

LEVANTAMENTO ESTRUTURAL APLICADO À HIDROGEOLOGIA

O potencial hidrogeológico em rochas cristalinas está associado a falhas, fraturas e juntas intercomunicantes. Para que estas descontinuidades possam armazenar água, elas têm de ser abertas. Alguns fatores influenciam diretamente para esta condição: o tipo de tectônica, se compressional ou extensional; o tipo de rocha e a maneira que esta irá responder ao esforço aplicado; e as direções estruturais existentes.

Da observação e análise das imagens de satélite, foram identificadas quatro direções principais de lineamentos estruturais. As relações de sobreposição entre estes lineamentos foram estabelecidas por critérios como obliteração, rotação, interceptação, interrupção e deslocamento entre os mesmos, permitindo hierarquizá-los, do mais antigo para o mais novo, na seguinte ordem (figura 3): lineamentos **L1** com direções de N30 a N65E; lineamentos **L2** com direção geral NS, variando de N15W a N15E; **L3** com direção geral N15-25W; e **L4** orientados segundo N55-70W.

Os lineamentos **L3** e **L4** mostram deslocamentos sem indício de arrasto visível, indicando a atuação de tectônica rúptil.

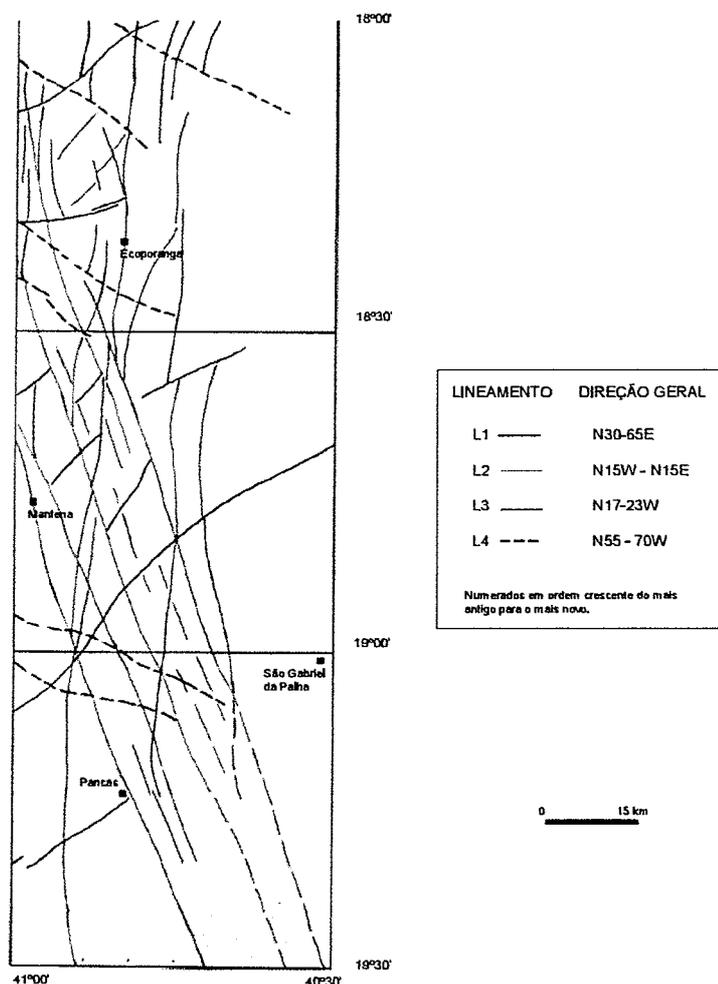


Figura 3: Mapa esquemático dos principais lineamentos estruturais extraídos de imagem de satélite abrangendo as folhas de Ecoporanga, Mantena e São Gabriel da Palha.



A interpretação e análise dos dados levantados revelaram a existência de dois eventos de deformação. O primeiro compressivo (D1), em regime de cisalhamento dúctil a dúctil-rúptil, com cinco fases de geração de foliações e posteriormente um evento extensional (D2) em regime rúptil.

As principais atitudes médias de falhas normais geradas no evento D2 e as resultantes de reativação de estruturas formadas do evento D1 são: **N50E/70NW**, **N65-70E/70-85SE**, **N25E/65-85SE**, **N20E/45NW**, **N10W/75SW** e **N20W/87NE**.

As principais atitudes de juntas extensionais são: **N10W/90**, **N35W/90**, **N60E/85SE**, **N20E/45SE**, **N20W/85SW** e **N45E/70SE**.

Descrições de feições estruturais são encontradas em mapeamentos realizados na região. Vieira (1993) descreve dobras flexurais abertas, de pequena amplitude e grande comprimento de onda, com eixo NS e suave caimento para norte, na região de Baixo Guandu e interpreta estes dobramentos como relacionados à tectônica transcorrente de *trend* NS, responsável por importantes zonas de cisalhamento, entre as quais se destaca o lineamento Guaçuí. Tuller (1993) também descreve dobras semelhantes na região de Colatina, ao sul da área.

O Complexo Montanha é sin- a tardi tectônico em relação a D1 e de granulação muito grossa. Reologicamente este complexo foi mais susceptível ao fraturamento longitudinal de direção NS nas zonas de charneiras das dobras descritas acima.

As discontinuidades de direção NS, e secundariamente as NW foram reaproveitadas no evento extensional Mesozóico, quando houve a intrusão de diques de diabásio preferencialmente nestas direções (Tuller op.cit.).

De natureza tardi a pós- tectônica o Complexo Medina e a Suíte Intrusiva Aimorés, são praticamente indeformados, não refletindo a mesma condição estrutural de fraturamento resultante de dobramento flexural.

A direção NS, e subordinadamente a NW, são as direções mais favoráveis ao armazenamento de água subterrânea, preferencialmente nos augen gnaisses do Complexo Montanha. Esta interpretação é corroborada pelo posicionamento, nestas direções, dos diques de diabásio da Suíte Intrusiva Fundão, como também pelas maiores vazões verificadas em poços tubulares profundos situados ao longo destes fraturamentos.

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

Os estudos desenvolvidos na área permitiram definir dois sistemas aquíferos de acordo com o tipo de permeabilidade das rochas. Os aquíferos fraturados são representados pelas rochas cristalinas do embasamento e os aquíferos granulares pelos sedimentos terciários da Formação Barreiras e quaternários das aluviões fluviais e flúvio-marinhas (Figura 4).



O cadastramento de pontos d'água resultou em 852 pontos sendo 799 poços tubulares, 27 poços escavados, 01 poço ponteira e 25 nascentes distribuídos nos municípios segundo a tabela 1. Do total de poços tubulares cadastrados, 51 são poços secos. A maior concentração dos pontos encontra-se na área de ocorrência da Formação Barreiras e das aluviões.

A distribuição dos pontos d'água por sistemas aquíferos mostra que 65% captam água do aquífero granular, 19% do fraturado e 1% têm entradas d'água no granular e no fraturado. Não foram obtidas informações quanto ao sistema captado para 15% dos poços tubulares.

As principais características hidráulicas e construtivas dos poços tubulares perfurados na área são mostradas na figura 5 onde estão representados, em gráficos de barras, a profundidade, o nível estático, a vazão de teste e a capacidade específica. Esses gráficos foram construídos a partir dos valores de mínimo, média interna, mediana, média, máximo e desvio padrão.

Tabela 1: Número de pontos d'água cadastrados por município.

<i>Município</i>	<i>Pontos d'água cadastrados</i>	<i>Município</i>	<i>Pontos d'água cadastrados</i>
Água Doce do Norte	7	Montanha	28
Águia Branca	5	Mucurici	19
Alto Rio Novo	6	Nova Venécia	34
Barra de São Francisco	9	Pancas	5
Baixo Guandu	7	Pedro Canário	28
Boa Esperança	11	Pinheiros	14
Colatina	42	Ponto Belo	7
Conceição da Barra	27	Rio Bananal	9
Ecoporanga	25	São Domingos do Norte	9
Gov. Lindemberg	7	São Gabriel da Palha	17
Jaguaré	47	São Mateus	133
Linhares	270	Sooretama	45
Mantenópolis	5	Vila Pavão	8
Marilândia	22	Vila Valério	7

TOTAL - 852 pontos d'água



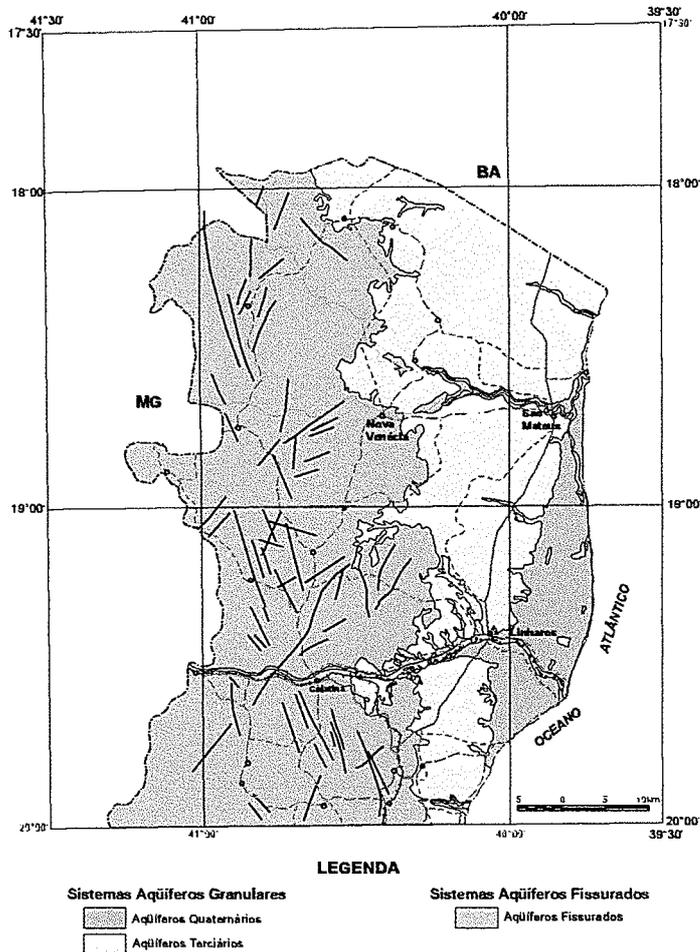


Figura 4: Mapa de Sistemas Aqüíferos.

Os Sistemas Aqüíferos Granulares

Os aquíferos granulares representados pelos sedimentos terciários da Formação Barreiras e sedimentos quaternários fluviais e flúvio-marinhos ocorrem na porção oriental cobrindo cerca de 40% da área.

Furos de sondagem realizados na costa do Espírito Santo pela PETROBRAS constataram espessuras para a Formação Barreiras de até 80 metros, com aumento gradual em direção à plataforma continental, chegando a alcançar 150 metros.

A Formação Rio Doce é constituída por arenitos grossos, localmente conglomeráticos, com intercalações de folhelhos e calcários. Ocorre sotoposta aos sedimentos da Formação Barreiras sendo caracterizada apenas por meio de furos de sondagem os quais indicam espessuras de até 3185 metros.



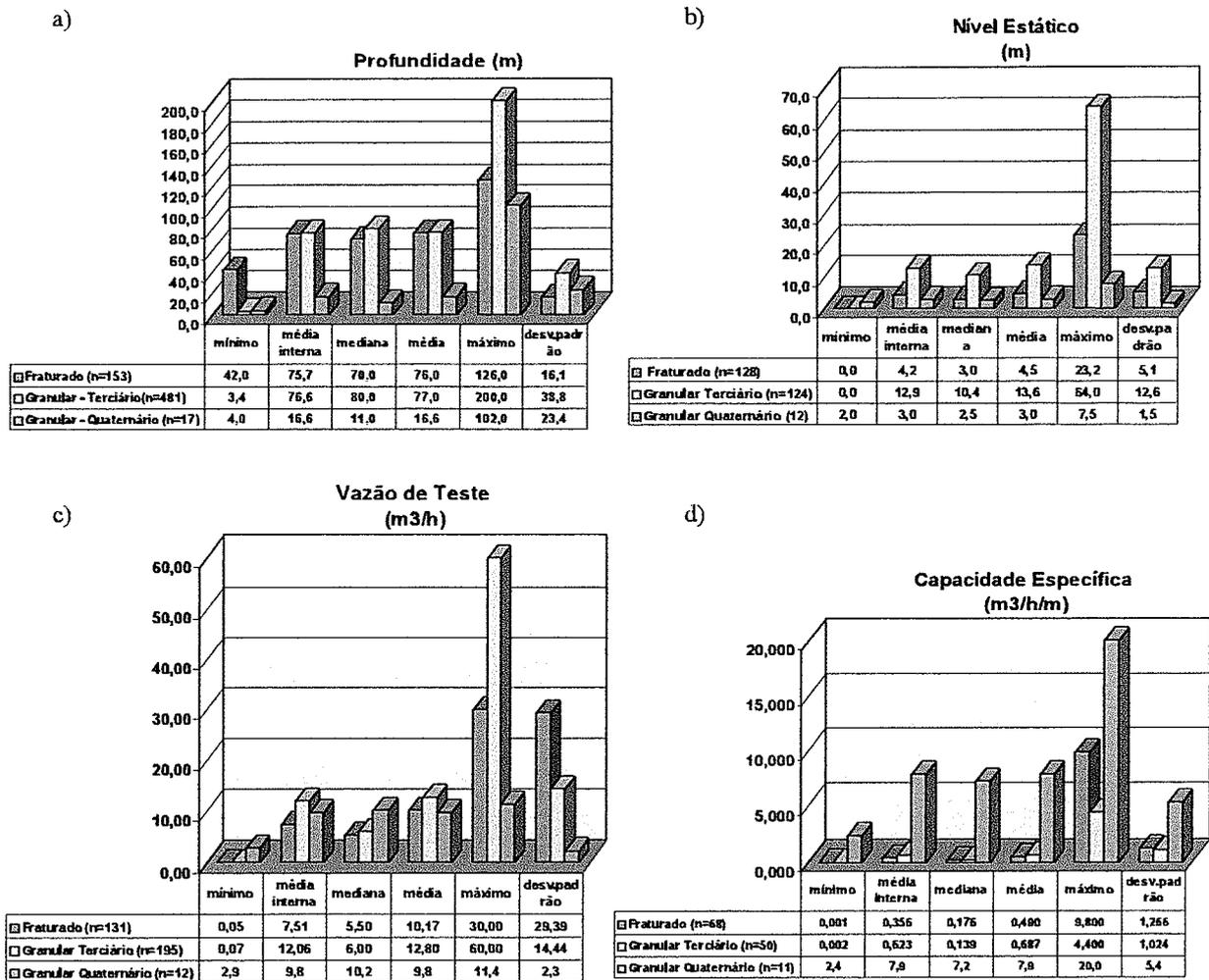


Figura 5: Parâmetros hidráulicos e construtivos dos poços tubulares profundos. a) Profundidade, b) Nível Estático, c) Vazão de teste e d) Capacidade Específica.

Os sedimentos quaternários fluviais representados pelas aluviões dos principais rios que drenam a área (Itaúnas, São Mateus, Barra Seca e Doce) são constituídos por cascalhos, areias, siltes e argilas. Dados disponíveis de espessura para poços situados próximo à foz dos rios São Mateus e Doce revelam profundidades médias de 20 metros.

Os sedimentos quaternários flúvio-marinhos são caracterizados por sedimentos detríticos originados em ambientes diversos. São reconhecidos depósitos de terraços marinhos arenosos, depósitos lagunares de natureza argilo-arenosa, depósitos de manguezais, arenitos de praia e crostas calcárias de algas e corais. Dados de espessura são inexistentes.

Os sedimentos fluviais e flúvio-marinhos apresentam granulometria e composição variáveis, exibindo localmente grande potencial hidrogeológico.

A recarga dos sistemas granulares ocorre principalmente através da infiltração direta das chuvas.



Sistemas Aquíferos Fraturados

Os aquíferos fraturados são representados pelas rochas cristalinas dos Complexos Paraíba do Sul, Montanha e Medina, e pelas Suítes Intrusivas Aimorés e Fundão. Estas rochas abrangem cerca de 60% da área, estando distribuídas ao longo de uma faixa de direção norte-sul, balizada a leste pelo meridiano de 40°15'.

A ocorrência da água subterrânea nessas rochas depende da interação de diversos fatores tais como relevo, litologia, espessura do manto de intemperismo, e principalmente da trama estrutural, dada pela existência de falhas, fraturas e juntas abertas e a intercomunicação entre essas superfícies de descontinuidade.

A recarga nesses sistemas se processa através dos sistemas de fraturas que controlam a drenagem superficial ou através de filtração vertical a partir dos lençóis freáticos superficiais.

Potencial de Uso dos Recursos Hídricos Subterrâneos

Os aquíferos granulares terciários (Formação Barreiras e/ou Rio Doce) apresentam uma produtividade bastante variável com vazões localmente elevadas (46m³/h) e capacidade específica de até 13m³.h/m. Poços perfurados pela Petrobrás, no município de Linhares, que atingiram a Formação Rio Doce forneceram vazões entre 50 e 82m³/h.

Os aquíferos granulares aluviais e flúvio-marinhos apresentam potencial local elevado com vazões de até 11m³/h e capacidade específica média de até 7,2m³/h/m.

Nos aquíferos fraturados a capacidade de produção é baixa com um valor médio de 7,5m³/h e capacidade específica média de 0,35m³/h/m. Ressalta-se a constatação de tendência de poços posicionados junto aos fraturamentos de direção NS e NW apresentarem maiores vazões.

Avaliação Hidroquímica

Os dados físico-químicos disponíveis não permitem a caracterização hidroquímica de forma mais precisa visto serem em número relativamente reduzido, muitas vezes incompletos e não apresentarem a abrangência satisfatória em termos de distribuição e de representatividade para os aquíferos existentes. Deste modo, será feita uma avaliação, de caráter preliminar, com base em 141 resultados analíticos, em grande parte efetuados pela CESAN – Companhia Espírito Santense de Saneamento e nos valores obtidos para os parâmetros determinados “in loco” (condutividade elétrica e pH) em pontos d'água com condições de amostragem (nascentes e poços ativos).

A condutividade elétrica mostra um espectro muito amplo de variação para todos os aquíferos, como atestado pelos valores bastante altos de desvio padrão (figura 6a). Os aquíferos fissurados são os que exibem média interna mais elevada (419μS/cm) sendo seguidos pelos aquíferos granulares quaternários (220,4μS/cm) e granulares terciários (146,6μS/cm). Os valores



mais elevados de condutividade elétrica ocorrem junto ao litoral e na área de domínio do aquífero fissurado (Figura 7). Valores elevados próximos à costa podem estar relacionados ao avanço de cunha salina ou à presença de camadas de sal gema nos sedimentos.

