

GEOPROCESSAMENTO NA SELEÇÃO DE PONTOS PARA MONITORAMENTO TELEMÉTRICO DE QUALIDADE DE ÁGUA NA BACIA DO RIO DAS VELHAS

Gerson José de Mattos Freire^{1,2}

Ana Clara Mourão Moura²

Renata Hungari de Oliveira²

Sheyla Aguilar de Santana²

Zenilde Guimarães Viola³

Isabella Cristina de Oliveira Wagner¹

¹Aluvial Engenharia e Meio Ambiente Ltda.

Avenida Francisco Sá, 35 – Conjunto 200 – Prado – Belo Horizonte – MG Brasil CEP 30410-060

gmsfreire@aluvial.com.br

²Universidade Federal de Minas Gerais

Instituto de Geociências – Departamento de Cartografia

Avenida Antônio Carlos, 6627 Pampulha – Belo Horizonte – MG Brasil CEP 31270 – 901

³Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM

Gerência de Monitoramento e Geoprocessamento – Águas de Minas

Rua Espírito Santo nº 495 - 12º andar - Centro - Belo Horizonte – MG Brasil CEP 30160-030

Zenilde.guimaraes@meioambiente.mg.gov.br

RESUMO

A qualidade dos corpos d'água pode mudar com frequência ao longo do tempo, necessitando de medições frequentes, da correta caracterização e análise das alterações. Quando o intervalo de tempo entre medições é suficientemente pequeno, o registro resultante pode ser considerado um monitoramento contínuo de qualidade. Os dispositivos adotados para este processo, denominados estações telemétricas, possuem sensores e sistemas de gravação de dados para medir parâmetros físicos e químicos em intervalos de tempo discretos, para locais pré-estabelecidos.

As tecnologias emergentes no campo de sensores permitem a ampliação da variedade de componentes químicos mensuráveis ao mesmo tempo em que se reduzem os limites de detecção. Contínuos progressos vêm sendo realizados para melhorar a qualidade de aplicações e aperfeiçoar os procedimentos de controle. A adoção de uma metodologia estruturada para a locação de pontos de monitoramento torna-se necessária, pelas características dinâmicas dos diversos empreendimentos e usos associados ao recurso hídrico.

Observa-se hoje uma grande difusão do SIG na produção de inventários e apoio à prática do planejamento, uma vez que permite a definição física e a análise quantitativa dos componentes ambientais, mesmo análises qualitativas, atribuindo pesos às características identificadas dentro de uma escala de valores estabelecida. Tem-se tornado o principal instrumento de planejamento de recuperação ambiental por possibilitar um retrato mais fiel da complexidade e permitir a integração de análises por disciplinas diversas. Este trabalho mostra como aplicaram-se recursos do geoprocessamento para, a partir de dados de sensores remotos e outros disponíveis, promover a modelagem do sistema de rede hídrica da bacia do Rio das Velhas em Minas Gerais, com vistas à construção de cenários caracterizadores dos pontos mais indicados para o recebimento de unidades telemétricas, e resultou na locação de uma rede de monitoramento da bacia através de telemetria.

Palavras Chave: geoprocessamento, recursos hídricos, macrolocalização, telemetria

ABSTRACT

The quality of water bodies may change frequently over time, requiring frequent measurements, the correct characterization and analysis of the changes. When the time interval between measurements is sufficiently small, the resulting record can be considered a continuous monitoring of quality. The devices adopted for this process, called telemetric stations, have sensors and systems for recording data to measure physical and chemical parameters in discrete time intervals, to pre-established places.

Emerging technologies in the field of sensors allow for the expansion of the variety of chemical components measured at the same time that it reduces the detection limits. Continuous progress has been made to improve the quality of applications and improve control procedures. The adoption of a structured methodology for the leasing of monitoring points is necessary, the dynamic characteristics of the various developments and uses associated with water resource.

It can be seen today a great diffusion of GIS in the production of inventories and support the practice of planning, since it allows the physical definition and quantitative analysis of the environmental components, even qualitative analysis, assigning weights to the features identified within a range of values established. It has become the main tool for planning of environmental recovery by allowing a more accurate picture of the complexity and enable integration of analysis for various disciplines. This work shows how resources were applied to the GIS, from remote sensing data and other resources to promote the modeling of the system of water supply in the basin of the Rio das Velhas, in the state of Minas Gerais, towards the construction of scenarios characterizing the most suitable for receiving telemetric units, and resulted in the hiring of a network monitoring through telemetry to the basin.

Key-words: geoprocessing, hidric resources, macrolocation, telemetry

1 - INTRODUÇÃO

A operação de uma estação telemétrica fornece registros quase contínuos da qualidade da água que podem ser processados e publicados para acesso através da Internet. O monitoramento contínuo de parâmetros de qualidade de água tais como temperatura, condutividade, pH, oxigênio dissolvido (OD) e turbidez é viável em uma grande variedade de ambientes aquáticos, com procedimentos específicos a serem adotados em função desta variedade. Existem no mercado sensores para a avaliação em tempo real de outros parâmetros além dos já citados, tais como os potenciais de oxi-redução, vazão, amônias, nitratos, cloretos e clorofila. Os registros das mudanças na qualidade da água podem ser utilizados como base para o cálculo das cargas de contaminantes em um determinado local. Os dados dos sensores também podem ser utilizados para estimar outros componentes presentes, se for possível o estabelecimento de correlações significativas, muitas vezes por meio de análises estatísticas de regressão. Além dos parâmetros de leitura direta, alguns sistemas incluem algoritmos para derivar outros parâmetros, como a condutividade específica, salinidade, sólidos totais dissolvidos e o percentual de saturação de OD.

