

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
Centro de Energia Nuclear na Agricultura**

Impacto da irrigação na bacia hidrográfica do ribeirão dos Marins

Ariovaldo Antonio Tadeu Lucas

Tese apresentada para obtenção do título
de Doutor em Ecologia Aplicada

**Piracicaba
2007**

Ariovaldo Antonio Tadeu Lucas
Engenheiro Agrônomo

Impacto da irrigação na bacia hidrográfica do ribeirão dos Marins

Orientador:
Prof.Dr. **MARCOS VINICIUS FOLEGATTI**

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutor em Ecologia Aplicada

**Piracicaba
2007**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Lucas, Ariovaldo Antonio Tadeu
Impacto da irrigação na bacia hidrográfica do ribeirão dos Marins /
Ariovaldo Antonio Tadeu Lucas. - - Piracicaba, 2007.
101 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
Bibliografia.

1. Água – Qualidade 2. Bacia hidrográfica 3. Impacto ambiental
4. Irrigação – Manejo 5. Modelagem de dados I. Título

CDD 631.7

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

A minha esposa *Simone Cristina de Oliveira Lucas* pelo amor, dedicação, carinho e apoio em todos os momentos da minha caminhada.

DEDICO

Aos meus pais Orlando e Maria e todos os meus familiares, especialmente ao meu sobrinho Murilo “*in memoriam*”.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela essência da vida e evolução pessoal e profissional.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Rural, pela oportunidade de desenvolvimento do trabalho e ao curso de Pós-Graduação Ecologia Aplicada – Interunidades – ESALQ/CENA, pela realização do curso.

Ao Programa Internacional de Bolsas de Pós-Graduação da Fundação Ford – IFP e a sua coordenação pela equipe da Fundação Carlos Chagas, pela concessão da bolsa de estudo e a Comissão Fulbright Brasil pela concessão da bolsa “sanduíche”.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa – edital CT-Hidro (CNPq) pela concessão do auxílio pesquisa.

Ao Prof. Dr. Marcos Vinicius Folegatti, pela orientação, amizade, confiança e conselhos em todos os momentos alegres ou difíceis.

Ao Prof. Dr. Richard H. Cuenca, pelos ensinamentos, amizade e confiança durante minha estada na Oregon State University.

Aos professores Sérgio Nascimento Duarte, Tarlei Arriel Botrel, Ênio Farias França e Silva, Claudinei Fonseca, René Porfírio Camponez do Brasil, Plínio Camargo, Walter de Paula Lima, Luiz Antonio Martinelli, Maria Victoria Ramos Ballester, Nilson Augusto Villa Nova pela ajuda, sugestões e informações.

Indistintamente aos colegas dos cursos de Pós-Graduação Ecologia Aplicada e Irrigação e Drenagem, a todos os companheiros e companheiras do Programa Bolsa da Fundação Ford.

As secretárias Beatriz, Márcia Fecchio, Marcinha, Estela, Roseli, Regina Freitas, Sandra, Davilmar e Vanda pela paciência e colaboração.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural, Hélio, Gilmar, Sr. Antonio, Osvaldo e Luis pela amizade durante todos esses anos.

Aos membros do Grupo de Prática em Irrigação e Drenagem pela colaboração no trabalho de campo e ajuda nas análises.

A minha família “Americana”, Pat, Oscar, Azzizz, Raul e Cris, demais colegas Alicia, Pat Brayan, Bene e Martine.

Aos colegas do Hydrology Science Team, Suva, Aristides, Yutaka, Peggy, Kent, Mike e Jeepe, pela amizade e diversão em Corvallis.

À família Oliveira pela acolhida como filho e irmão e pelo apoio durante esses anos.

A todos aqueles que diretamente ou indiretamente colaboram para a execução deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
1 INTRODUÇÃO	12
2 DESENVOLVIMENTO	14
2.1 Impacto ambiental e manejo da irrigação	14
2.2 Sustentabilidade dos recursos hídricos e da irrigação	18
2.3 Monitoramento, quantidade e qualidade da água	22
2.4 O modelo MIKE SHE	29
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	32
3.1 Descrição da área de estudo	32
3.2 Rede de drenagem da microbacia e pontos de coleta de água	35
3.3 Manejo da irrigação.....	38
3.4 Quantidade de água.....	40
3.5 Caracterização da irrigação	41
3.6 Análise dos dados	41
3.7 Avaliação do impacto ambiental da irrigação	41
3.8 Calibração do modelo	42
3.9 Simulação de cenários.....	44
3.10 Análise do desempenho do modelo.....	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1 Qualidade da água.....	49
4.2 Qualidade da água de irrigação.....	62
4.3 Quantidade de água.....	71
4.4 Sistemas de irrigação e manejo.....	73
4.5 Avaliação do desempenho do modelo MIKE SHE/11	82
4.6 Simulações.....	84
4.7 Impacto ambiental.....	90
5 CONCLUSÕES	92
REFERÊNCIAS.....	93

RESUMO

Impacto da Irrigação da microbacia hidrográfica do ribeirão do Marins

Atualmente a água é o recurso mais limitante para o desenvolvimento urbano, industrial e principalmente agrícola devido à constante contaminação em função da falta de planejamento e uso inadequado dos recursos hídricos pela humanidade. Assim o presente trabalho teve o objetivo de estudar o impacto ambiental da irrigação nos recursos hídricos da microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins e testar a capacidade do modelo hidrológico MIKE SHE em pequenas áreas irrigadas da microbacia e conseqüentemente detectar problemas relacionados à irrigação e a falta de manejo da água nessas áreas. Avaliou-se a qualidade da água de irrigação utilizada na produção de hortaliças; a qualidade da irrigação praticada pelos produtores, a quantidade de água na microbacia hidrográfica e simulou-se a área irrigada da microbacia. Os parâmetros de qualidade de água analisados foram: sedimentos em suspensão, pH, condutividade elétrica, alcalinidade, turbidez, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês, zinco, sódio, fósforo, sulfato, cloreto, nitrogênio amoniacal e nitrato, durante 10 meses. A qualidade da irrigação foi avaliada através do manejo da irrigação via tensiômetros, instalados em duas propriedades agrícolas e em duas profundidades, e avaliação do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) foi feito em quatro propriedades agrícolas. A avaliação do impacto ambiental foi feito por meio dos indicadores de qualidade da água e do CUC. Os dados coletados e avaliados permitiram concluir que a agricultura irrigada provoca pouco impacto na microbacia hidrográfica. De acordo com as classificações de Ayers e Westcot e USDA a água pode ser considerada boa para ser utilizada na agricultura. Observou-se que a umidade do solo no período amostrado ficou próxima da saturação. O uso do modelo para a simulação da área irrigada permitiu economia de água quando o manejo da irrigação foi utilizado.

Palavras-chave: Quantidade de água; Qualidade da água; Manejo da irrigação; Modelagem

ABSTRACT

Impact of irrigation at the Marins stream watershed

Nowadays the water is the most limiting resource to the urban, industrial and agricultural development due to constant contamination and inadequate water use by the mankind. Then this work aimed to study the environmental impact of irrigation at the Marins stream watershed and to check the ability of the model MIKE SHE in small irrigated area, consequently, to detect problems related with irrigation operations at the small watershed. It were evaluated the water quality used in the horticultural production, the irrigation quality practiced by the farmers, water quantity in the watershed and simulation was done for the irrigated area. The parameters analyzed were physicals and chemicals: suspense sediments, pH, electric conductivity, alkalinity, turbidity, potassium, calcium, magnesium, cupper, iron, manganese, zinc, sodium, phosphorus, sulfate, chlorine, ammonia nitrogen, and nitrate, during 10 months. The irrigation quality was evaluated through the irrigation management by tensiometers installed in two properties and two depths and by the Christiansen uniformity coefficient (CUC) measured in four properties. The environmental impact of irrigation was made by the water quality indicators and the CUC. The results permitted to conclude that irrigated agricultural causes few impact at the Marins stream watershed. The water showed a acceptable quality when compared with the classification proposed by Ayers & Westcot and USDA to irrigation. It was observed that the soil wet was near the saturation. The model allowed to save water when water management was used.

