

b) elaboração de critérios para avaliar as estações de monitoramento quanto aos seus usos (Figura 4) separando-as em dois grupos: grupo A, estação com destacada importância; e B, estação com importância específica; se os critérios 1 a 5 são aplicáveis e o 9 não, a estação poderá ser classificada no Grupo A ou B, indiferentemente; se são aplicáveis os critérios 6 a 8 e o 9 não, a estação deverá ser classificada no Grupo B; e se for aplicável somente o critério 9, a estação não é necessária do ponto de vista hidrológico;

c) julgamento quanto à avaliação da estação considerando os procedimentos apresentados na Figura 5.

2.5 Procedimento Llamas

Segundo Llamas (1996) para se localizar estações fluviométricas em uma rede de monitoramento devem ser considerados os seguintes critérios preliminares:

a) verificação das condições geográficas e hidrológicas predominantes, particularmente as variações espaciais, o regime das precipitações e o regime hidrológico;

b) cálculo da densidade de drenagem da bacia;

c) mapeamento de condições locais especiais de fluxo natural ou regularizado;

d) levantamento das seções de controle mais importantes para a gestão dos recursos hídricos, definidas por planos de recursos hídricos ou outros instrumentos de planejamento e gestão;

e) verificação da necessidade de subsidiar as estações de monitoramento de qualidade das águas em pontos específicos.

Llamas recomenda que sejam considerados, ainda, o tamanho da bacia hidrográfica e a densidade mínima de estações por área territorial, sugeridas pela OMM, de acordo com a característica fisiográfica da bacia, conforme já apresentado na Tabela 1.

2.6 Método Dubreuil

O método de Dubreuil, *apud* Llamas (1996), consiste na elaboração de um plano de localização de estações para uma rede de monitoramento fluviométrica, construído em três etapas subsequentes:

1ª Estudos das condições físicas e climáticas predominantes: inclui o levantamento dos fatores condicionantes do comportamento hidrológico previsto para a região, dentre os quais:

a) fatores perenes (sic)⁷: morfologia, localização geográfica, distribuição da rede fluviométrica existente, aspectos pedológicos e geológicos;

b) fatores variáveis no tempo: clima, cobertura vegetal e umidade do solo.

⁷ a extensão temporal deve ser relativizada uma vez que todos estes fatores também variam em diferentes medidas de tempo, afetando o comportamento hidrológico da área sob estudo.

Dubreuil sugere tratamentos diferenciados a cada um dos condicionantes, buscando estabelecer faixas de influência no comportamento hidrológico. A construção de mapas específicos para cada tema tratado e a superposição final de todos os mapas escolhidos permitem elaborar um documento síntese e, assim, definir regiões da bacia que poderiam ser consideradas homogêneas relativamente aos aspectos considerados.

2ª Estudos das realidades regionais condicionantes das vazões fluviais buscando construir o mapeamento das zonas fisicoclimáticas homogêneas: nessa etapa deverão ser escolhidos critérios físicos, econômicos e hidrológicos que permitem melhor localizar as estações; utilizando o mapa das zonas homogêneas, construído na primeira etapa, ou utilizando critérios consagrados na literatura⁸ busca-se localizar estações em cada uma destas áreas; ao término dessa etapa pretende-se elaborar uma alternativa de arranjo para a rede.

3ª Elaboração do plano de localização das estações tendo em vista as zonas homogêneas, os usos da água e projetos de desenvolvimento regionais: nessa etapa deve-se proceder à análise comparativa entre a localização das estações existentes e aquela proposta na segunda etapa e, incluindo considerações relativas à operação e gestão da rede, definir qual o melhor arranjo a ser proposto.

Com o desenvolvimento das tecnologias de informações e com o apoio dos computadores e de programas computacionais, que possibilitam o manuseio de mapas com informações relacionadas, tornaram-se possíveis o cruzamento das informações representadas em mapas temáticos, sua superposição com pesos e equações diferenciados e a rápida apresentação do mapa resultante dessas combinações. Essas técnicas, além da rapidez inserida no processo, permitem aumentar sensivelmente a precisão no resultado final do trabalho assim como a flexibilidade na proposição de novas alternativas de projeto.