As tecnologias emergentes no campo de sensores permitem a ampliação da variedade de componentes químicos mensuráveis ao mesmo tempo em que se reduzem os limites de detecção. Devido à possibilidade de se fazer em tempo quase real o acompanhamento de confiabilidade dos dados disponíveis via Internet, contínuos progressos vêm sendo realizados para melhorar a qualidade de aplicações e aperfeiçoar os procedimentos de controle. A adoção de uma metodologia estruturada para a locação de pontos de monitoramento torna-se necessária, pelas características dinâmicas dos diversos empreendimentos e usos associados ao recurso hídrico.

Observa-se hoje uma grande difusão do SIG na produção de inventários e apoio à prática do planejamento, uma vez que permite a definição física e a análise quantitativa dos componentes ambientais, mesmo análises qualitativas, atribuindo pesos às características identificadas dentro de uma escala de valores estabelecida. Tem-se tornado o principal instrumento de planejamento de recuperação ambiental por possibilitar um retrato mais fiel da complexidade e permitir a integração de análises por disciplinas diversas. O Geoprocessamento tem papel significativo na nova visão de gestão da ocupação antrópica. A

informação organizada, correta e disponível de forma ágil é um recurso estratégico e indispensável para tomar decisões adequadas e em tempo hábil. Nesse contexto, o Geoprocessamento é importante ferramenta de gestão, pois é um conjunto de tecnologias para processamento da informação cuja localização geográfica é uma característica inerente, indispensável para análise. Segundo Christofletti (1999), a compreensão de sistemas ambientais engloba diversas naturezas, relacionadas à estruturação e funcionamento de seus elementos através de fluxos de interação e transformações espaço-temporais, o que requer abordagem sistêmica e multidisciplinar. Milton Santos (1996) também trabalha com este conceito ao caracterizar a complexidade espacial como composta por fixos e fluxos que interagem, com poder de transformação a partir desta interface.

Entre os recursos proporcionados pelas geotecnologias estão as metodologias destinadas à análise de fenômenos espaciais, objetivando apoio à tomada de decisões. O que tem sido denominado por alguns pesquisadores como “modelagem da informação espacial” é a capacidade de multiplicar a imaginação individual, permitindo que grupos de pessoas compartilhem, através de uma experiência comum, modelos mentais de uma realidade, independente de sua complexidade. Sobre a utilização de modelos, Moura (2003) explica que a construção e aplicação de modelos vão desde a representação gráfica de fenômenos até a proposição de análises e sínteses através de algoritmos de avaliações heurísticas. Nesse sentido, a autora alerta para o fato de que os modelos materializam valores de um contexto da produção científica, um “olhar” que evolui com o tempo e segundo diferentes objetivos. Ela acredita na produção de modelos como uma obra aberta, no sentido proposto por Umberto Eco (1988), pois possibilitam diferentes leituras, adequados à visão integrada da questão ambiental, holística e não atomística, promovendo a leitura da realidade não de forma linear e, sim, marcada pela complexidade. Assim, a proposta é aplicar os recursos do geoprocessamento para, a partir de dados de sensores remotos e outros disponíveis, promover a modelagem do sistema de rede hídrica da bacia do Rio das Velhas, com vistas à construção de cenários caracterizadores dos pontos mais indicados para o recebimento de unidades telemétricas. Este trabalho apresenta a metodologia adotada para a locação de uma rede de monitoramento através de telemetria para a bacia do Rio das Velhas, no estado de Minas Gerais.

2 - ÁREA DE TRABALHO

O rio das Velhas tem sua nascente principal na cachoeira das Andorinhas, Município de Ouro Preto, numa altitude de aproximadamente 1.500 m. Toda a bacia compreende uma área de 29.173 km², onde estão localizados 51 municípios que abrigam uma população de aproximadamente 4,8 milhões de habitantes (destes, aproximadamente 89% residem em distritos e municípios integralmente inseridos na bacia), segundo os últimos dados estatísticos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2000). O rio das Velhas deságua no rio São Francisco em barra do Guaicuí após quase 800 km, Distrito de Várzea da Palma, numa altitude de 478 m, com uma vazão média de 300 m³/s. A bacia hidrográfica é dividida em trechos, segundo os cursos alto, médio e baixo. O Alto rio das Velhas compreende toda a região denominada Quadrilátero Ferrífero, tendo o Município de Ouro Preto como o limite sul dessa região e os Municípios de Belo Horizonte, Contagem e Sabará como limite ao norte. Uma porção do Município de Caeté faz parte do alto rio das Velhas, tendo a serra da Piedade como limite leste. Em relação ao Médio rio das Velhas, ao norte traça-se a linha de limite desse trecho da bacia coincidindo com o rio Paraúna, o principal afluente do rio das Velhas e, a partir de sua barra, segue-se para oeste, na mesma latitude do divisor de águas ao norte do córrego Salobinho, continuando pela linha divisória dos Municípios de Curvelo e Corinto. Finalmente, o Baixo rio das Velhas compreende, ao sul, a linha divisória entre os Municípios de Curvelo (apenas o Distrito de Thomaz Gonzaga), Corinto, Monjolos, Gouveia e Presidente Kubitscheck e, ao norte, os Municípios de Buenópolis, Joaquim Felício, Várzea da Palma e Pirapora.

Entre os afluentes do rio das Velhas destacam-se, na margem direita, o ribeirão Jaboticatubas (Município de Jaboticatubas), o rio Cipó (afluente do rio Paraúna localizado entre os Municípios de Santana de Pirapama, Presidente Juscelino e Gouveia), o rio Paraúna, principal afluente do rio das Velhas, e o ribeirão Curimataí (Município de Buenópolis). Na margem esquerda destacam-se os ribeirões Arrudas e Onça que drenam a Região Metropolitana de Belo Horizonte, o ribeirão Jequitibá (Sete Lagoas), o ribeirão da Onça (Cordisburgo), o ribeirão do Picão (Curvelo), o ribeirão Bicudo (Corinto) e o ribeirão do Cotovelo (Município de Pirapora). A densidade da rede de drenagem natural apresenta maior riqueza hidrográfica entre os afluentes da margem direita, fato associado às características geológicas da bacia.