Keywords: Water quantity; Water quality; Irrigation management; Modeling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do modelo MIKE SHE (REFSGAARD et al., 1992)	31
Figura 2 – Localização da área de estudos – Microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins (Fonte: Casagrande, 2005)	34
Figura 3 – Pastagem degradada e aterro sanitário na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins	35
Figura 4 – Mapa da rede de drenagem da microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins e localização dos pontos de amostragens de água (Fonte: Casagrande 2005)	37
Figura 5 – Tensiômetros instalados em uma propriedade agrícola, a) área não irrigada e b) área irrigada	39
Figura 6 – Valores de precipitação mensal, ano 2005	48
Figura 7 – Variação temporal do sedimentos no ribeirão dos Marins	56
Figura 8 – Variação temporal da turbidez no ribeirão dos Marins	57
Figura 9 – Variação temporal do nitrato no ribeirão dos Marins	57
Figura 10 – Variação temporal da amônia no ribeirão dos Marins	57
Figura 11 – Variação temporal do fósforo total no ribeirão dos Marins	58
Figura 12 – Variação temporal do magnésio no ribeirão dos Marins	58
Figura 13 – Variação temporal do cálcio no ribeirão dos Marins	58
Figura 14 – Variação temporal do potássio no ribeirão dos Marins	59
Figura 15 – Variação temporal do sódio no ribeirão dos Marins	59
Figura 16 – Variação temporal do ferro no ribeirão dos Marins	59
Figura 17 – Variação temporal do manganês total no ribeirão dos Marins	60
Figura 18 – Variação temporal da dureza no ribeirão dos Marins	60
Figura 19 – Variação temporal da alcalinidade total no ribeirão dos Marins	60
Figura 20 – Variação temporal do pH no ribeirão dos Marins	61
Figura 21 – Variação temporal da condutividade elétrica da água no ribeirão dos Marins	61
Figura 22 – Variação da condutividade elétrica da água na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins ao longo do ano, ponto 1	67
Figura 23 – Variação da condutividade elétrica da água na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins ao longo do ano, ponto 2	67
Figura 24 – Variação da condutividade elétrica da água na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins ao longo do ano, ponto 3	68
Figura 25 – Variação da condutividade elétrica da água na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins ao longo do ano, ponto 4	68
Figura 26 – Variação da condutividade elétrica da água na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins ao longo do ano, ponto 5	69

Figura 27 – Variação da condutividade elétrica da água na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins ao longo do ano, ponto 6.....	69
Figura 28 – Variação da condutividade elétrica da água na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins ao longo do ano, ponto 7.....	70
Figura 29 – Vazões médias registradas na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins.....	72
Figura 30 – Vazões médias registradas na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins.....	72
Figura 31 – Curva característica de retenção de água no solo, propriedade 1, profundidade de 0-20 cm	75
Figura 32 – Curva característica de retenção de água no solo, propriedade 1, profundidade de 20-40 cm	75
Figura 33 – Curva característica de retenção de água no solo, propriedade 2, profundidade de 0-20 cm	76
Figura 34 – Curvas característica de retenção de água no solo, propriedade 2, profundidade de 20-40 cm	76
Figura 35 – Umidade do solo na área de estudo irrigada da propriedade 1, profundidade de 0-20 cm	77
Figura 36 – Umidade do solo na área de estudo irrigada da propriedade 1, profundidade de 20-40 cm	77
Figura 37 – Umidade do solo na área de estudo não irrigada da propriedade 1, profundidade de 0-20 cm	78
Figura 38 – Umidade do solo na área de estudo não irrigada da propriedade 1, profundidade de 20-40 cm	78
Figura 39 – Umidade do solo na área de estudo irrigada da propriedade 2, profundidade de 0-20 cm	79
Figura 40 – Umidade do solo na área de estudo irrigada da propriedade 2, profundidade de 20-40 cm	80
Figura 41 – Umidade do solo na área de estudo adjacente na propriedade 2, profundidade de 0-20 cm	80
Figura 42 – Umidade do solo na área de estudo adjacente na propriedade 2, profundidade de 20-40 cm	81
Figura 43 – Comparação dos resultados da vazão observada e simulada para o período de calibração (a) e validação (b)	83
Figura 44 – Volumes de irrigação para os cenários simulados.....	86
Figura 45 – Variação temporal da umidade do solo período de simulação.....	87
Figura 46 – Balanço Hídrico do período simulado, janeiro de 2000 a fevereiro de 2002.....	88
Figura 47 – Variação temporal da precipitação e da evapotranspiração para o período simulado.....	89
Figura 48 – Detalhe do vazamento de água em uma propriedade produtora de hortaliças.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais problemas resultantes da falta de manejo na irrigação e drenagem não sustentável e medidas mitigadoras apropriadas	15
Tabela 2 – Diretrizes para interpretação da qualidade da água para irrigação	24
Tabela 3 – Condições e padrões da Classe 1 – Águas doces	28
Tabela 4 – Propriedades dimensionais da rede de drenagem e da microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins	36
Tabela 5 – Valores finais dos parâmetros calibrados para o modelo MIKE SHE e MIKE 11	44
Tabela 6 – Valores de critérios para avaliação do desempenho do modelo	47
Tabela 7 – Resumo da análise de variância dos parâmetros de qualidade da água: oxigênio dissolvido (OD), nitrato (NO_3^-), amônia (NH_3), fósforo total (PO_4^-), potássio (K), sódio (Na^{2+}) e condutividade elétrica da água (CEa)	50
Tabela 8 – Resumo da análise estatística do teste de Tukey para comparação de médias dos parâmetros de qualidade da água:	51
Tabela 9 – Concentração média em mg L ⁻¹ de amostras de água coletada de fevereiro a dezembro de 2005	51
Tabela 10 – Valores mínimos e máximos da variáveis de qualidade de água da microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins medidos de fevereiro a dezembro de 2005	53
Tabela 11 – Valores médios da variáveis de qualidade de água da microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins nos períodos seco (PS) e período úmido (PU)	55
Tabela 12 – Valores de condutividade elétrica da água, razão de adsorção de sódio, sódio, classificação e risco de salinização	63
Tabela 13 – Resultados de vazão média, vazão obtido pela metodologia de regionalização das variáveis hidrológicas para o Estado de São Paulo	71
Tabela 14 – Coeficientes de uniformidade determinados em 4 propriedades agrícolas da microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins	74
Tabela 15 – Valores de umidade na capacidade de campo, ponto de murcha permanente, umidade crítica, lâmina de água disponível e lâmina real disponível	82
Tabela 16 – Valores estatísticos de avaliação do modelo para os períodos de calibração e validação	83
Tabela 17 – Valores dos volumes médios aplicados na área irrigada durante a simulação	84

1 INTRODUÇÃO

A água é um dos recursos naturais mais importantes para a manutenção dos ecossistemas. Entretanto, com o aumento de sua demanda em relação à disponibilidade observa-se uma maior degradação de sua qualidade. Por outro lado a preocupação com a preservação ambiental, especialmente com os ecossistemas aquáticos, aumentou entre os setores usuários d'água, e um dos setores que mais causa preocupação à sociedade é o setor agrícola, através do uso da água na produção de alimentos por meio da irrigação.

A produção agrícola realizada com planejamento, acompanhamento técnico e práticas de manejo integrado de pragas e doenças reduz o risco de degradação dos recursos hídricos. A irrigação é uma prática que beneficia o aumento da produção de alimentos, fixa o homem na zona rural, gera empregos diretos e indiretos e contribui para o crescimento econômico. Por outro lado quando não praticada corretamente ocasiona prejuízos ao ambiente dentre os quais destacam-se a salinização dos solos, captação excessiva de água de mananciais, percolação profunda, lixiviação de nutrientes, etc. No entanto, o lançamento de esgoto urbano e industrial sem tratamento também é um dos principais fatores de contribuição de deterioração da qualidade da água.

A conservação dos recursos hídricos está intimamente ligada com a qualidade das microbacias, ou seja, com a conservação de nascentes, mata-ciliares, uso adequado do solo e cobertura vegetal. Esses fatores são regulamentados por leis para assegurar que as atividades antrópicas alterem o mínimo possível a dinâmica e o ecossistema das microbacias.

Portanto, há necessidade de se conhecer o potencial hídrico das microbacias e os efeitos negativos que as atividades antrópicas acarretam ao ambiente. Deste modo para que a agricultura irrigada continue seu crescimento, sem comprometer a qualidade e quantidade de água é essencial diagnosticar e caracterizar microbacias definindo-se as quais são aptas para a prática da agricultura irrigada e aquelas aptas para a captação de água para abastecimento público e industrial.

A degradação da rede hidrológica das microbacias é prejudicial aos usuários. No município de Piracicaba, um dos maiores problemas ambientais nas bacias

hidrográficas, está relacionado a qualidade e quantidade de água. A ocupação desordenada, a falta de planejamento urbano e rural e o descaso na proteção ambiental causam desequilíbrio e degradação. Na microbacia do ribeirão dos Marins a situação não é diferente: a intensiva exploração de recursos, lançamento de esgoto urbano e industrial, atividades agrícolas e florestais vem causando desequilíbrio no seu ecossistema. Assim este trabalho teve o objetivo de estudar o impacto ambiental da irrigação na microbacia do ribeirão dos Marins e testar o modelo hidrológico MIKE SHE em pequenas áreas irrigadas, avaliando-se a qualidade da água de irrigação utilizada na produção de hortaliças, a qualidade da irrigação praticada pelos produtores, através do manejo da irrigação e a avaliação de sistemas de irrigação.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Impacto ambiental e manejo da irrigação

De acordo com a FAO (1997), o desenvolvimento da irrigação pode causar impacto ambiental positivo ou negativo. O aspecto positivo da irrigação é que intensificando a produção de alimentos e forrageiras nas terras mais favoráveis, é possível permitir a um país reduzir a pressão nas terras marginais, pois essas terras já estão em processo de degradação. O impacto ambiental potencialmente negativo do desenvolvimento da irrigação pode ocorrer fora ou dentro da propriedade agrícola. Fora da propriedade, o efeito pode acontecer à montante, onde o rio pode ser represado com fins de fornecimento de água. Outro conjunto de problemas pode ser gerado à jusante da área irrigada pela disposição de água, que pode conter concentrações elevadas de sais, dejetos orgânicos, organismos patogênicos e resíduos agroquímicos. Dentro da propriedade, o efeito pode ocorrer na forma de escoamento superficial, percolação profunda, salinização e encharcamento do solo de acordo com o método de irrigação utilizado.