O pH pode ser usado como um parâmetro identificador do tipo de aquífero captado pois exhibe baixos desvios padrões e valores distintos de média e mediana para os sistemas aquíferos fissurados e granulares terciários (figura 6b). Poços que interceptam a Formação Barreiras mostram águas ácidas com valor médio de pH de 5,1, sendo freqüentes valores em torno de 4,0. Os poucos dados disponíveis para a Formação Rio Doce indicam a presença de águas levemente ácidas a básicas, com pH variando de 6,15 a 8,67. Os aquíferos fissurados apresentam águas ligeiramente ácidas a neutras com pH médio de 6,5, comparável ao valor obtido para o reduzido número de amostras relativas ao sistema aquífero granular quaternário. A análise do mapa de isovalores (Figura 8) permite verificar a correspondência quase perfeita das áreas de ocorrência dos sistemas aquíferos com os valores de pH.

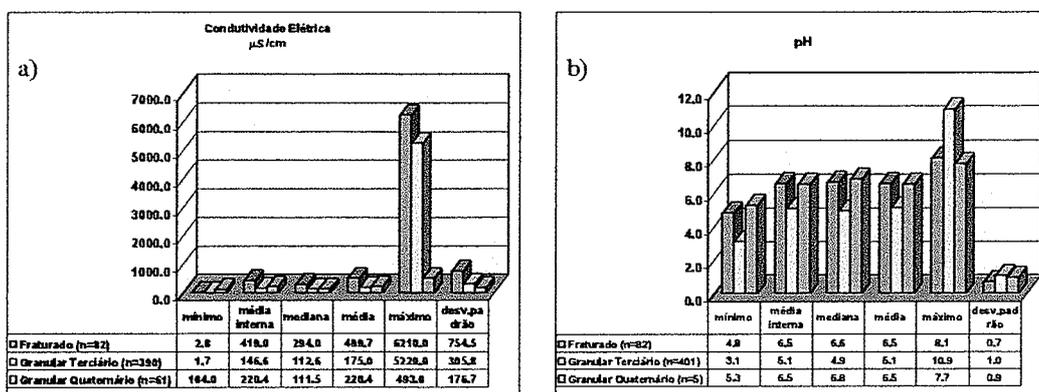


Figura 6: Valores estatísticos de parâmetros físico-químicos para os aquíferos. a) Condutividade Elétrica (µS/cm) e b) pH



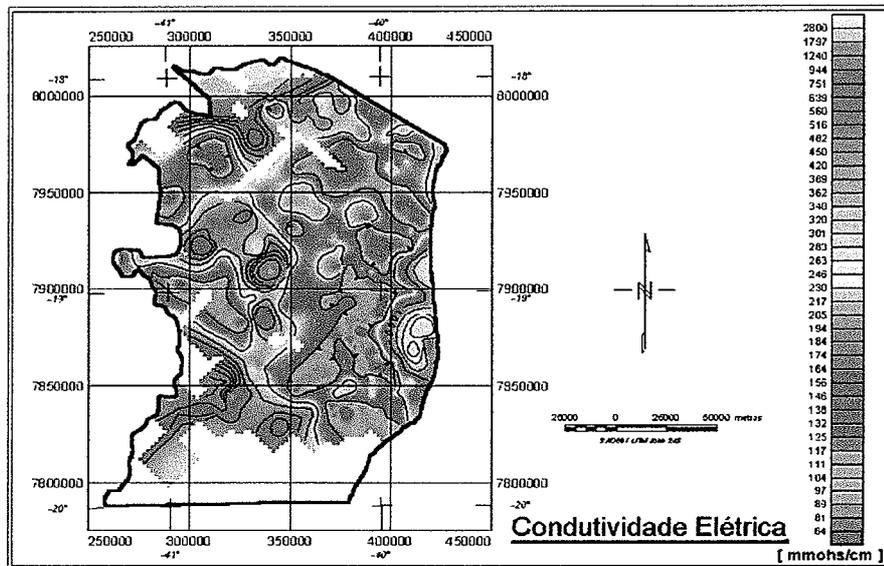


Figura 7: Mapa de isovalores de condutividade elétrica.

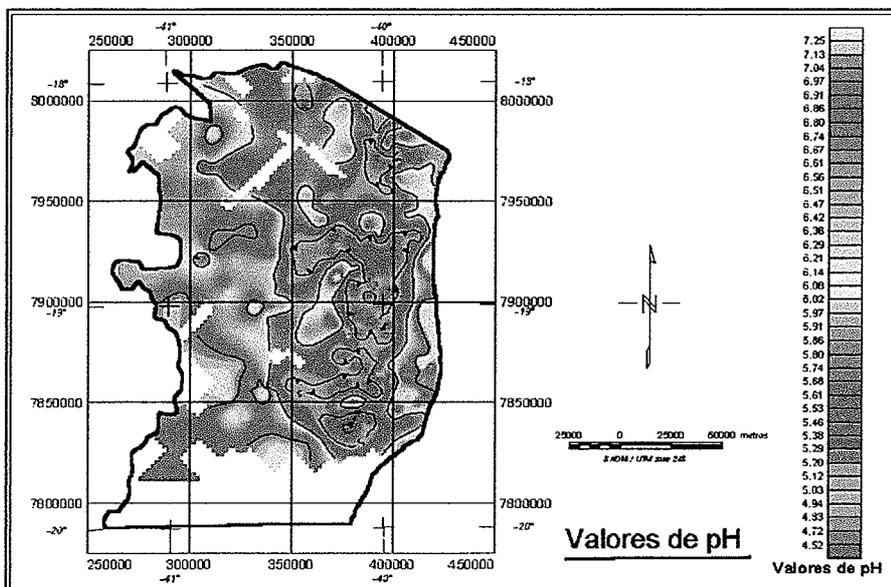


Figura 8: Mapa de isovalores de pH.

Uma das principais características químicas das águas subterrâneas na região é a ocorrência indistinta de ferro em teores elevados (acima de 1,0mg/L), bem acima do limite fixado pelo Ministério da Saúde para consumo humano. Visto a observância em todos os aquíferos de valores elevados de cor e turbidez (Figura 9) pode-se inferir que o ferro esteja presente tanto na forma solúvel quanto na insolúvel, como hidróxidos ou óxidos, associados aos colóides, à matéria orgânica e aos materiais em suspensão. A presença do manganês em altas concentrações (média de 1,9mg/L) é verificada com frequência nos aquíferos granulares e, em geral, acompanha os teores de ferro.



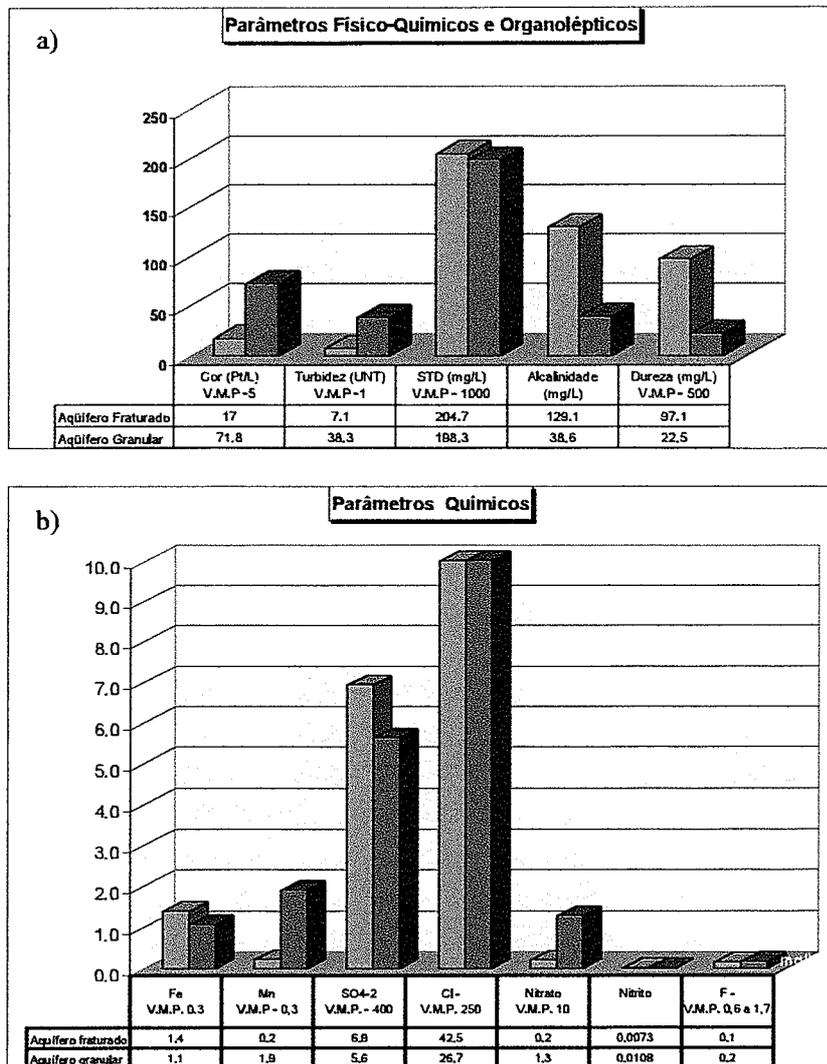


Figura 9: Valores médios para parâmetros físico-químicos e organolépticos (a) e químicos (b).

Dentre todas as análises físico-químicas, apenas onze relativas ao aquífero fissurado mostraram-se completas. A classificação dessas águas, utilizando-se do diagrama de Piper, indica uma grande variabilidade composicional, não havendo o predomínio de determinados ânions ou cátions. Cálcio, magnésio e sódio ocorrem em proporções aproximadamente igualitárias enquanto que bicarbonato e cloreto mostram maior amplitude de variação. Apenas águas sulfatadas não foram encontradas.

Vale mencionar que durante os trabalhos de campo foi detectada água gasosa em 7 poços tubulares sendo 5 no município de Linhares, 01 no município de Jaguaré e 01 no município de Pedro Canário, todos eles situados em área de ocorrência da Formação Barreiras



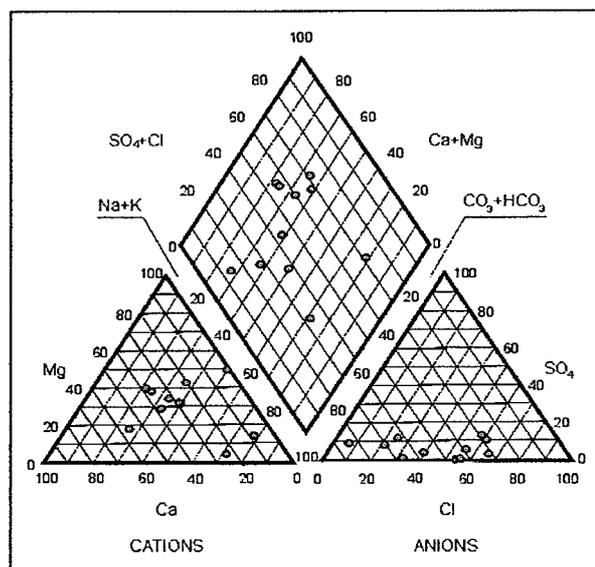


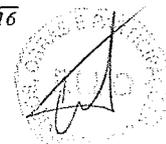
Figura 10: Diagrama de Piper para amostras de água do sistema aquífero fissurado.

DIAGNÓSTICO DE USO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NO NORTE DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO

O Uso da água subterrânea

O uso da água subterrânea no norte do Estado do Espírito Santo até a década de 80 era pouco expressivo em decorrência do quase desconhecimento a respeito do real potencial de exploração e da possibilidade de atendimento da demanda de consumo a partir dos recursos hídricos superficiais. Na década de 90, a expansão das atividades econômicas conduziu ao aumento, de forma não planejada e estruturada, do volume de água captado nos cursos d'água resultando na significativa redução das vazões. Em 1998, a ocorrência de evento de estiagem extremamente rigoroso levou ao comprometimento de muitos sistemas de abastecimento, especialmente em comunidades rurais. Nesta época, foram perfurados 125 poços tubulares pelo Programa de Ações Emergenciais de Combate aos Efeitos da Seca.

Os resultados obtidos nas perfurações permitiram estabelecer uma primeira avaliação e caracterização dos aquíferos e demonstrou haver, sob certas condições, potencial satisfatório de exploração para atendimento de pequenas a médias demandas. Motivados por esses resultados vários agricultores, pecuaristas e empresários ligados aos setores industriais e comerciais optaram pela utilização do recurso subterrâneo para complementação do consumo de água.



O incremento das perfurações no final da década de 90 foi de tal magnitude que dentre os 799 poços tubulares cadastrados, 57% foram perfurados no período de 1998 a março de 2001, podendo este valor ser ainda maior visto que para 28% dos poços não foi possível identificar a data de perfuração (Figura 11).

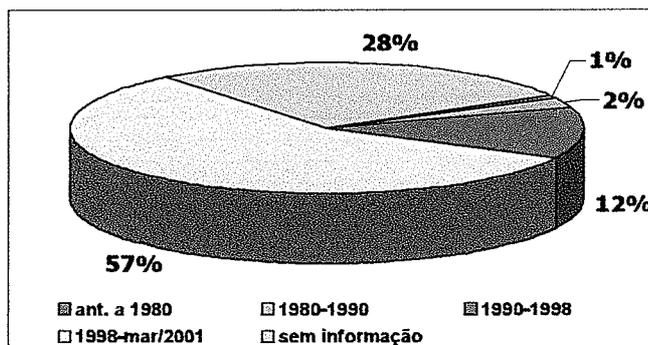


Figura 11. Data de perfuração dos 827 poços cadastrados.

Atualmente, a água subterrânea assume um papel significativo no abastecimento de comunidades e núcleos rurais e mesmo de áreas urbanas como é observado em Conceição da Barra, em Vila de Itaúnas (distrito de Conceição da Barra) e em Guriri (distrito de São Mateus), importantes pólos turísticos da região. Em várias sedes municipais é utilizada como parcela complementar ao sistema de abastecimento ou tida como uma reserva estratégica para situações de escassez ou de problemas nas estações de tratamento. Nos dois maiores centros urbanos, São Mateus e Linhares, a água subterrânea é amplamente utilizada nos mais diversos estabelecimentos comerciais e industriais.

O uso agrícola é importante na porção central e oriental da área onde se concentram as culturas de café, pimenta do reino, coco e em menor proporção, mamão. A grande maioria dos poços é utilizada somente nos períodos estivais, como fração auxiliar na irrigação, visto que as vazões são insuficientes para sustentação dessa atividade. Alguns poços são mantidos em produção durante o ano para o abastecimento das residências da propriedade ou para dessedentação animal.

O uso exclusivo para dessedentação animal não é comum, restringindo-se a algumas propriedades na porção ocidental e às avícolas localizadas nos municípios de São Mateus, Linhares e Jaguaré. A figura 12 apresenta as modalidades e proporções de uso da água subterrânea no norte do Espírito Santo.

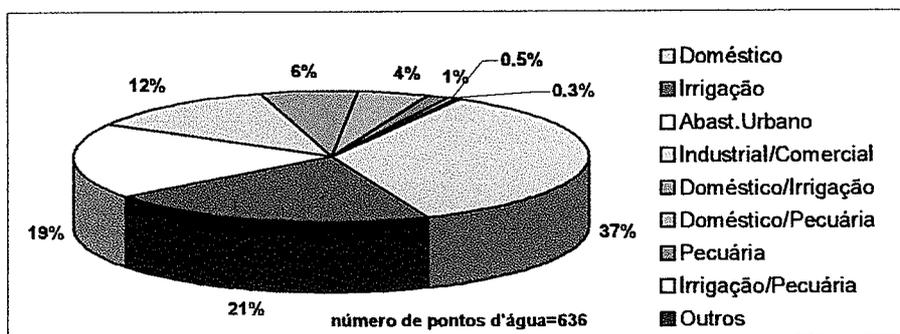


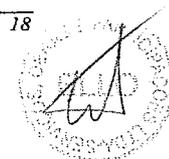
Figura 12. Uso atual dos poços tubulares.

Estado Atual dos Poços Tubulares e o Risco Potencial de Contaminação

Um aspecto a ser comentado é que o crescimento da participação da água subterrânea nos diversos setores, não foi acompanhado de mecanismos que assegurassem a utilização racional e a conservação qualitativa da água subterrânea. O resultado do avanço das perfurações, sem o rigor técnico necessário, foi demonstrado no cadastramento onde se verificou que 51% dos poços tubulares encontravam-se em risco potencial médio a alto de contaminação, com base somente na análise dos aspectos construtivos e de manutenção. Poços considerados como em risco potencial alto de contaminação (18% do total) referem-se aos destituídos de selo sanitário, de tampa e de cerca no perímetro de proteção, construídos com materiais inadequados e por vezes exibindo perfurações ou trincas no revestimento. Aqueles em risco potencial médio de contaminação (33% do total) exibem um ou dois problemas mencionados, mas a presença de alguns aspectos favoráveis os torna menos susceptíveis.

Poços de pequena profundidade, normalmente com no máximo 40 metros, revestidos com PVC hidráulico ou de irrigação e perfurados em quase toda a sua extensão, são de ocorrência generalizada na área de domínio dos aquíferos granulares. De modo geral, não possuem laje de proteção ou cimentação do espaço anelar no intervalo superior.

O emprego de técnicas de construção de poços pouco apropriadas visando a redução do custo conduzem, muitas vezes, ao abandono quando começam surgir problemas tais como bombeamento de areia, grande quantidade de material em suspensão na água e presença de contaminantes devido à entrada de águas superficiais de baixa qualidade. Poços mal construídos, ou inadequadamente abandonados podem ser um conduto para a entrada e propagação de compostos e elementos nocivos e a penetração destes em zonas aquíferas naturalmente protegidas da contaminação. A má construção revela-se na ausência de selo sanitário, na falta de cimentação do espaço anelar, na seleção inapropriada da abertura dos filtros ou da granulometria do pré-filtro e no desenvolvimento ineficiente. Adicionalmente, um poço abandonado pode ser um receptáculo de dejetos e resíduos perigosos.



A existência de grande número de poços com sérias deficiências construtivas potencializa a vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação decorrente de diversas atividades antrópicas. Sabe-se que os grandes centros urbanos ou áreas agrícolas importantes apresentam elevado potencial degradador da qualidade das águas subterrâneas.

Em zonas urbanas, os fatores que predisõem à introdução de elementos, compostos ou microorganismos nocivos no sistema aquífero referem-se, dentre outros, a: prática inadequada de disposição de resíduos, o lançamento de efluentes industriais no solo e nos cursos d'água, fora dos padrões regulamentados, a pequena abrangência do sistema de tratamento de esgoto ou falhas na rede coletora, a presença de fossas negras e ocorrência de vazamentos de tanques de combustíveis.