O rio das Velhas apresenta regime de tipo pluvial, como, aliás, a quase totalidade dos rios brasileiros. No período de chuvas (outubro-março), verifica-se uma grande elevação no nível das águas.

3 - METODOLOGIA

Entre os métodos clássicos para a locação de pontos de monitoramento de qualidade de água destacam-se os métodos por julgamento, baseado na

experiência e escolha do planejador do sistema e os métodos de localização baseados em interesses específicos, como a pesquisa das condições de poluição em determinada área ou para a fiscalização e controle da poluição ambiental. A época da publicação deste artigo, a rede de monitoramento existente na bacia do Rio das Velhas caracterizava-se como do tipo misto, pois ao mesmo tempo em que se distribuía espacialmente sobre a bacia (Rede Básica) tinha objetivos específicos de monitoramento atendidos pela rede Dirigida.

Método de Sharp

SHARP (1971) propôs um procedimento de amostragem seqüencial, visando a localização de fontes de poluição, baseado na divisão da rede de drenagem em centros de "massa" que, fazendo uma analogia com a Física, representam o centro de gravidade ou baricentro da rede de drenagem da bacia hidrográfica. Assim, o método de Sharp é baseado no ordenamento de rios na bacia e no cálculo do centro de massa da rede de drenagem. No conceito adotado por SHREVE (1966), citado em SHARP (1971) para ordenamento de rios, cada tributário inicial ou formador é de ordem ou magnitude um. Cada um destes tributários formadores é denominado elemento externo e inicia em uma seção chamada origem e termina a jusante em uma seção chamada junção ou bifurcação. Toda vez que dois elementos externos se juntam formando um novo elemento, este último recebe o nome de elemento interno e possui ordem ou magnitude dois. Quando quaisquer dois elementos internos ou externos se juntam, possuindo magnitudes M1 e M2, o elemento interno resultante terá ordem de magnitude (M1 + M2).

O procedimento de adição das magnitudes é seguido quando da junção de outros elementos internos até que se chegue ao exutório da bacia hidrográfica, ou seja, a cada junção somam-se as magnitudes dos elementos que estão se juntando. O resultado deste processo é que se a bacia contiver N origens ou N elementos externos, a magnitude do exutório será N.

Quando o elemento do rio possui uma configuração normal, ou seja, apenas um caminho entre a origem e a junção, sendo esta consistindo de bifurcação, o número de elementos, l, e o número de bifurcações, b, está relacionado ao número de origens ou elementos externos conforme a equação a seguir:

$$l = 2N - 1 \quad (1)$$

e o número de bifurcações é:

$$b = N - 1 \quad (2)$$

O elemento que divide a rede de drenagem aproximadamente ao meio, no que diz respeito ao número de tributários, é chamado de centro de massa, de gravidade, baricentro, ou centróide da rede de drenagem. Assim, a magnitude do centro de massa da

rede drenagem, M_c , pode ser calculada segundo a seguinte equação (SHARP, 1971):

$$M_c = M_i = \left[\frac{M_0 + 1}{2} \right] \quad (3)$$

onde: M_0 é a magnitude do exutório;

M_i é a magnitude do i -ésimo elemento interior da rede de drenagem, e;

[] Valor modular inteiro.

Como se vê, método de SHARP para macrolocalização de estações subdivide sistematicamente a rede de drenagem em porções aproximadamente iguais em termos de número de tributários contribuintes.

Este método foi proposto para definir a macrolocalização de estações em rede de monitoramento cujo objetivo é detectar, isolar e identificar a origem da fonte poluidora.

Cada tributário externo ou elemento externo, como definido anteriormente, que contribui para o rio principal recebeu a magnitude um. Evidentemente, a escala do mapeamento influencia o número de tributários considerados. Visando a normatização dos dados em uma escala homogênea para toda a bacia, optou-se pela

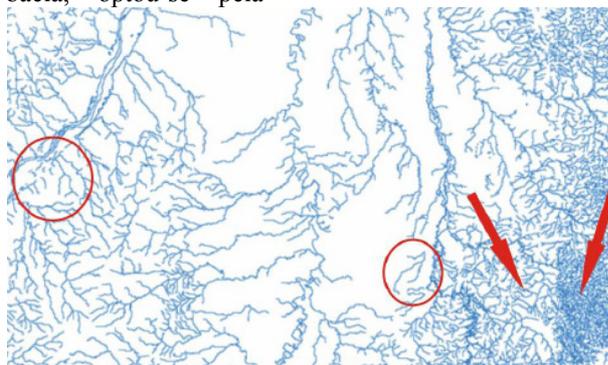


Fig.1 - Mosaico da rede hidrográfica de cartas do IBGE. Destaque da descontinuidade de rios (círculos vermelhos) e na diferença metodológica entre duas cartas (indicada pelas setas vermelhas). Fonte: Projeto Geoxisto.

Diante da impossibilidade de utilização dos dados vetoriais existentes, optou-se pela construção do Modelo Digital de Terreno a partir de dados de sensores remotos que apresentassem a camada DEM (Digital Elevation Model). Um Modelo Numérico ou Digital de Terreno, geralmente chamado de MDT, MNT ou DEM, é o dado resultante da reconstrução com ferramentas computacionais e representação artificial da altimetria de uma região selecionada. A altimetria é armazenada em uma grade regular de pontos, um arquivo matricial ou raster onde o valor digital corresponde à média de altimetria da unidade territorial que ele representa. O tamanho da célula representada é a resolução do MNT.

Um MDT pode ser gerado por técnicas de interferometria ou por estereoscopia óptica. No caso da interferometria são empregadas duas cenas de radar de uma mesma área, formando um interferograma. Esta é uma técnica de imageamento ativa, em que o radar

construção, sobre modelo de elevação digital, da malha hidrográfica total.