Diferentes métodos de irrigação podem ter diferentes impactos e não pode ser assumido que métodos como a irrigação localizada pode ter menor impacto. É preciso levar em consideração os aspectos relacionados ao consumo de energia, bem como a quantidade de mão-de-obra utilizada (DOUGHERTY; HALL, 1995). Na Tabela 1 estão apresentados os principais problemas ambientais que a irrigação pode ocasionar.

Tabela 1 – Principais problemas resultantes da falta de manejo na irrigação e drenagem não sustentável e medidas mitigadoras apropriadas

Problema	Medidas mitigadoras
Excesso ou déficit de aplicação de água	- adequação do quanto e quando saber irrigar.
Sais oriundos do processo de drenagem	- Instalação de drenagem incluindo disposição de bacias para evaporação da água se a qualidade do fluxo do rio é afetada adversamente pela água de drenagem.
Evitar encharcamento	- Fornecer água para lixiviação como uma operação específica.
Acidificação do solo	- Organização ou ajuste da infra-estrutura de manejo da irrigação para assegurar suficiente recursos financeiros para manter ambos os sistemas de irrigação e drenagem. - Análise de solo e monitoramento de mudanças para que potenciais problemas possam ser manejados.
Baixa qualidade da água	Definir níveis de qualidade de água (incluindo monitoramento e tratamento).
Redução na qualidade da irrigação	Desenvolvimento do controle de qualidade nas indústrias.
Problemas da qualidade da água para usuários à jusante causados pelo fluxo de retorno da irrigação	- Designar terras para disposição de água salina construindo canais de disposição separados. - Instituir sistema de saneamento contra perigo de contaminação com esgoto e pesticidas - Monitorar a qualidade da água.
Degradação ecológica	- Adequação de áreas em função de legislação.
Redução da biodiversidade	- Operação de sistema de gestão visando a vida silvestre ao redor dos reservatórios e com base que permitam a manutenção de fauna e flora em leis.
Danos ao ecossistema à jusante devido à redução da quantidade e da qualidade da água	- Designar terras para várzeas e disposição de água de drenagem.
Depleção da água subterrânea	- Definir regulamentação.
Secamento de poços	- Monitorar o nível de água subterrânea.

Adaptado de Dougherty; Hall, 1995

Hill e Walter (2003), afirmam que a prática da irrigação necessita de uma fonte de água, condução até o campo, aplicação da água no solo e coleta para o reuso. Esses processos alteram a hidrologia da bacia e a qualidade da água no espaço e no

tempo, sendo que o efeito da irrigação na bacia hidrográfica pode ser resumido em uma palavra: depleção. Depleção, neste contexto, é a abstração consuntiva de água do sistema hidrológico como resultado da irrigação. Geralmente, a depleção é causada por muitos fatores incluindo a quantidade e o tempo de captação, o tipo de estrutura de captação, a cultura plantada, o tipo de solo, a profundidade do lençol freático, o método de irrigação, a eficiência da irrigação, a área irrigada, a evapotranspiração, a água subterrânea e a água de irrigação. Os mesmos autores argumentam que em estudos hidrológicos é comum quantificar o impacto sobre os rios dos quais a água é desviada, os quais podem ser de dois tipos: 1) desvio que reduz a descarga e 2) água de retorno da irrigação que aumenta a descarga.

O impacto no fluxo de rios pode ser completamente diferente entre os vários métodos de irrigação. A natureza da irrigação por superfície geralmente produz escoamento superficial, o qual pode ser imediatamente armazenado e reusado, bem como a percolação, a qual pode não estar disponível para reuso depois de um período de tempo. A percolação profunda é reduzida com a irrigação por aspersão comparada com a irrigação convencional por superfície, enquanto que com o gotejamento a percolação profunda pode ser mais reduzida.

As preocupações mais diretas com os impactos são dentro da área irrigada, pois terras irrigadas, especialmente em vales, tendem a elevação do lençol freático, exigindo drenagem, ou seja, são áreas sujeitas aos processos de salinização e encharcamento (FAO,1997).

De acordo com Sakthivadivel e Sally (2003), o fluxo salino para rios ou reservatórios pode ser minimizado através de intervenções que reduzam a percolação profunda e o escoamento superficial. Similarmente, a poluição causada por movimento de sais no fluxo de retorno da irrigação pode ser reduzida pela minimização da passagem desses fluxos por solos ou água subterrânea salinas. A depleção da água pode ser reduzida das seguintes formas: 1) redução da evaporação da água aplicada via irrigação nos campos, pela adoção de técnicas de precisão apropriadas como gotejamento ou práticas agronômicas como uso de mulching ou mudando a data de plantio para época de menor demanda evaporativa; 2) reduzindo a evaporação da área

não plantada; 3) diminuindo a superfície livre de água; e 4) desviando água salina ou poluída direto para reservatórios sem diluição em água doce.

Uma alternativa para a mitigação do impacto ambiental da irrigação está na prática de um bom manejo da água dentro do ecossistema agrícola. Segundo Clyma et al. (2003), o impacto ambiental da irrigação pode ser minimizado com o manejo que melhora a produtividade, reduz impactos ambientais, melhora o ambiente dos rios e disponibiliza água que pode ser usada para outros propósitos.

Sakthivadivel e Sally (2003), salientam que a agricultura irrigada tem uma contribuição fundamental na produção de alimentos, mas preocupações também têm sido expressadas sobre seu desempenho e algumas indesejáveis conseqüências, tais como a falta de investimentos no setor de irrigação e os impactos ambientais. Assim, o desafio é encontrar caminhos para melhorar e manter a produção de alimentos e bens materiais fazendo uso sustentável dos recursos disponíveis e não degradar solos e água. Portanto, a área agrícola pode ser aumentada pela expansão da irrigação ou aumentando a produtividade através da adoção de práticas agrícolas apropriadas e práticas de manejo da água que conservem solos e a própria água. Medidas podem incluir desenvolvimento de variedades mais produtivas, promovendo técnicas inovadoras de baixo custo para aplicação e conservação da água, uso conjunto de águas superficiais e subterrâneas e implementação de políticas institucionais para assegurar o manejo integrado dos recursos hídricos em nível de bacia hidrográfica, reconhecendo o uso de água.

A melhora no manejo da água reduz encharcamento e salinidade porque o volume lixiviado e o total de sal retornado ao rio são reduzidos. A água liberada no fluxo de retorno melhora a qualidade da água no rio e fornece mais água para peixes e vida selvagem, evidenciando que um manejo cuidadoso pode conduzir a uma agricultura irrigada permanente (CLYMA et al., 2003). De acordo com os referidos autores, com a melhoria do manejo, implica em aumento de produtividade, redução dos impactos ambientais da irrigação e aumento da disponibilidade de água acompanhado de conservação. Argumentam ainda que o manejo sustentável da água deva atingir efetivamente a irrigação, manejando-se a salinidade para limitar impacto e deva ter

como foco a capacitação do agricultor com o objetivo de aplicar o volume adequado de água na produção de alimentos.

Quando o manejo da água para a agricultura, especialmente em áreas onde a água mais do que a terra é o fator limitante, é usual mudar o foco do aumento da produtividade da terra para conservação da água, o qual identifica e adota práticas de manejo agrícola e da água que atinjam maior produção por volume de água consumido. Isso irá incluir seleção de culturas ou variedades que consumam menos água e melhoramento nas práticas de preparo de solo e aplicação de fertilizantes. Por outro lado, a irrigação com déficit, irrigação complementar ou de precisão que permitem melhor controle, tempo e confiabilidade dos suplementos de água permitem ao irrigante aplicar limitada quantidade de água para as culturas no tempo e na quantidade que auxilie a ótima resposta da cultura a água, disponibilizando mais água para outros usos (SAKTHIVADIVEL; SALLY, 2003).

O sucesso da agricultura irrigada exige esforço social, mas certamente medidas institucionais devem ser conduzidas para o progresso do gerenciamento dos recursos hídricos (SKOGERBOE, 2003).