Dentre as atividades agrícolas que podem causar degradação da qualidade da água subterrânea a mais importante refere-se ao uso de fertilizantes e pesticidas. Os fertilizantes, constituídos de proporções variadas de fósforo, potássio e nitrogênio podem infiltrar-se para o aquífero e serem transportados junto com o fluxo subterrâneo. O nitrogênio, na forma de nitrato, representa o composto de maior preocupação por ser altamente tóxico e bem mais móvel que o fósforo em todas as suas diversas formas. Os pesticidas são formados por compostos orgânicos sintéticos, sendo muito persistentes e extremamente nocivos mesmo a baixas concentrações. Associado à prática agrícola há ainda o problema da degradação do solo por meio de alcalinização/salinização, devido à introdução sucessiva de água superficial, pela irrigação, em sistema aquífero de baixa permeabilidade e a conseqüente concentração dos sais dissolvidos na superfície do terreno em virtude da intensa evapotranspiração.

Pode-se deduzir pelo exposto que a proteção dos recursos hídricos subterrâneos requer a identificação de áreas e mecanismos através dos quais os poluentes podem entrar no sistema aquífero. Os terrenos agricultáveis localizados na porção central e nordeste da área, os centros urbanos mais expressivos e os pólos industriais, constituem áreas em que os aquíferos encontram-se mais propensos à contaminação, havendo portanto a necessidade de controle e fiscalização das atividades para que os impactos possam ser minimizados. Vale ressaltar que problemas de qualidade de água subterrânea são muitas vezes de difícil avaliação e detecção devido às heterogeneidades inerentes dos sistemas subterrâneos e muitas vezes só são diagnosticados quando um poço de suprimento de água para consumo humano é afetado.

A GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

A gestão dos recursos hídricos no Estado do Espírito Santo é de competência da Secretaria de Estado para Assuntos de Meio Ambiente – SEAMA por meio da Coordenação de Gestão Integrada de Recursos Hídricos – COGIRH. As ações implementadas seguem os princípios estabelecidos na



Lei Estadual nº 5818/1998 que instituiu a Política Estadual de Recursos Hídricos definindo as diretrizes e os instrumentos de gestão.

Destaca-se a criação do Programa Estadual de Gestão das Águas – PEGA constituído de oito ações gerenciais que visam a preservação, controle, ampliação e integração do conhecimento a respeito dos recursos hídricos, o incentivo e orientação da gestão participativa e descentralizada por meio da criação dos Comitês de Bacias e o próprio fortalecimento institucional e das articulações interinstitucionais.

O foco principal das ações tem sido os recursos hídricos superficiais em face dos sérios conflitos de uso já instalados no Estado. A questão dos recursos hídricos subterrâneos encontra-se em avaliação para que se possa definir os princípios e critérios para estabelecimento da outorga de direitos de uso, um dos principais instrumentos de gestão e que funcionará como importante mecanismo de controle da perfuração dos poços e da exploração dos mananciais subterrâneos. Ressalta-se que a administração, proteção e conservação, especificamente das águas subterrâneas, foram contempladas na lei estadual 6295/2000.

CONCLUSÃO

O uso da água subterrânea no Norte do Estado de Espírito Santo intensificou-se nos últimos anos em vista, principalmente, do aumento da demanda de consumo e da conseqüente redução das disponibilidades hídricas superficiais. A expansão das perfurações de poços tubulares tem-se processado de forma não controlada e o que é mais preocupante, com a utilização, muitas vezes, de técnicas totalmente inadequadas. Tal fato torna os aquíferos mais susceptíveis à contaminação uma vez que facilita a entrada e propagação de elementos e compostos nocivos a profundidades elevadas e em porções mais protegidas. O uso racional bem como a proteção e conservação qualitativa e quantitativa serão promovidas somente a partir do estabelecimento de um sistema eficiente de gestão integrada dos recursos hídricos. Recomenda-se que haja uma interação, na troca de informações, entre o órgão gestor de recursos hídricos e o órgão fiscalizador das obras de perfuração com vistas a coibir as práticas inadequadas na elaboração de projetos e na construção de poços tubulares.

Quanto à capacidade de produção por meio de poços tubulares, os estudos indicaram os aquíferos granulares, em especial aqueles relacionados à Formação Rio Doce, como os de maior potencial. No entanto, as vazões mostram variações em um amplo espectro, refletindo as heterogeneidades intrínsecas dos sedimentos. Este aspecto denota a necessidade, para a perfuração, de estudos detalhados, por vezes incluindo avaliação geofísica, de elaboração criteriosa do projeto construtivo e de execução das etapas de completação e desenvolvimento com bastante rigor técnico. Os aquíferos fissurados exibem, de modo geral, baixas vazões. Levantamento estrutural realizado



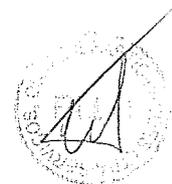
na área apontou a direção NS e de forma subordinada a direção NW de fraturamentos como as mais favoráveis ao armazenamento de água subterrânea. As vazões mais elevadas encontradas nos aquíferos fissurados tendem a associar-se a poços tubulares situados ao longo dessas estruturas.

Em relação aos aspectos hidroquímicos verificou-se que a condutividade elétrica é um parâmetro de grande amplitude de variação. Os maiores valores encontram-se próximo à costa, provavelmente relacionados à presença de sedimentos salinos ou ao avanço de cunha marinha, e no domínio dos aquíferos fissurados. Águas extraídas do aquífero relacionado à Formação Barreiras mostram pH ácido (média de 5,1) enquanto aquelas provenientes dos aquíferos fissurados são levemente ácidas a neutras (média de 6,5). Valores elevados de ferro, cor e turbidez são bastante frequentes e relacionam-se, em parte, a problemas construtivos e de manutenção dos poços.

A água subterrânea desempenha atualmente um importante papel no abastecimento de comunidades rurais e mesmo de zonas urbanas. O uso na irrigação é difundido, como fonte complementar de demanda, mas restringe-se ao período de estiagem. Os setores comerciais e industriais das grandes áreas urbanas (São Mateus e Linhares) utilizam-se, intensivamente, de poços tubulares. O uso para dessedentação animal ainda é pouco expressivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Costa, F.G. Projeto Hidrogeologia do Centro de Minas Gerais e Norte do Espírito Santo, folha Rio Doce – SO. 1980. Belo Horizonte, s.ed., (Relatório inédito DNPM/CPRM).
- Martin, L., Suguio, K., Dominguez, J.M.L., Flexor, J.M. 1997. *Geologia do Quaternário Costeiro do Litoral Norte do Rio de Janeiro e do Espírito Santo*. Belo Horizonte; CPRM/FAPESP, 1997. 112p. (inclui mapas 1:200.000).
- MMA – Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal/FUNARBE – UFV – Fundação Arthur Bernardes. Relatório Parcial, 15 – Estudos Hidrológicos Básicos In: *Plano Diretor de Recursos Hídricos das Bacias do Leste – Rios Mucuri, São Mateus, Itanhém (Alcobaça), Peruípe, Jucuruçu e Buranhém*. Viçosa; MMA/FUNARBE/UFV, 1998.v.1.
- Oliveira M.J.R. 2000. *Folha SE.24-Y-C-II e SE.24-Y-C-III (PARTE) Conselheiro Pena/ São Gabriel da Palha*. Belo Horizonte, COMIG/CPRM, 92p. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil-Projeto Leste)
- Silva J.M.R., Lima M.I.C., Veronese V.F., Ribeiro Júnior R.N., Rocha R.M., Siga Jr. 1987. *Folha SE.24 Rio Doce. Geologia*. Rio de Janeiro, IBGE, p. 23-172, (Série Levantamento de Recursos Naturais, v. 34)
- Tuller M.P. (Org.). 1993. *Folha SE.24-Y-C-VI Colatina*. Brasília, DNPM/CPRM, 163 p. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil)
- Vieira V.S. (Org.). 1993. *Folha SE.24-Y-C-V Baixo Guandu*. Brasília, DNPM/CPRM, 173p. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil)



doc. 06 – Estudo da Universidade Federal do Espírito Santo.



CONSÓRCIO NORTE CAPIXABA

ello

COPASA

enops
engenharia

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
COLEGIADO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

JULIA ALVES FRAGA DE ARAUJO

**AVALIAÇÃO DE VOLUMES DE REGULARIZAÇÃO PARA CURSOS
D'ÁGUA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO MATEUS**

VITÓRIA
2014



JULIA ALVES FRAGA DE ARAUJO

**AVALIAÇÃO DE VOLUMES DE REGULARIZAÇÃO PARA CURSOS
D'ÁGUA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO MATEUS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Universidade Federal do
Espírito Santo, como requisito parcial
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Ambiental.
Orientador: José Antônio Tosta dos
Reis

VITÓRIA
2014



AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, José Antônio Tosta dos Reis, pelo extremo profissionalismo, paciência, dedicação e disponibilidade para atender qualquer dúvida que surgiu ao longo do período de estudo.

Aos meus pais, pelo apoio e incentivo aos estudos. Aos meus familiares, que nunca duvidaram no meu potencial.

Aos meus amigos, que sempre me acompanharam e se fizeram presentes nas minhas realizações.

Aos meus amigos da UFES, que tornaram o ambiente de estudo mais agradável durante todos os anos juntos e me ajudaram profundamente nos momentos mais difíceis desse caminho.

A Universidade Federal do Espírito Santo, por ser a base do meu conhecimento acadêmico. Pela oportunidade de conviver com professores e alunos e funcionários extremamente competentes.

A University of Nebraska-Lincoln e todas as pessoas incríveis que conheci durante o período de intercâmbio. Ao Biological Systems Engineering Department, pelo aprendizado e oportunidade de estágio.

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram na realização desse trabalho.



RESUMO

A inadequada gestão dos recursos hídricos e as diferentes características físicas, climáticas e ambientais das diversas regiões do país, podem agravar problemas relacionados com a escassez de água, mesmo em um país que apresenta enorme disponibilidade hídrica como o Brasil. Para garantia de atendimento das demandas a construção de reservatórios de regularização tem constituído prática comum no País. O presente trabalho apropriou volumes de reservação a partir de dois diferentes métodos empíricos - método da Simulação e método baseado nas Diferenças em relação a sequência de deflúvios mínimos - em cinco seções fluviométricas localizadas na bacia hidrográfica do rio São Mateus. Adicionalmente, foram considerados os registros da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande para avaliação dos efeitos sobre o dimensionamento do reservatório da incorporação da precipitação e da evaporação. Na sequência, a partir dos registros da estação fluviométrica Barra do Rio Preto, foi avaliada a influência do tamanho da série histórica de vazões sobre o volume do reservatório. Os resultados indicaram que método da Simulação gerou menores volumes de reservação que o método baseado nas diferenças em relação a sequências de deflúvios mínimos. A incorporação da precipitação e evaporação produziu, para a área de estudo, aumento discreto do volume de reservação. O tamanho da série histórica pode produzir variações significativas no volume de reservação; nesse contexto, a utilização de séries históricas mais extensas tende a gerar volumes de reservação mais consistentes.



SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	OBJETIVOS	13
2.1.	Objetivo geral	13
2.2.	Objetivos específicos.....	13
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1.	Recursos hídricos e escassez hídrica	14
3.2.	Regularização de vazões em corpos d'água	15
3.3.	Exemplos de aplicações de métodos de regularização de vazões em corpos d'água.....	18
3.4.	Métodos empíricos de dimensionamento de reservatórios	20
3.4.1.	MÉTODO DA SIMULAÇÃO.....	21
3.4.2.	MÉTODO BASEADO NAS DIFERENÇAS EM RELAÇÃO A SEQUÊNCIAS DE DEFLÚVIOS MÍNIMOS	22
4.	ÁREA DE ESTUDO	24
5.	METODOLOGIA.....	26
5.1.	Dados hidrológicos	26
5.2.	<i>Software SisCAH</i>	31
5.3.	Dados fisiográficos	32
5.4.	Métodos empregados para apropriação dos volumes de reservação	34
5.5.	Cenários de simulação de demandas	35
5.6.	Avaliação da influência do tamanho das séries históricas.....	36
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
6.1.	Vazões médias de longo período e curvas de permanência	37
6.2.	Volumes de reservação	39



6.2.1. Volumes estimados pelos métodos da sequências de deflúvios mínimos e da simulação sem incorporação de precipitação e evaporação	39
6.2.2. Volumes estimados pelo método da simulação com incorporação de precipitação e evaporação	42
6.3. Avaliação da influência do tamanho da série histórica	49
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	54
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
ANEXO A – REGISTROS FLUVIOMÉTRICOS.....	61
ANEXO B – REGISTROS PLUVIOMÉTRICOS	66
ANEXO C – REGISTROS EVAPORIMÉTRICOS	71



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bacia hidrográfica do Rio São Mateus	25
Figura 2 - Localização das estações fluviométricas selecionadas.....	27
Figura 3 - Localização geográfica das estações pluviométricas selecionadas	29
Figura 4 - Localização geográfica da estação meteorológica selecionadas	30
Figura 5 - Cartas MDE utilizadas no estudo	33
Figura 6 - Curva de permanência da estação fluviométrica Fidelândia – Montante	38
Figura 7 - Curva de permanência da estação fluviométrica Ataléia.....	38
Figura 8 - Curva de permanência da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande	38
Figura 9 - Curva de permanência da estação fluviométrica Barra do Rio Preto	39
Figura 10 - Curva de permanência da estação fluviométrica Barra de São Francisco.....	39
Figura 11 - Área inundada (cota 40) da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande	42
Figura 12 - Área inundada (cota 45) da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande	43
Figura 13 - Área inundada (cota 50) da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande	43
Figura 14 - Área inundada (cota 55) da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande	44
Figura 15 - Área inundada (cota 60) da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande	44
Figura 16 - Área inundada (cota 65) da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande	45



Figura 17 - Área inundada (cota 70) da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande	45
Figura 18 - Área inundada (cota 75) da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande	46
Figura 19 - Área inundada (cota 80) da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande	46
Figura 20 - Área inundada (cota 85) da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande	47
Figura 21 - Linha de tendência que correlaciona área e volume de inundação para a estação fluviométrica de São João da Cachoeira Grande	48
Figura 22 – (i) Volumes acumulados x demandas acumuladas para a série histórica da estação fluviométrica Barra do Rio Preto no intervalo de 2001 a 2005	51
Figura 23 - (ii) Volumes acumulados x demandas acumuladas para a série histórica da estação fluviométrica Barra do Rio Preto no intervalo de 1991 a 2005	52
Figura 24 - (iii) Volumes acumulados x demandas acumuladas para a série histórica da estação fluviométrica Barra do Rio Preto no intervalo de 1996 a 2005	52



LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características das estações fluviométricas selecionadas	27
Tabela 2 -Características das Estações Pluviométricas selecionadas	28
Tabela 3 – Estações hidrológicas e período comum de dados históricos.....	31
Tabela 4 - Vazões médias de longo período para as estações fluviométricas selecionadas	37
Tabela 5 - Valores da vazão Q_{90} para as estações fluviométricas selecionadas	37
Tabela 6 - Volumes de reservação (em Hm3) estimados para a estação fluviométrica Fidelândia – Montante.....	40
Tabela 7 - Volumes de reservação (em Hm3) estimados para a estação fluviométrica Ataléia	40
Tabela 8 - Volumes de reservação (em Hm3) estimados para a estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande.....	40
Tabela 9 - Volumes de reservação (em Hm3) estimados para a estação fluviométrica Barra do Rio Preto.....	40
Tabela 10 - Volumes de reservação (em Hm3) estimados para a estação fluviométrica Barra de São Francisco.....	41
Tabela 11- Características da estação fluviométrica de São João da Cachoeira Grande	48
Tabela 12 - Volumes de reservação (em Hm3) estimados para a estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande.....	49
Tabela 13 - Volumes de reservação simulados de acordo com o intervalo proposto para a série histórica de vazões	50



LISTA DE ABREVIÇÕES

ANA	Agência Nacional de Águas
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MDE	Modelo Digital de Elevação
SisCAH	Sistema Computacional para Análise Hidrológica
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i>



1. INTRODUÇÃO

O entendimento do processo de armazenamento de águas é fundamental para a gestão de recursos hídricos. Segundo Cavalcante Filho (2007) estudos climatológicos demonstram que o maior problema na gestão dos recursos hídricos está na má distribuição das chuvas, assim como no inadequado aproveitamento do escoamento superficial dos corpos d'água.

Historicamente, a implantação de reservatórios de regularização tem sido o principal instrumento na busca da sustentabilidade hídrica nas regiões onde os recursos hídricos são limitados ou apresentam uma distribuição temporal desfavorável. De acordo com Studart (2006), uma das principais funções da regularização de cursos d'água é a de fornecer uma vazão constante, ou não muito variável no tempo.

A construção de reservatórios de regularização pode ser necessária para atingir diferentes objetivos, dentre eles o atendimento às necessidades de abastecimento urbano ou rural, a geração de energia, o combate às inundações ou para o controle de estiagem, a recreação, a navegação, etc. (BARBOSA JR., 2012).

De acordo com Campos (1996), o dimensionamento de um reservatório é um processo de decisão, que envolve conhecimentos das condições ambientais, econômicas, sociais, etc. Portanto, é importante destacar que, como o custo do reservatório é um dos itens mais altos em relação ao custo total de um projeto de regularização de um curso d'água, o dimensionamento inadequado pode inviabilizar economicamente o projeto (FONTANELA, 2010).

Diferentes métodos podem ser empregados para a determinação dos volumes de reservatórios, dentre os quais merecem destaque o Método de Rippl, Método da Simulação, e Método Baseado nas Diferenças em Relação a Sequências de Deflúvios Mínimos, dentre outros. Estes métodos, sumariamente apresentados e discutidos por Dornelles, Tassi e Goldenfum (2010) e Tucci (2004), ainda que trabalhem sobre uma mesma base de registros hidrológicos ou fisiográficos, podem produzir valores discrepantes entre si. Assim, a determinação da vazão regularizada por reservatórios tem



sido objeto de vários estudos e busca avaliar qual o método mais apropriado para determinação dos volumes reservados (SCARE, 2003).

Este trabalho tem por objetivo avaliar, a partir de diferentes métodos, volumes de regularização para cursos d'água da bacia hidrográfica do rio São Mateus, importante sistema hídrico da porção norte do estado do Espírito Santo.



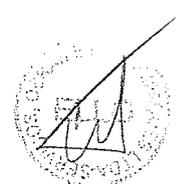
2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar, a partir de diferentes métodos, volumes de reservação em cursos d'água da bacia hidrográfica do rio São Mateus.

2.2. Objetivos específicos

- Apropriar volumes de reservação a partir dos métodos da Simulação e das Diferenças em Relação a Sequências de Deflúvios Mínimos;
- Confrontar os resultados associados aos diferentes métodos de estimativa de volumes de regularização;
- Avaliar a influência do tamanho das séries históricas e da incorporação do processo de evaporação sobre os volumes de reservação estimados.



