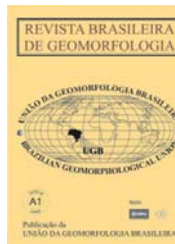




www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 15, nº 2 (2014)



INFLUÊNCIA DOS FATORES GEOLÓGICOS, GEOMORFOLÓGICOS E ANTRÓPICOS DA PRODUÇÃO DE FLUXO DE BASE EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS NA APA CACHOEIRA DAS ANDORINHAS, OURO PRETO (MG)

THE INFLUENCE OF GEOLOGICAL, GEOMORFOLOGYCAL AND ANTHROPOGENIC FACTORS ON THE BASEFLOW YIELD OF MOUNTAIN CATCHMENTS AT APA CACHOEIRA DAS ANDORINHAS, OURO PRETO (MG)

Josefa Clara Monteiro

*Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto.
Campus Universitário, Bauxita, Ouro Preto/MG, Cep: 35.400.000 - Brasil.
E-mail: josefalafuente@hotmail.com*

Luis de Almeida Prado Bacellar

*Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto.
Campus Universitário, Bauxita, Ouro Preto/MG, Cep: 35.400.000 - Brasil.
E-mail: bacellar@degeo.ufop.br*

Informações sobre o Artigo

Data de Recebimento:
29/01/2013
Data de Aprovação:
17/05/2014

Palavras-chave:

Fluxo de base, bacia hidrográficas, relevo.

Keywords:

Baseflow, catchments, hydrology.

Resumo

Apesar de sua relevância para a segurança hídrica da região metropolitana de Belo Horizonte a área da Área de Proteção Ambiental Estadual da Cachoeira das Andorinhas (APA/CA) ainda é carente de estudos detalhados quanto à disponibilidade hídrica superficial e subterrânea. Neste trabalho objetivou-se estabelecer a influência da geologia, geomorfologia e uso da Terra no potencial hídrico de pequenas bacias hidrográficas situadas na APA/CA. Foram selecionados três pares de bacias, cada par com condições geológicas e geomorfológicas semelhantes, mas com graus distintos de interferência antrópica. Utilizando-se dados de chuva e vazão, obtidos durante um ano hidrológico (Julho/2006–Julho/2007), estabeleceram-se os regimes pluvio-fluviométricos e determinaram-se alguns parâmetros hidrológicos, como o fluxo de base pela técnica smoothed mínima e o coeficiente de recessão (α) pela técnica matching strip. A análise conjugada destes parâmetros, de índices morfométricos e de dados físico-químicos das águas indicam que as bacias em áreas de relevo mais suave tendem a apresentar menores coeficientes de recessão e maiores volumes de fluxo de base. Portanto, nestas áreas o potencial hídrico é maior, já que a vazão das drenagens se mantém por mais tempo na estação seca. O relevo mais suave, com solo mais espesso e maior tempo de trânsito das águas subterrâneas, também justificam as águas mais redutoras e com maiores condutividades elétricas. Os dados também sugerem que as bacias da área com maiores proporções de florestas tendem a apresentar

menores fluxos de base por conta das maiores taxas de evapotranspiração. Os métodos aplicados se mostraram adequados para caracterizar o regime hídrico de pequenas bacias hidrográficas e podem ser importantes para a gestão de recursos hídricos.

Abstract

Despite its relevance to water security for the metropolitan region of Belo Horizonte, the Cachoeira das Andorinhas Environmental Protection area (APA/CA) still lacks detailed studies of surface water and groundwater availability. This study aims to establish the influence of geology, geomorphology and land use in the hydrological potential of catchments located in an area of environmental protection named APA Cachoeira das Andorinhas. Three pairs of small catchments were selected; each pair with similar geological and geomorphological conditions, but with distinct levels of anthropogenic influence. Rainfall and channel flow data were obtained during a hydrological year (July/2006 – July/2007) to establish the hydrological behavior. With these measurements some hydrological parameters were determined: baseflow, with smoothed minima technique, and recession coefficient, with matching strip technique. The analysis of these parameters, morphometric indices and physicochemical data shows that catchments with lower relief tend to present lower recession coefficient and higher baseflow volumes. The hydrologic potential in these areas is higher because the discharge can be maintained for a longer time in the dry season. Smoother relief, with thicker soil and higher transit time for recharging waters justify the reducing waters, with higher electric conductivity. Data also suggest that forested catchments tend to present lower baseflow because of higher evapotranspiration rates. These applied methods are suitable for water regime characterization of catchments and may be important for the management of water resources.

1.Introdução

A Área de Proteção Ambiental Estadual da Cachoeira das Andorinhas (APA/CA) localiza-se nas cabeceiras da sub-bacia do Alto Rio das Velhas, na porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero. A APA/CA apresenta 18.700 hectares, tendo sido criada em 1989, por se situar em região considerada patrimônio natural de reconhecido valor histórico, cultural, paisagístico e turístico. É também de relevante importância hídrica, pois a bacia do Alto Rio das Velhas é responsável por parte considerável do abastecimento de água da região metropolitana de Belo Horizonte (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2001).

Como a região constitui as cabeceiras do rio das Velhas e tem sofrido com a ocupação desordenada, sua transformação em Área de Proteção Ambiental se justifica pela necessidade de corrigir situações críticas de degradação ambiental ou como ação preventiva para integrar a conservação e o desenvolvimento sustentável através de um adequado ordenamento territorial e do aproveitamento racional dos recursos naturais (UFV/IEF, 2005a).

Na perspectiva da gestão de bacias, as ações de planejamento devem incluir a análise de diferentes variáveis ambientais, como o meio físico-biótico, a ocupação humana e seu inter-relacionamento. A área da

APA/CA é carente de informações detalhadas quanto aos recursos hídricos, tanto superficiais como subterrâneos (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2001; FERREIRA & BACELLAR, 2010). Neste sentido, propôs-se examinar a influência da geologia, da geomorfologia e do uso da terra no potencial hídrico de micro-bacias de cabeceira. Entende-se como potencial hídrico a capacidade de produzir água de forma sustentável, o que implica na manutenção da vazão por mais tempo em épocas de estiagem, devido ao fluxo de base (COSTA, 2005). O fluxo de base representa a parcela de vazão em canais de drenagem proveniente de aquíferos. Portanto, em climas sazonais como na área de estudo, com invernos secos e verões chuvosos, o fluxo de base sustenta as vazões dos rios efluentes nos períodos de estiagem e sua quantificação pode contribuir para a avaliação do potencial.

Trabalhos desenvolvidos em pequenas bacias hidrográficas na região da sub-bacia do Alto Rio das Velhas (COSTA, 2005; COSTA & BACELLAR, 2009) têm demonstrado que quanto mais íngreme o relevo da bacia, menor é a produção de fluxo de base, ou seja, menor o potencial hídrico. Demonstrou-se também nesses trabalhos que o potencial hídrico é muito influenciado pelas características geológicas e geomorfológicas e também pelas formas de uso e ocupação do terreno.

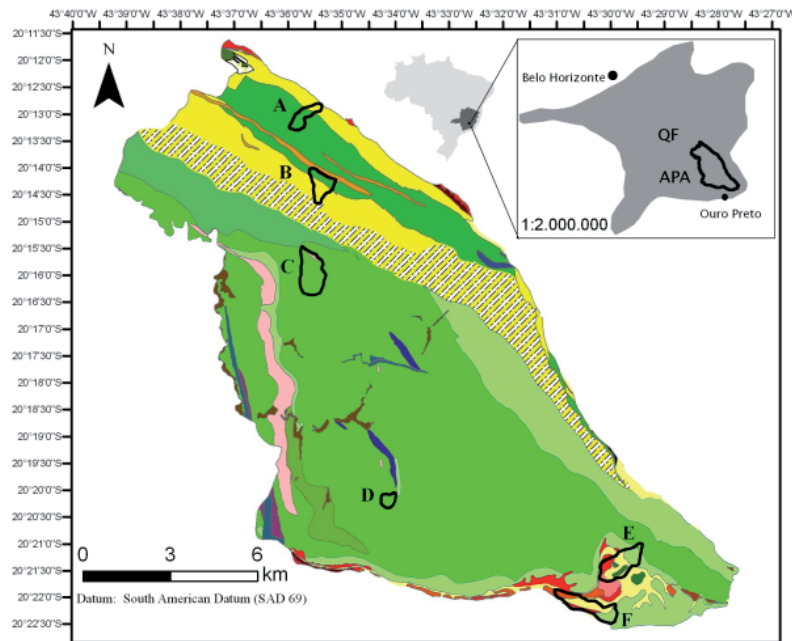
Portanto, o estudo do padrão de fluxo em pequenas bacias também pode trazer informações relevantes quanto à influência das formas de uso e ocupação no regime hidrológico (COSTA, 2005; COSTA & BACELLAR, 2006; FREITAS, 2010).

No presente trabalho, pretende-se avançar nessa linha de pesquisa, ao agregar dados de novas bacias monitoradas na APA/CA, na sub-bacia do Alto Rio das Velhas. Para tal, foram selecionadas seis bacias de 1ª ou 2ª ordem hierárquica (sensu Strahler), com características geométricas similares, mas com distintas características geológico-geomorfológicas e de formas de uso e ocupação do terreno. As bacias foram monitoradas durante o ano hidrológico (2006/2007) e procurou-se estabelecer a influência dos fatores condicionantes no

potencial hídrico pela correlação com índices hidrológicos e morfométricos.