2.2 Sustentabilidade dos recursos hídricos e da irrigação

As áreas irrigadas têm aumentado rapidamente nos últimos 30 anos, colaborando com a expansão da produção agrícola e o crescimento populacional. A irrigação usa uma grande fração de água doce em quase todos os países. Globalmente, 70% da água desviada dos mananciais para propósitos humanos vai para a agricultura, e a área irrigada ainda está em expansão; com isso a demanda de água para atividade da irrigação também está crescendo. Em alguns países, a expansão do uso da água superficial parece estar se aproximando do limite físico, e a extração da água subterrânea excedendo a capacidade da taxa de recarga. Entretanto, a demanda de água industrial e doméstica tem aumentado rapidamente como resultado do crescimento do desenvolvimento econômico e urbano. Em alguns países e regiões a água já está sendo transferida da irrigação para os usos industrial e urbano diminuindo

o volume de água antes disponível para a produção de alimentos com a agricultura irrigada (ROSEGRANT; RINGLER, 2000).

O uso da irrigação tem proporcionado uma produção de alimentos crescente ao longo dos anos e melhorado a qualidade de vida no meio rural; porém experiências revelam problemas e falhas no manejo da agricultura irrigada, tais como, aumento do uso da água, baixa eficiência e problemas ambientais são considerados os principais problemas do setor de irrigação.

Os problemas ambientais incluem excessiva captação da água, redução da qualidade da água, encharcamento e salinização. A acentuada redução anual da descarga de alguns dos principais rios do mundo tem sido atribuída em parte a grande captação causada pela agricultura irrigada. Em algumas bacias, excessiva retirada da água dos rios para irrigação tem causado desastres ambientais e ecológicos em áreas à jusante, e bombeamento da água subterrânea a taxas elevadas tem contribuído para o rebaixamento do lençol freático e entrada de água salina em algumas áreas costeiras. Muitos problemas de qualidade de água têm sido provocados ou agravados pela alteração no deflúvio associada com o uso consultivo da agricultura. Portanto, práticas inapropriadas da irrigação acompanhada por inadequada drenagem têm, freqüentemente, prejudicado solos através do encharcamento e da salinização (CAI et al., 2003). A FAO estima que 60-80 milhões de hectares por ano são afetados em vários níveis por excesso de umidade e salinidade (FAO, 1996). Finalmente, estas irrigações induzem problemas e ameaças ambientais não apenas em sistemas de produções agrícolas, mas também de saúde e no ambiente humano (CAI et al., 2003).

Segundo Sanz (1999), a agricultura irrigada tem uma grande importância econômica e é o principal consumidor de água. Mas o uso da irrigação não deve visar somente à rentabilidade do produtor; é necessário introduzir considerações ecológicas e socioeconômicas para manter os serviços ambientais (várzeas, biodiversidade, recursos naturais: solo; fertilidade; água – quantidade e qualidade), o qual tem influência direta nas atividades humanas.

O conceito de desenvolvimento sustentável foi introduzido numa versão moderna pelo relatório “Nosso Futuro Comum”, preparado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, cuja definição para desenvolvimento sustentável é:

“quando provê as necessidades da geração atual sem comprometer a habilidade de que às futuras gerações possam prover as suas”. Isto quer dizer que a espécie humana deve utilizar os recursos naturais de forma a não alterar as atuais condições do equilíbrio da biosfera, o qual depende do equilíbrio climático atual e da biodiversidade existente (SALATI et al., 2002). De acordo com Ongley (1996), o desenvolvimento sustentável ainda deve incluir o manejo e a conservação de recursos naturais básicos e que a orientação tecnológica e institucional mude de maneira que assegure o alcance e a contínua satisfação das necessidades humanas conservando terra, água, plantas e recursos genéticos animais, ambientalmente não degradante, tecnicamente apropriada, economicamente viável e socialmente aceitável.

Atualmente este conceito de desenvolvimento sustentável é reconhecido por pesquisadores como um tópico de pesquisa importante na preservação dos recursos hídricos (LOUCKS¹, 2000, apud CAI et al., 2002), com intuito de evitar o agravamento da escassez de água e reduzir a poluição dos corpos d’água.

Segundo Salati et al. (2002), nos chamados ecossistemas produtivos, especialmente aqueles relacionados com a produção agrícola e florestal, a análise da sustentabilidade poderá ser feita tomando-se por base o balanço hídrico das bacias hidrográficas. Para uma determinada bacia hidrográfica, a sustentabilidade produtiva com reflexos na sustentabilidade social e econômica poderá ser analisada também pela capacidade da produção primária. Neste caso, porém, o enfoque deve ser a biomassa comercializada, ou seja, os grãos, as fibras, proteínas, frutos, flores, madeiras, etc. A manutenção da sustentabilidade desses ecossistemas de produção, dentro de uma escala de tempo dependerá de avanços tecnológicos, implementação de mecanismos de proteção dos recursos naturais renováveis centrados na conservação do solo, recursos hídricos e biodiversidade.

Conferências nacionais, internacionais, grupos de trabalhos ou comitês têm identificado alguns princípios e diretrizes gerais em sustentabilidade de recursos hídricos. Estes encontros apresentam resultados que refletem alguns conceitos importantes de sustentabilidade hídrica planejada, como gerenciamento da demanda, confiabilidade e flexibilidade de abastecimento, controle de impactos negativos,

¹ LOUCKS, D.P. Sustainable water resources management. **Water International**, Urbana, v.25, n.1, p.3-11, 2000.

adaptação de tecnologia, viabilidade e eficiência econômica. Enquanto estas diretrizes provêm ajuda e direcionamento para planejamento e tomada de decisão, elas não foram traduzidas em conceitos operacionais que podem ser aplicados a regiões específicas para gerenciamento e manutenção de recursos hídricos (BISWAS², 1994, apud CAI et al., 2002).

Critérios que incorporem sustentabilidade e quantidade de recursos hídricos são necessários para especificar as relações entre usos da água e as conseqüências em longo prazo combinando disponibilidade atual e futura.

No contexto hidrográfico, gerenciamento sustentável de recursos hídricos pode ser definido como provisão de água em longo prazo, estável, e flexível assegurando capacidade para demanda de água das culturas, bem como o crescimento das demandas de água municipais e industriais (CAI et al., 2002).

No caso específico da agricultura paulista, é importante destacar a necessidade de superação do atual padrão de uso dos recursos naturais e da exploração da força de trabalho em prol da construção de novas alternativas de desenvolvimento para áreas rurais. Nesse Estado, tal superação assume especial importância porque requer, dentre outros, a construção de modelos alternativos de agricultura que sejam capazes de assegurar emprego e renda para a população cujas habilidades não conseguem ser aproveitadas fora da atividade agrícola. Sob o aspecto sócio-ambiental e, particularmente, de uso da água, a própria política nacional de recursos hídricos define como um de seus fundamentos a garantia do uso múltiplo da água, o que implica o uso planejado e integrado do recurso por parte dos segmentos de usuários. Por essa razão, a construção de propostas de desenvolvimento territorial para as áreas rurais paulistas exigirá necessariamente um amplo esforço do setor agrícola, não só para a otimização do consumo de água, mas também para o controle dos insumos (sobretudo dos agroquímicos) que, por conta da ação das chuvas e das técnicas mal planejadas de irrigação, são carregados para os corpos d'água, prejudicando, assim os usos à jusante. (FELICIDADE et al., 2004).

² BISWAS, A.K. Sustainable water resources development: some personal thoughts. **International Journal Water Resources**, Dublin, v.10, n.2, p.109-116, 1994.

2.3 Monitoramento, quantidade e qualidade da água

As informações são indispensáveis para um adequado desenvolvimento dos recursos hídricos dentro de bases sustentáveis. A falta de informações aumenta a incerteza das decisões e dos resultados dos usos e impactos dos recursos hídricos (BRAGA et al, 2002a).

A melhor maneira de obter informações sobre recursos hídricos é através do monitoramento quantitativo e qualitativo, instrumento que possibilita a avaliação da oferta hídrica, aproveitamento múltiplo e integrado da água e visa à minimização de impactos ao ambiente (PORTO et al., 1991). A qualidade da água depende diretamente da quantidade de água existente para dissolver, diluir e transportar as substâncias benéficas e maléficas para o ecossistema (BRAGA et al., 2002b).

O conceito de monitoramento da qualidade da água é muito mais amplo do que o simples verificar se os padrões legais de qualidade da água estão sendo obedecidos ou não. Deve atender à necessidade de se responder o que está ocorrendo (BRAGA et al, 2002a) e ser utilizado para auxiliar gerenciadores de recursos hídricos a entender e prevenir potenciais impactos negativos provenientes de fatores naturais ou antropogênicos em nossos recursos hídricos (PETERS; WARD, 2003).

A implantação de um programa de monitoramento para caracterização espacial e temporal da qualidade de um corpo d'água exige esforços que variam de acordo com os objetivos de utilização dos dados gerados e da finalidade de uso da água (COIMBRA, 1991).

De acordo com Benetti e Bidone (2002), a implantação de uma rede de monitoramento da qualidade da água pode ter os seguintes objetivos: avaliação da qualidade da água para determinar sua adequabilidade para os usos propostos; acompanhar a evolução da qualidade do manancial ao longo do tempo, como reflexo do uso do solo da bacia e de medidas de controle da poluição adotadas; avaliação do ambiente aquático como um todo, considerando, além da água, sedimentos e material biológico. Peters e Ward (2003), destacam que o monitoramento da quantidade e qualidade da água em longo prazo deve ser consistente e comparável para por exemplo, descrever o estado e a tendência dos recursos hídricos, identificar existente e emergente problemas na qualidade da água e determinar as ações e regras.