2.7 Método da Cartografia Conjunta

A cartografia conjunta é aplicada aos processos de otimização de redes fluviométricas. Essa técnica permite a interação entre variáveis climatológicas e hidrológicas com a conseqüente alteração da localização e densidade das redes propostas, após sucessivas iterações.

A sua aplicação é auxiliada por sistemas de informação geográfica para que o objeto específico de trabalho possa ser uma quadrícula no mapa, tão local quanto possível, e possam ser inseridas informações que permitam o cálculo dos escoamentos superficiais em cada uma delas. Para cada quadrícula, são necessárias as seguintes informações:

- a) características fisiográficas;
- b) características hidrográficas;

⁸ Refere-se aqui às confluências principais, à relação logarítmica entre as vazões e às áreas de drenagem ou seções fluviais de controle.

c) variáveis climáticas; e

d) variáveis hidrológicas.

Sugere-se a execução das seguintes etapas na aplicação da técnica:

1ª Elaborar a análise de regressão linear entre a temperatura média anual de cada estação climatológica e as características fisiográficas, o que pode resultar na definição da temperatura média anual em cada quadrícula.

2ª Elaborar a análise de regressão linear entre a precipitação média anual registrada em cada estação pluviométrica e as características fisiográficas, o que deve resultar na precipitação média em cada quadrícula.

3ª Estimar a evaporação potencial utilizando a fórmula de Turc, *apud* Llamas (1996), conforme equações 1 e 2:

$$E = \left(\frac{P}{0,9 - P^2 L^2} \right)^{1/2} \quad 1$$

$$L = 300 + 25 \times T - 0,05 \times T^3 \quad 2$$

Nas quais:

E = evaporação média anual em cada quadrícula da malha (mm)

P = idem para a precipitação média anual (mm)

T = idem para a temperatura média anual (°C)

L = variável auxiliar

4ª Calcular o valor preliminar para o escoamento superficial em cada quadrícula utilizando-se da equação simplificada do balanço hídrico 3:

$$Q = P - E \quad 3$$

Na qual:

Q = escoamento superficial (mm)

5ª Calcular, por integração dos escoamentos das quadrículas, o escoamento superficial Q_c na seção das estações hidrométricas existentes e, comparando com o escoamento observado Q_o , calcular para cada área de drenagem das estações a relação entre o escoamento calculado e aquele observado, ou seja:

$$K = \frac{Q_c}{Q_o} \quad 4$$

6ª Por intermédio do fator “K”, faz-se nova estimativa da precipitação, utilizando-se da expressão 5 e, com este novo valor de P, recalcula-se as etapas 3ª, 4ª e 5ª, até a estabilização do valor “K” com sua convergência para 1.

$$P = K \times Q - E \quad 5$$

7ª Por fim, visando verificar o erro de interpolação, será feita a eliminação de “m” estações hidrométricas existentes: refazendo as etapas descritas anteriormente e calculando as diferenças entre os valores de Q_0 e Q_c , estas diferenças devem ser utilizadas para que se estabeleça uma relação entre a densidade das estações e os erros, o que permitirá calcular a densidade ideal, otimizando a locação das estações da rede.

2.8 Método Karasiev

Karasiev, *apud* Llamas (1996) e Mollinedo (2000), elaborou um método para otimização das observações de uma rede baseando-se nos trabalhos desenvolvidos por Drozdov, Shepelevski, Gandin e Kogan, *apud* Mollinedo (2000). O objetivo do método é definir a área ótima para a locação de estações fluviométricas. Devem ser definidas, inicialmente, regiões que tenham características geográficas e hidrológicas relativamente homogêneas. Três critérios são utilizados para o cálculo da densidade ótima das estações, baseados nas áreas de drenagem da bacia homogênea sob análise:

a) área mínima - *Amin*: aquela cuja superfície seja considerada pouco sensível às variações locais de uso e ocupação do solo, sendo representativa das condições climáticas e hidrológicas em um longo período;

b) área relativa à variabilidade hidrológica - *Agrad*: superfície que garante que em 95% das vezes a diferença entre as vazões específicas anuais de duas bacias adjacentes é maior que o desvio-padrão das vazões; essa área pode ser calculada pela equação 6.