2. Área de Estudo

A APA/CA situa-se na região centro-sudeste do estado de Minas Gerais, nas cabeceiras do Alto Rio das Velhas, coincidindo com o eixo vazado da mega estrutura anticlinal de Mariana (DOOR, 1969). Mais de 85% da área APA/CA está sobre xistos e filitos arqueanos do Supergrupo Rio das Velhas, de idade arqueana, e os 15% restantes sobre quartzitos, filitos, metadolomitos e itabiritos do Supergrupo Minas (Figura 1). Sua paisagem tem intenso controle lito-estrutural, conforme UFV/IEF (2005b).



Litologias	
Cenozóica Kripton Vermelho Cangaço	Areia, argila e cascalho
	Laterita e detritos ferruginosos não cimentados
	Blocos, matacões e seixos de quartzito, itabirito e canga em solo aluvial
	Canga
Proterozóica Minas Itabirita	Diabásio
	Itabirito, lentes de filito e de mármore
	Itabirito, metacalcário e filito
	Quartzito filito
	Quartzito fino, filito e conglomerado
Arqueano Rio das Velhas Mauricé	Filito, lente de quartzito fino e de formação ferrífera
	Xisto
	Quartzito sericitico: metaconglomerado e quartzito-mica xisto
	Quartzito fino e quartzito-sericitico xisto; xisto carbonoso subordinado
	Metaconglomerado e quartzito sericitico fino; Quartzito mica xisto subordinado
Arqueano Rio das Velhas Nova Lima	Xisto e formação ferrífera local
	Xisto, rocha calcissilicática, metaconglomerado e formação ferrífera
	Xisto, filito carbonoso e formação ferrífera subordinada
	Formação ferrífera
	Xisto, rocha calcissilicática e metargilito carbonoso
	Xisto metassedimentar, xisto metavulcânico e filito
	Tremolito
	Granada-estaurolita xisto
	Metaconglomerado
	Metarenito
Metagrauvaca félsica	
Metadiabásio	

Figura 1 - Mapa Geológico da APA/CA (adaptado de CODEMIG, 2007).

O Supergrupo Rio das Velhas é subdividido em três grupos, o Quebra-Osso, Nova Lima e o Maquiné (DOOR, 1969; ALKMIM & MARSAHK, 1998). O Grupo Nova Lima, predominante na APA/CA (Figura 1), é constituído principalmente por quartzo-biotita

xistos e filitos em áreas com predomínio de colinas convexas e, secundariamente, nas áreas mais elevadas, por cristas alinhadas e ravinadas (Figura 2), onde se desenvolvem Latossolos Vermelho Amarelos distróficos e Cambissolos Háplicos, respectivamente (Figura 3).

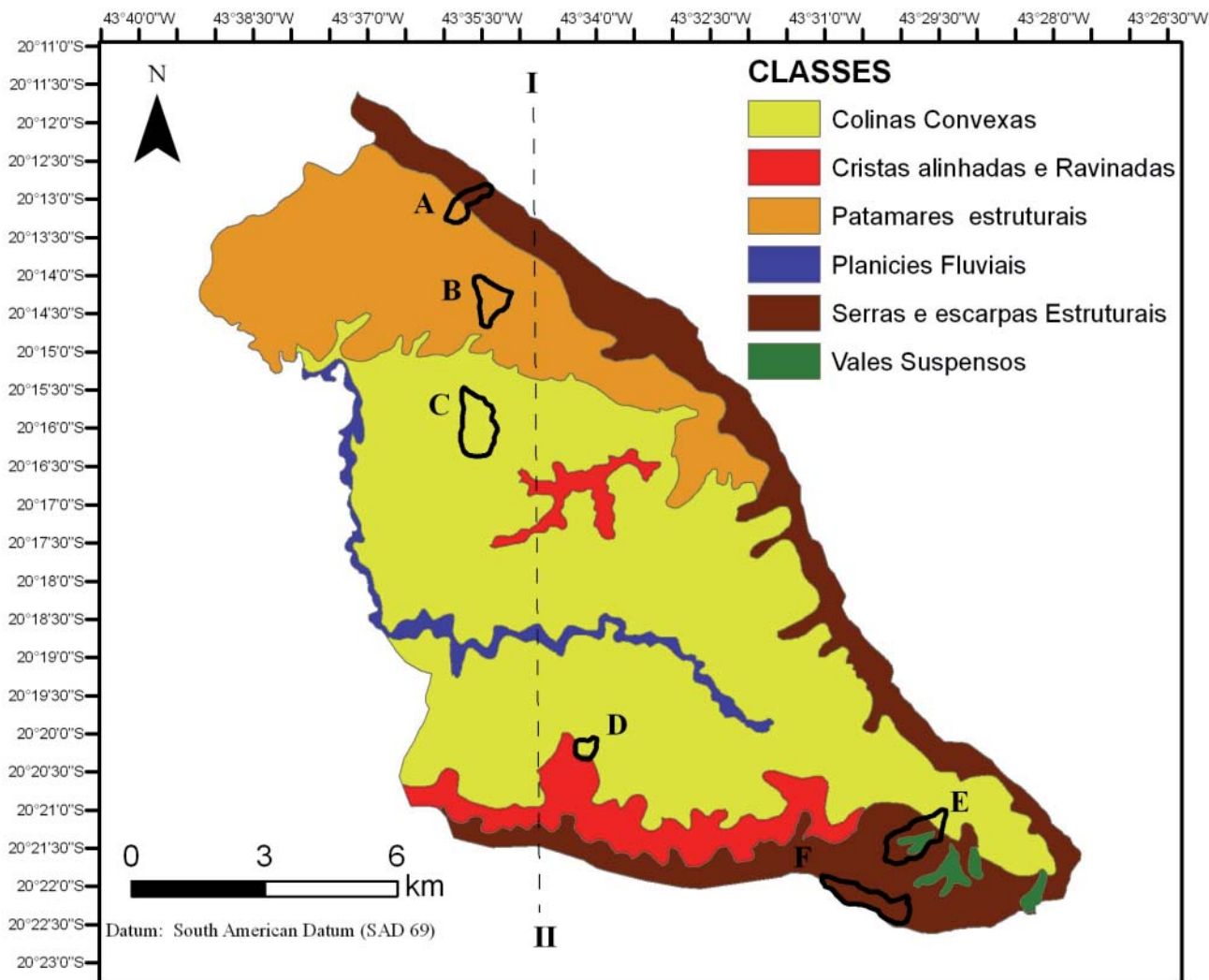


Figura 2 - Mapa geomorfológico da APA/CA (adaptado de UFV/IEF, 2005b).

Sobreposto estratigraficamente ao Grupo Nova Lima ocorre o Grupo Maquiné, dominando a paisagem nordeste e leste da APA/CA, e constituído por metaconglomerados, quartzitos maciços e sericíticos e sericita-quartzo-xistos, formando cristas alinhadas e ravinadas e patamares estruturais (Figura 2), com Neossolos Litólicos e Cambissolos Háplicos (Figura 3), rasos e pobre em nutrientes (UFV/IEF, 2005b).

As rochas do Supergrupo Minas, de idade paleoproterozóica (DOOR, 1969), ocupam uma extensão muito menor, mas constituem importantes elementos da

paisagem local, formando extensas cristas divisoras nos limites sul e nordeste da APA/CA (UFV/IEF, 2005b). Este supergrupo pode ser dividido em quatro grupos - Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará - dos quais afloram na área apenas os dois primeiros. O Grupo Caraça subdivide-se em duas formações, denominadas Moeda (quartzitos e meta-conglomerados) e Batatal (filitos ou micaxistos), aflorantes em pequenas áreas pouco significativas, no extremo norte e sul da APA/CA (Figura 1). O Grupo Itabira subdivide-se em duas formações, a Formação Cauê (itabiritos e itabiritos filíticos) e a

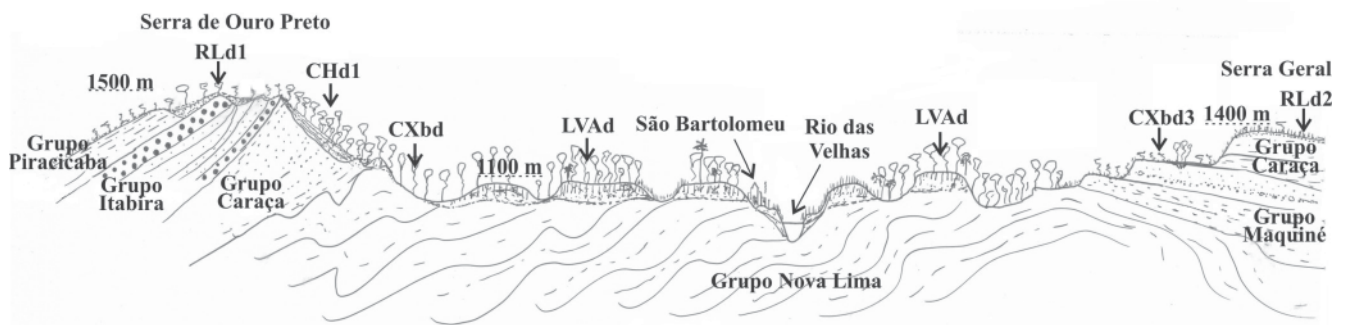


Figura 3 - Perfil geológico da APA associando formas de relevo, tipos de solo e cobertura florestal (adaptado de UFV/IEF, 2005b).