A avaliação da água poderá ser feita pela composição dos resultados obtidos com os padrões de qualidade estabelecidos para a classe em que está enquadrado o manancial. Outro método que vem tendo aplicação crescente é o da utilização de índices de qualidade da água. Muitos índices de qualidade da água têm sido desenvolvidos. Ele se apresenta como um número graduado de 0 a 100 representativo da qualidade da água amostrada (BENETTI; BIDONE, 2002). O uso de índices de qualidade de água é uma tentativa que todo programa de monitoramento de águas superficiais prevê como forma de acompanhar, através de informações resumidas, a possível deterioração dos recursos ao longo da bacia hidrográfica ou ao longo do tempo (TOLEDO; NICOLELLA, 2002). Segundo Peters e Ward (2003), os dados devem conduzir para informações que sejam de relevância para o manejo dos recursos hídricos.

O monitoramento da água é uma atividade crítica para manejo da água que infelizmente não tem identificado um caminho para organizar sua ajuda e para maximizar o valor dos dados e a informação produzida pelo monitoramento (PETERS; WARD, 2003).

De acordo com Markowitz et al. (2003), o monitoramento é o componente chave da proteção ambiental e procura organizar uma série de atividades seqüenciais para produzir e transmitir informações sobre recursos hídricos.

Assim, a agricultura irrigada é dependente de um adequado suprimento de água utilizável e de boa qualidade (AYERS; WESTCOT, 1985) necessitando de um monitoramento periódico de avaliação da água usada para esta atividade.

Conceitualmente, qualidade da água refere-se as características do suplemento de água que irá influenciar sua sustentabilidade para específico uso. Qualidade é definida por certas características químicas, físicas e biológicas. Em irrigação a avaliação, enfatiza as características físicas e químicas da água (AYERS; WESTCOT, 1985).

A Tabela 2 apresenta diretrizes para interpretação da qualidade da água para irrigação. Nesta tabela são apresentados valores para os principais parâmetros que influenciam a qualidade da água usada para irrigação relacionados ao equipamento, a cultura e ao solo.

Tabela 2 – Diretrizes para interpretação da qualidade da água para irrigação

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valores para uso na irrigação
Salinidade			
Condutividade Elétrica	CEa	$\mu\text{S cm}^{-1}$	0 – 3000
Grau de restrição de uso	Nenhuma	Ligeira e Moderada	Severa
	<700	700 – 3000	>3000
	Ou		
Total de sólidos dissolvidos	TDS	mg L^{-1}	0 – 2000
Cátions e Ânions			
Cálcio	Ca^{2+}	mg L^{-1}	0 – 800
Magnésio	Mg^{2+}	mg L^{-1}	0 – 120
Sódio	Na^{+}	mg L^{-1}	0 – 900
Carbonato	CO_3^{2-}	mg L^{-1}	0 – 6
Bicarbonato	HCO_3^{-}	mg L^{-1}	0 – 600
Cloro	Cl^{-}	mg L^{-1}	0 – 1100
Sulfato	SO_4^{-2}	mg L^{-1}	0 – 2000
Nutrientes			
Nitrogênio-Nitrato	$\text{NO}_3\text{-N}$	mg L^{-1}	0 – 10
Nitrogênio Amônio	$\text{NH}_4\text{-N}$	mg L^{-1}	0 – 5
Fósforo Fosfato	$\text{PO}_4\text{-P}$	mg L^{-1}	0 – 2
Potássio	K^{+}	mg L^{-1}	0 – 2
outros			
Boro	B	mg L^{-1}	0 – 2
Ácido/Base	pH		6,0 – 8,5
Razão de adsorção de Sódio	RAS		0 – 15

Adaptado de Ayers e Westcot (1985) e Peterson (1999).

É importante distinguir a diferença entre os conceitos de poluição e contaminação de um manancial durante a avaliação da qualidade da água para o uso a qual se destina.

Entende-se por poluição a alteração de suas características por quaisquer ações ou interferências, sejam elas naturais ou provocadas pelo homem. Essas alterações podem produzir impactos estéticos, fisiológicos ou ecológicos. O conceito de poluição da água tem-se tornado cada vez mais amplo em função de maiores exigências com relação à conservação e ao uso racional dos recursos hídricos (BRAGA et. al., 2002b).

A contaminação refere-se à transmissão de substâncias ou microrganismos nocivos à saúde pela água. A ocorrência da contaminação não implica necessariamente um desequilíbrio ecológico. Assim, a presença na água de organismos patogênicos prejudiciais ao homem não significa que o meio ambiente esteja ecologicamente desequilibrado. De maneira análoga, a ocorrência de poluição não implica necessariamente riscos à saúde de todos os organismos que fazem uso dos recursos hídricos afetados (BRAGA et. al., 2002b).

A poluição das águas tem como origem fontes, dentre as quais se destacam: a) efluentes domésticos; b) efluentes industriais e; c) carga difusa urbana e agrícola (CETESB, 2005). Segundo Ongley (1996), a fonte não pontual, também conhecida como difusa, é proveniente de um conjunto de atividades humanas para qual os poluentes não tem um ponto óbvio para entrada nos corpos hídricos.

O deflúvio superficial agrícola apresenta características diferentes. Os seus efeitos dependem muito das práticas agrícolas utilizadas em cada região e da época do ano em que se realizam a preparação do solo para o plantio, a aplicação de fertilizantes, defensivos agrícolas e a colheita. A contribuição representada pelo material proveniente da erosão intensifica-se quando da ocorrência de chuvas em áreas rurais (CETESB, 2005). Os poluentes resultantes do deflúvio superficial agrícola são constituídos de sedimentos, nutrientes, agroquímicos e dejetos animais. Para as condições brasileiras, não se tem quantificado o quanto esses poluentes contribuem para a degradação dos recursos hídricos (MERTEN; MINELLA, 2002).

O “runoff” agrícola é uma importante fonte de poluentes na bacia. Como uma consequência das atividades urbanas e agrícolas, a concentração de nutrientes (NO_3^- , PO_4^-) e metais traços (Cu, Cd, Pb, Zn, Cr, Ni e Hg) em sedimentos e água superficiais tem excedido as recomendações para proteção dos ecossistemas aquáticos. Quando da necessidade de estudos específicos de qualidade de água em determinados trechos de rios ou reservatórios, com vistas a diagnósticos mais detalhados, outras variáveis podem vir a ser determinadas, tanto em função do uso e ocupação do solo na bacia contribuinte, atuais ou preteridos, quanto pela ocorrência de algum evento excepcional na área em questão (CETESB, 2005).

Proteção e restauração dos recursos hídricos exige a participação de todos em projetos e aplicação de estratégias que reconheça a diversidade de interesses e integre ciência com fatores sociais, econômicos e culturais (MARKOWITZ et al., 2003).

Porém, segundo Ayres e Westcot (1985), a preocupação com a qualidade da água era freqüentemente negligenciada por causa da boa qualidade dos suprimentos de água pleno e prontamente disponível. Esta situação agora está mudando em muitas áreas. Intensivo uso de todos os suprimentos de boa qualidade significa que novos projetos de irrigação e velhos projetos buscam novos suprimentos e fontes menos

desejáveis, devendo confiar na baixa qualidade. Para evitar problemas quando do uso desses suprimentos de baixa qualidade deve haver planejamento para assegurar que a qualidade de água disponível seja colocada para o melhor uso.

No Brasil, a classificação das águas foi estabelecida pela Resolução n. 357, de 17 de março de 2005 pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), sendo a mais utilizada para comparar o nível de qualidade das águas brasileiras para os diversos usos, inclusive o uso na irrigação, como os trabalhos de Gonçalves et al. (2005), Brito et al. (2005), Vanzela (2004) entre outros.

A resolução CONAMA 357 (2005) estabelece critérios de classificação para águas doces, classificando as em:

I - classe especial, águas destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, com desinfecção;
- b) à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; e,
- c) à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.

II - classe 1, águas que podem ser destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado;
- b) à proteção das comunidades aquáticas;
- c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA n. 274, de 2000;
- d) à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; e
- e) à proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.

III - classe 2, águas que podem ser destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional;
- b) à proteção das comunidades aquáticas;
- c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA n. 274, de 2000;

- d) à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e
- e) à aqüicultura e à atividade de pesca.

IV - classe 3, águas que podem ser destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado;
- b) à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras;
- c) à pesca amadora;
- d) à recreação de contato secundário; e
- e) à dessedentação de animais.

V - classe 4, águas que podem ser destinadas:

- a) à navegação; e
- b) à harmonia paisagística.