Dados da rede hídrica na bacia

Na decisão sobre a fonte de dados e as técnicas a serem adotadas, é necessário considerar que o estado de Minas Gerais já conta com coleção de arquivos vetoriais digitalizados a partir dos mapas topográficos do IBGE, em escala 1:50.000 e 1:100.000. Trata-se do projeto Geominas (MINAS GERAIS, 2009), que disponibilizou as informações com atributos associados, permitindo tanto o aproveitamento dos dados cartográficos, como também das associações de tabelas alfanuméricas. Existem arquivos vetoriais com tabelas de informações sobre valores de altimetria das curvas de nível e pontos cotados, o que poderia ser usado como base para a construção de modelos digitais de elevação. Contudo, em pesquisas anteriores, a exemplo do projeto GeoXisto, observou-se que o conjunto de dados vetoriais não apresenta escala homogênea ao longo do estado, variando consideravelmente entre as escalas 1:100.000 e 1:50.000, e mesmo entre mapas de mesma escala há diferenças metodológicas que impedem a construção de um mosaico conectado e integrado da rede de drenagem. Há descontinuidade de linhas da rede, a exemplo da figura apresentada a seguir.

emite o sinal através de uma antena central e registra as características do retorno deste sinal através de duas outras antenas alocadas a distância uma da outra. Através da comparação dos dois sinais pode-se criar o modelo de elevação. É o caso do produto obtido através do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), cuja resolução espacial é de 90m. O projeto SRTM teve o objetivo de mapear 80% do globo terrestre, entre as latitudes 54°S e 60°N, gerando modelos digitais do terreno por interferometria com instrumentos baseados no Spaceborn Imaging Radar C - band/X-band Synthetic Aperture Radar (SIR-C/X-SAR). Esta técnica foi muito útil na geração de modelos digitais de terreno no globo, a partir de dados gratuitamente disponibilizados pela NASA. Contudo, para trabalhos em escalas que exigem maior detalhamento a resolução de 90 metros não seria suficiente. Recentemente foram também disponibilizados de modo gratuito a camada de DEM

do satélite ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), que apresenta sensores capazes de adquirir pares estereoscópicos através do uso de dois telescópios. Um dos sensores gera imagens em nadir (vertical) ou com um ângulo lateral de até 8,55 graus e 55 segundos após a mesma

área é imageada com um outro instrumento que faz uma imagem em retro-visada de aproximadamente 27 graus em direção oposta à órbita do satélite. A partir dessa operação um par estereoscópico de bandas é constituído, as quais são denominadas de bandas 3N (Nadir) e 3B (Backward looking).

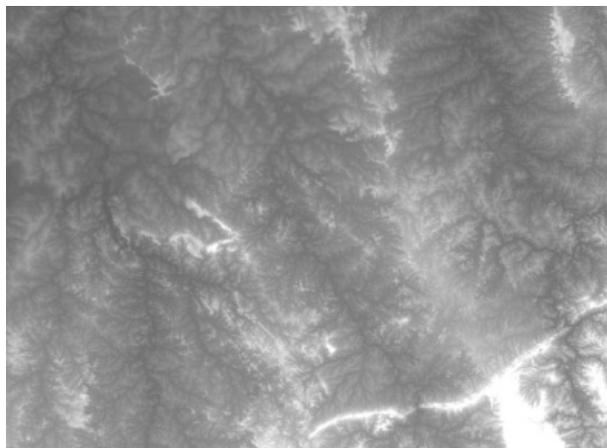


Fig.2 - Exemplo de modelo digital de terreno - distribuição de tons segundo altimetria

O ASTER permite a construção de modelo digital de terreno com resolução espacial de 30 metros, podendo chegar a 15 metros. Os dados do satélite ASTER foram escolhidos como fonte de informações para a geração do modelo digital de terreno devido à sua melhor resolução espacial e, na seqüência, para a geração da rede hídrica da área.

Construção da rede hídrica

De acordo com Freitas (2003), a função de um aplicativo de rede é tratar e simular dados espaciais que obedeçam a um padrão de fluxo. É composto por um conjunto de vértices (“nós”) e arestas, chamado

grafo. Cada aresta no grafo possui uma característica topológica específica (sentido de fluxo) e um custo para ser percorrida (impedância). Este custo pode representar a distância entre os vértices, velocidade de deslocamento ou até formas de impedância mais específicas, usadas em redes representativas de sistemas de fluxos de análise mais complexa, como o trânsito de automóveis em uma grande cidade. Obtidas estas características, cada grafo gera uma matriz de adjacência, que representa a relação topológica de todos os vértices do grafo entre si de maneira otimizada, como mostram as figuras a seguir.

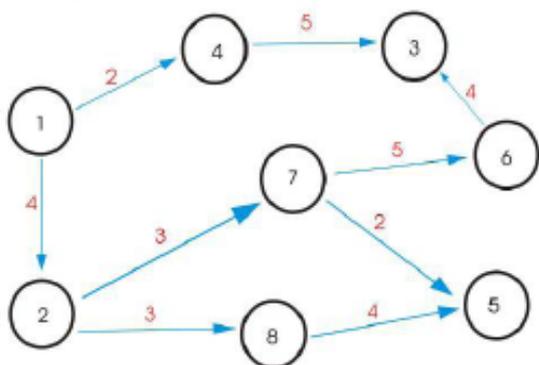


Figura 3. Grafo

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	∞	4	∞	2	∞	∞	∞	∞
2	4	∞	∞	∞	∞	∞	3	3
3	∞	∞	∞	5	∞	4	∞	∞
4	2	∞	∞	5	∞	∞	∞	∞
5	∞	∞	∞	∞	∞	∞	2	4
6	∞	∞	4	∞	∞	∞	5	∞
7	∞	3	∞	∞	2	5	∞	∞
8	∞	3	∞	∞	4	∞	∞	∞

Figura 4. Matriz de adjacência

Assim, a matriz de adjacência possibilita o emprego de algoritmos e sua execução por parte de ferramentas de informática e geoprocessamento. Estes meios proporcionam, no aplicativo de rede, as consultas acerca de caminhos ótimos (de menor custo) envolvendo dois ou mais vértices, consultas estas que podem ter como base quaisquer fatores, tais como distância, tempo, inclinação, velocidade, entre outras.