Formação Gandarela (metadolomitos). O Grupo Itabira aflora no limite sul da área e é composto principalmente por itabiritos, itabiritos filíticos e dolomíticos. Estas unidades constituem o domínio das serras e escarpas estruturais (Figura 2), que ocupam 15% da área e evidenciam forte controle geológico e estrutural exercido pelos quartzitos e itabiritos do Supergrupo Minas nos limites sul e leste da APA. É a unidade com maior declividade média de toda a APA/CA, ultrapassando os 45%, e ocorre em cotas entre 1120m e 1640m. Neste domínio se desenvolvem Neossolos Litólicos (Figura 3), associados a Campos Rupestres, de elevado valor ambiental e muito frágeis (UFV/IEF, 2005b). Em alguns trechos ao longo do rio das Velhas afloram restritos depósitos de sedimentos aluviais quaternários (Figura 1), de textura predominantemente siltosa-argilosa, com níveis de conglomerados e lentes arenosas.

Em síntese, grande parte da APA/CA é ocupada por Mata Atlântica, e nas zonas de maior altitude, onde afloram rochas mais resistentes do Supergrupo Minas e do Grupo Maquiné, predominam os Campos Rupestres, constituídos normalmente por espécies de baixo porte e com distribuição esparsa no terreno (UFV/IEF, 2005a). A Mata Atlântica se encontra relativamente bem preservada, embora em alguns trechos tenha sido sujeita a desmatamentos desde o início do Ciclo do Ouro (GUTERSOHN, 1945), em função de produção de carvão vegetal para uso doméstico e fundições e também, mais recentemente, para plantações de eucalipto, pastagens e plantações agrícolas. Na região sul da APA/CA a vegetação rupestre foi localmente afetada por mineração de bauxita e de quartzito.

O clima é do tipo tropical de montanha, segundo a classificação Koppen (HERZ, 1978), com temperatura média anual entre 14° e 19° C. Os maiores índices

pluviométricos anuais encontram-se nas áreas de serras, com valores da ordem de 2.000 mm/ano, que diminuem para as áreas mais baixas, onde predominam rochas do Grupo Nova Lima, até atingindo valores de 1234 mm/ano. A época de estiagem ocorre geralmente entre Abril e Outubro e a chuvosa de Novembro a Março.

Na área da APA/CA são poucas as informações detalhadas sobre os recursos hídricos, tanto superficiais como subterrâneos. Dentre estes, destacam-se o trabalho de Silva *et al* (1994) e Cruz (1995), que definiram seis unidades hidroestratigráficas do Alto Rio das Velhas, sendo que a APA/CA se encontra predominantemente em duas destas: na zona aquífarda do Grupo Nova Lima com zonas aquíferas intercaladas, de muito baixo potencial hídrico; e na zona aquífera do Grupo Maquiné, de médio potencial hídrico.

3. Materiais e Métodos

Para a seleção das bacias, procedeu-se inicialmente o cruzamento de dados geológicos, geomorfológicos e de uso da terra da APA/CA, de forma a selecionar aquelas com características físicas semelhantes entre si, mas com diferentes formas de uso da terra ou distintos estados de conservação. O cruzamento destes parâmetros foi feito com base na análise e interpretação das informações cartográficas e fotográficas existentes, a saber: mapa geológico e topográfico do Quadrilátero Ferrífero (Escala 1:25.000 - CPRM); mapa de solos (Escala 1:50.000 - UFV/IEF, 2005b); fotografias aéreas de 1966 (Escala 1:60.000); ortofotos de 1986 (Escala: 1:10.000-CEMIG) e imagem IKONOS (1:25.000) de 2006. Todo este acervo foi integrado em ambiente SIG (sistema de informação geográfica), para definir as bacias a serem estudadas.

Assim, foram selecionadas duas bacias de baixa ordem hierárquica de cada uma das três unidades geológicas mais representativas da APA/CA, uma mais preservada e outra com significativa influência antrópica. Posteriormente, em campanhas de campo avaliou-se em cada bacia pré-selecionada a viabilidade logística e técnica para monitoramento, como as condições de acesso, a exequibilidade de instalação de vertedores e pluviômetros e a disponibilidade de monitores para auxiliar na aquisição de dados de campo. As seis bacias selecionadas (com áreas de drenagem entre 0,2 km² e 1,0 km²) com predomínio das três unidades espacialmente mais importantes da área da APA/CA foram:

1. Bacias A (mineração) e B (mais preservada): Grupo Maquiné (constituído, na área de estudo, majoritariamente por quartzitos e xistos) / Supergrupo Rio das Velhas (Tabela 1).
2. Bacias C (mais preservada) e D (agropecuária): Grupo Nova Lima (constituído, na área de estudo, basicamente por quartzo-biotita xistos e filitos / Supergrupo Rio das Velhas (Tabela 1).
3. Bacias E (pedreira) e F (preservada): grupos Caraça (quartzitos, conglomerados, filitos e micaxistos) e Itabira (itabiritos e dolomitos) / Supergrupo Minas (Tabela 1).

Em cada bacia, os dados geológicos, pedológicos, de vegetação e uso e ocupação foram compilados e posteriormente verificados em campo (Tabelas 1 e 2).

Com uso do programa SIG, determinaram-se em cada bacia os seguintes índices morfométricos (Tabela 1): a área de contribuição (A); Perímetro (P) Comprimento (L); Coeficiente de compacidade (Kc); Coeficiente de forma (Kf); Densidade de drenagem (Dd); e Ordem hierárquica (O) sensu Strahler. A declividade média foi estimada através do parâmetro *slope index* (SI), que tem sido empregado para avaliar o gradiente topográfico médio de bacias (LACEY & GRAYSON, 1998). Este índice é obtido com a seguinte equação:

$$SI = H/\sqrt{A}$$

onde H = amplitude altimétrica (km), ou seja, a diferença entre a maior e a menor cota da bacia e A=área da bacia (km²).

Foi instalado um pluviômetro em cada bacia, seguindo as recomendações de Costa (2005) e Freitas (2010), objetivando a aquisição de dados de precipitação. Tais dados foram comparados com séries históricas regionais disponibilizadas pela ANA (2009). Para monitorar a vazão, empregaram-se vertedores de paredes delgadas (6 mm de espessura), confeccionados em

Tabela 1 - Características litológicas e morfométricas das bacias.

		A	B	C	D	E	F
Coord. UTM vertedor		7764402N 646292E	7761684N 647066E	7759092N 646825E	7750845N 649597E	7746716N 656258E	7748317N 657093E
Litologias (%)	Quartzito	24,67	5,94	–	–	46,96	38,27
	Xisto	75,23	89,7	94,61	100	25,71	41,62
	Mtconglom.	–	4,24	–	–	–	–
	Mtgrauvaca	–	–	5,38	–	–	–
	Itabirito	–	–	–	–	16,62	0,03
	Canga	–	–	–	–	10,71	14,81
	Laterita	–	–	–	–	–	5,26
Param. morfométricos	A (km ²)	0,4	0,29	0,98	0,23	0,89	0,96
	P (km)	3,12	2,34	4,07	1,81	5,26	4,37
	L (km)	1,3	0,93	1,55	0,59	2,2	1,82
	Kc	1,38	1,2	1,15	1,05	1,56	1,25
	Kf	0,24	0,34	0,4	0,66	0,18	0,29
	Dd (km/km ²)	3,03	2,67	1,77	2,19	2,31	2,13
	Ordem hierárquica	1 ^a	1 ^a	2 ^a	1 ^a	1 ^a	2 ^a
	SI	457,93	421,06	242,28	208,3	286,14	412,93

Tabela 2 - Uso da Terra em percentagem nas bacias.

USO E OCUPAÇÃO (%)			
Bacias	Mata Atlântica	Campo Rupestre	Urbano-Agrícola-Pedreira
A	42	57	1
B	17	83	-
C	99	-	1
D	64	-	36
E	30	25	45
F	79	19	2

chapas de aço galvanizado, adequados para avaliação de pequenas vazões (RANTZ, 1982). O valor da vazão no exutório de cada bacia foi mensurado com um micromolinetete de marca GLOBAL WATER, modelo FP101.

Os valores de vazão instantânea medidos no início da estação seca (abril/2006) em cada bacia e a determinação da área transversal do canal de drenagem permitiram especificar as dimensões e o tipo de vertedor adequado para cada caso (triangular, retangular e trapezoidal). Na soleira dos vertedores foi feito um chanfro de 45° para assegurar o efeito da queda livre da água. Na face montante do vertedor, sempre a certa distância da soleira, fixou-se uma régua para a leitura da altura da lâmina de água, já que estudos prévios (COSTA, 2005; COSTA *et al.*, 2007) comprovaram ser desnecessário seu posicionamento no interior do reservatório, como usualmente recomendado (RANTZ, 1982), mas de difícil instalação.

A precipitação e a vazão foram medidas diariamente durante um ano hidrológico 203 (Julho/2006 a Julho/2007). A precipitação foi medida somente pela manhã e a vazão duas 204 vezes por dia (de manhã e ao final da tarde), com exceção da bacia C, com apenas uma 205 medida matutina, devido às dificuldades de acesso. Os dados de carga hidráulica no vertedor 206 (cm), bem como o volume precipitado (ml) foram obtidos por monitores residentes nas 207 redondezas previamente treinados. Os dados recolhidos foram tratados em ambiente Excel e 208 calibrados com medidas de vazão adquiridas com o método volumétrico, tido como de maior 209 acurácia para pequenos deflúvios (RANTZ, 1982).

Para caracterização do potencial hídrico, optou-se pelo método hidrológico (CUSTÓDIO & LLAMAS,

1976; FEITOSA *et al.*, 2008) para estabelecer a influência dos condicionantes geológicos, geomorfológicos e de uso da terra na produção sustentável do fluxo de base. Para tanto, os dados de vazão foram representados em hidrogramas diários, que representam graficamente a vazão ao longo do tempo e que refletem as características geológico-geomorfológicas, climáticas e vegetais da bacia hidrográfica.