$$Agrad = 8 \times \sigma^2 \times \frac{q^2}{(\nabla q)^2} \quad 6$$

Na qual:

σ = desvio padrão das vazões anuais

q = vazão específica média anual

∇q = gradiente das vazões específicas médias anuais

Com esse critério pode-se definir, então, a área de drenagem para a qual se torna importante a instalação de estações de monitoramento com otimização das informações coletadas. No entanto, isso pode levar à arranjos com densidade muito pequena de estações, razão pela qual, Karasiev propõe um terceiro critério que impõe uma correlação mínima entre os dados coletados por duas estações subsequentes em um curso e numa rede, denominado *Acor*.

c) área relativa à correlação hidrológica mínima - *Acor*: superfície máxima que assegura a correlação entre as estações e, conseqüentemente, um erro máximo admitido para os valores medidos em cada uma das estações; essa área é calculada pela equação 7.

$$Acor = \sigma^4 \times \frac{de^2}{(Cv)^4} \quad 7$$

Sendo que:

$$Cv = 100 \times \frac{\sigma}{xm} \quad e \quad 8$$

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{N-1}\right) \sum_{i=1}^N (xi - xm)^2} \quad 9$$

Nas quais:

de = distância entre as seções para a qual é nula a correlação entre os valores médios anuais de vazões

Cv = coeficiente de variação das vazões médias anuais (%)

N = número de estações existentes

xi = vazões médias anuais

xm = valor médio das vazões médias anuais

σ = desvio-padrão das vazões anuais

Karasiev define, então, a área de drenagem ótima (*Aot*) para a localização de uma estação aquela que preserve a desigualdade representada pela fórmula 10 e ilustrada pela Figura 6.

$$Amin < Agrad < Aot < Acor \quad 10$$

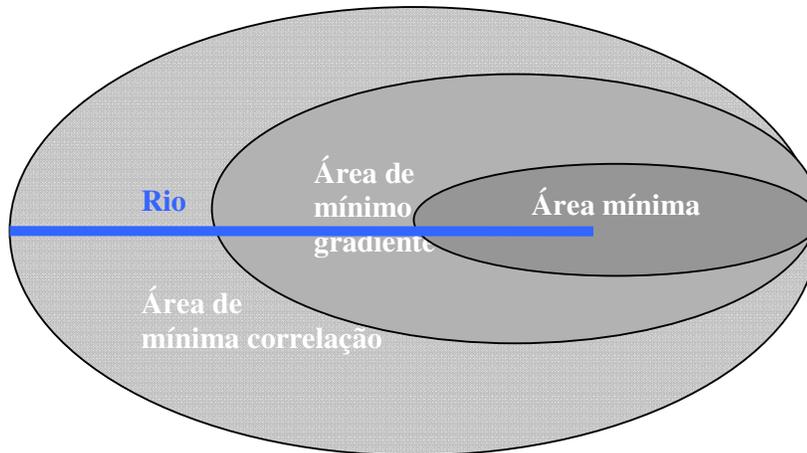


Figura 6 – Ilustração das áreas de Karasiev

Considerando que para cada área ótima há a necessidade de instalação de uma estação fluviométrica, pode-se estimar o número de estações suplementares (*N*) requerido para toda a bacia sob análise, segundo Karasiev, utilizando-se o ordenamento de Horton, conforme a equação 11.

$$N = \sum_{i= u ot + 1}^u rb^{u-1} \quad 11$$

Na qual:

N = número estimado de estações suplementares para a bacia

rb = coeficiente de bifurcação definido por Horton

u = ordem de Horton para o exutório da bacia

u ot = ordem de Horton para a bacia de área ótima para rede

O método de Karasiev sugere, ainda, que uma rede de monitoramento ótima deveria possuir entre 15 e 30% das estações instaladas em bacias de drenagem com ordem inferior àquela da área ótima.