3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Recursos hídricos e escassez hídrica

Em termos mundiais, o Brasil se encontra em situação privilegiada quanto à disponibilidade de água, principalmente de água doce. O Brasil é o país com maior disponibilidade hídrica renovável per capita do planeta (LANNA, 2001). Porém, como a distribuição interna é desigual, diversas regiões apresentam problemas de escassez hídrica. Mesmo dentro de um estado existem bacias com graus de escassez diferentes, que podem ser agravados pela maior aglomeração populacional e atividade econômica da região (SCARE, 2003). Além da escassez quantitativa, Camara (2003) destaca que a disponibilidade hídrica do país tem sido também comprometida pela perda de sua qualidade.

A percepção da escassez faz com que a água passe a ser considerada um recurso natural com valor econômico, estratégico e social. Assim, existe a necessidade do planejamento dos recursos hídricos, que visam ao atendimento das demandas, analisando as disponibilidades desses recursos e a sua alocação entre usos múltiplos, de forma a obter os máximos benefícios econômicos e sociais, com a mínima degradação ambiental (SETTI *et al.*, 2001).

De acordo com Camara (2003), o crescimento da variedade de usos múltiplos de água na sociedade moderna contribui para o aumento de conflitos, que são somente solucionados com o estabelecimento de regras operacionais complexas no âmbito da gestão de recursos hídricos.

Ainda, de acordo com Camara (2003), algumas intervenções estruturais ou não-estruturais podem ser empregadas para a gestão dos recursos hídricos. As intervenções estruturais modificam o regime hidrológico no espaço e no tempo, como por exemplo, a construção de barragens. Já as intervenções não-estruturais estão relacionadas a instrumentos de gestão, como a outorga e a cobrança do uso da água.

Moreira (2001) destaca que o investimento em intervenções estruturais com o objetivo de aumentar a disponibilidade de água foi a primeira alternativa de



gestão das águas no país. Entretanto, essas soluções criaram outros problemas como os grandes desperdícios devido ao aumento da oferta sem estímulo ao uso racional da água.

A partir da década de 90, surge a necessidade de implementar medidas mais eficientes para o uso racional dos recursos hídricos. Práticas como manejo, gerenciamento e monitoramento ambiental se tornaram destaque nesse novo modo de gestão (MOREIRA, 2001).

No Brasil existem diferentes critérios para a adoção de vazões de referência para a outorga de água. De acordo com Silva *et al.* (2006), a variabilidade desses critérios está relacionada com as características individuais de cada bacia hidrográfica e é um procedimento adequado para proteção dos rios, uma vez que as alocações de água são geralmente estabelecidas a partir de uma vazão de base de pequeno risco. Vergara *et al.* (2013) ressaltam que, no Brasil, adota-se como referência a vazão mínima, procedimento que busca diminuir os possíveis riscos de escassez por usos desordenados. No entanto, os limites estabelecidos pelos critérios de outorga são usualmente dilatados quando da construção de reservatórios de regularização ao longo dos cursos d'água.

3.2. Regularização de vazões em corpos d'água

Como as vazões de cursos d'água são aleatórias, muitas são as situações em que a disponibilidade hídrica natural pode não ser suficiente para suprir as demandas em determinados períodos de tempo. De acordo com Nunes (2013), o uso de práticas de regularização é uma das medidas mais eficazes para promover o desenvolvimento sustentável e permitir a melhor utilização dos recursos hídricos superficiais.

Assim, em situações em que a vazão demandada é superior à disponibilidade, faz-se necessária a reservação das águas de épocas de excesso para suprir a carência de água nos períodos de estiagem. A vazão garantida para atendimento da demanda é usualmente denominada vazão regularizada (WENDLAND, 2001).



De acordo com Barbosa Jr. (2012), a regularização das vazões naturais envolve, invariavelmente, o represamento das águas através da construção de reservatórios, geralmente formados por barragens implantadas nos cursos d'água. Os reservatórios são comumente usados quando existir a necessidade de redistribuição da água no espaço e no tempo e tem como objetivo aumentar a vazão disponível para aumentar a garantia de abastecimento de água (NUNES, 2013).

Para Silva *et al.* (2013) e Barbosa Jr. (2012), a principal característica dos reservatórios é o multiuso. O armazenamento criado com a construção de barragens pode ser usado para controle de enchentes e de períodos de escassez, conservação da água, aumento de vazão, geração de energia elétrica, navegação e recreação. Nesse contexto, segundo os referidos autores, as variáveis de decisão, funções, objetivos e restrições variam de acordo com diferentes tipos de problemas associados à reservação.

A implantação de reservatórios de regularização modifica a permanência das vazões nos rios e altera a garantia do suprimento de água a jusante do mesmo. Como as vazões a montante e a jusante do reservatório são alteradas, existe a necessidade de se analisar comportamentos diferentes quanto à garantia de abastecimento com usos múltiplos. Segundo Asfora e Cirilo (2005), ocorre um aumento do valor da vazão mínima disponível a jusante e este valor tende a se aproximar do valor da vazão média.

O conceito de confiabilidade do reservatório é, provavelmente, um dos aspectos mais importantes envolvidos na tomada de decisões significativas sobre as políticas de recursos hídricos (SILVA *et al.*, 2013). Em nível de planejamento, geralmente utilizam garantias de fornecimento da vazão regularizada de 100 a 80%. Por exemplo, a garantia de 100% indica que em qualquer intervalo de tempo a vazão regularizada correspondente poderá ser obtida a partir do reservatório, independente da severidade da estiagem (LEÃO; FERNANDES; GALVÍNCIO, 2011). Segundo Reis (2002), a quantidade outorgável deveria ter uma disponibilidade de referência associada a uma confiabilidade, a fim de não se criar um cenário de aparente controle ao tomador de decisão, uma vez que a garantia associada à oferta pode ser uma



condição suficiente para o processo de outorga, mas não suficiente para o bom desempenho do sistema.

A ocorrência das vazões em corpos d'água é dependente de muitos fatores, como precipitação, evaporação, infiltração, vazamentos, dentre outros. Adicionalmente, a demanda também pode ser variável. Assim, não é possível prever com precisão o tamanho do reservatório de água necessário para suprir as demandas nos períodos de escassez. Ainda, de acordo com Amorim e Pereira (2008), o período de coleta dos dados históricos também é extremamente importante para a precisão no dimensionamento, uma vez que quanto mais longo o período analisado, mais eficiente será o dimensionamento.

De acordo com Tucci (2004), a apropriação dos volumes de reservação pode gerar duas situações ineficientes: o superdimensionamento das reservas, elevando o custo de projeto, ou o subdimensionamento das reservas, necessitando racionamento de água durante o período seco. O dimensionamento ótimo do reservatório seria aquele encontrado entre as duas situações críticas citadas. Segundo Amorim e Pereira (2008), o cálculo é realizado na tentativa de atender toda a demanda pelo maior período possível e com o menor custo de implantação.

Os métodos de dimensionamento de reservatórios de regularização, estudados por Cavalcante Filho (2007) e Nunes (2013), podem ser classificados em empíricos, analíticos e experimentais.

Os métodos empíricos utilizam o conceito de período crítico da série histórica, que pode ser descrito como aquele em que o reservatório passa da condição de cheio para vazio pela primeira vez. Como exemplo de método empírico encontra-se o método de Rippl, que pode ser considerado o primeiro grande marco no dimensionamento de reservatórios para controle de estiagem (NUNES, 2013).

O método de Rippl ou Diagrama de Massas é um procedimento gráfico em que são utilizados os volumes acumulados ao longo de um ano hidrológico. A partir do gráfico de volumes acumulados é possível a determinação da vazão num tempo qualquer, uma vez que as vazões constituem as tangentes do referido gráfico (BARBOSA JR., 2012). Segundo Cavalcante Filho (2007), o método



apresenta algumas limitações como, por exemplo, a não incorporação da evaporação. Apesar disso, o método de Rippl garante bons resultados de dimensionamento em regiões em que o regime chuvoso é bem determinado e a evaporação é relativamente pequena.

Os métodos analíticos de dimensionamento de reservatórios assumem que as vazões seguem leis de probabilidade, que podem ser as distribuições log-normal ou gama, os modelos auto-regressivos, dentre outros. A partir dessas leis, estimam-se o desempenho do reservatório através de cálculos analíticos. Como limitação, apresentam a impossibilidade de manipulação de regras de operação complexas (CAVALCANTE FILHO, 2007; NUNES, 2013).

Por fim, de acordo com Cavalcante Filho (2007) e Nunes (2013), os métodos experimentais assumem que as vazões seguem certa lei de probabilidade, permitindo a geração de séries sintéticas de vazões e a execução da operação simulada do reservatório. Uma grande vantagem dessa classe de métodos de dimensionamento de reservatório é a versatilidade da técnica de simulação. No entanto, o esforço computacional requerido para o funcionamento dos métodos experimentais é considerado a principal limitação de seu uso.

De acordo com Cavalcante Filho (2007), Nunes (2013) e Margon (2013), o método de Monte Carlo – um dos métodos experimentais recorrentemente empregados para o dimensionamento de reservatórios - baseia-se na execução de um número elevado de simulações, cujo valor varia de acordo com a complexidade do modelo. A simulação estocástica oferece meios para a geração de inúmeras sequências sintéticas, que são independentes da série histórica, mas que apresentam as mesmas propriedades estatísticas. A análise do desempenho do reservatório permite ao planejador tomar uma decisão baseada na análise probabilística do fenômeno estudado.

3.3. Exemplos de aplicações de métodos de regularização de vazões em corpos d'água

Pedrosa (2009) utilizou o Método do Diagrama Triangular para propor a ampliação da Barragem de Limeira II, localizada próxima à divisa entre os



Estados de Alagoas e Pernambuco. Por ocasião do estudo, a Barragem de Limeira II atendia exclusivamente ao Sistema Adutor de Estrela de Alagoas e Minador do Negrão; no entanto, sua capacidade de armazenamento não era suficiente para o abastecimento de água bruta para épocas de longa estiagem. Segundo Pedrosa (2009), o método do Diagrama Triangular foi escolhido devido à sua simplicidade e por apresentar vantagens como a rápida análise de erros nos parâmetros estatísticos, bem como o fornecimento simultâneo de uma avaliação dos volumes regularizados e das perdas médias por evaporação e sangria. Com os resultados obtidos no dimensionamento hidrológico foi possível concluir que uma ampliação na cota da barragem de 2.2 m aumentaria a oferta hídrica o suficiente para atender os objetivos propostos.

Mannich, Kaviski e Mine (2011) utilizaram três técnicas de determinação de curvas de regularização para a estação fluviométrica Porto Amazonas, localizada no Rio Iguaçu, Paraná. A regularização foi avaliada: (i) através da série histórica, utilizando o método de Rippl, (ii) via simulação com séries sintéticas, utilizando o método de Monte Carlo, e (iii) por meio de uma abordagem teórica desenvolvida por Gomide (1986). Mannich, Kaviski e Mine (2011) expuseram algumas limitações dos métodos estudados. De forma geral, para os métodos que utilizam dados históricos, existe a deficiência de não se considerar as incertezas das vazões e, conseqüentemente, os resultados encontrados só seriam válidos se as mesmas vazões ocorressem no futuro. Como alternativa, aplicam-se métodos experimentais, como o de Monte Carlo, em que várias séries sintéticas são geradas a fim de atrelar probabilidades de falha no volume de reservação ao longo de um determinado intervalo de tempo. O objetivo do trabalho de Mannich, Kaviski e Mine (2011) era comparar os resultados obtidos pelo método proposto por Gomide com os demais métodos propostos. O método estabelecido por Gomide foi escolhido por apresentar simplicidade na determinação do volume do reservatório de regularização de baixos níveis fluviométricos. Os resultados mostraram-se muito similares àqueles obtidos através dos métodos de Monte Carlo e Rippl.

Silva *et al.* (2013) criaram um programa computacional para calcular o volume útil de armazenamento de reservatórios utilizando o método Picos Sequenciais, que utiliza extensas séries hidrológicas. O programa proposto por Silva *et al.*



(2013) foi aplicado a uma série histórica de vazões médias mensais referentes a um período de 30 anos de monitoramento fluviométrico do Rio Corrente, curso d'água localizado na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. De acordo com os referidos autores, o trabalho realizado não teve como objetivo o planejamento e construção de um reservatório de regularização, uma vez que os dados de vazão do Rio Corrente foram utilizados apenas para a verificação e aplicação do programa computacional que foi desenvolvido. Silva *et al.* (2013) concluíram que o programa computacional apresentou-se como uma importante ferramenta para a tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos.

Nunes (2013) utilizou duas estações fluviométricas pertencentes à bacia do Rio Entre Ribeiros e seis estações fluviométricas situadas na bacia do Rio Preto para avaliação de volumes de regularização. Foram apropriados dados históricos mensais de 1968 a 2005 para todas as estações estudadas. Nunes (2013) estabeleceu um coeficiente de regularização que indica a proporção entre a vazão regularizada e a vazão média no período considerado. O volume de reservação foi obtido através do método das Diferenças acumuladas, por meio do qual é possível estimar a menor capacidade útil de um reservatório que atenda ao período de estiagem mais crítico do intervalo de tempo analisado. A autora apresentou uma modificação no método a fim de associar um fator de frequência (período de retorno) ao dimensionamento do reservatório. Para alcançar a independência do ano de início da série histórica disponível foi proposta a criação de séries sintéticas. Nunes (2013) concluiu que para valores de coeficiente de regularização maiores ou iguais a 0.75 a criação de séries sintéticas foi eficiente para simular o volume do reservatório com períodos de retorno maiores ou iguais ao número de anos das séries históricas usadas.

3.4. Métodos empíricos de dimensionamento de reservatórios

Dentre os diferentes métodos empíricos de dimensionamento de reservatórios, o método da Simulação e o método baseado nas Diferenças em relação à sequência de deflúvios mínimos serão descritos nas seções subsequentes.



Esses métodos serão aplicados no presente trabalho, para o dimensionamento de reservatórios, conforme procedimentos descritos no capítulo reservado para Metodologia.

3.4.1. MÉTODO DA SIMULAÇÃO

No método da Simulação é realizado um balanço de massa pela contabilização de entradas e saídas do reservatório. Desta forma, aplica-se a equação da continuidade a um reservatório finito, em um determinado dia ou mês, conforme explicam detalhadamente Tucci (2004) e Fontanela (2010). Para a aplicação do método, o balanço de massa é estabelecido conforme equação (01).

$$S_{(t+1)} = S_{(t)} + q_{(t)} - D_{(t)} - E_{(t)} + P_{(t)} \quad (01)$$

Na equação (01) $S_{(t)}$ representa o armazenamento no início do intervalo de tempo t , $q_{(t)}$ o deflúvio afluente durante o intervalo t , $D_{(t)}$ a descarga operada visando ao suprimento da demanda durante o intervalo de tempo t , $E_{(t)}$ a evaporação do reservatório durante o intervalo de tempo t e $P_{(t)}$ a chuva sobre o reservatório durante o intervalo de tempo t .

Segundo Tucci (2004), a evaporação e a precipitação são dependentes da área do espelho líquido, calculada em função do volume armazenado no reservatório. Outras perdas são comparativamente pequenas e são usualmente negligenciadas (MCMAHON; MEIN, 1978).

Duas hipóteses são consideradas para aplicação do método da Simulação: **a)** o reservatório estará cheio no início da contagem do tempo e **b)** os dados históricos são representativos para as condições futuras. Assim, o volume do reservatório é definido como o maior déficit obtido quando do balanço de massa para o local onde o reservatório será construído.

É importante destacar que o método da Simulação é usado para dimensionar o armazenamento útil do reservatório e não o seu armazenamento real. Assim, é necessário acrescentar o chamado volume morto do reservatório, associado às exigências dos equipamentos de captação de água e para acomodar sedimentos.



A principal vantagem do método da Simulação, detalhadamente apresentado e discutido por Tucci (2004), é a flexibilidade de poder incorporar demandas temporalmente variáveis. Outra vantagem explicitada por McMahon e Mein (1978) é a simplicidade do procedimento que mostra claramente o comportamento da água armazenada.

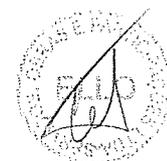
Uma limitação do método da Simulação é que a determinação do volume de reservação é baseada em séries históricas e a sequência de vazões analisadas pode não ser representativa. Além disso, séries não contínuas podem ser de difícil manipulação devido a dificuldades de atribuir a condição de reservatório inicial depois de uma falha na série histórica de vazões (MCMAHON; MEIN, 1978).

3.4.2. MÉTODO BASEADO NAS DIFERENÇAS EM RELAÇÃO A SEQUÊNCIAS DE DEFLÚVIOS MÍNIMOS

Supondo-se que o reservatório esteja cheio no início do seu funcionamento, no instante mais crítico de operação do reservatório toda a sua capacidade de armazenamento terá sido utilizada. Desta forma, computando-se as diferenças entre os volumes totais a serem supridos e os deflúvios totais em cada período crítico alternativo seriam obtidas as capacidades de armazenamento útil necessárias, sempre se aceitando a suposição que o reservatório esteja cheio quando do início da sua operação (TUCCI, 2004). O maior valor de capacidade útil definirá aquela necessária para suprir a demanda durante toda a sequência de vazões.

Segundo Tucci (2004), este método tem a vantagem de automatizar o cálculo das capacidades sem necessidade de iterações, como no método de Simulação. Nesse método não é considerada a evaporação, mas pode-se considerar um valor mensal constante aproximado de evaporação que será subtraído dos deflúvios.

Outra vantagem do método baseado nas Diferenças em relação a sequências de deflúvios mínimos é que existe a possibilidade de considerar o risco de não atendimento à demanda, ou seja, é possível atrelar probabilidades ao método.



De acordo com Tucci (2004), o método baseia-se nos dados mais severos dentro do período selecionado, mas pode-se também identificar outros períodos sucessivamente mais críticos e, assim, utilizando-se ferramentas estatísticas, calcula-se o risco de não atendimento à demanda local.



4. ÁREA DE ESTUDO

A bacia do Rio São Mateus apresenta uma superfície de aproximadamente 13482 km², sendo 7710 km² no estado do Espírito Santo e 5772 km² no estado de Minas Gerais. Suas nascentes, localizadas em Minas Gerais, conformam dois braços: o rio Cotaxé, com 244 km de extensão e o rio Cricaré, com 188 km. A união desses dois rios dentro da cidade de São Mateus é o que justifica o nome da bacia. A bacia abrange 23 municípios, sendo 11 no Espírito Santo e 12 em Minas Gerais (FIGUEIREDO *et al.*, 2008).

A principal causa da degradação dessa bacia é o desmatamento indiscriminado. Além disso, verifica-se a construção de estradas mal projetadas e não conservadas e a ausência quase absoluta de práticas conservacionistas na implantação e manutenção das áreas de cultivo (FIGUEIREDO *et al.*, 2008), aspectos que recorrentemente comprometem a adequada disponibilidade de água em diferentes pontos da bacia.