A análise de hidrogramas permite inferir o potencial hídrico de bacias pela determinação do volume e taxa de decaimento de fluxo de base. O decaimento do fluxo de base é usualmente avaliado pelo gradiente da curva de vazões no período de estiagem (período de recessão) quando a vazão é representada em escala logarítmica (CUSTÓDIO & LLAMAS, 1976). O gradiente desta curva é denominado coeficiente de recessão e este método de determinação é conhecido como de Barnes (Figura 4).

O coeficiente de recessão depende de características morfométricas das bacias e das propriedades hidrodinâmicas dos aquíferos integrantes de sua área de contribuição, como o coeficiente de armazenamento e a condutividade hidráulica (DEWANDEL *et al.*, 2003)

O fluxo de base foi determinado pela decomposição (separação) de hidrogramas diários, com a técnica automatizada denominada “*smoothed mínima*” (NATHAN & MCMAHON 1990, WAHL & WAHL, 1995). Nessa técnica é identificado o menor valor de vazão a cada cinco dias consecutivos. Cada valor mínimo é comparado com seus vizinhos imediatos. Se 90% de uma dada vazão mínima é menor que a vazão correspondente aos mínimos anterior e posterior da série hidrológica, este constitui um ponto de inflexão. A interligação destes pontos define a separação entre o

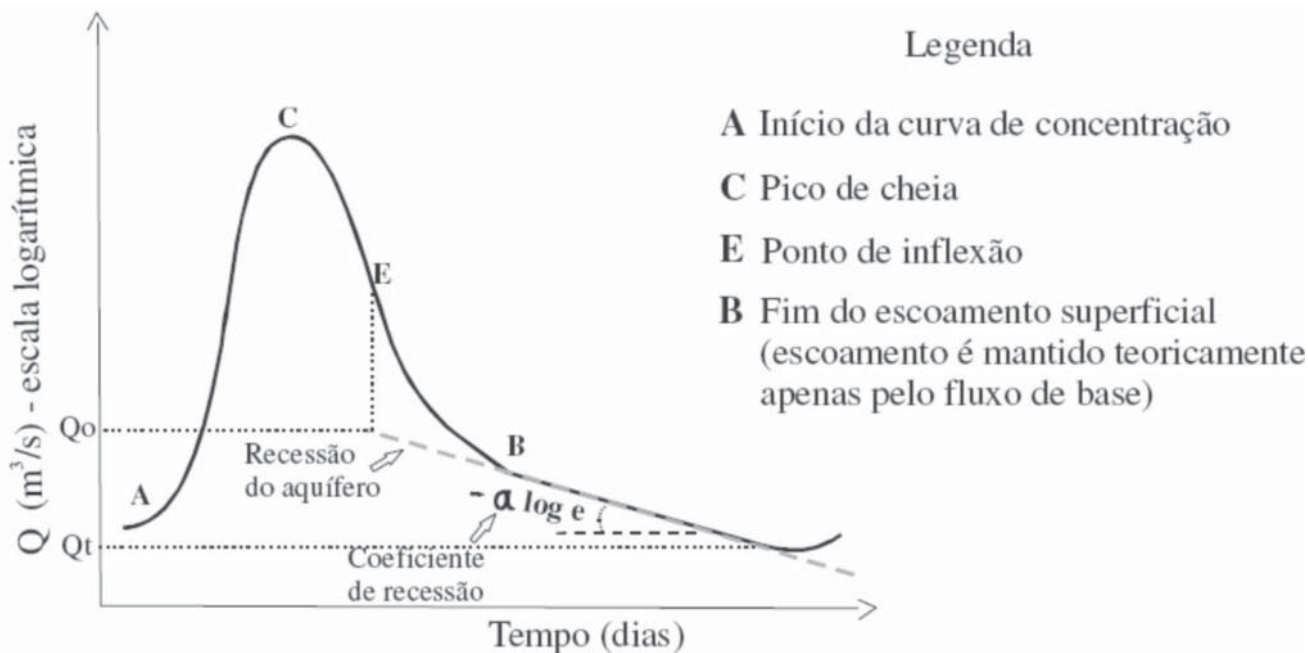


Figura 4 - Determinação do coeficiente de recessão (α) pelo método de Barnes. Adaptado de Costa (2005).

fluxo superficial e fluxo de base no canal de drenagem, que assim podem ser estimados em base anual. Com a separação de hidrogramas é possível determinar alguns índices hidrológicos, como:

- Índice do fluxo de base (IFB) = fluxo de base anual/fluxo total anual;
- Fluxo de base específico (FBE) = fluxo de base anual/área da bacia.

Para determinar o coeficiente de recessão (α), optou-se por empregar a técnica das tiras de papel (*matching strip method*- TALLAKSEN, 1995), que consiste em identificar uma reta de recessão mestra para qual converjam todos os períodos de recessão identificados em hidrogramas com representação de vazões diárias em escala logarítmica (Figura 5).

As diversas curvas de recessão são então movidas horizontalmente de forma a construir uma curva de recessão mestra, cujo gradiente resulta no coeficiente de recessão (α) de acordo com a equação do método de Barnes (DEWANDEL *et al.*, 2003):

$$Q(t) = Q_0 e^{-\alpha t} \tag{2}$$

onde, Q_0 = vazão inicial do fluxo de base (L/s); e = base dos logaritmos neperianos; t = tempo (dias) desde o início da recessão; α = coeficiente de recessão.

Portanto, quando a vazão é representada em escala logarítmica, a recessão do fluxo de base será representada por uma reta cuja inclinação é “ $-\alpha$ ” (Figura 4).

A reta de recessão mestra foi elaborada por três operadores diferentes para cada bacia, objetivando eliminar a subjetividade inerente ao método. Como os resultados das três medidas foram similares, os valores adotados correspondem às médias aritméticas das mesmas.

Além da análise do regime de vazões, a variabilidade química das águas nos exutórios de bacias hidrográficas também constitui uma boa alternativa para analisar o potencial hídrico (COSTA, 2005; FREITAS, 2010). Os seguintes parâmetros físico-químicos foram levantados *in situ* durante um ano hidrológico no mesmo ponto de instalação dos vertedores: condutividade elétrica (CE), temperatura (T), sólidos totais dissolvidos (STD), utilizando-se de condutímetro WTW FF 340. O potencial hidrogeniônico (pH) foi mensurado através do medidor de pH de modelo WTW pH340.

Para determinar o efeito do relevo no potencial hídrico procedeu-se à comparação de índices morfométricos com parâmetros hidrológicos, como o coeficiente de recessão. Como o número de bacias envolvidas neste trabalho é pequeno, para esta comparação foram também agregados os dados de outras oito bacias de pequena ordem hierárquica monitoradas previamente

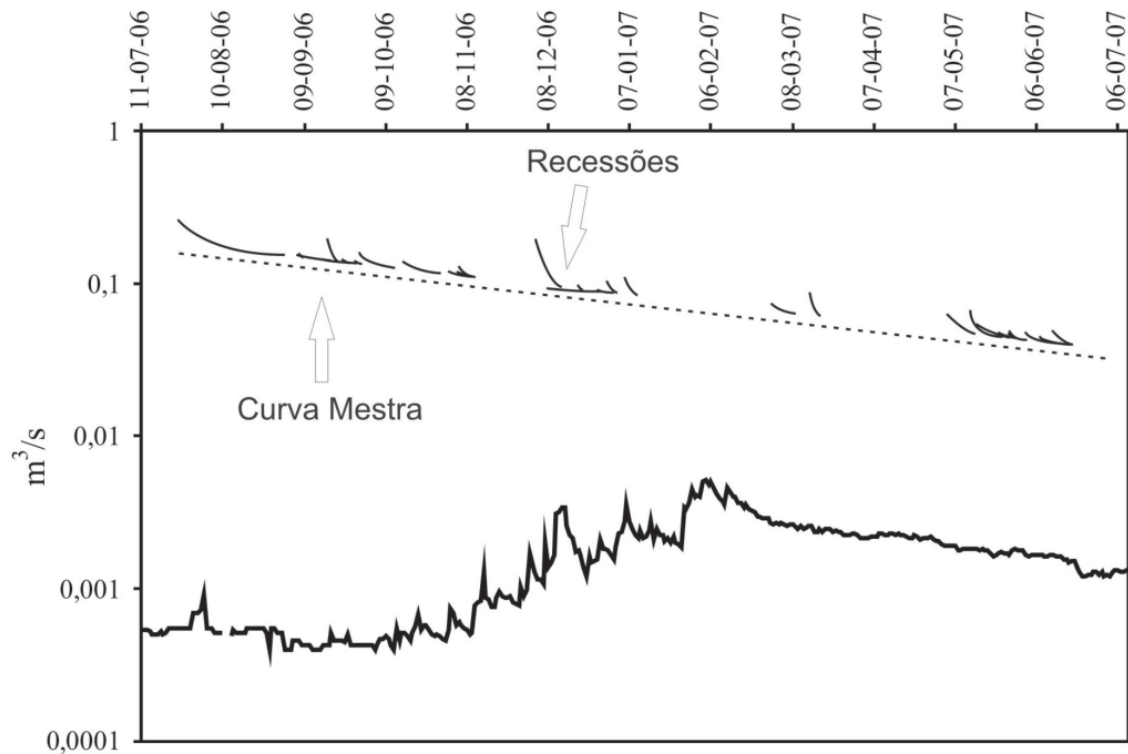


Figura 5 - Determinação da reta de recessão mestra através da técnica matching strip para a bacia A. A reta de recessão foi deslocada para baixo para permitir visualizar cada pequeno período de recessão identificado no hidrográfico.

na região (COSTA, 2005; COSTA & BACELLAR, 2009). Cabe destacar que estas oito bacias se situam na bacia do rio Maracujá, no Quadrilátero Ferrífero, a sul da área da APA/CA foram monitoradas durante um ano hidrológico. Seis dessas bacias (B1, B3, B3.1, B4, B5 e B6) se situam no Complexo Metamórfico Bação, constituído por rochas gnáissicas, migmatíticas e graníticas, e considerado como de baixo potencial hídrico (SILVA *et al*, 1994; CRUZ, 1995; ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2001). As outras duas bacias (B8 e B8.1) são estruturadas em xistos e filitos do Grupo Piracicaba/Supergrupo Minas, de alto potencial hídrico (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2001).