O objetivo de se construir um modelo digital de terreno e a partir dele a rede hídrica é justamente estruturar uma rede na qual possam ser definidos os

fluxos e a acumulação hídrica, análise fundamental na especificação de lugares ótimos para a instalação de pontos de medição de poluentes. O método se baseia na construção do Modelo Digital do Terreno (MDT) e na identificação de células ou pixels correspondentes a talvegues, definidos a partir de um limiar de acúmulo de contribuintes a montante daquelas células.

Segundo Moura (2005) trata-se de aplicação do modelo de definição de área acumulada, que estuda o fluxo de água a montante de um determinado ponto. Para a geração do estudo de área acumulada, é

necessário que já tenha sido gerado o mapa de direção de escoamento ou direção de fluxo. Ele é obtido indicando para cada pixel ou célula do MNT ou MDT a direção de fluxo para uma de suas vizinhas imediatas: é aplicada uma máscara de 3x3 células que percorre toda

a matriz e compara para cada célula sua altura em relação às 8 vizinhas, identificando o sentido de fluxo. Nos exemplos abaixo, o sentido preferencial do fluxo nos pontos centrais é de N-S para o primeiro caso e de NO-SE no segundo caso.



Figura 5. Sentido Preferencial de Fluxo

Uma vez obtido o mapa de fluxo, a área acumulada é obtida somando as células na direção do fluxo. No exemplo abaixo, apresentado por Mendes e Cirilo (2001, p. 380), pode-se compreender o roteiro de estimativa de área acumulada em etapas consecutivas: tendo as setas representando o fluxo e os tons de cinza a altimetria, o cálculo é realizado para cada célula da matriz. Os valores indicam a acumulação ocorrida em cada célula do conjunto a partir do deslocamento do fluxo da célula selecionada. Na figura “a” o fluxo segue na diagonal NO-SE e os valores 2 significam, ao

aplicar o modelo considerando a primeira célula da matriz, os acúmulos no sentido de deslocamento da água. Na figura “b” é considerada como ponto de referência a segunda célula, e identificados os acúmulos no fluxo de água no conjunto, a partir da influência desta célula. Na figura “c” é considerada como referência a terceira célula e os acúmulos no conjunto a partir de sua influência, e assim por diante, até que todas as células da matriz sejam percorridas. O resultado final é o índice de acumulação por célula.

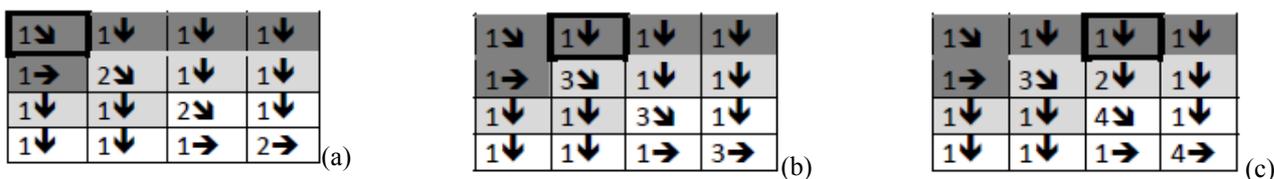


Figura 6. Índice de acumulação

A partir do cálculo de área acumulada é então possível definir a rede de drenagem, que é representada pelas células cuja acumulação seja maior que um limiar definido. Este procedimento destaca os talwegues formados pela topografia, de modo que uma boa definição de limiar requer trabalho de campo e conhecimento da área para identificação do valor a partir do qual uma calha ou talvegue serão definidos

como componentes da rede de drenagem. Estes estudos foram inicialmente apresentados por BEVEN e KIRKBY (1979).

Supondo que o exemplo a seguir já seja o índice de acumulação calculado por célula, para o exemplo de limiar de definição de rede de drenagem 15, tem-se que as células coloridas são as selecionadas como calhas ou talwegues dos cursos d'água.

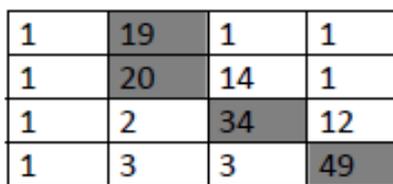


Figura 7. Seleção de calhas

Uma vez escolhida como fonte de dados a imagem ASTER, estudados os modelos disponíveis para interpretação topográfica e geração de dados de drenagem, foi estruturada a rede de drenagem com cuidado especial para escolha do limiar definidor dos pixels pertencentes à rede. A escolha do limiar foi definida por comparação a mapas vetoriais do projeto Geominas, nos quais estão armazenados dados de rede hídrica e de topografia do IBGE.

Foram necessárias 06 cenas da ASTER para recobrimento da área. As camadas de DEM das imagens contêm informações de altitude em pixels de resolução espacial de 30 metros. As imagens foram tratadas para serem retiradas pequenas imperfeições, relacionadas à falta de informações em alguns pixels, o que foi resolvido pelo processo de obtenção de dados na vizinhança (Near-Neighborhood).

Uma vez ajustado o modelo digital de terreno, foi gerada a matriz de direção de fluxos, que informa a direção do fluxo da água, conforme a metodologia exposta anteriormente. Após o mapa de fluxo foi gerada a matriz de acumulação, que através das informações de direção de fluxo e altitude consegue calcular a acumulação de água em cada pixel do conjunto.