2.9 Método Sharp

O método desenvolvido por Sharp (1971) é utilizado para a macrolocalização⁹ de estações e consiste na análise topológica da rede de drenagem para a definição da seqüência ótima de amostragem.

Sharp (1970) afirma que o ordenamento de uma rede de drenagem é uma medida direta da sua entropia e que a incerteza de que a fonte geradora de um parâmetro detectado no exutório da bacia seja identificada é igual a “u-i”; onde “u” é a ordem de Horton do exutório e “i” é a ordem do ramo na qual está localizada a fonte poluente. O resultado dessa diferença é o número mínimo de amostras para que a fonte poluente seja identificada.

Utilizando-se do conceito de magnitude de uma rede drenagem, segundo estudos de Shreve (1967) e Scheidegger (1965), *apud* Sharp (1971), Sharp propôs o método de amostragem seqüencial, cujas etapas são apresentadas abaixo:

a) classificar a rede de drenagem definindo como magnitude de cada ramo o número de tributários externos ou nascentes do respectivo ramo (por exemplo: um curso d’água formado por dois tributários de magnitudes “m” e “n” terá magnitude “m+n”);

b) identificar o exutório da bacia e definir sua magnitude;

c) dividir a magnitude do exutório por dois visando encontrar o primeiro centróide da bacia (quando não houver curso com esta magnitude busca-se o curso de magnitude mais próxima);

d) se uma rede é dividida em duas partes pelo primeiro centróide, o centróide da parte superior da bacia pode ser determinado da mesma maneira pela qual foi determinado o centróide de toda a bacia;

e) para a parte inferior da bacia, no entanto, o centróide pode ser determinado pela renumeração completa das magnitudes dos ramos desta área e, daí por diante, conforme definido para a bacia

⁹ A macrolocalização de estações de monitoramento representa a distribuição de pontos de amostragem em uma bacia hidrográfica, abstraindo-se das condições específicas locais mais adequadas para a instalação de uma estação.

como um todo; pode-se utilizar outro método para que os centróides das partes superior (Mc'') e inferior (Mc') da bacia sejam definidos com a aplicação das equações 12 e 13, abaixo:

$$Mc' = \left[\frac{u - Mu + 1}{2} \right] \quad 12$$

$$Mc'' = Mc' + Mu \quad 13$$

Nas quais:

u = magnitude do exutório da bacia

Mc' = centróide da parte inferior da bacia

Mc'' = centróide da parte superior da bacia

Mu = magnitude do exutório da parte superior da bacia

f) repetir o procedimento acima até que toda a rede de drenagem seja dividida;

g) o primeiro centróide definirá o nível hierárquico n° 1, dividindo a rede em duas metades; o segundo centróide definirá o nível hierárquico n° 2, dividindo a rede em quatro partes; o terceiro centróide dividirá a rede em oitavas, definindo o nível hierárquico n° 3; e assim sucessivamente;

h) as amostragens seqüenciais são definidas como aquelas necessárias à identificação da fonte poluente a partir da última estação fixa, ou centróide mais próximo das nascentes.

2.10 Método utilizando o conceito da Entropia

Soares (2001) propõe que “A entropia associada representa fisicamente a soma das incertezas de alguma variável particular da bacia hidrográfica, que poderá ser reduzida pela amostragem nas M estações.”