4. Resultados

Os dados pluviométricos coletados possibilitaram determinar as médias mensais de precipitação em cada bacia, comprovando-se a similaridade na distribuição sazonal de chuvas evidenciada por dados pluviométricos regionais, com um período chuvoso de novembro a março e estiagem de abril a outubro. Houve problemas

com a aquisição de dados nas bacias C e D, mas nas outras a precipitação anual variou entre 2230 mm/ano e 1251 mm/ano, nas bacias F e B, respectivamente. Tais valores, altamente variáveis, são compatíveis com os encontrados em outras partes do Quadrilátero Ferrífero, caracterizado por maiores precipitações nas regiões mais serranas em decorrências do efeito orográfico. A série histórica de 24 anos (1982-2006) da estação da mina de ferro de Capanema, próxima à bacia A, apresentou média pluviométrica de 1655 mm/ano, para esse período. Assim verificou-se que o ano hidrológico monitorado (2006-2007) foi um pouco mais seco (1440 mm/ano) que a média.

A vazão obtida com vertedores foi calibrada com o método volumétrico, mais exato, e dadas às boas correlações obtidas (Figura 6), as primeiras foram corrigidas pela respectiva equação da reta de correlação. A bacia com a correlação mais baixa foi a B, com $R^2 = 0,70$, enquanto que na bacia E não houve oportunidade de fazer esta comparação devido ao caráter intermitente da drenagem.

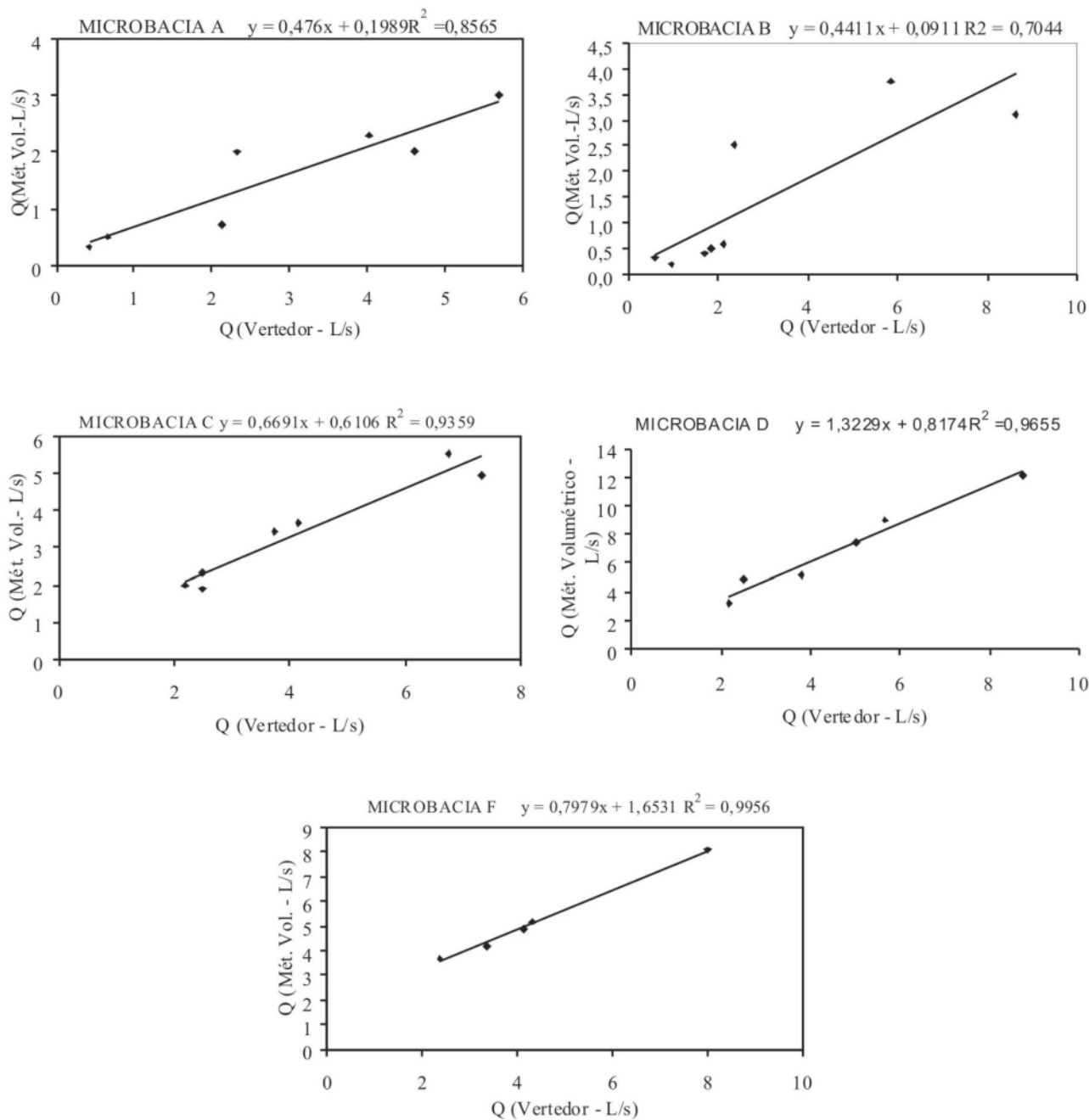


Figura 6 - Gráficos de correlação entre as vazões obtidas no vertedor e com o método volumétrico nas bacias.

Com estes dados, conceberam-se os hidrogramas diários de vazão específica (vazão/área) de todas as bacias (Figura 7). A série de medidas de vazão está incompleta para as bacias E e D, por conta de problemas com as leituras. Essas falhas, concentradas no período chuvoso, não impediram a determinação do coeficiente de recessão com o método *matching strip*, mas prejudicaram a separação de fluxo de base, especialmente, para

a D. Na bacia E as pequenas falhas foram suprimidas pela adoção de valores médios, sem maiores variações no resultado, que foi o menor de todos (Tabela 3). O valor adotado para a D deve ser considerado um valor mínimo, já que a comparação no período em que o monitoramento foi contínuo em todas as bacias demonstrou que o volume de fluxo de base na D é o maior entre todas as bacias monitoradas.

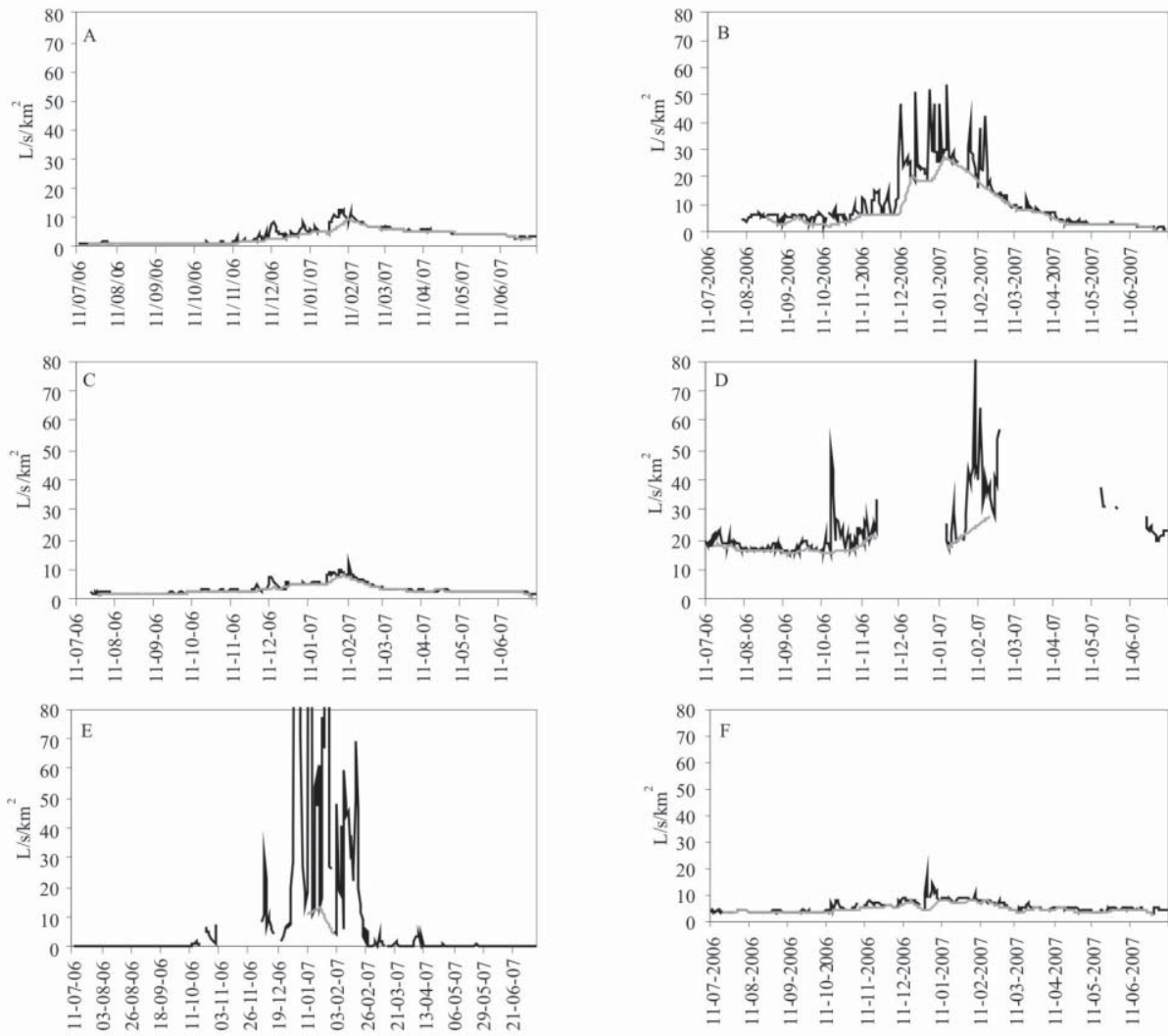


Figura 7 - Determinação da vazão diária específica e do fluxo de base específico (cinza claro) das bacias pela técnica smoothed minima.