A região da bacia hidrográfica do Rio São Mateus tem, basicamente, dois tipos climáticos: o tropical úmido (chuvoso), nas proximidades do litoral, e o tropical sub-úmido, com estação seca no inverno, nas cabeceiras. O índice pluviométrico anual médio, por sua vez, varia de 1300 mm, na faixa litorânea, a 800 m, perto das nascentes (ANA, 2014).

A Bacia Hidrográfica do Rio São Mateus está representada graficamente na Figura 1.



5. METODOLOGIA

O trabalho proposto avaliou a aplicação de dois diferentes métodos empíricos de dimensionamento de reservatórios: o método da simulação e o método baseado nas diferenças em relação a sequência de deflúvios mínimos.

A descrição dos dados hidrológicos e fisiográficos, a apresentação dos cenários de simulação avaliados e os softwares empregados quando da aplicação dos referidos métodos de dimensionamento dos reservatórios conformam o escopo das seções subsequentes.

5.1. Dados hidrológicos

Os dados pluviométricos e fluviométricos empregados no presente estudo foram obtidos a partir do Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas (ANA). Os dados evaporimétricos foram apropriados a partir do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Para a condução do estudo, foram escolhidas cinco estações fluviométricas em operação na bacia hidrográfica do rio São Mateus. A extensão da série histórica e a disponibilidade de dados consistidos de vazão constituíram os critérios empregados para a seleção das estações fluviométricas. Somente foram consideradas estações que apresentaram séries históricas de dados consistidos com extensão mínima de dez anos.

A Tabela 1 reúne nome, código de identificação na ANA, coordenadas geográficas, altitude, curso d`água e estado da Federação das estações fluviométricas selecionadas. A Figura 2 ilustra a localização geográfica da região de estudo, rede de drenagem, e a localização das estações fluviométricas selecionadas.



Tabela 1- Características das estações fluviométricas selecionadas

CÓDIGO	NOME	RIO	LATITUDE	LONGITUDE	ALTURA	ESTADO
55779000	Fidelândia – Montante	Rio São Mateus/Braço Norte	-18:11:37	-41:14:55	250 m	MG
55790000	Ataléia	Rio Santa Cruz	-18:2:43	-41:6:44	250 m	MG
55850000	São João da Cachoeira Grande	Rio São Mateus/Braço Norte	-18:33:50	-40:20:10	38 m	ES
55895000	Barra do Rio Preto	Rio São Mateus/Braço Sul	-18:41:37	-40:52:55	162 m	ES
55900000	Barra de São Francisco	Rio São Francisco	-18:45:11	-40:53:33	192 m	ES

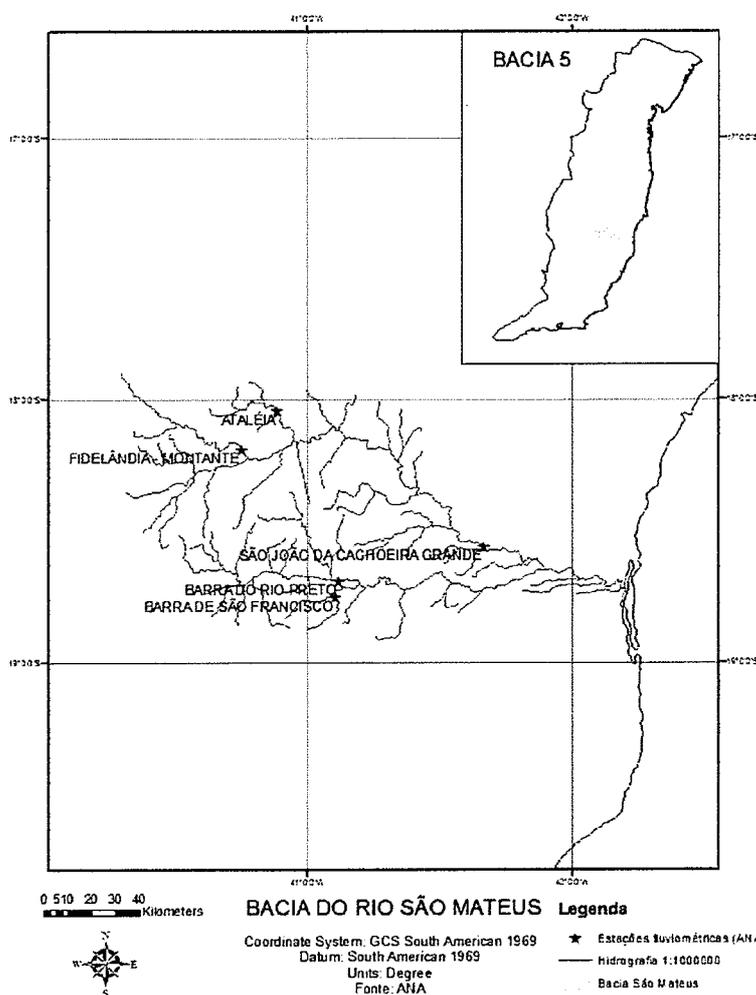


Figura 2- Localização das estações fluviométricas selecionadas



A aplicação do método da Simulação envolveu a utilização de dados de precipitação e evaporação. Neste trabalho, para se incluir a influência da chuva sobre o volume final dos reservatórios, foram escolhidas quatro estações pluviométricas em operação na bacia do rio São Mateus. A seleção das estações pluviométricas foi feita considerando-se a proximidade geográfica das estações pluviométricas relacionadas na Tabela 1 e a presença de totais mensais precipitados para um período de, no mínimo, dez anos consecutivos.

A Tabela 2 apresenta as estações pluviométricas selecionadas indicando, adicionalmente, código, município e estado de instalação da estação, coordenadas geográficas e altitude. A Figura 3 ilustra a localização geográfica da região de estudo, rede de drenagem, assim como a localização das estações pluviométricas selecionadas. É relevante registrar que os dados pluviométricos da estação Barra de São Francisco foram utilizados para o dimensionamento do volume final dos reservatórios associados às estações pluviométricas de Barra de São Francisco e Barra do Rio Preto.

Tabela 2 -Características das estações pluviométricas selecionadas

CÓDIGO	NOME	LATITUDE	LONGITUDE	ALTURA	ESTADO
01840004	Barra de São Francisco	-18:45:13	-40:53:37	192 m	ES
01840020	São João da Cachoeira Grande	-18:33:53	-40:20:12	100 m	ES
01841007	Fidelândia – Montante	-18:12:11	-41:14:54	210 m	MG
01841008	Ataléia	-18:2:49	-41:6:52	-	MG



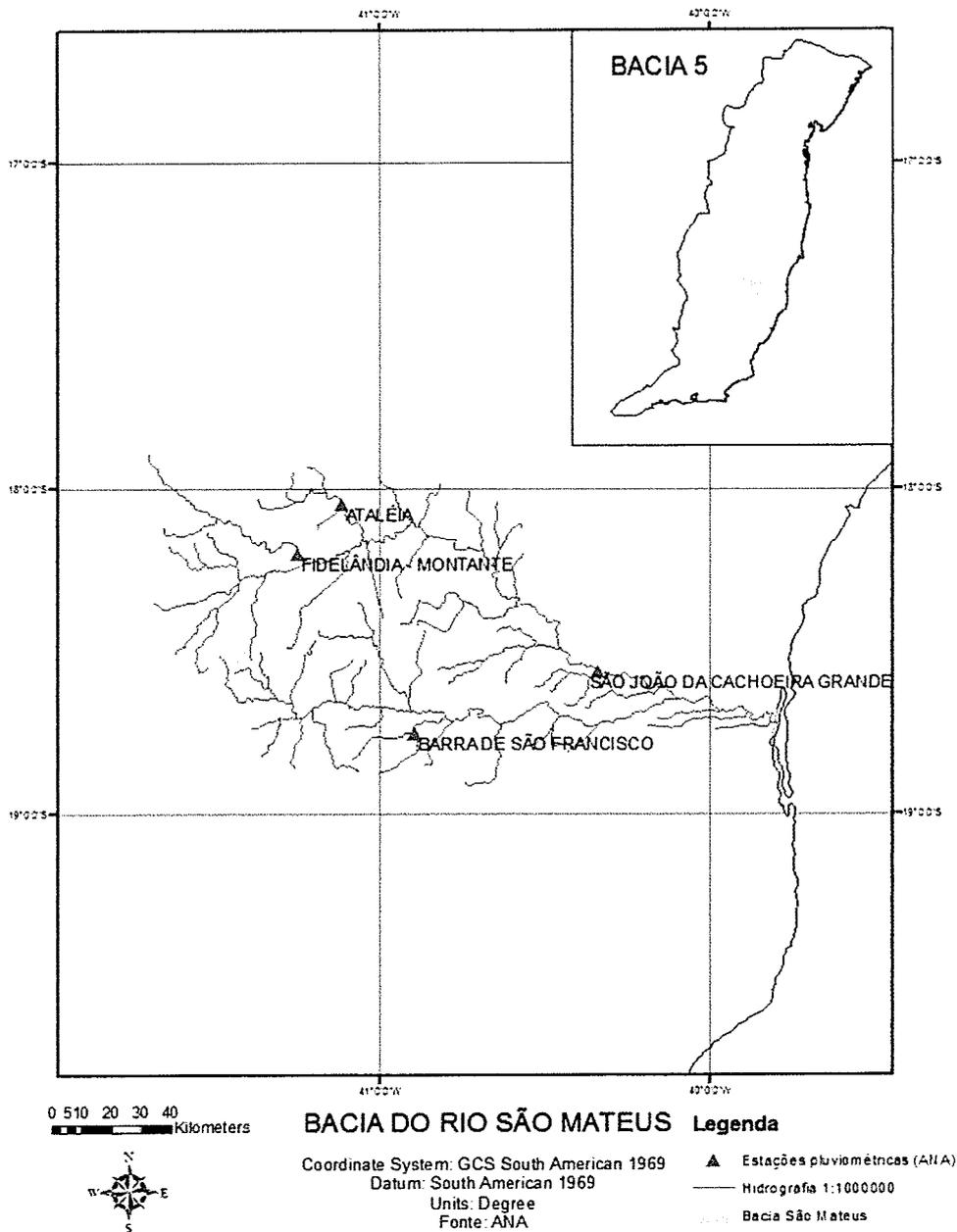


Figura 3 - Localização geográfica das estações pluviométricas selecionadas

Os dados evaporimétricos foram obtidos da estação meteorológica de São Mateus, em operação nas proximidades da foz do rio São Mateus. A referida estação está instalada na latitude $-18,7^\circ$ e longitude $-39,85^\circ$ e numa altitude de



aproximadamente 25 metros. A Figura 4 ilustra a localização da estação meteorológica selecionada.

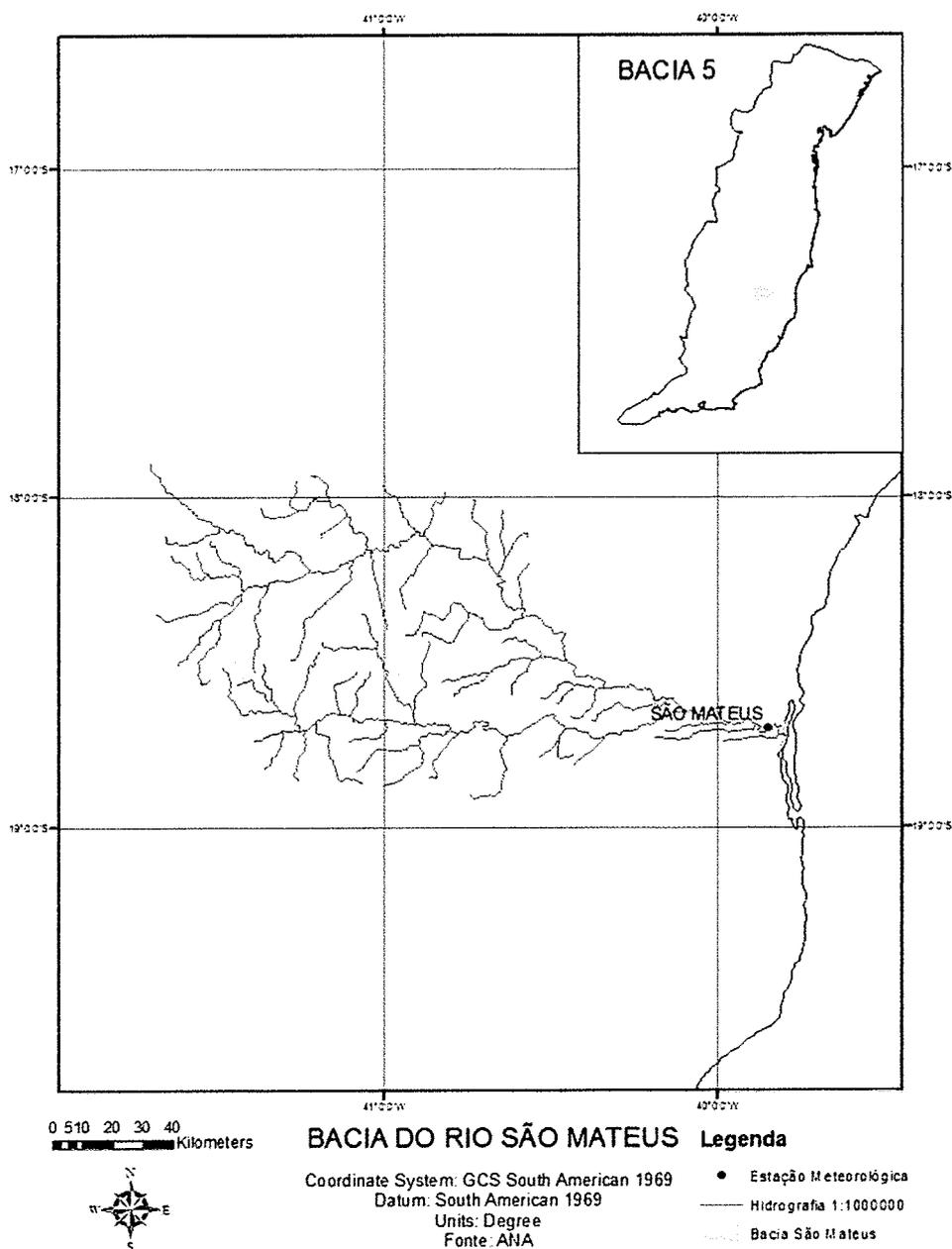


Figura 4 - Localização geográfica da estação meteorológica selecionadas

Após a escolha das estações fluviométricas, pluviométricas e meteorológica, foi necessária a seleção de um intervalo de tempo comum entre todos os registros disponíveis. Para cada estação fluviométrica escolhida determinou-se o maior



período de operação em comum com as estações pluviométricas e meteorológica selecionadas. Os períodos considerados para a aplicação dos métodos de dimensionamento de reservatórios, por par de estações fluviométricas e pluviométricas, estão indicados na Tabela 3. Como a estação meteorológica de São Mateus começou a operar no ano de 1969, seus registros apresentaram-se suficientes para a combinação com quaisquer dos pares de estações fluviométricas e pluviométricas estabelecidos.

Tabela 3 – Estações hidrológicas e período comum de dados históricos

ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA	ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA	INTERVALO
Fidelândia – Montante	Fidelândia – Montante	[1996-2005]
Ataléia	Ataléia	[1971-2005]
São João da Cachoeira Grande	São João da Cachoeira Grande	[1995-2005]
Barra do Rio Preto	Barra de São Francisco	[1971-2005]
Barra de São Francisco	Barra de São Francisco	[1988-2005]

Os métodos de dimensionamento empregados neste trabalho demandam vazões médias mensais, totais mensais precipitados e totais mensais evaporados. Naquelas situações em que as séries históricas selecionadas apresentaram falhas, procedeu-se da seguinte forma:

- Para os meses em que não se dispunha da vazão média empregou-se a vazão média mensal de longo período associada àquele mês;
- Para os meses em que não se dispunha do total mensal precipitado empregou-se o total mensal precipitado médio de longo período;
- No caso da estação meteorológica, os meses com falhas foram complementados utilizando-se normais climatológicas da estação São Mateus.

5.2. Software SisCAH

Para a manipulação dos dados hidrológicos foi empregado o Sistema Computacional para Análise Hidrológica (SisCAH), programa de domínio



público desenvolvido e disponibilizado pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Viçosa.

O *software* SisCAH foi utilizado para a condução das seguintes tarefas:

- Pré-processamentos das séries históricas de vazão, com subsequente seleção dos períodos empregados para o dimensionamento dos reservatórios (períodos indicados na Tabela 3);
- Determinação, por estação fluviométrica, das vazões médias de longo período. Segundo Tucci (2004), a vazão média de longo período ou vazão média de longa duração pode ser definida como a média das vazões da série de dados disponíveis e corresponde à máxima vazão possível a ser regularizada em qualquer curso d'água, abstraindo-se as perdas.
- Construção, por estação fluviométrica, da curva de permanência de vazões. Conforme observa Vergara *et al.* (2013), a curva de permanência indica a porcentagem de tempo que um determinado valor de vazão é igualado ou ultrapassado durante o tempo de observação. Dessa maneira, a curva de permanência permite visualizar a potencialidade natural de um corpo d'água, uma vez que destaca a vazão mínima e o grau de permanência de qualquer valor da vazão
- Apropriação, a partir de cada curva de permanência estabelecida, da vazão com permanência mínima de 90% (Q_{90}).

5.3. Dados fisiográficos

A partir do Sistema de Informações Hidrológicas da ANA, foi obtido o arquivo no formato *shapefile* da Bacia Atlântico Trecho Leste (Bacia 5). Este *shapefile* foi utilizado para a determinação da localização geográfica das estações hidrológicas e da rede de drenagem da bacia do Rio São Mateus. Os modelos obtidos na ANA estão em Sistemas de Coordenadas Geográficas América do Sul 1969 e Datum América do Sul 1969.



Adicionalmente, foram empregados *shapes* SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) para a determinação da relação entre o volume reservado e a área do espelho d'água de cada reservatório dimensionado. Estes *shapes* foram obtidos a partir do monitoramento por satélite da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Segundo Penha e Silva (2012), o sensor SRTM consiste de um sistema de radar lançado a bordo da *Space Shuttle Endeavour* durante 11 dias de missão em fevereiro de 2000. Tal sistema teve missão de mapear a topografia global, com dados de 90 m de resolução espacial e 16 bits. Vale ressaltar que os modelos digitais de terreno, que foram disponíveis gratuitamente, são uma aproximação da realidade, e estão propensos a vários erros e incertezas.

As cartas de Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizadas para o desenvolvimento do estudo foram as seguintes: SE-24-V-C; SE-24-V-D; SE-24-Y-A; SE-24-Y-B; SE-24-Y-C e SE-24-Y-D. Os modelos estão em Sistema de Coordenadas Geográficas e Datum WGS84. A Figura 5 indica a composição das cartas empregadas para a conformação da área de estudo.