Pode-se resumir a teoria revisada para aplicação à análise de séries fluviométricas com as seguintes definições quanto ao conceito de entropia:

a) entropia própria: característica intrínseca de uma série de dados, analisada isoladamente das demais séries coletadas em diferentes locais em uma bacia hidrográfica, é resultado da equação 14;

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \log p(x) dx \quad 14$$

b) entropia associada ou conjunta: característica relativa à redundância de informações contida em várias séries de dados, considerando a análise conjunta dessas séries, é resultado da equação 15;

$$H(x,y) = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x,y) \log p(x,y) dx dy \quad 15$$

c) entropia condicional: característica relativa à redundância seqüencial contida em uma série de dados, considerando a existência de uma outra série, é resultado das equações 16 e 17.

$$H_x(y) = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x,y) \log \left(\frac{p(x,y)}{p(x)} \right) dx dy \quad 16$$

$$H_y(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x,y) \log \left(\frac{p(x,y)}{p(y)} \right) dx dy \quad 17$$

d) entropia da distribuição: característica relativa à média da informação presente em uma função distribuição de probabilidades.

Soares desenvolveu matematicamente a equação 18 para a quantificação da entropia associada cujo comportamento possa ser representado pelas funções distribuição multivariada Normal ou Log-Normal.

$$H(X_m) = \left(\frac{M}{2} \right) \ln(2\pi) + \left(\frac{1}{2} \right) \ln |C| + \frac{M}{2} - M \ln(\Delta X) \quad 18$$

Na qual:

H = entropia associada ou conjunta

M = número de amostras (ou estações)

X_m = vetor de M séries de dados

|C| = determinante da matriz das covariâncias C (que mede a dependência entre as séries amostrais associadas)

ΔX = intervalo de amostragem dos dados, assumido o mesmo para todas as estações M

Soares (2001) utilizou essa equação no tratamento de séries de dados de qualidade de água. Para sua aplicação às séries de dados fluviais há de se considerar que estas se comportam em uma bacia hidrográfica com forte “redundância” quanto aos seus valores em função da acumulação das vazões de montante para jusante. O comportamento das vazões tem forte correlação com a área de drenagem, razão pela qual pode ser proposto utilizar a vazão específica como variável com comportamento mais próximo das variáveis de qualidade utilizadas por Soares.

Para o cálculo da entropia condicional, Soares propõe a equação 19.

$$H(X_1, X_2, \dots, X_{j-1} | X_j) = H(X_1, X_2, \dots, X_{j-1}, X_j) - H(X_j) \quad 19$$

Na qual:

$$H(X_1, \dots, X_j) = \left(\frac{j}{2} \right) \ln(2\pi) + \left(\frac{1}{2} \right) \ln |C| + \frac{j}{2} - j \ln(\Delta X) \quad 20$$

Nas quais:

H(X/Y) = entropia condicional de X, dado Y

j = número de amostras (ou estações)

Soares propõe, então, procedimento utilizando-se dos conceitos de entropia para a hierarquização e otimização de redes de monitoramento da qualidade de água constituída por M estações em uma mesma bacia hidrográfica:

3 CLASSIFICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS E MÉTODOS

Buscou-se classificar cada um deles de acordo com a aplicabilidade ou não do método, da seguinte maneira:

a) quanto aos objetivos/interesses: verificação se o método permite projetar uma rede para atender aos grupos de objetivos;

b) quanto à escala temporal: verificação se o método permite atender à escala temporal, coletando informações suficientes para a análise naqueles períodos;

c) quanto à escala espacial: verificação se o método permite locar as estações atendendo à escala espacial expressa na tabela.

A classificação visa, ainda, verificar as informações que são necessárias para a aplicação do método. Quando não são necessárias as informações, o quadro não é preenchido. Dessa forma, permite a Tabela 4 que possamos escolher o método mais adequado ao uso que se pretende para uma rede de monitoramento, adequando-o às informações disponíveis para a bacia em questão.

4 CONCLUSÃO

Pode-se verificar que a utilização de métodos e procedimentos consistentes é prerrogativa do operador da rede e que, definidos os objetivos da coleta dos dados, pode este escolher qual deve auxiliá-lo na verificação da melhor localização das estações existentes. Este exercício prescinde, então, daqueles que utilizam-se das informações geradas e pode ser elaborado sistematicamente visando à adequação física ou operacional à dinâmica da gestão dos recursos hídricos.