Na Tabela 3 são apresentados os valores dos parâmetros hidrológicos de todas as bacias estudadas, como o fluxo de base específico (FBE), do índice de fluxo de base (IFB) e o coeficiente de recessão (α).

O coeficiente de recessão (α) foi por ordem decrescente: E>D>C>A>F>B; o FBE, por outro lado, variou da seguinte forma: D>B>F>A>C>E. O IFB só pode ser considerado para avaliações qualitativas entre as bacias,

Tabela 3 - Parâmetros hidrodinâmicos das bacias monitoradas. O valor do FBE da bacia D é um valor mínimo por conta das falhas na série hidrológica

Bacias	USO E OCUPAÇÃO (%)		
	Mata Atlântica	Campo Rupestre	Urbano-Agrícola-Pedreira
A	42	57	1
B	17	83	-
C	99	-	1
D	64	-	36
E	30	25	45
F	79	19	2

pois não foi possível obter medidas contínuas e confiáveis do fluxo total, especialmente no período de chuva.

Como será discutido a seguir, os valores médios dos parâmetros físico-químicos das águas no exutório das bacias (Tabela 4) se mostraram coerentes com as características geológicas e geomorfológicas das bacias. Os valores máximos e mínimos de alguns parâmetros,

como os sólidos totais dissolvidos, coincidiram de forma geral com os meses de maior e menor proporção de fluxo de base, como previsto (COSTA, 2005). O único valor discrepante e não justificável foi o de sólidos totais dissolvidos medidos na bacia E no mês de setembro, que apresentou um resultado alto (31,00 mg/L) quando comparado com sua média (13,89 mg/L).

Tabela 4 - Valores de parâmetros físico-químicos das águas das bacias.

Bacias		CE ($\mu\text{S/cm}$)	STD (mg/L)	T ($^{\circ}\text{C}$)	pH	Eh (mV)
A	Minima	3,00	0.00	14.00	4.80	189.00
	Máxima	7,02	4.63	18.80	6.60	196.00
	Médias	4,98	2.10	16.26	5.58	192.50
B	Minima	2,50	0.00	15.20	5.13	186.00
	Máxima	5,10	3.23	21.00	7.10	225.00
	Médias	3,56	1.34	17.84	5.81	204.00
C	Minima	34,60	0.00	15.50	5.10	166.00
	Máxima	45,80	29.03	19.60	7.00	193.00
	Médias	40,55	16.20	17.68	6.23	183.67
D	Minima	27,80	0.00	17.10	4.82	59.00
	Máxima	36,59	23.46	20.40	7.10	67.00
	Médias	32,81	13.70	18.71	6.13	62.67
E	Minima	12,20	5.00	16.10	4.71	186.00
	Máxima	77,50	31.00	19.50	7.00	197.00
	Médias	28,03	13.89	17.93	5.99	191.50
F	Minima	2,60	0.00	15.50	4.65	225.00
	Máxima	6,30	3.94	19.60	6.70	240.00
	Médias	3,43	2.25	17.79	5.48	232.33

5. Discussão dos Resultados

Os grandes compartimentos geomorfológicos do Quadrilátero Ferrífero refletem um histórico de erosão diferencial dos principais grupos litológicos (SALGADO *et al*, 2007), de comportamento reológico muito distinto entre si. O efeito do relevo no potencial hídrico foi investigado com a comparação de um índice morfométrico, o *slope index*, com parâmetros hidroló-

gicos, como o coeficiente de recessão. O coeficiente de recessão foi selecionado por não ser afetado, em tese, pelas condições climáticas e por ser função de parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos para bacias geometricamente similares.

Na figura 8 nota-se que há relação direta entre o coeficiente de recessão e o *slope index*, confirmando-se as observações já levantadas por Costa (2005) e Costa

& Bacellar (2009). Ou seja, quanto mais íngreme a área, mensurada pelo *slope index*, maior o coeficiente de recessão, indicando que as bacias de regiões de

cabeceras tendem a transmitir o fluxo proveniente de aquíferos (fluxo de base) de forma mais rápida, ou seja, apresentam menor potencial hídrico.

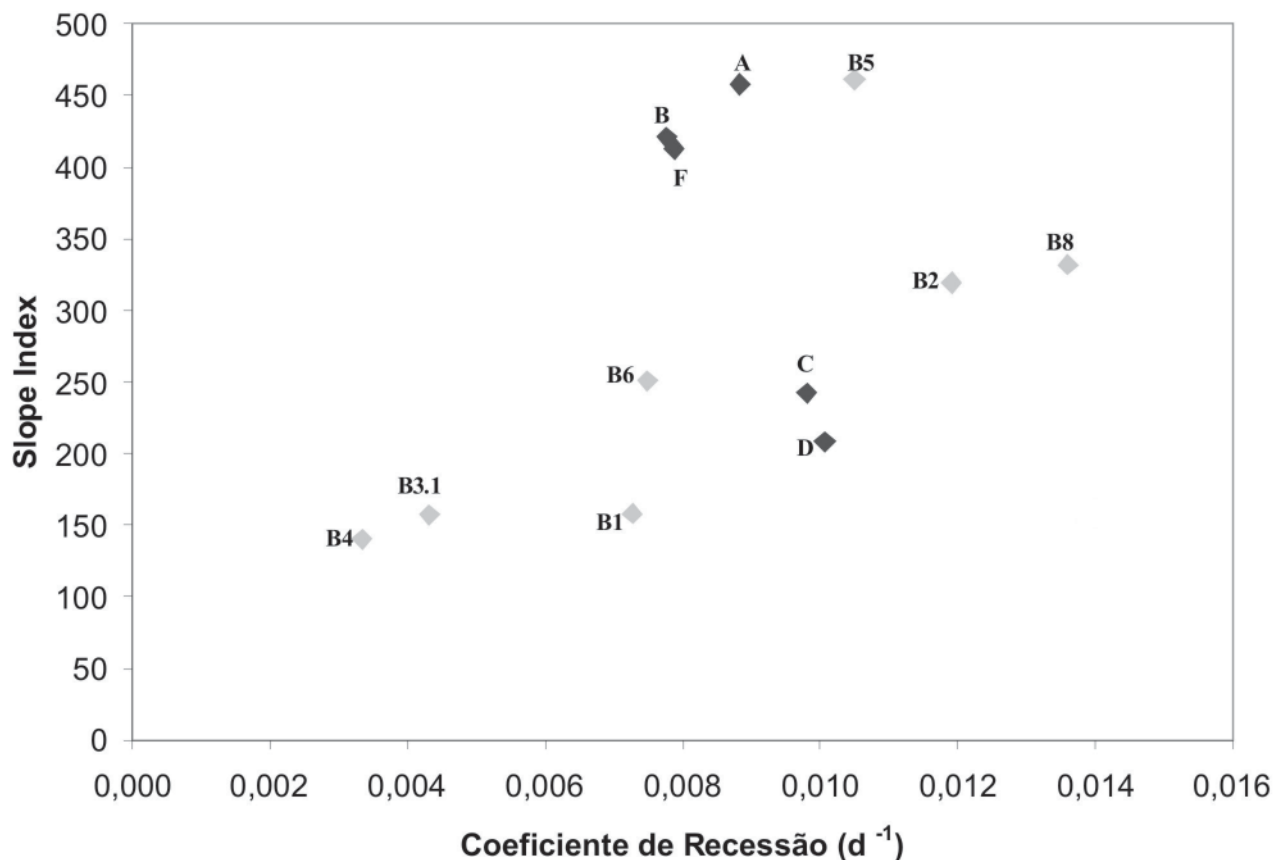


Figura 8 - Gráfico de dispersão do coeficiente de recessão versus Slope Index de todas as bacias analisadas neste estudo e das bacias monitoradas por Costa (2005).

A análise de outros índices hidrológicos, como o fluxo de base específico é mais complexa, por ser este também afetado pelas condições climáticas, variáveis no espaço e no tempo. As variações devido à orografia são significativas para as bacias situadas nas regiões serranas, como a A, B, D e F, mas para aquelas situadas na área de afloramento de rochas do grupo Nova Lima (bacias C e D) espera-se um clima similar aos encontrados no embasamento cristalino (Complexo do Bação), situado a sul da APA/CA. Como o ano hidrológico monitorado por Costa (2005), de 2003/2004, apresentou precipitação similar à monitorada no ano de 2005/2006 (diferença de 8%, segundo os dados do pluviógrafo instalado na Mina de Capanema), os dados de Costa (2005) podem ser comparados, ao menos com os das bacias C e D. Na figura 9 estão representadas a

relação entre o fluxo de base específico e o coeficiente de recessão das bacias deste estudo e das monitoradas por Costa (2005).