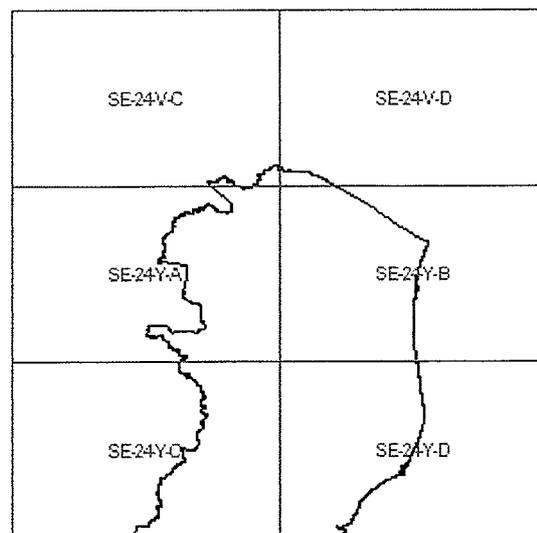


Figura 5 - Cartas MDE utilizadas no estudo

Todos os procedimentos que envolveram o tratamento e manipulação de *shapefiles* foram realizados com o auxílio do software *ArcGIS* 10.1, desenvolvido pelo *Environmental Systems Research Institute* (ESRI).



5.4. Métodos empregados para apropriação dos volumes de reservação

Para a apropriação dos volumes de reservação, foram empregados os métodos da Simulação e das Diferenças em relação a sequências de deflúvios mínimos, previamente apresentados na seção 3.3. A aplicação do método da Simulação com incorporação de afluxos referentes a precipitação e defluxos associados à evaporação ficou limitada à seção fluvial estabelecida pela estação de São João da Cachoeira Grande.

Para a incorporação da precipitação e da evaporação no Método da Simulação foi preciso estabelecer uma função matemática entre área do espelho d'água e o volume armazenado no reservatório. Como esta função matemática é dependente da topografia do local, assumiu-se a construção de uma barragem nas proximidades da estação fluviométrica de São João da Cachoeira Grande. Nesse contexto, o *software ArcGIS 10.1* permitiu calcular, a partir da análise das curvas de nível no entorno da referida estação fluviométrica, diferentes volumes de reservação e áreas do espelho d'água correspondente e, conseqüentemente, estabelecer a função área versus volume de reservação.

Nessa etapa do trabalho, as cartas no modelo SRTM foram manipuladas pelo programa *ArcGIS 10.1* e foram unidas em uma única imagem utilizando-se a ferramenta *Mosaic to New Raster*. As imagens obtidas da EMBRAPA estão em coordenadas geográficas sobre o Datum planimétrico WGS1984 e zona 24S. No entanto, como citado por Ferreira *et al.* (2012), para estudos sobre bacias hidrográficas recomenda-se o uso de uma projeção cartográfica equivalente, ou seja, aquela que mantém as distorções das áreas proporcionais. Dessa forma, aplicou-se a projeção UTM sobre o mosaico utilizando-se a ferramenta *Project Raster* a fim de alterar o seu sistema de coordenadas. Adicionalmente, utilizou-se a ferramenta *Fill*, com o objetivo de se eliminar pequenas imperfeições, como depressões e picos, no modelo digital. Em seguida, com o *raster* já ajustado, utilizou-se a ferramenta *Contour* (Spatial Analyst) para a criação de curvas de nível com intervalo de cinco metros de espaçamento.

A partir da cota de instalação da estação fluviométrica, assumiu-se um aumento da soleira da barragem de cinco em cinco metros, com o objetivo de se apropriar a área de espelho d'água e seu respectivo volume. Nesta etapa de



manipulação do MDE foi necessária a criação de polígonos. Cada polígono correlacionou uma altura distinta da barragem com uma área superficial de alagamento. Para o cálculo do volume de cada polígono gerado foi necessária a interpolação das curvas de nível, criando uma estrutura de grade triangular (TIN) que representa uma superfície por meio de conjuntos de faces triangulares. A partir disso, utilizou-se a ferramenta *Polygon Volume* para se determinar a área e o volume correspondente. Adicionalmente, a área de cada polígono também foi calculada pela ferramenta *Calculate Geometry*, a fim de se verificar a semelhança dos resultados originalmente obtidos.

5.5. Cenários de simulação de demandas

A vazão média de longo período indica a disponibilidade hídrica na bacia e representa a máxima vazão passível de ser regularizada na construção de um reservatório. Assim, foram consideradas as seguintes perspectivas de regularização quando do dimensionamento dos reservatórios:

- Garantia de atendimento de 50% (cinquenta por cento) da vazão média de longo período, com manutenção de uma vazão à jusante dos reservatórios de 50% (cinquenta por cento) da vazão Q_{90} .
- Garantia de atendimento de 75% (setenta e cinco por cento) da vazão média de longo período, com manutenção de uma vazão à jusante dos reservatórios de 50% (cinquenta por cento) da vazão Q_{90} .

Para a operacionalização das estimativas de volumes de reservação foi utilizada a planilha eletrônica do Microsoft Excel. É relevante registrar que os volumes de reservação estabelecidos com auxílio do método da Simulação foram obtidos com auxílio da Programação Não Linear, técnica de otimização disponível na planilha eletrônica Microsoft Excel a partir da ferramenta *Solver*. O volume inicial de reservação foi definido como variável de decisão e a função objetivo foi definida de forma a minimizar o volume de reservação através do conceito de período crítico. Sendo assim, determinou-se que em algum momento o reservatório atingiria o volume mínimo igual a zero, de tal forma que o volume inicial fosse ajustado a fim de atingir essa otimização. Como no



método da Simulação o reservatório deve estar cheio no início, o volume inicial será o volume de reservação.

Para a operacionalização do método baseado nas Diferenças em relação a sequências de deflúvios mínimos, considerou-se uma série histórica de vazão mensal com extensão n de meses. Inicialmente, calculou-se a diferença entre a demanda e a vazão afluyente, a cada mês, e identificou-se qual a maior diferença encontrada dentro da série histórica avaliada. Em seguida, utilizou-se a soma de dois meses consecutivos para determinar a maior diferença entre a demanda e a vazão de entrada e, assim, sucessivamente. Esse procedimento foi feito até que a soma dos meses fosse igual a extensão da série histórica. O volume do reservatório foi o maior valor encontrado para a diferença em relação aos deflúvios.

5.6. Avaliação da influência do tamanho das séries históricas

O presente trabalho buscou avaliar, adicionalmente, a influência da extensão das séries históricas no volume total dos reservatórios de regularização dimensionados. Para essa etapa do trabalho foi escolhida a estação fluviométrica de Barra do Rio Preto e empregado o Método da Simulação, excluindo-se a influência dos processos de evaporação e precipitação.

Para a condução da análise proposta, foram construídas séries históricas de diferentes tamanhos, iniciando-se com os cinco anos mais recentes da série histórica; em seguida, foram considerados os dez anos mais recentes e assim sucessivamente, até se utilizar toda a série histórica da estação de Barra do Rio Preto (série histórica com extensão de 35 anos). Essa avaliação gerou sete séries históricas diferentes. Para cada série histórica, utilizou-se o *software* *SisCAH* para se recalculer a curva de permanência e a vazão média de longo período. Por fim, calculou-se o volume necessário de reservação que seria associado a cada extensão de série histórica



6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Vazões médias de longo período e curvas de permanência

Utilizando-se o *software SisCAH* foram apropriados os valores das vazões médias de longo período das diferentes estações fluviométricas selecionadas, conforme valores reunidos na Tabela 4.

Tabela 4 - Vazões médias de longo período para as estações fluviométricas selecionadas

CÓDIGO	NOME	VAZÃO MÉDIA DE LONGO PERÍODO
55779000	Fidelândia – Montante	3,5 m ³ /s
55790000	Ataléia	5,5 m ³ /s
55850000	São João da Cachoeira Grande	39,6 m ³ /s
55895000	Barra do Rio Preto	20,3 m ³ /s
55900000	Barra de São Francisco	1,8 m ³ /s

As curvas de permanência de cada estação fluviométrica, também estabelecidas com auxílio do *software SisCAH*, estão reunidas nas figuras de 6 a 10. A partir das curvas de permanência foram apropriadas as vazões Q_{90} de cada estação pluviométrica. Os valores de Q_{90} encontrados estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores da vazão Q_{90} para as estações fluviométricas selecionadas

CÓDIGO	NOME	VAZÃO Q_{90}
55779000	Fidelândia – Montante	0,3 m ³ /s
55790000	Ataléia	0,8 m ³ /s
55850000	São João da Cachoeira Grande	4,4 m ³ /s
55895000	Barra do Rio Preto	4,2 m ³ /s
55900000	Barra de São Francisco	0,4 m ³ /s



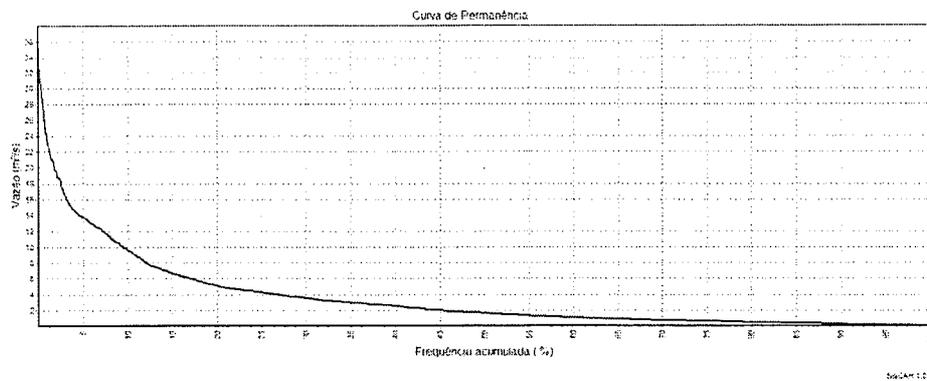


Figura 6 - Curva de permanência da estação fluviométrica Fidelândia – Montante

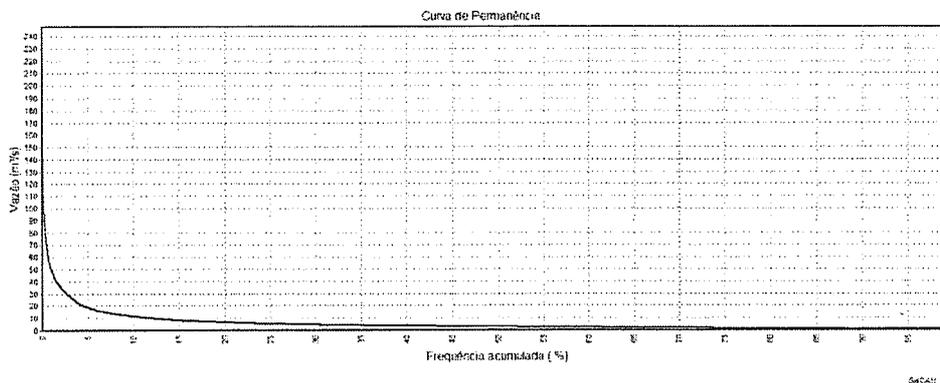


Figura 7 - Curva de permanência da estação fluviométrica Ataléia

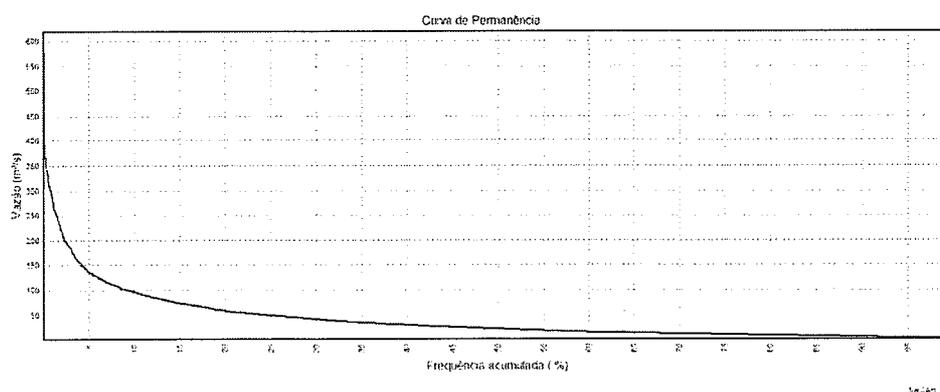


Figura 8 - Curva de permanência da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande



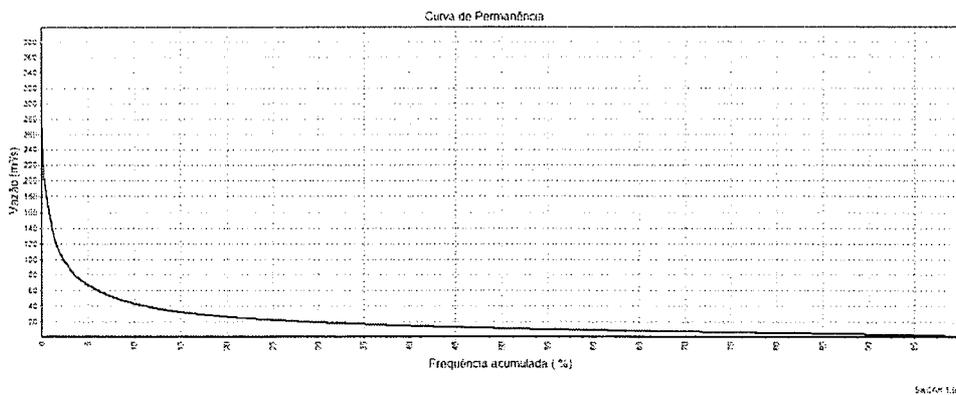


Figura 9 - Curva de permanência da estação fluviométrica Barra do Rio Preto

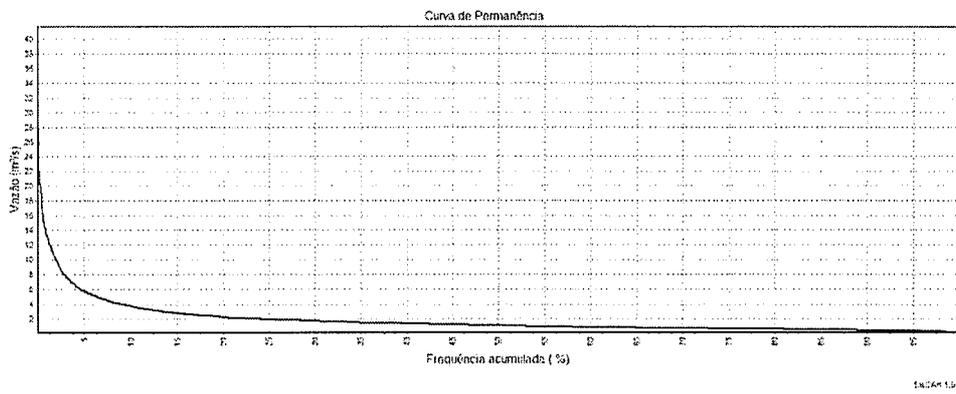


Figura 10 - Curva de permanência da estação fluviométrica Barra de São Francisco

6.2. Volumes de reservação

6.2.1. Volumes estimados pelos métodos da sequências de deflúvios mínimos e da simulação sem incorporação de precipitação e evaporação

Os volumes estimados a partir dos métodos da sequência de deflúvios mínimos e da simulação sem incorporação de totais mensais precipitados e evaporados estão reunidos, por estação fluviométrica, nas tabelas de 6 a 10. Estas tabelas apresentam os volumes reservados para garantia de atendimento de vazões



equivalentes a 50% e 75% da vazão média de longo período, assegurada a manutenção de 50% da vazão Q_{90} a jusante de cada ponto de reservação.

Tabela 6 - Volumes de reservação (em Hm^3) estimados para a estação fluviométrica Fidelândia – Montante

MÉTODO	VAZÃO REGULARIZADA	
	50% DA VAZÃO MÉDIA DE LONGO PERÍODO	75% DA VAZÃO MÉDIA DE LONGO PERÍODO
Simulação	22,13	111,09
Deflúvios mínimos	52,58	113,95

Tabela 7 - Volumes de reservação (em Hm^3) estimados para a estação fluviométrica Ataléia

MÉTODO	VAZÃO REGULARIZADA	
	50% DA VAZÃO MÉDIA DE LONGO PERÍODO	75% DA VAZÃO MÉDIA DE LONGO PERÍODO
Simulação	23,89	59,13
Deflúvios mínimos	74,52	276,46

Tabela 8 - Volumes de reservação (em Hm^3) estimados para a estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande

MÉTODO	VAZÃO REGULARIZADA	
	50% DA VAZÃO MÉDIA DE LONGO PERÍODO	75% DA VAZÃO MÉDIA DE LONGO PERÍODO
Simulação	120,72	1364,66
Deflúvios mínimos	418,42	1364,66

Tabela 9 - Volumes de reservação (em Hm^3) estimados para a estação fluviométrica Barra do Rio Preto

MÉTODO	VAZÃO REGULARIZADA	
	50% DA VAZÃO MÉDIA DE LONGO PERÍODO	75% DA VAZÃO MÉDIA DE LONGO PERÍODO
Simulação	123,29	799,74
Deflúvios mínimos	255,87	833,70



Tabela 10 - Volumes de reservação (em Hm^3) estimados para a estação fluviométrica Barra de São Francisco

MÉTODO	VAZÃO REGULARIZADA	
	50% DA VAZÃO MÉDIA DE LONGO PERÍODO	75% DA VAZÃO MÉDIA DE LONGO PERÍODO
Simulação	4,70	35,21
Deflúvios mínimos	21,68	84,96

A partir da simples inspeção das tabelas de 6 a 10 apresentam-se como relevantes as seguintes considerações:

- Em todas as seções fluviométricas analisadas seriam necessários reservatórios de regularização, mesmo para atendimento das menores demandas de água (captações de 50% da vazão média de longo período, acrescida de vazão residual de 50% da vazão Q_{90});
- Os volumes de reservação estimados pelos métodos da simulação e da sequência de deflúvios mínimos apresentaram-se substancialmente diferentes, independentemente da seção fluviométrica ou da vazão de regularização consideradas. Os maiores valores de reservação foram estimados pelo método da sequência dos deflúvios mínimos. A única exceção foi observada no volume de reservação associado a estação de São João da Cachoeira Grande e para atendimento de 75% da vazão média de longo período;
- Ainda que tenha conduzido os menores volumes de reservação, o método da simulação apresentou-se mais sensível à variação na vazão de regularização. Aumento da vazão de regularização de 50% para 75% da vazão média de longo período produziu volumes de reservação de 5 (volume associado a estação de Fidelândia – Montante) a 11 vezes maiores (estação de São João da Cachoeira Grande). No método da sequência de deflúvios mínimos, a maior variação no volume de reservação, para a mesma variação na vazão de regularização, foi de 4 vezes (volume associado a estação de Barra de São Francisco). A única exceção a esta regra foi observada nos volumes de reservação associados à estação de Ataléia.