Foram utilizados procedimentos para extração dos valores inferiores ao limiar de acúmulo, o estabelecido como parâmetro para considerar o pixel como pertencente à rede como drenagem ou não. Este limiar deve ser definido de acordo com o tamanho da bacia a ser trabalhada e define o grau de detalhamento das drenagens geradas: quanto menor o limiar maior o número de feições geradas. O limite estabelecido foi de 1500. O critério de referência foi a calibração com a média praticada nos mapeamentos Geominas (IBGE escala 1:50.000). A figura 8 a seguir sintetiza os resultados encontrados e a malha hidrográfica gerada.

Aplicação do modelo de Shreve e Sharp

Utilizando-se o resultado da matriz de acumulação e de fluxos, aplica-se então o modelo de SHREVE (1966) e SHARP (1971) para ordenamento das feições de drenagem. Conforme já exposto, cada feição de drenagem tributária conta como uma contribuição de magnitude "1" e a cada interseção os valores vão se somando ao longo da bacia de acordo

com o fluxo de direção. O elemento formado pela interseção de dois outros tributários externos torna-se um tributário de segunda ordem. No exutório da bacia hidrográfica, a magnitude do rio principal será igual ao número de tributários externos. O primeiro centróide ou centro de massa definido divide a rede de drenagem da bacia hidrográfica em duas partes aproximadamente iguais, e do mesmo modo pode ser encontrado para cada parte seu centro de massa e assim sucessivamente até que se chegue aos tributários externos de ordem um, cobrindo-se assim toda a rede de drenagem.

Alocação baseada no número de descargas pontuais de poluentes

A modificação no procedimento de SHARP, realizada por SANDERS, é a consideração das fontes pontuais de poluição como tributários. Essa contribuição de SANDERS aparece pela primeira vez com o trabalho de CLARKSON (1979). O número de descargas de poluentes pode ser considerado no projeto da rede de monitoramento, utilizando-se o procedimento de SHARP para a macrolocalização de estações, considerando-se cada descarga individual de poluente como sendo um tributário externo de ordem um. Com esta modificação e utilizando-se as equações descritas anteriormente, os centros de massa da rede de drenagem podem ser especificados em função das atividades populacionais e industriais.



Figura 8. Rede de drenagem obtida

Inserção de descargas de poluentes conforme o porte e a natureza dos empreendimentos

Diversos estudos já foram publicados abordando a atividade antrópica na bacia do Velhas. Desde a atividade minerária e de metalurgia em seu alto e baixo curso, bem como a crescente urbanização em seu médio curso e a pressão decorrente do agronegócio em seu trecho final, a atividade antrópica se desdobra em múltiplas pressões sobre o curso d'água. A metodologia utilizada neste trabalho pretende a inserção de empreendimentos de impacto conforme seus portes e impacto de suas atividades sobre os recursos hídricos.

A justificativa para o procedimento reside no objetivo de estruturar uma escala de valores hierarquizados sobre o grau de impacto na paisagem das diferentes atividades e, na sequência, na construção do somatório destes valores ao longo da acumulação hídrica. Trata-se de trabalho de padronização de escalas que permite que dados qualitativos (descritivos ou nominais) sejam apresentados de modo quantitativo (por números) segundo a avaliação ou ranking de suas qualidades. Segundo Moura (2003) a transformação das escalas nominal e ordinal para intervalo ou razão possibilita a aplicação de operações aritméticas e de técnicas de estatística paramétrica. Componentes são

colocados em um ranking segundo um olhar, ou recorte, e permitem a atribuição de valores numéricos.

Os dados passaram por um processo de pré-processamento, visando à padronização que permitiu as álgebras nas avaliações de distribuições espaciais dos impactos. O Sistema de Informações Ambientais – SIAM – Minas Gerais disponibilizou base de dados com a localização de 1200 empreendimentos com processo de licenciamento aprovados ou em aprovação, divididos em classes conforme seu porte e potencial poluidor nos termos da Deliberação Normativa COPAM 74/04, que estabelece, para o estado de Minas Gerais, critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor, de empreendimentos e atividades modificadoras do meio ambiente passíveis de autorização ambiental de funcionamento ou de licenciamento ambiental. Foram também inseridos pontos referentes aos lançamentos de efluentes identificados, considerados contribuições unitárias, os usuários outorgados de água subterrânea e ou superficial, considerados contribuições unitárias, e os locais de disposição de resíduos sólidos na bacia, classificados conforme a natureza da disposição efetuada (aterro sanitário, aterro controlado ou lixão) em escala crescente de dano possível à qualidade das águas nos cursos d'água próximos. A tabela a seguir mostra os empreendimentos inseridos e sua classificação.

TABELA 1 – TIPOLOGIAS DE INTERVENÇÕES E CLASSIFICAÇÃO

Tipologia de intervenção	Descrição	Classificação
Empreendimentos	I – Pequeno porte e pequeno ou médio potencial poluidor	1
	II – Médio porte e pequeno potencial poluidor	2
	III – Pequeno porte e grande potencial poluidor ou médio porte e médio potencial poluidor	3
	IV – Grande porte e pequeno potencial poluidor	4
	V – Grande porte e médio potencial poluidor ou médio porte e grande potencial poluidor	5
	VI – Grande porte e grande potencial poluidor	6
Resíduos Sólidos urbanos	Aterro Sanitário	1
	Aterro Controlado	3
	Lixão	5
Lançamentos	Lançamentos em cursos d'água	1
Outorgas de água	Outorgas de água superficiais	1
	Outorgas de água subterrâneas	1

A partir da organização desta tabela foi então elaborado mapa com o objetivo de identificação e classificação das fontes poluidoras, e também criadas conexões à rede hídrica existente. Uma vez geradas estas conexões para cada ponto da tabela ao longo do território e, sobretudo, da rede hídrica, foi aplicada a metodologia de busca do centro de massa, com o

estabelecimento de uma função gravitacional para a locação dos pontos, praticada para os elementos constituintes da bacia, porém agregando as diversas intervenções antrópicas e empreendimentos na bacia do Velhas. A figura a seguir mostra a distribuição espacial das intervenções na bacia.