Verifica-se que a tendência de relação inversa entre estes índices demonstrada por Costa (2005) se mantém, mesmo quando são incorporadas as bacias em áreas serranas sobre formações ferríferas e quartzitos, como a A, B e F, sujeitas a maior precipitação (Figura 9). Ou seja, os dados obtidos corroboram a correlação inversa entre o fluxo de base específico e o coeficiente de recessão, indicando que as bacias com maiores coeficientes de recessão, situadas em áreas mais íngremes, tendem a apresentar fluxos de base específicos menores. Desta forma, bacias de cabeceira, mais íngremes, tendem a apresentar menor potencial hídrico que bacias situadas à jusante.

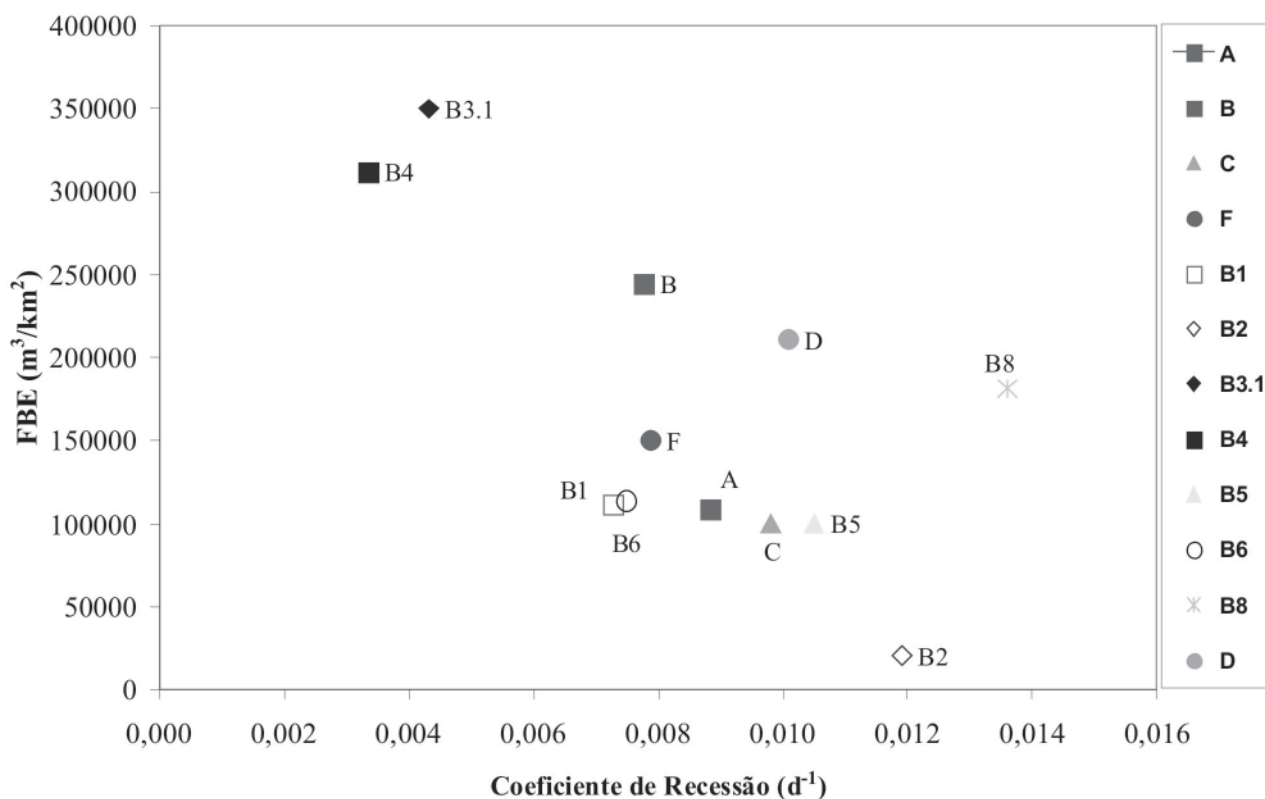


Figura 9 - Gráfico de dispersão do coeficiente de recessão versus FBE de todas as bacias analisadas neste estudo e das monitoradas por Costa (2005).

Os dados físico-químicos das águas também refletem a influência da geologia e do relevo. As bacias situadas em áreas mais elevadas (bacias A, B, E e F) apresentam águas com pH inferior a 5,99, devido aos solos orgânicos frequentes em áreas com Campos Rupestres (ANDRADE, 2008), enquanto que as bacias C e D apresentam pH médios de 6,23 e 6,13, respectivamente (Tabela 4).

As bacias C e, especialmente a D, apresentam águas com Eh mais baixos (Tabela 4), em decorrência provavelmente da maior contribuição de aportes de água subterrânea, com maior tempo de residência, nestas áreas de relevo mais suave. Pelo mesmo motivo e também pelo fato de atravessar rochas mais intemperizáveis (xistos) e, portanto, mais suscetíveis à lixiviação, a condutividade elétrica e o teor de sólidos totais dissolvidos (Figura 10) são maiores nas bacias C e D.

O acréscimo dos valores de STD nas águas após as primeiras chuvas no início da estação úmida é fenômeno comum e muitas vezes explicado pela lavagem das águas mais salinizadas retidas na zona não saturada do solo nos primeiros eventos de recarga (MCGLYNN *et*

al, 2002). A incorporação mais lenta destas águas mais salinas nas bacias do grupo Nova Lima, em outubro (Figura 10), que nas localizadas em áreas mais íngremes, em setembro, também pode ser consequência do maior tempo de trânsito das águas subterrâneas daquelas.

Cabe lembrar que neste trabalho, consideraram-se como condicionantes antrópicos os fatores de uso e ocupação do solo, que implicaram no estado de degradação ou preservação das bacias (Tabela 2). A influência dos vários tipos de uso e ocupação com o potencial hídrico não é simples, já que a resposta hídrica é resultante da combinação multifatorial e a contribuição dos condicionantes antrópicos tende a ser suprimida por outras características da bacia. No entanto, as bacias com maiores percentagens de área ocupada por Floresta Estacional Semidecidual - a C (99%), a F (79%), D (63,9%) e a A (42%) (Tabela 2) – apresentam comportamento peculiar. Cabe destacar que este tipo de vegetação tende a aumentar a interceptação de chuvas nas copas e na serrapilheira, a evapotranspiração real e as taxas de infiltração. Contudo, em áreas de relevo suave e lençol freático raso, a elevação das taxas de recarga pode ser

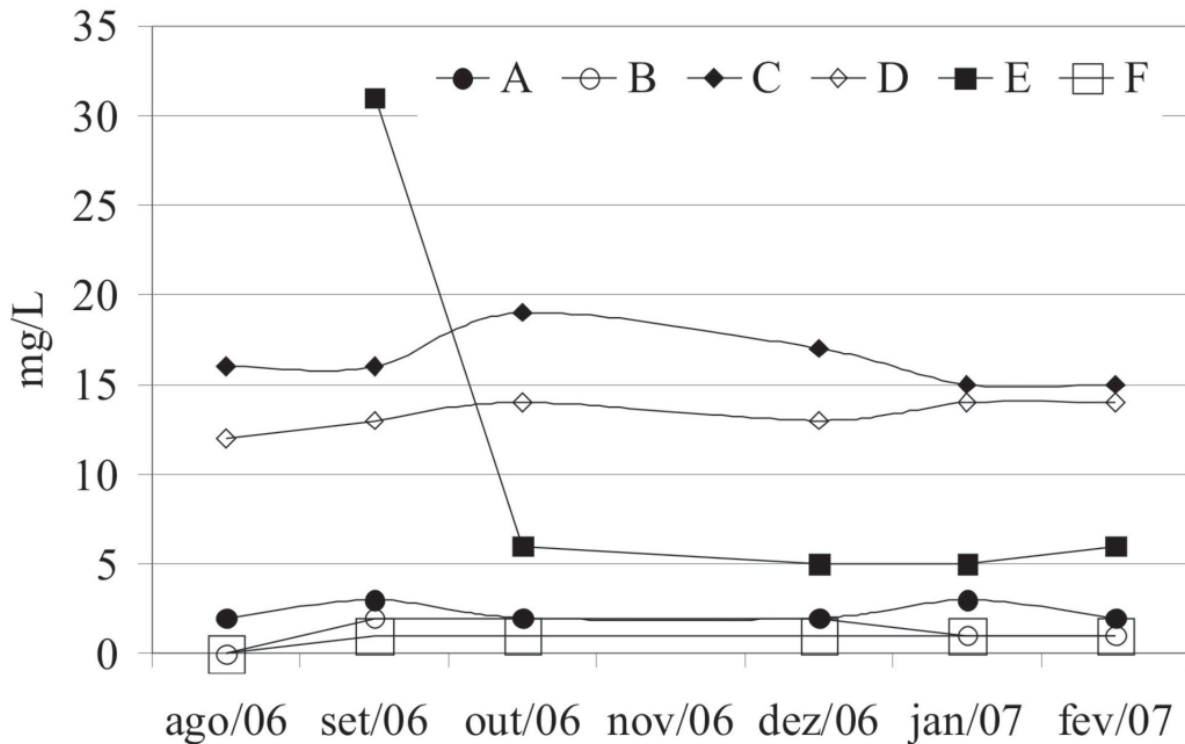


Figura 10 - Gráficos com valores de STD da água das bacias.

inferior ao aumento das taxas de infiltração no solo em consequência da maior transpiração devido a raízes profundas em contato com o nível d'água subterrâneo (BACELLAR, 2005).