Tucci (1997) observa que o método da sequência de deflúvios mínimos tem a vantagem de automatizar o cálculo das capacidades sem necessidade de iterações, como no método da Simulação. No entanto, é concebido a partir da suposição de que o reservatório de regularização esteja cheio no início do período crítico, aspecto que, dependendo da conformação da série histórica, pode majorar os volumes reservados.

6.2.2. Volumes estimados pelo método da Simulação com incorporação de precipitação e evaporação

Conforme indicado na seção 5.4, a avaliação de volumes de reservação com incorporação dos efeitos associados a evaporação e precipitação ficou limitada à estação fluviométrica de São João da Cachoeira Grande.

As figuras de 11 a 20 apresentam as possíveis áreas de inundação associadas a uma barragem eventualmente construída no entorno da estação fluviométrica de São João da Cachoeira Grande, considerando variações do nível d'água entre as cotas 40 e 85 metros.

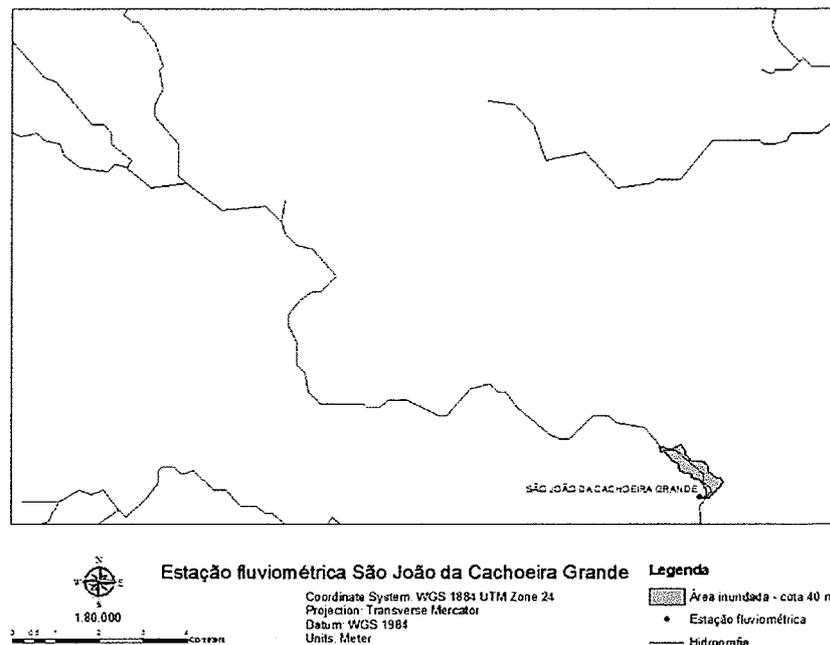


Figura 11 - Área inundada (cota 40 m) da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande



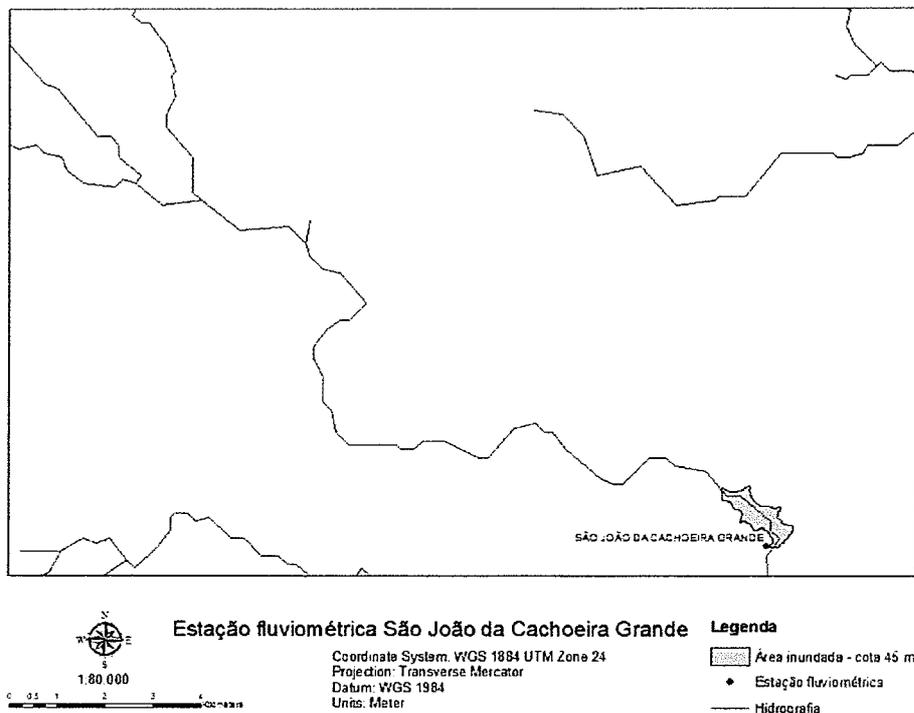


Figura 12 - Área inundada (cota 45 m) da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande

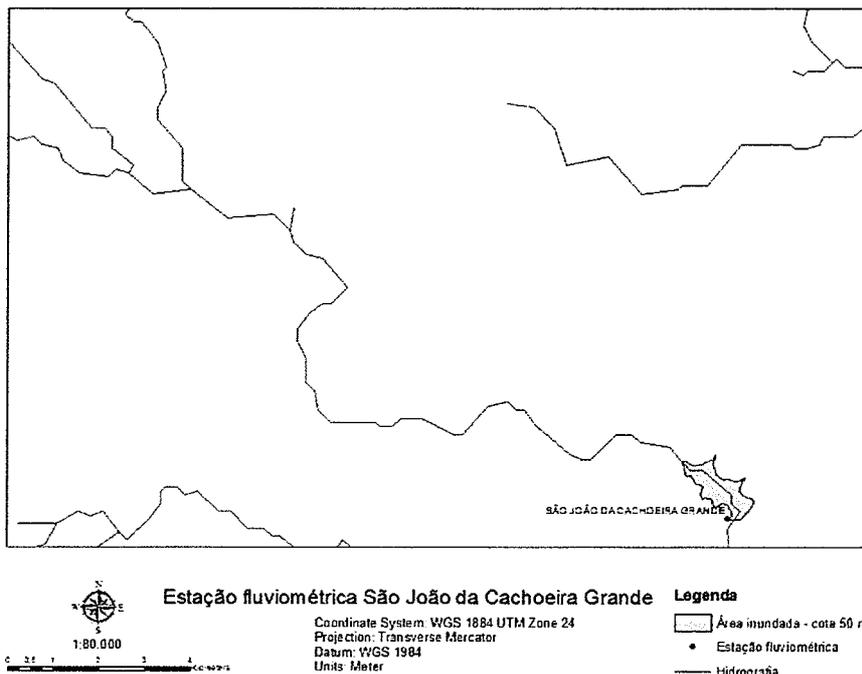


Figura 13 - Área inundada (cota 50 m) da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande



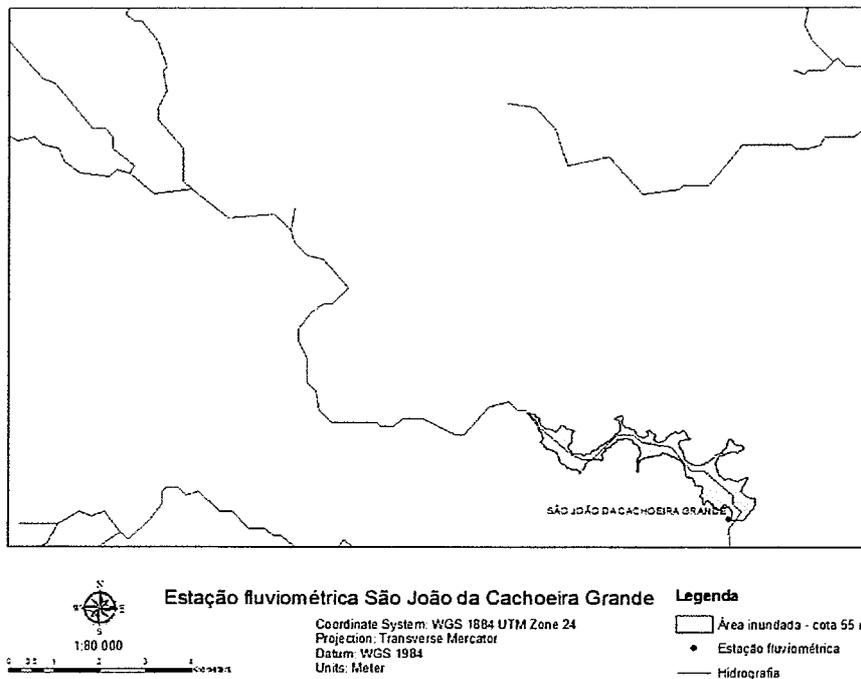


Figura 14 - Área inundada (cota 55 m) da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande

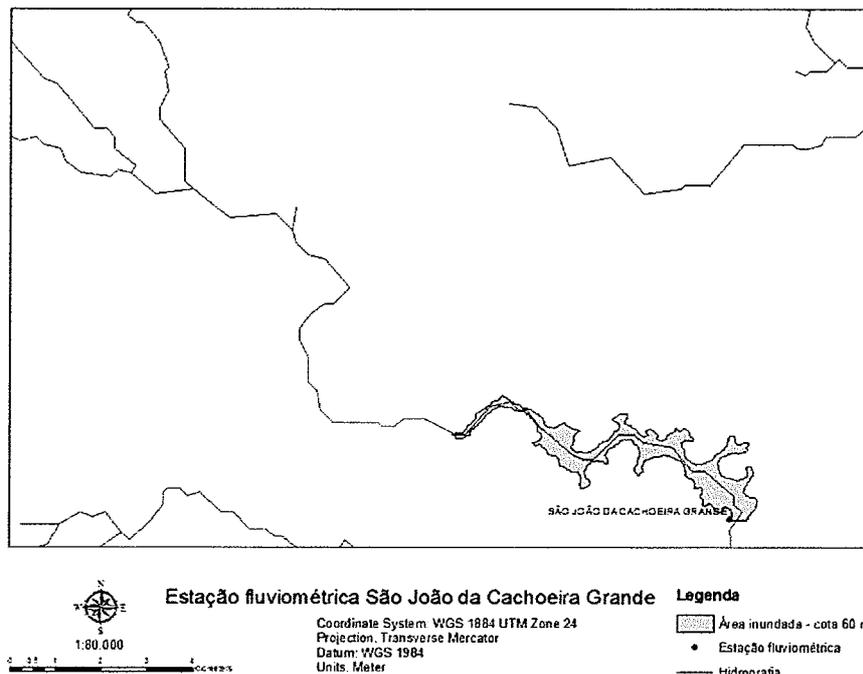


Figura 15 - Área inundada (cota 60 m) da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande



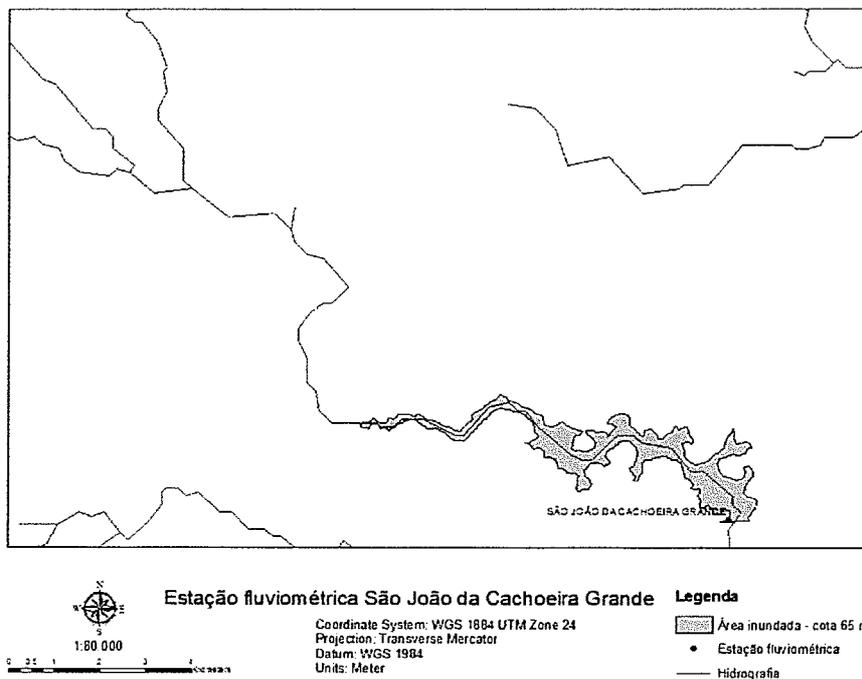


Figura 16 - Área inundada (cota 65 m) da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande

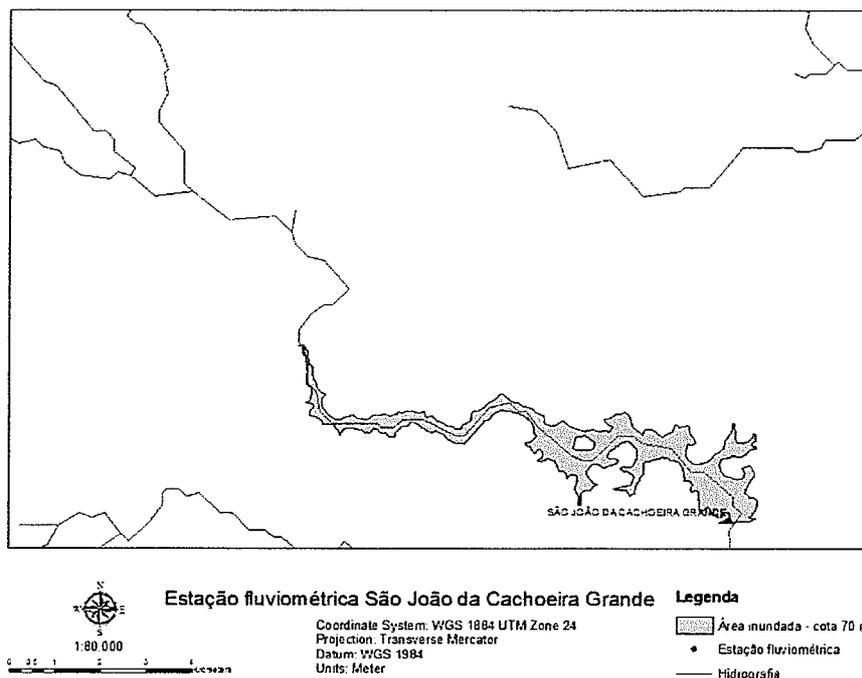


Figura 17 - Área inundada (cota 70 m) da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande



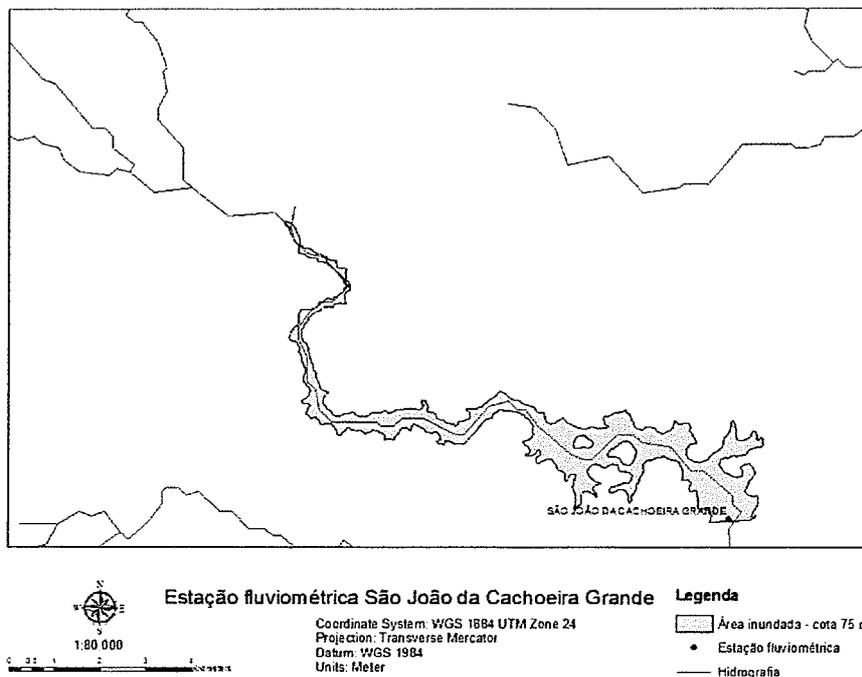


Figura 18 - Área inundada (cota 75 m) da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande

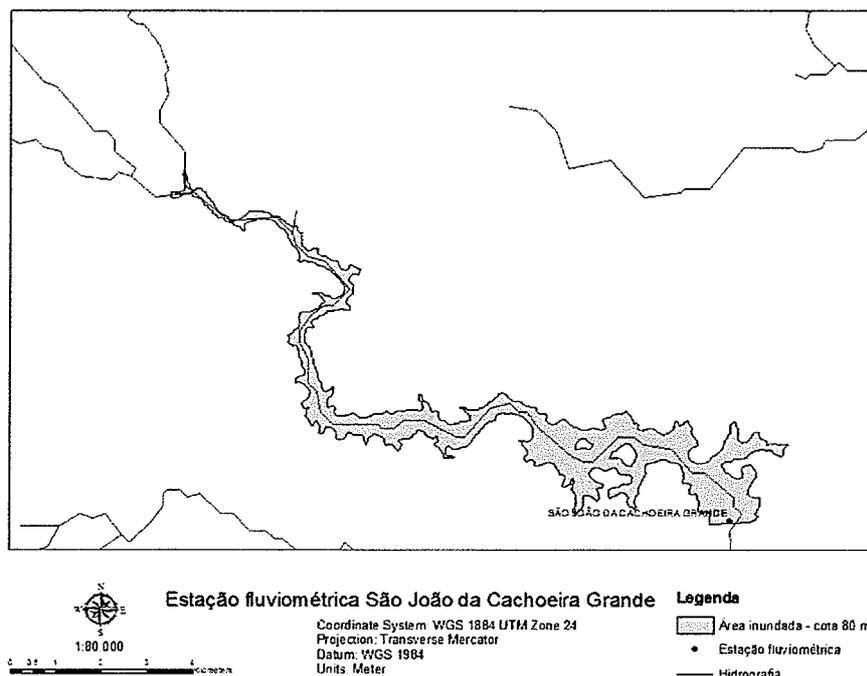


Figura 19 - Área inundada (cota 80 m) da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande



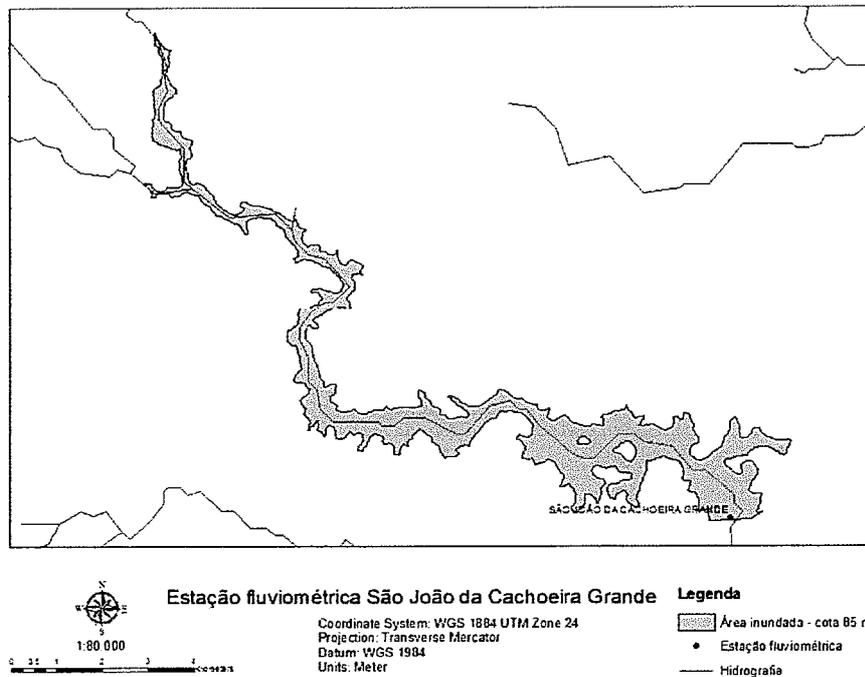


Figura 20 - Área inundada (cota 85 m) da estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande

A partir da determinação das áreas e volumes de inundação, apropriadas pelo *software ArcGIS 10.1*, foi possível obter uma função matemática que correlaciona essas variáveis. Com o auxílio do *Excel*, construiu-se um gráfico de dispersão e ajustou-se uma linha de tendência. A Tabela 11 reúne áreas e volumes de inundação associados a estação de São João da Cachoeira Grande. A Figura 21 apresenta o gráfico de dispersão estabelecido com as referidas variáveis e correspondente linha de tendência.