De acordo com a CONAMA 357 (2005) aplicam-se às águas doces de classe 2 as condições e padrões da classe 1 (Tabela 3), à exceção do seguinte:

I - não será permitida a presença de corantes provenientes de fontes antrópicas que não sejam removíveis por processo de coagulação, sedimentação e filtração convencionais;

II - coliformes termotolerantes: para uso de recreação de contato primário deverá ser obedecida a Resolução CONAMA n. 274, de 2000. Para os demais usos, não deverá ser excedido um limite de 1.000 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 6 (seis) amostras coletadas durante o período de um ano, com frequência bimestral. A E. coli poderá ser determinada em substituição ao parâmetro coliformes termotolerantes de acordo com limites estabelecidos pelo órgão ambiental competente;

III - cor verdadeira: até 75 mg Pt L⁻¹;

IV - turbidez: até 100 UNT;

V - DBO 5 dias a 20°C até 5 mg L⁻¹ O₂;

VI - OD, em qualquer amostra, não inferior a 5 mg L⁻¹ O₂;

VII - clorofila a: até 30 µg L⁻¹;

VIII - densidade de cianobactérias: até 50000 cel mL⁻¹ ou 5 mm³ L⁻¹; e,

IX - fósforo total:

a) até 0,030 mg L⁻¹, em ambientes lênticos; e,

b) até 0,050 mg L⁻¹, em ambientes intermediários, com tempo de residência entre 2 e 40 dias, e tributários diretos de ambiente lêntico.

Tabela 3 – Condições e padrões da Classe 1 – Águas doces

Padrões	
Parâmetros	Valor máximo
Sólidos dissolvidos totais	500 mg L ⁻¹
Boro total	0,5 mg L ⁻¹ B
Cloreto total	250 mg L ⁻¹ Cl
Cloro residual total (combinado + livre)	0,01 mg L ⁻¹ Cl
Cobre dissolvido	0,009 mg L ⁻¹ Cu
Ferro dissolvido	0,3 mg L ⁻¹ Fe
Fósforo total (ambiente lêntico)	0,020 mg L ⁻¹ P
Fósforo total (ambiente lótico e tributários de ambientes intermediários)	0,1 mg L ⁻¹ P
Manganês total	0,1 mg L ⁻¹ Mn
Nitrato	10,0 mg L ⁻¹ N
Nitrogênio amoniacal total	3,7mg L ⁻¹ N, para pH 7,5
	2,0 mg L ⁻¹ N, para 7,5 < pH 8,0
	1,0 mg L ⁻¹ N, para 8,0 < pH 8,5
	0,5 mg L ⁻¹ N, para pH > 8,5
Sulfato total	250 mg L ⁻¹ SO ₄
Sulfeto (H ₂ S não dissociado)	0,002 mg L ⁻¹ S
Zinco total	0,18 mg L ⁻¹ Zn

Fonte: CONAMA Resolução n. 357, de 17 de março de 2005.

2.4 O modelo MIKE SHE

As previsões de resposta para sistemas hidrológicos são feitos por modelos de simulação. Numerosos modelos hidrológicos foram desenvolvidos no passado, porém referiam-se às condições médias da bacia. No entanto, os parâmetros desses modelos não tinham significado físico e não eram derivados de propriedades mensuráveis da bacia. Nessas circunstâncias modelos tradicionais podiam ser aplicados apenas quando a bacia permanecia sem mudanças. Por esta razão, não podiam ser usados para prever efeitos de mudanças no uso do solo, como por exemplo, desmatamento, recultivo ou irrigação. Para resolver tais problemas, um modelo mais sofisticado era necessário. O mesmo deveria ser espacialmente distribuído para permitir a percepção de mudanças em diferentes partes da bacia; os componentes dos modelos deveriam ser baseados em leis físicas para permitir extrapolar além da amplitude de dados usados para calibração, e ainda os parâmetros dos modelos deveriam ser tais que pudessem ser avaliados por medida direta, permitindo que os efeitos de alterações no futuro pudessem ser simulados, como por exemplo, estudos de mudança de cobertura do uso do solo. Poucos modelos deste tipo têm sido informados pela literatura, dentre eles o Sistema Hidrológico Europeu (SHE), um dos principais (REFSGAARD et al., 1992). Atualmente a versão do modelo foi aperfeiçoada e a nova geração foi denominada MIKE SHE.

De acordo com Thompson et al. (2004), o programa MIKE SHE é um modelo determinístico e distribuído de base física. O módulo de movimento de água tem uma estrutura modular que compreende seis componentes, os quais descreve os principais processos físicos do ciclo hidrológico fase terrestre: interceptação, evapotranspiração, escoamento superficial, deflúvio, zona insaturada, zona saturada troca entre aquíferos e rios. Ainda segundo os mesmos autores o modelo usa o método das diferenças finitas para resolver as equações diferenciais parciais que descreve os processos de escoamento superficial (equação bidimensional de Saint Venant), canal (equação unidimensional de Saint Venant), zona insaturada (equação unidimensional de Richard), e fluxo saturado subsuperficial (equação tridimensional de Boussineq), enquanto que soluções analíticas são usadas para descrever interceptação, evapotranspiração e degelo.

A representação das características da bacia e os dados de entrada são fornecidos através da discretização horizontal e vertical da bacia dentro de uma rede ortogonal de grades (Figura 1). Desta maneira a variabilidade espacial dos parâmetros como elevação, tipo de solo (parâmetros hidráulicos do solo), cobertura do solo, precipitação e evapotranspiração potencial podem ser representados. Dentro de cada célula da grade a variação vertical no solo e nas características hidrológicas são descritas em um número de camadas horizontais com variação da profundidade. O fluxo lateral entre células ocorre como escoamento superficial ou fluxo da zona saturada subsuperficial. A equação de unidimensional de Richard empregada para a zona insaturada assume que o fluxo horizontal é negligível comparado com o fluxo vertical (THOMPSON et al., 2004).

Lohani et al. (1993) argumentam que a hidrologia de uma área irrigada é usualmente complicada porque envolve vários processos como escoamento superficial, fluxo de zona insaturada, interceptação ou evapotranspiração, fluxo de água subterrânea, deflúvio e significantes interações entre os processos. Entretanto, o regime hidrológico é influenciado por atividades humanas regulando as condições da água. Tradicionalmente, análises hidrológicas da exigência de irrigação, encharcamento, sistemas de drenagem, problemas de salinidade, etc, têm sido conduzidos pelo uso de métodos analíticos baseados em experiências.

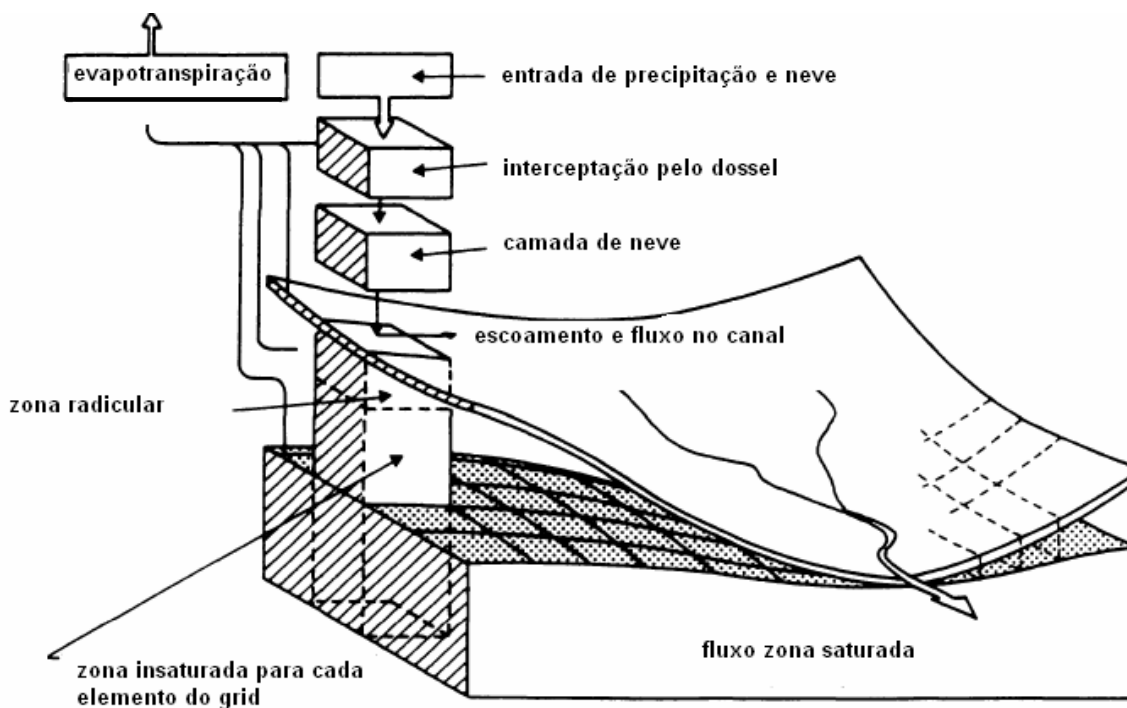


Figura 1 – Representação esquemática do modelo MIKE SHE (REFSGAARD et al., 1992)

Os referidos autores também relatam que o regime hidrológico dentro de uma área irrigada pode ser investigado com o uso do modelo MIKE SHE em três diferentes escalas: 1) perfil do solo na área irrigada. Esta análise pode fornecer estimativa da necessidade hídrica da combinação de vários tipos de culturas sem considerar a localização na área; 2) escala de campo; representa uma seção do campo com um comprimento típico de 100-200 m. Um modelo nesta escala pode analisar a distribuição da água de irrigação dentro do campo e os riscos de perda de água; 3) zona de irrigação: inclui uma série de campos independentes, cada um recebendo água de irrigação de um canal na entrada da área e tendo um sistema de drenagem na saída. O modelo pode ser usado para analisar os efeitos de políticas e decisões sobre alocação de água entre os campos, bem como a análise do encharcamento em diferentes partes da zona irrigada.