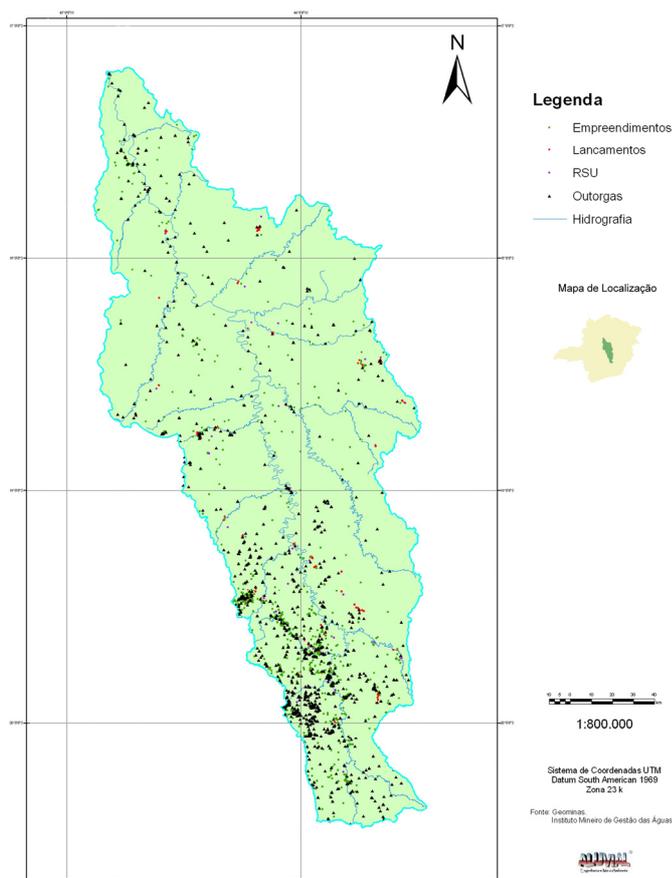


Figura 9. Empreendimentos e intervenções inseridos na análise

4 - RESULTADOS

Os valores de cada feição ou segmento de linha de drenagem foram estabelecidos através de uma rede de acúmulo e obtidos os seus valores. Foram encontrados valores de 1 (nas entradas da bacia) a 9651 (em seu exutório). O procedimento seguinte foi a localização dos centros de gravidade da rede através da divisão consecutiva dos fluxos de acúmulo. (Exemplo: posição 4825 entre 1 e 9651; posição 2412 entre os valores 1 e 4825 e posição 7239 entre os valores 4825 e 9651, e daí por diante). O elemento ou trecho do rio designado pela primeira divisão, primeiro centro de massa, da rede de drenagem recebe a classificação de primeiro nível hierárquico. A divisão da rede de drenagem em quartos define o segundo nível hierárquico. Conseqüentemente, a divisão da rede de drenagem em sextos definirá o terceiro nível hierárquico. Com o procedimento a rede foi dividida através da localização de quinze pontos de primeira a quarta ordens e 48 pontos de quinta e sexta ordens.

Assim, a rede de monitoramento será constituída de postos ou estações de monitoramento fixas, a serem decididas baseando-se na classificação do nível de hierarquia. O primeiro nível hierárquico, ou baricentro da bacia hidrográfica, localizou-se nas proximidades de da estação de monitoramento convencional BV150 (Rio das Velhas a jusante do Rio Paraúna). O segundo nível hierárquico acrescentou dois pontos sendo o primeiro próximo à estação de monitoramento convencional BV146 (Rio das Velhas a Jusante do rio Pardo Grande) porém ainda a jusante do Rio Curimataí e o segundo próximo à estação de monitoramento convencional BV 156 (Rio das Velhas a jusante do Rio Jaboticatubas) e assim sucessivamente. O mapa a seguir sintetiza os resultados encontrados para a macrolocalização ótima com relação ao monitoramento através de estações telemétricas e amostragens seqüenciais, levando-se em consideração os níveis hierárquicos destas estações.