Tabela 4 – Classificação dos procedimentos e dos métodos para planejamento e projeto de redes fluviométricas

Métodos e Procedimentos	Objetivos e interesses		Escala temporal			Escala espacial			Requisitos do método					
	Hidrológicos	Gestão	Alterações climáticas	Usos de Recursos Hídricos	Alerta	Macro localização	Micro localização	Locais representativos	Informações fluviométricas iniciais	Informações pluviométricas iniciais	Informações cartográficas e topológicas	Informações ambientais	Informações de gestão	Informações sócio-econômicas
Procedimento OMM	A	A	A	A	A	A	A	A	N	N	N	N	N	N
Procedimento DNAEE	A	A	A	A		A		A	N	N	N	N	N	N
Procedimento Galvão	A	A	A	A		A			N	N	N	N	N	N
Procedimento FIH (Alemanha)	A	A	A	A	A	A		A					N	
Procedimento Llamas	A	A	A	A	A	A		A	N	N	N	N	N	N
Método Dubreuil	A	A	A	A	A	A		A	N	N	N	N	N	N
Método Cartografia Conjunta	A		A	A		A			N	N	N			
Método Karasiev	A		A	A		A			N		N			
Método Sharp	A		A	A		A			N		N			N
Método utilizando entropia	A	A	A	A		A		A	N				N	N
LEGENDA	A – APLICÁVEL		N – NECESSÁRIO			SEM PREENCHIMENTO – NÃO APLICÁVEL OU DESNECESSÁRIO PARA O MÉTODO								

BIBLIOGRAFIA

- BELZ, J. e ENGEL, H. Optimization of surface water observation networks. In: International workshop on hydrological networks for integrated and sustainable water resources management, 2003, Koblenz, Alemanha. *Anais* p. 115-122.
- DNAEE/MME. *Planejamento de redes*. Brasília: 1983. 44p.
- DNAEE. *Rede hidrológica nacional – aspectos relevantes*. Brasília: 1995. 6p.
- GALVÃO, W. S. *Uso de sistema de informação geográfica (SIG) na geração de modelos de favorabilidade à locação de estações fluviométricas e de unidades geoambientais homogêneas na bacia do rio São Francisco*. 2004. Tese de doutoramento – Universidade de Brasília, Brasília.
- LLAMAS, J. *Curso intensivo de planejamento e projeto de redes meteorológicas e hidrométricas*. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, 1996. 66p.
- MOLLINEDO, M. A. O. *Optimizacion de la red hidrológica básica bajo los escenarios del cambio climático en la Republica de Bolívia*. 2000. Resumo de Tese de doutoramento - Universidad Estatal Hidrometeorologica de Rusia, San Petersburgo, Rússia.
- SHARP, W. E. Stream order as a measure of sample source uncertainty. *Water Resources Research*, v. 6, n. 3, p. 919-926, 1970.
- SHARP, W. E. A topologically optimum water-sampling plan for rivers and streams. *Water Resources Research*, v. 7, n. 6, p. 1641-1646, 1971.
- SCHEIDEGGER, A. E. *Theoretical Geomorphology*. 2ª ed. New York: Springer-Verlag, 1970. 435p.
- SANDERS, T. G. *et al. Design of network for monitoring water quality*. 4ª ed. Michigan: Water Resources Publications, 1983. 328p.
- SOARES, P. F. *Projeto e avaliação de desempenho de redes de monitoramento de qualidade de água utilizando o conceito de entropia*. 2001. 211p. Tese de doutoramento – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, USP, São Paulo.
- VOGT, K. e PETERSEN, V. Surface water quality monitoring – requirements of the EU Water Framework Directive. In: International workshop on hydrological networks for integrated and sustainable water resources management, 2003, Koblenz, Alemanha. *Anais ...* p. 103-113.
- WMO. *Guide to hydrological practices – data acquisition and processing, analysis, forecasting e others aplicaciones*. 15º ed. 1994. World Meteorological Organization n° 168. p. 259-287.