Tabela 11- Características da estação fluviométrica de São João da Cachoeira Grande

COTA (m)	VOLUME (Hm ³)	ÁREA (Km ²)
40	0,54	29,69
45	0,74	39,31
50	0,89	45,75
55	2,41	106,89
60	3,44	142,22
65	4,58	175,32
70	6,09	212,00
75	7,63	241,80
80	8,91	260,57
85	9,64	268,48

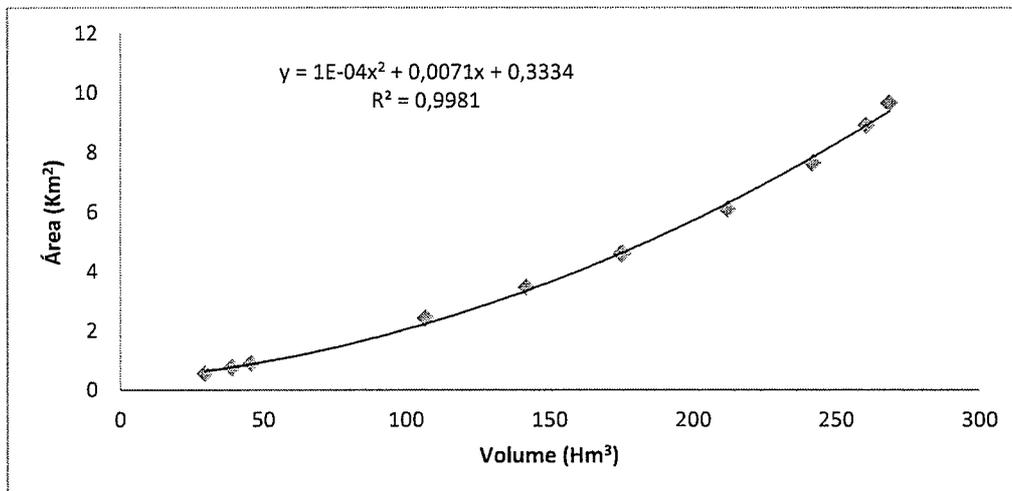


Figura 21 - Relação área versus volume de inundação para a estação fluviométrica de São João da Cachoeira Grande

Os valores obtidos no dimensionamento do reservatório, utilizando-se o método da simulação com incorporação de precipitação e evaporação, estão dipostos na Tabela 12.



Tabela 12 - Volumes de reservação (em Hm³) estimados para a estação fluviométrica São João da Cachoeira Grande

MÉTODO	VAZÃO REGULARIZADA	
	50% DA VAZÃO MÉDIA DE LONGO PERÍODO	75% DA VAZÃO MÉDIA DE LONGO PERÍODO
Simulação	120,72	1364,66
Simulação (PE)*	121,34	1427,60

*(PE) Incorporação da precipitação e evaporação.

Os valores resumidos na Tabela 12 indicam que a incorporação dos efeitos da evaporação e da precipitação produziram valores de reservação ligeiramente maiores que aqueles estimados sem a incorporação destes processos no balanço de massa conduzido pelo método da simulação.

A incorporação dos efeitos da evaporação e precipitação são usualmente relevantes para o dimensionamento dos reservatórios naquelas situações em que os totais evaporados superam, de maneira relevantes, os totais precipitados diretamente sobre os reservatórios. No entanto, a simples inspeção dos totais precipitados monitorados na estação de São João da Cachoeira Grande (Anexo B, Tabela B.3) e dos totais evaporados na estação de São Mateus (Anexo C, Tabela C.1), indica que, para o período objeto de simulação (1995 a 2005), as perdas por evaporação e os ganhos por precipitação foram equivalentes.

6.3. Avaliação da influência do tamanho da série histórica

A estação fluviométrica Barra do Rio Preto foi escolhida para a avaliação da influência do tamanho da série histórica porque apresenta a maior quantidade de dados mensais de vazão dentre as estações escolhidas. As diferentes séries históricas associadas à estação de Barra do Rio Preto foram geradas de tal modo que a primeira série apresentava extensão correspondente aos cinco anos mais recentes de operação da estação; a segunda, com os dez anos mais recentes, e assim, sucessivamente. Para cada série histórica estabelecida foram geradas novas curvas de permanência, novas vazões com permanência de 90% e novas vazões de longo período, conforme procedimento descrito no capítulo reservado para a Metodologia.



Os volumes de reservação estimados a partir de cada série histórica conformada para a estação de Barra do Rio Preto estão reunidos na Tabela 13.

Tabela 13 - Volumes de reservação (em Hm³) simulados de acordo com o intervalo proposto para a série histórica de vazões

INTERVALO	VAZÃO REGULARIZADA	
	50% DA VAZÃO MÉDIA DE LONGO PERÍODO	75% DA VAZÃO MÉDIA DE LONGO PERÍODO
[1971-2005]	123,29	799,74
[1976-2005]	190,44	330,15
[1981-2005]	0,00	0,00
[1986-2005]	0,00	568,38
[1991-2005]	0,00	0,00
[1996-2005]	0,00	129,92
[2001-2005]	134,29	258,03

De acordo com os resultados resumidos na Tabela 13 é possível observar que, quando consideradas as séries históricas de vazões médias mensais monitoradas entre os anos de 1981 e 2005; 1986 e 2005; 1991 e 2005; 1996 e 2005 não seria necessária a construção do reservatório de regularização para garantir o atendimento de 50% da vazão média de longo período, com manutenção de uma vazão à jusante dos reservatórios de 50% da vazão de referência Q_{90} . Para a garantia de atendimento de 75% da vazão média de longo período, conservado o vertimento de 50% da vazão Q_{90} , não haveria necessidade de construção do reservatório de regularização entre 1981 e 2005 e entre 1991 e 2005.

De acordo com a Tabela 13, poderiam ocorrer, dependendo da série histórica considerada, três situações distintas: i) em algum momento do intervalo de análise a demanda acumulada seria maior que a volume afluente acumulado, surgindo a necessidade da construção de um reservatório de regularização; ii) em nenhum momento proposto a demanda acumulada seria maior que o volume afluente acumulado e não haverá reservatório; iii) para a demanda igual a 50% da vazão média de longo período, com manutenção de uma vazão à jusante dos reservatórios de 50% da vazão de referência Q_{90} , não haveria situação em que a demanda acumulada seria superior ao volume afluente



acumulado, não existindo necessidade de reservação; no entanto, quando a demanda correspondesse a 75% da vazão média de longo período, com manutenção de uma vazão à jusante dos reservatórios de 50% da vazão de referência Q_{90} , surgiria a necessidade da construção de um reservatório. As figuras 22, 23 e 24 representam as situações i), ii) e iii), respectivamente.

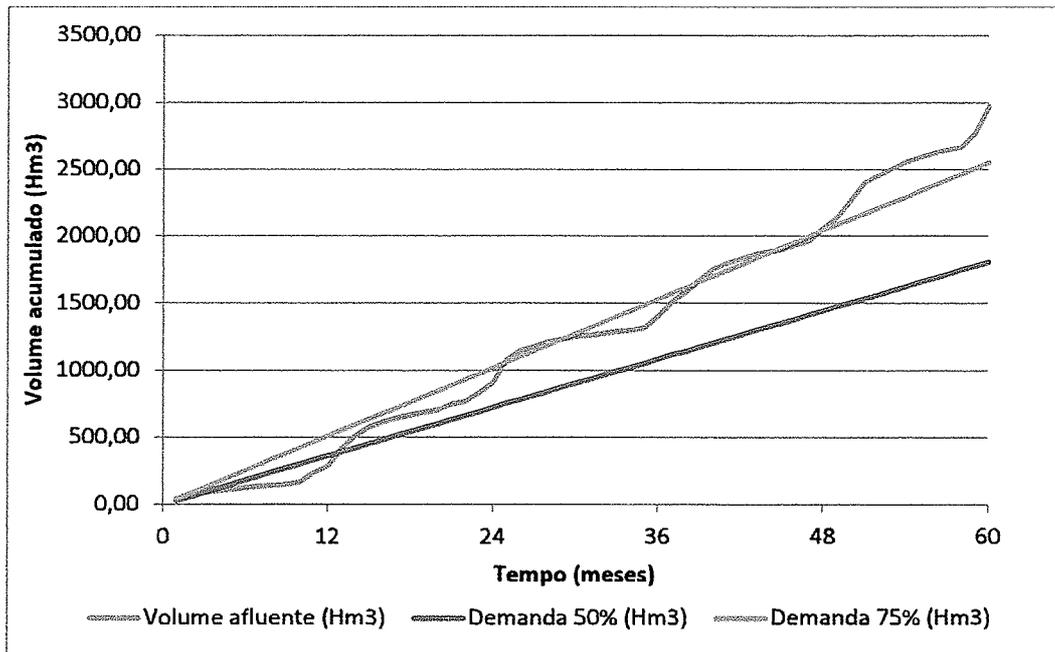


Figura 22 – (i) Volumes acumulados versus demandas acumuladas para a série histórica da estação fluviométrica Barra do Rio Preto no período de 2001 a 2005



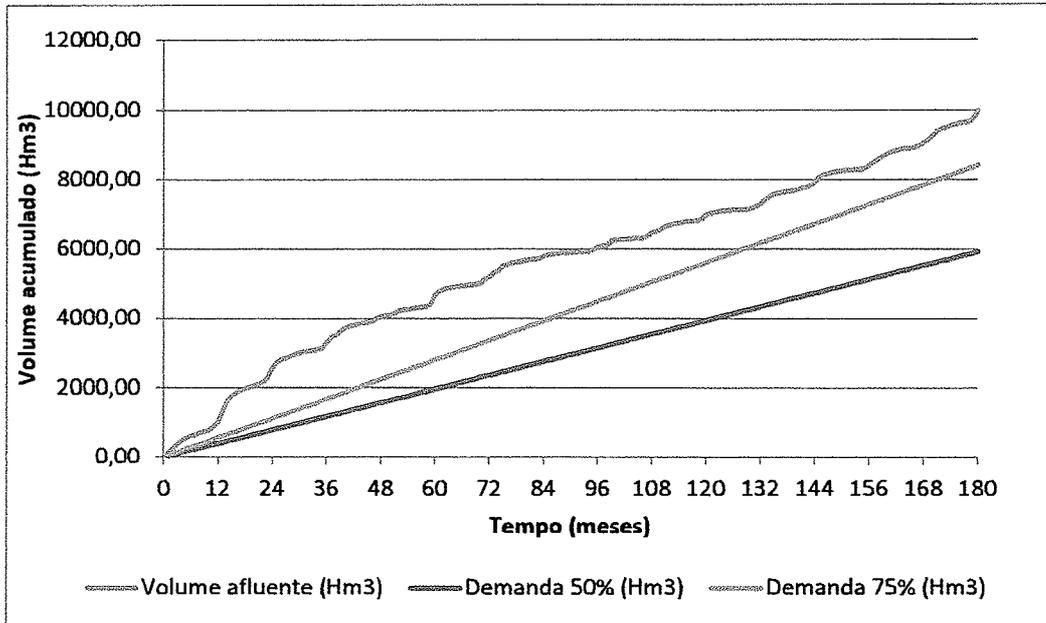


Figura 23 - (ii) Volumes acumulados versus demandas acumuladas para a série histórica da estação fluviométrica Barra do Rio Preto no período de 1991 a 2005

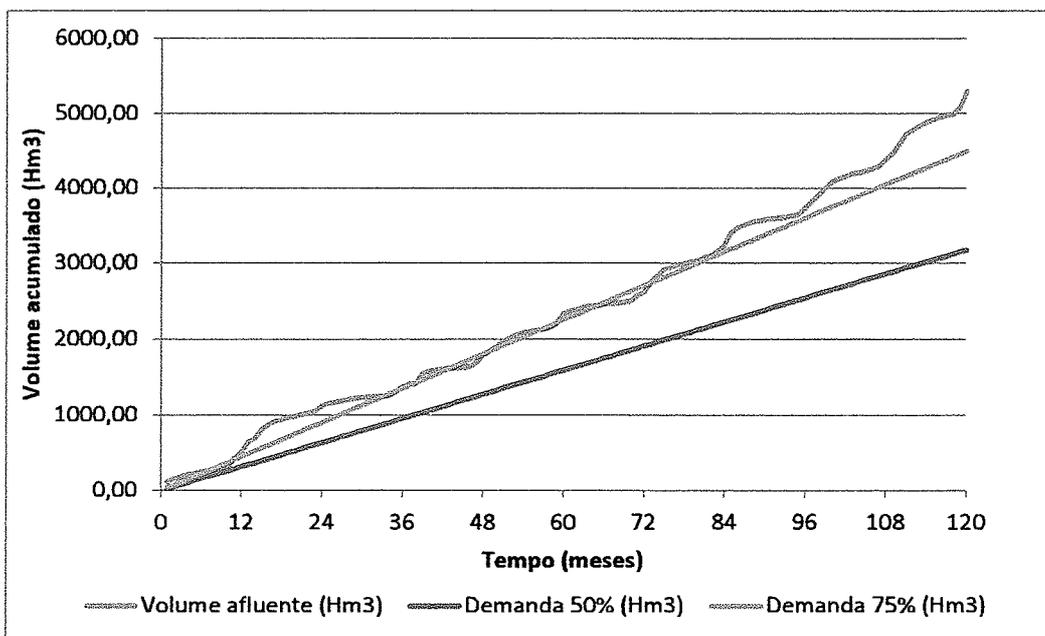


Figura 24 - (iii) Volumes acumulados versus demandas acumuladas para a série histórica da estação fluviométrica Barra do Rio Preto no período de 1996 a 2005



Os resultados resumidos na Tabela 13 e graficamente representados pelas figuras 22, 23 e 24 indicam a estreita dependência que os métodos de apropriação de volumes de reservação apresentam das séries de registros hidrológicos. Como na estação de Barra do Rio Preto foram observadas estiagens entre os anos de 1971 e 1980, entre 1986 e 1990 e entre 2001 e 2005, a incorporação das vazões monitoradas nestes períodos induziu a necessidade de reservação, necessidade que não se estabeleceria quando consideradas as séries históricas que não envolveram os referidos períodos.



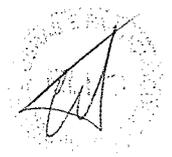
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As principais conclusões do presente trabalho podem ser assim sinalizados:

- Os volumes de reservação estimados pelo método da Simulação apresentaram-se inferiores àqueles estimados pelo método da Sequência de Deflúvios Mínimos, independentemente do valor assumido para a vazão de regularização;
- A incorporação dos efeitos da evaporação e da precipitação produziu maiores volumes de reservação. No entanto, função dos dados de precipitação (estação pluviométrica de São João da Cachoeira Grande) e da evaporação (estação climatológica de São Mateus) utilizados, o uso dos totais evaporados e dos totais precipitados não alterou os volumes de reservação em mais de 5%;
- Os volumes de reservação estimados foram dependentes da extensão da série histórica de vazões empregada no processo de dimensionamento. Séries históricas que incorporaram estiagens mais severas conduziram, invariavelmente, aos maiores volumes de reservação. Neste contexto, apresentaram-se como mais consistentes os volumes estimados com séries históricas mais extensas.

Como recomendações do presente trabalho sugere-se:

- Replicar as metodologias de avaliação de volumes de reservação para bacia hidrográfica que apresente modelo digital do terreno estabelecido com maior precisão. Ainda que no presente estudo a ferramenta *Fill*, disponível no *software* ArcGIS 10.1, tenha sido empregada para correção de picos e depressões, sua aplicação sem a adequada verificação de campo pode produzir a eliminação tanto dos erros de altitude quanto as depressões reais existentes, produzindo modelos que não se apresentam confiáveis para a descrição da morfologia da bacia hidrográfica. Este aspecto pode ser determinante para a deformação dos resultados associados ao método da Simulação com inclusão dos eventos de precipitação e evaporação, uma vez que a apropriação dos



totais evaporados e dos totais precipitados depende da área do espelho d'água, cujo valor varia com o volume de reservação;

- Replicar as metodologias de avaliação de volumes de reservação para bacia hidrográfica que disponha de maior número de estações climatológicas. No presente estudo, os registros de evaporação foram obtidos a partir da estação climatológica de São Mateus, estação instalada junto a linha de costa e distante algumas dezenas de quilômetros das estações fluviométricas e pluviométricas consideradas para aplicação do método da Simulação;
- Estudar, previamente a aplicação das metodologias de avaliação de volumes de reservação, as séries históricas de vazões. Bacias que apresentem elevados níveis de regularização dos cursos d'água demandam a reconstituição das séries históricas de vazões previamente à aplicação das metodologias para apropriação dos volumes de reservação.
- Estabelecer diferentes cenários de confiabilidade do sistema utilizando o método baseado nas Diferenças em relação a sequência de deflúvios mínimos, selecionando os períodos mais críticos da série histórica.