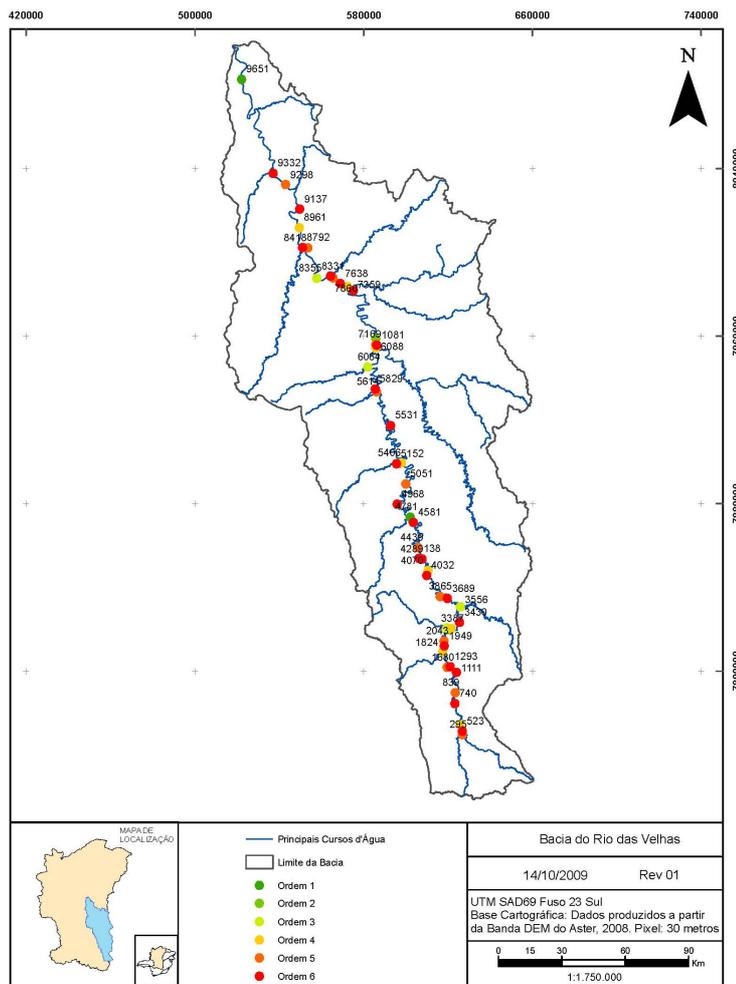


Figura 10 – Pontos para monitoramento encontrados

5 - CONCLUSÃO

A Análise permite verificar que devido à pressão imposta pelos empreendimentos, o baricentro da bacia se desloca em direção a montante, até atingir as proximidades de BV156 (Rio das Velhas a jusante do Rio Jaboticatubas), logo após a foz do Rio Jequitibá, devido ao maior acúmulo de atividades antrópicas no trecho correspondente da bacia.

Conclui-se que a metodologia apresentada para locação da rede de monitoramento telemétrico é uma ferramenta imprescindível à construção de um modelo de desenvolvimento sustentável com a integração aos requisitos de qualidade do planejamento de intervenções estruturantes no saneamento, controle de efluentes industriais e manutenção de qualidade das águas. O produto permitirá diagnosticar a efetividade da instalação e operação de estações automáticas e telemétricas de monitoramento de qualidade de águas superficiais na bacia do Rio das Velhas, área considerada de grande interesse estratégico para levantamento de informações sobre qualidade de recursos hídricos à sociedade, de modo a avaliar os resultados das ações de revitalização da bacia previstas no Projeto Estruturador do governo de Minas Gerais - Meta 2010, bem como levantar os custos de da

operação e manutenção desses tipos de estações ao longo do tempo.

6 - AGRADECIMENTOS

Agradecemos à UFMG – Projeto GeoSchisto, ao IGAM – MG Projeto Águas de Minas e à Aluvial Engenharia e Meio Ambiente pelo apoio na elaboração deste trabalho.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Christofolletti, A. Modelagem de Sistemas Ambientais. Editora Blücher Ltda, 1999.
- Clarkson, C.C. – River Quality Monitoring: Selection of Water Quality Sampling Sites and Characterization of a Pollutant Plume in a Stream, M.S. Thesis, University of Massachusetts, November 1978.
- Dixon, W.; Smyth, G. K. E Chiswell, B. Optimized Selection of River Sampling Sites. Water Resources, v. 33, nº 4, p. 971-978, 1999.
- Eco, Umberto. A obra aberta; forma e indeterminação nas poéticas contemporâneas. Trad. Giovanni Cutolo. São Paulo, Perspectiva, 1988.
- Freitas, C.F.- Construção e aplicação de modelo de rede em Ouro Preto: utilização de fatores ambientais e

logísticos no cálculo de impedâncias. Belo Horizonte, IGC-UFGM, Monografia de Especialização em Geoprocessamento, 2003. (Orientação: Moura, Ana Clara M.)

Gontijo Jr., W.C., Koide, S. - Projeto De Redes Fluviométricas Utilizando o Método Sharp – Estudos De Casos Na Bacia Hidrográfica Do Rio São Francisco – In Xvii Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos e 8º. Simpósio De Hidráulica E Recursos Hídricos Dos Países De Língua Oficial Portuguesa, São Paulo – SP, 25 a 29, nov/2003.

Gontijo Jr., W. C. (2007). Avaliação e redimensionamento de redes para o monitoramento fluviométrico utilizando o método Sharp e o conceito de entropia - Dissertação de Mestrado, Publicação PTARH.DM-103/2007, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 190p.

Guimarães, A. P.; Paisagem física do Rio das Velhas, UFGM/IGC: Belo Horizonte, 1953.

Mendes, C.A.B., Cirilo, J.A. Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação. Porto Alegre, Ed. ABRH, 2001, 536 p.

Minas Gerais. Deliberação Normativa COPAM nº 74, de 9 de setembro de 2004 - Estabelece critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor, de empreendimentos e atividades modificadoras do meio ambiente passíveis de autorização ambiental de funcionamento ou de licenciamento ambiental no nível estadual, determina normas para indenização dos custos de análise de pedidos de autorização ambiental e de licenciamento ambiental, e dá outras providências - (Publicação - Diário do Executivo - "Minas Gerais" - 02/10/2004)

Moore, I.D.; Turner, A.K.; Wilson, J.P.; Jenson, S.K.; Band, L.E. GIS and land-surface-subsurface process modeling. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T.; ed. Environmental modeling with GIS. New York, Oxford University Press, 1993. Cap. 19, p. 196-230.

Moura, A. C. M.; Freitas, C. R.; Dutra, L. V.; Melo, G. R.; Carvalho, O. S.; Freitas, C. C.; Amaral, R. S.; Scholte, R. G. C.; Drummond, S. C.; Guimarães, R. J. P. S. Atualização de mapa de drenagem como subsídio para montagem de SIG para a análise da distribuição da esquistossomose em Minas Gerais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. (SBSR), 16-21 abr. 2005, Goiânia. Anais... São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 3551-3558.

Moura, A. C. M. Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano. Belo Horizonte, Ed da autora, 2003. 294 p.

Sanders, T. G. et al. Design of network for monitoring water quality. 4ª ed. Michigan: Water Resources Publications, 1983. 328p.

Santos, Milton. A natureza do espaço; técnica e tempo, razão e emoção. São Paulo, Hucitec, 1996.

Sharp, W. E. A topologically optimum water-sampling plan for rivers and streams. Water Resources Research, v. 7, n. 6, p. 1641-1646, 1971.

Sharp, W. E. Stream order as a measure of sample source uncertainty. Water Resources Research, v. 6, n. 3, p. 919-926, 1970.

Shreve, R.L. – Statistical Law of stream numbers, Jour. Geology, V.74, p.17-37