Na modelagem de áreas irrigadas usando MIKE SHE, a umidade do solo e o movimento da água na zona insaturada são continuamente calculados em toda a área e profundidade determinadas no modelo. Os cálculos são realizados com base na série histórica de dados meteorológicos. A aplicação da água de irrigação pode ser

especificada de acordo com duas opções: 1) pré-especificada: data e volume de água da irrigação são especificados antecipadamente de acordo com a prática usual da irrigação. Nesta opção a água de irrigação é usada sem considerar a atual exigência hídrica e a umidade do solo no campo; 2) irrigação automática: é sujeita ao estado da umidade do solo na profundidade da zona radicular, calculado pelo modelo. Se um dado nível mínimo de umidade é violado a irrigação é iniciada. O volume de irrigação é determinado pela atual umidade do solo e uma umidade máxima do solo é alcançada com a irrigação. Nesta opção a demanda da irrigação é considerada como uso ótimo da água na área irrigada com mínimo risco de perda de água e estresse hídrico. (LOHANI et al., 1993).

O modelo MIKE SHE pode ser acoplado ao modelo Mike 11 em estudos ambientais, porque Mike 11 é um modelo unidimensional para simulação de vazão, transporte de sedimentos e qualidade de água em estuários, rios, sistemas de irrigação e outros corpos d'água. O módulo hidrodinâmico de Mike 11 é baseado na equação diferencial parcial para fluxo de canais. Este módulo também serve de base para estudos morfológicos e de qualidade de água pela adição independente de módulos. As equações são resolvidas por técnicas implícitas e de diferença finita.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área de estudo

A descrição da área de estudo foi obtida nos trabalhos de Casagrande (2005) e no projeto da Secretaria Municipal de Agricultura e Abastecimento de Piracicaba (SEMA, 2003). A microbacia de drenagem do ribeirão dos Marins, afluente do rio Piracicaba por sua margem esquerda, está localizada inteiramente no município de Piracicaba, entre as coordenadas UTM 7.471.450 m e 7.486.995 m N e 218.044 m e 225.545 m E, zona 23, com uma área aproximada de 5.844 ha (Figura 2). Considerando o perímetro urbano obtido do IBGE (2002), 13,8 % da área da bacia está na zona urbana. Esta área do Estado de São Paulo, caracteriza-se por uma ocupação desuniforme do solo, com a maior parte da população concentrada em centros urbanos. As atividades econômicas

são heterogêneas, com áreas dominadas pela agricultura e outras por indústrias. A microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins é um exemplo típico deste padrão de uso e ocupação do solo da região. As atividades econômicas estão relacionadas com a agropecuária, principalmente o cultivo de cana-de-açúcar, hortaliças e a criação de gado de corte, leite, caprinos, ovinos e eqüinos (SEMA, 2003).

O clima da região, segundo a classificação de Koeppen, é do tipo mesotérmico, Cwa, isto é, subtropical úmido com estiagem no inverno, cujas chuvas do mês mais seco não atingem 30 mm e a temperatura do mês mais quente é superior a 22°C, enquanto a do mês mais frio é inferior a 18°C. A precipitação anual média é de aproximadamente 1300 mm. Cerca de 70% do volume de precipitação ocorre no verão, situação característica de clima tropical. Em termos geomorfológicos, a bacia está localizada em terrenos sedimentares que formam a Depressão Periférica.

O uso intensivo da microbacia na produção agropecuária vem causando danos ambientais (Figura 3), bem como a presença de um aterro sanitário que atendia a comunidade de Piracicaba, agravando a situação dos recursos hídricos da microbacia.

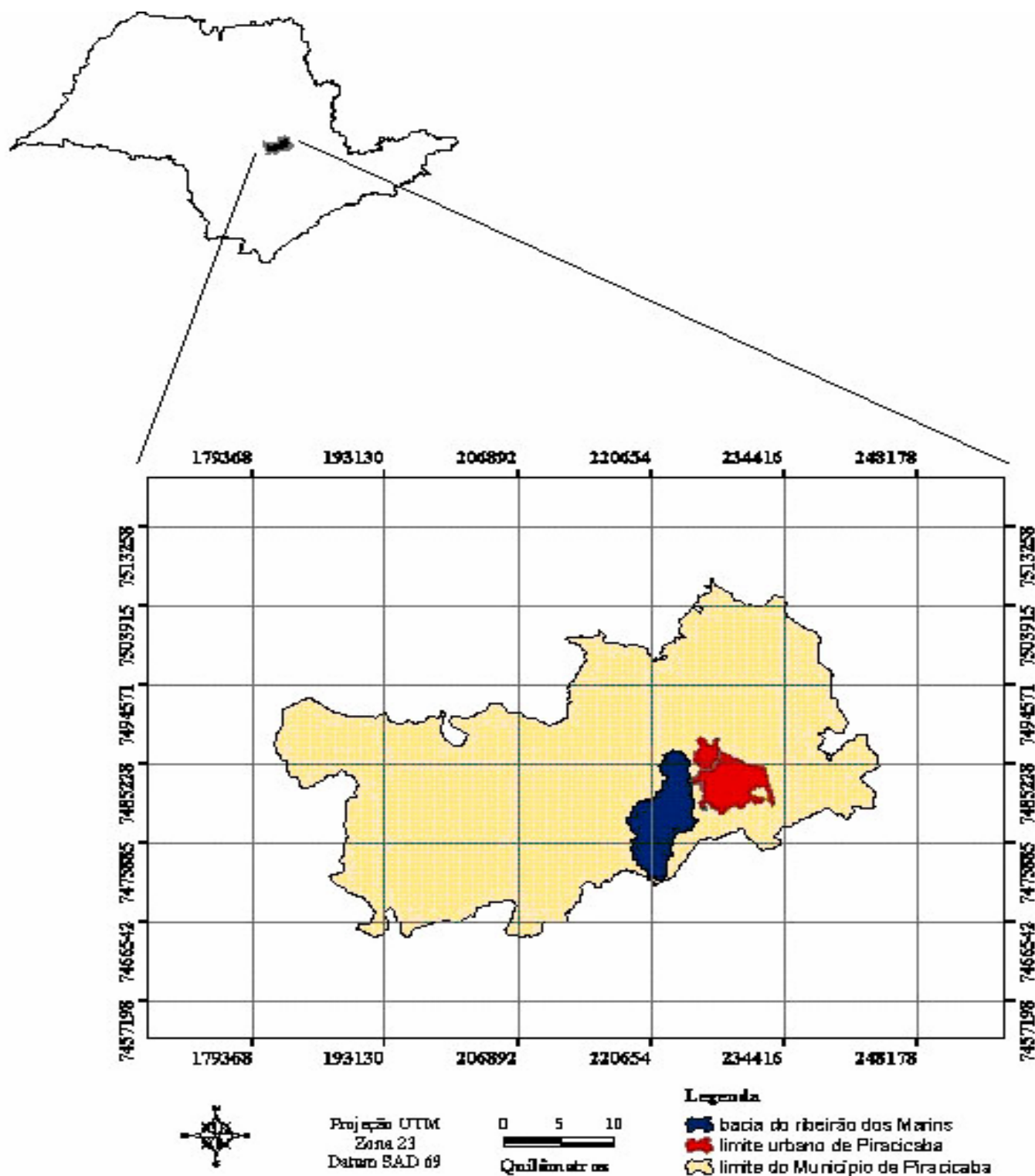


Figura 2 – Localização da área de estudos – Microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins
(Fonte: Casagrande, 2005)



Figura 3— Pastagem degradada e aterro sanitário na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins

3.2 Rede de drenagem da microbacia e pontos de coleta de água

A Tabela 4 apresenta os valores referentes à rede de drenagem e às propriedades dimensionais da microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins, descrita por Casagrande (2005): o maior comprimento foi obtido da distância que acompanha o vale principal, entre a foz e o ponto extremo sobre a linha do divisor de águas; a maior largura foi obtida da distância correspondente à linha que corta transversalmente o vale principal; o comprimento do curso d'água principal foi obtido da somatória dos segmentos correspondentes ao canal principal, ou seja, o comprimento do curso principal da nascente ao exutório; o comprimento total da rede foi determinado pela somatória dos segmentos correspondentes ao canal principal e tributários; o perímetro da bacia representa a linha do divisor de águas que circunda a bacia; a área da bacia compreende a área delimitada pelo divisor de águas e a densidade de drenagem, é a relação entre o comprimento total dos rios da bacia dados em quilômetros e a respectiva área em quilômetros quadrados.