Neste sentido, as análises dos hidrogramas em termo de vazões específicas apontam que as bacias C, F e A, em ordem decrescente, se caracterizam por vazões totais e fluxo de base específicos baixos e elevados índices de fluxos de base (Tabela 3). A bacia D é uma exceção, provavelmente porque nela a vegetação de porte se restrinja aos trechos mais íngremes e também pelo fato do restante de sua área ser ocupada por pastagens em grande parte degradadas. Dados adicionais e sistemáticos estão em curso para tentar confirmar esta interpretação e outros estudos nesta região e em outras têm mostrado que sob certas condições, como superfície freática rasa, a vegetação de maior porte pode reduzir a recarga dos aquíferos e o fluxo de base dos rios (CHENG *et al.*, 2002; BACELLAR, 2005; FREITAS, 2010).

6. Conclusões

A análise do potencial hídrico de bacias de cabeceira através do método hidrológico demonstrou

ser útil para definir as relações entre o fluxo superficial e subterrâneo e, desta forma, avaliar indiretamente as condições dos aquíferos.

Tendo-se em conta os dados monitorados, constatou-se:

- o emprego de vertedores de parede delgada para medir vazão associada à correção pelo método volumétrico apresentou bons resultados para pequenas vazões em bacias de 1ª ou 2ª ordem hierárquica. Estes métodos têm a vantagem de serem práticos e econômicos;
- o coeficiente de recessão (α) das bacias é por ordem decrescente: **E>D>C>A>F>B**. Esta relação mostra que nas bacias de menor coeficiente de recessão (A, B e F), a vazão é mantida na estiagem por um período de tempo maior, graças ao fluxo subterrâneo armazenado nos aquíferos a montante.
- Com relação à influência da geologia/geomorfolo-gia e do uso e ocupação no potencial hídrico, pôde-se concluir que:
- as bacias mais íngremes, com maiores *slope index*, tendem a apresentar maiores coeficientes de

recessão e menores fluxos de base, ou seja, menor potencial hídrico;

- as águas das bacias em áreas de relevo mais suave, com solo mais espesso e maior tempo de trânsito das águas de recarga, tendem a ser mais redutoras e com maiores condutividades elétricas;
- as bacias com maior proporção de área ocupada por Floresta Estacional Semidecidual tendem a apresentar baixas vazões totais e fluxos de base específicos e elevados índices de fluxos de base, conforme apontam estudos anteriores.

A incorporação de dados de monitoramento de seis novas bacias da área da APA/CA possibilitou corroborar algumas das conclusões de alguns estudos prévios feitos na região (COSTA, 2005; COSTA & BACELLAR, 2006, 2009; FREITAS, 2010). Porém, os resultados evidenciaram a necessidade de incorporar ainda mais bacias, para refinar as relações apontadas. É recomendável também estudar bacias de maior ordem hierárquica para averiguar se as tendências observadas se mantêm em outras escalas.

Por fim, os resultados evidenciaram que conhecer a interferência dos condicionantes analisados no potencial hídrico pode auxiliar no delineamento de estratégias capazes de orientar o uso e ocupação do solo local para uma gestão mais eficaz dos recursos hídricos.

7. Agradecimentos

Ao CNPq, à FAPEMIG (projeto CRA PPM0271-10) e ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas, pelo apoio financeiro à pesquisa.

8. Referências Bibliográficas

Agência Nacional de Água, Sistema de Monitoramento Hidrológico. Disponível em: < <http://mapas-hidro.ana.gov.br/Usuario/mapa.aspx>>. Acesso em: 10 jan. 2009.

ANA/GEF/PNUMA/OEA. **Avaliação das interferências ambientais da mineração nos recursos hídricos da bacia do Alto Rio das Velhas-MG**, IGAM. Belo Horizonte- MG. 2001

ANDRADE, L. N. **Caracterização hidrológica e hidrogeoquímica do Parque Estadual do Itacolomi (PEI), Ouro Preto/ Minas Gerais.** Dissertação de Mestrado Departamento de Geologia. UFOP. 2008.

BACELLAR, L. A. P. **O papel das florestas no regime**

hidrológico de bacias hidrográficas. GeoBr. p.39. 2005.

CHENG J.D., LIN L.L., LU H. S. Influence of forests on water flows from headwater watersheds in Taiwan. **Forest Ecology and Management**, 16. p.11-28. 2002.

CODEMIG. **Geologia do Quadrilátero Ferrífero – Integração e Correção Cartográfica em SIG.** Lydia Maria Lobato et al. - Belo Horizonte. 2007 1 CD-ROM.

COSTA F.M. **Análise por métodos hidrológicos e hidroquímicos de fatores condicionantes de bacias hidrográficas - Estudo de Casos no Quadrilátero Ferrífero.** Dissertação de Mestrado Departamento de Geologia. UFOP. 2005.

COSTA F. M., BACELLAR L. A. P. Analysis of the influence of gully erosion in the flow pattern of catchment streams, Southeastern Brazil. **Catena**, v.69, Issue 3, p.230-238. 2006.

COSTA, F. M.; BACELLAR, L. A. P.; SILVA, E. F. Vertedores portáteis em microbacias de drenagem. REM: **Revista da Escola de Minas** [online]. Vol.60 (2), p 213-218. 2007.

COSTA, F. M.; BACELLAR, L. A. P. The hydrogeologic potential conditioning factors of hydrographic catchments of Upper Velhas River Basin, Southeastern Brazil. **Environmental Earth Sciences**. V.59(1), p: 87-97. 2009.

CRUZ W.B. **Diagnóstico Hidrogeológico.** In: IGA/CETEC/ SAE-PR, Desenvolvimento ambiental de Ouro Preto – Bacia do Ribeirão do Funil. Relatório Técnico Final de Projeto de Pesquisa, p.39p. 1995.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. **Hidrologia Subterrânea.** Barcelona: Ediciones Omega S.A. 1976.

DEWANDEL B., LACHASSAGNE P., BAKALOWICZ M., WENG PH., AL-MALKI A. Evaluation of aquifer thickness by analyzing recession hydrographs. Application to the Oman ophiolite hard-rock aquifer. **Journal of Hydrology**, 274: p.248-269. 2003.

DOOR J. V. N. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Brazil. USGS/DNPM. **Geological Survey Professional Paper**, 641-A, p.110.1969.

FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J.M.; FEITOSA, E.C; DEMETRIO, J.G. **Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações.** CPRM/LABHID-UFPE. 3ª Ed. 2008.

FERREIRA, Q. C. G.; BACELLAR, L. A. P. Avaliação preliminar das condições hidrogeológicas na área do município de Ouro Preto, MG. **Geonomos**, 18(2): 13-21, 2010.

FREITAS, S. M.A.C. **Aplicação e técnicas de quantificação**

- da infiltração e da recarga de aquíferos do Alto Rio das Velhas.** Dissertação de Mestrado Departamento de Geologia. UFOP. 2010.
- GUTERSOHN, H. A Região Central de Minas Gerais. Trad. W.A. Egler. **Boletim Geográfico**, Rio de Janeiro. 1945.
- HERZ, N. Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **Geological Survey Professional**. Paper 641-C: 1-81. 1978.
- LACEY, G.C.; GRAYSON, R.B. Relating baseflow to catchment properties in south-eastern Australia. **Journal of Hydrology**, 204: p. 231-250. 1998.
- MCGLYNN, B. L.; MCDONNELL, J.; BRAMMER, D. D. A review of the evolving perceptual model of hillslope flowpaths at the Maimai catchments, New Zealand. **Journal of Hydrology**. 257: p.1-26. 2002.
- NATHAN R.J.; MCMAHON, T.A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. **Water Resources Research**, 26: p.1465-1473. 1990.
- RANTZ, S.E. Measurement and Computation of Streamflow: Volume 1. Measurement of Stage and Discharge. **Geological Survey Water-Supply paper 2175**. Washington. 1982.
- SALGADO, A.A.R.; VARAJÃO, C.A.C.; COLIN F.; BRAUCHER, R.; VARAJÃO, A.F.D.C.; NALINI JR., H.A. Study of the erosion rates in the upper Maracujá Basin (Quadrilátero Ferrífero/MG, Brazil) by the in situ produced cosmogenic ¹⁰Be method. **Earth Surface Processes and Landforms**, 32: p.905-911. 2007.
- SILVA A.B.; NETO A.F.S.; BERTACHINI, A.C. Potencial das águas subterrâneas do Quadrilátero Ferrífero. In: ABAS, Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 8, **Anais...**, p.264 – 273. 1994.
- TALLAKSEN L.M. A review of baseflow recession analysis. **Journal of Hydrology**, 165: p.349-370. 1995.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA/ INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS. **Zoneamento ecológico da Área de Proteção Ambiental Estadual Cachoeira das Andorinhas, Ouro Preto, Minas Gerais.** Relatório do meio biótico. Viçosa. 125 p. 2005a.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA/ INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS. **Zoneamento ecológico da Área de Proteção Ambiental Estadual da Cachoeira das Andorinhas, Ouro Preto, Minas Gerais: Relatório do meio físico integrado: geologia; solos; geomorfologia; qualidade das águas.** Viçosa. 107 p. 2005b.
- WAHL, K.L.; WAHL, T.L. Determining the flow of Comal Spring at New Braunfels, Texas. Texas Water. **Proceedings...**v.95, p16-17. 1995.