Tabela 4 – Propriedades dimensionais da rede de drenagem e da microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins

Propriedades dimensionais	Dimensões
Perímetro	43,3 km
Área de drenagem	58,4 km ²
Maior comprimento	15,4 km
Maior largura	7,4 km
Comprimento do canal principal	22,3 km
Comprimento da rede de drenagem	188,1 km
Densidade de drenagem	3,20 km.km ⁻²
Fonte: Casagrande (2005)	

A Figura 4 apresenta a rede de drenagem e a localização dos pontos de amostragem de água para análise.

Os pontos selecionados para coleta de água estão marcados no mapa de rede de drenagem da microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins (Figura 4) e são os mesmos pontos amostrados pelo projeto SEMA (2003), pois procurou-se dar uma continuidade nas amostragens para a obtenção de um histórico de qualidade da água na microbacia. No entanto, estes pontos foram selecionados considerando-se a contribuição dos pequenos tributários formadores do ribeirão dos Marins; a localização das propriedades de hortaliças e outros tipos de uso e ocupação do solo (chácaras de recreação, olarias, aterro sanitário, etc) além da facilidade de acesso.

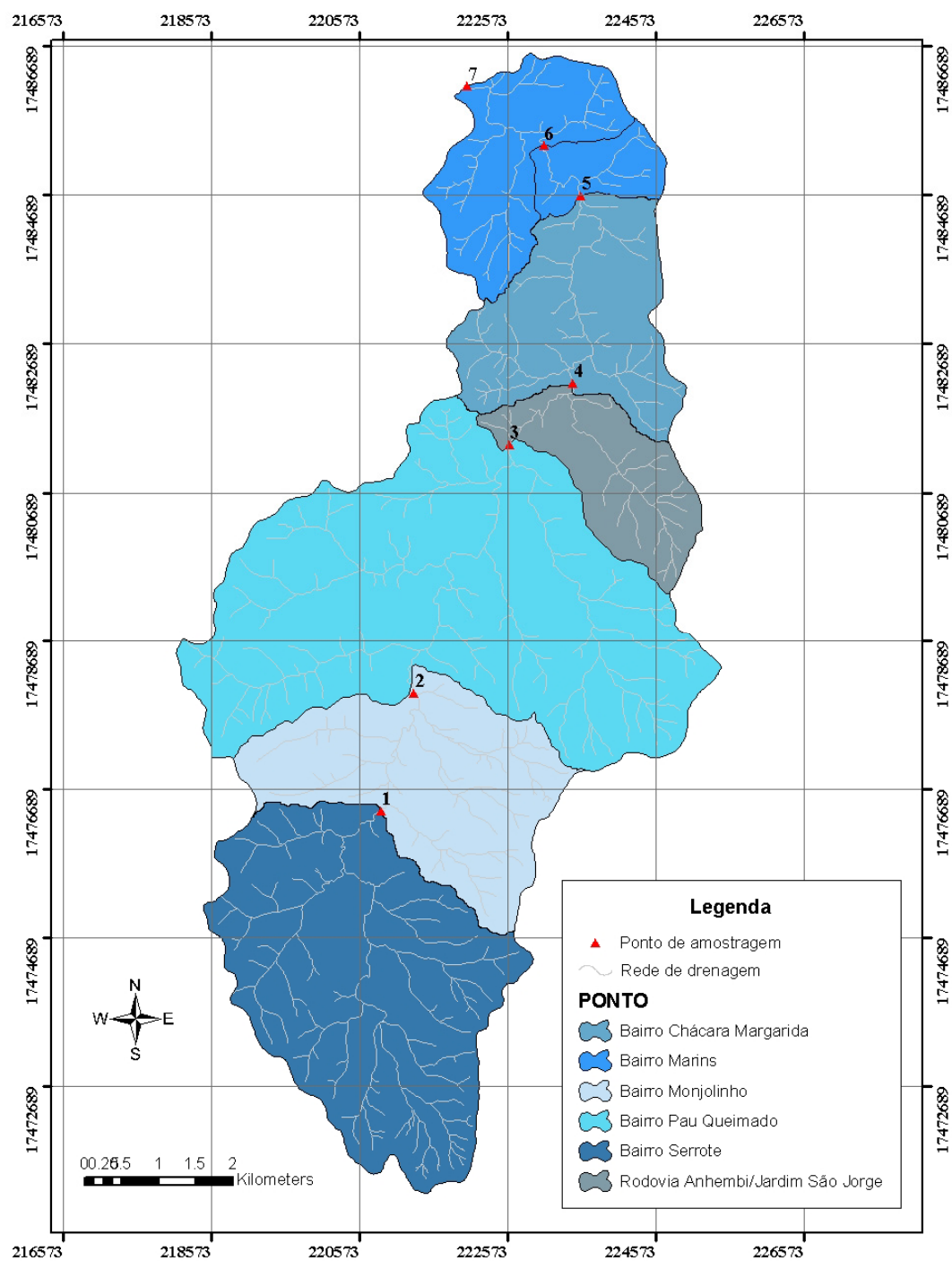


Figura 4 – Mapa da rede de drenagem da microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins e localização dos pontos de amostragens de água (Fonte: Casagrande 2005)

A água amostrada nestes pontos tiveram os parâmetros avaliados de acordo com APHA (1995), que foram físicos e químicos: sedimentos em suspensão com período de amostragem de fevereiro a julho totalizando 6 análises, pH com período de amostragem entre fevereiro e dezembro, totalizando 10 análises, condutividade elétrica, alcalinidade, turbidez, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês, zinco, sódio, fósforo, sulfato, cloreto, nitrogênio amoniacal e nitrato.

A razão de adsorção de sódio (RAS, Equação 1) e a razão de sódio trocável (RST, Equação 2) foram obtidas através do programa AquaChem v.3.7, o qual foi especificamente desenvolvido para análises e modelagem numérica e gráfica de conjunto de dados geoquímicos em meio aquoso.

$$RAS = \frac{Na^+}{\left(\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

$$RST = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+}} \quad (2)$$

em que

Na^+ - concentração de sódio, $mmol_c L^{-1}$;

Ca^{2+} - concentração de cálcio, $mmol_c L^{-1}$; e

Mg^{2+} concentração de magnésio, $mmol_c L^{-1}$.

3.3 Manejo da irrigação

Para verificar o manejo da irrigação nas propriedades agrícolas produtoras de hortaliças foram instalados tensiômetros nas profundidades de 0 – 20 e 20 – 40 cm, com três repetições para cada profundidade em duas propriedades agrícolas (Figura 5). Na primeira propriedade agrícola os tensiômetros foram instalados em solo cultivado com couve e cebolinha e em solo numa área adjacente, sem cultura. Na segunda propriedade, os tensiômetros foram instalados em solo com culturas de couve e couve-

flor e em solo numa área de vegetação natural, com o propósito de analisar e comparar o comportamento da umidade entre as áreas. As culturas foram escolhidas porque permaneciam mais tempo no campo e exigia menos interferência dos produtores.

Foram coletadas amostras de solo indeformadas, em cada profundidade para determinação das curvas características de retenção de água no solo, em laboratório, as quais foram ajustadas à equação (3) de van Genuchten (1980).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha|h|)^n)^m} \quad (3)$$

em que

θ - conteúdo volumétrico de água, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

θ_r - conteúdo de água volumétrico residual, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

θ_s - conteúdo de água volumétrico na saturação, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

h - potencial mátrico, m.c.a; e

α , m , n - parâmetros empíricos da equação.



Figura 5 – Tensiômetros instalados em uma propriedade agrícola, a) área não irrigada e b) área irrigada

As equações 4 e 5 foram utilizadas para calcular a lâmina total disponível e a lâmina real disponível como auxílio para avaliação do manejo da irrigação.

$$LTD = (\theta_{cc} - \theta_{pmp})10Z \quad (4)$$

em que

LTD = lâmina de água total disponível, mm;

θ_{cc} = umidade na capacidade de campo, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ_{pmp} = umidade do solo no ponto de murcha permanente, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

Z = profundidade efetiva do sistema radicular, cm.

$$LRD = (\theta_{cc} - \theta_{uc})10Z \quad (5)$$

sendo,

LRD = lâmina de água real disponível, mm;

θ_{uc} = umidade crítica do solo, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

A umidade crítica adotada para o manejo da irrigação está descrita em Marouelli et al. (1996), cujo valor é 70 kPa referente ao limite mínimo estabelecido para a cultura da alface, que é uma das mais cultivadas na microbacia do ribeirão dos Marins.

3.4 Quantidade de água

A quantidade de água na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins foi caracterizada através de medida de vazões determinadas por meio de limnigrama de montante de um vertedor instalado no ribeirão dos Marins, realizadas por Moretti (2001), no período de 1999/2000. Para o período de 2002/2003 as medidas de vazões foram determinadas com molinete por SEMA (2003). A vazão mínima de sete dias de duração com período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$), vazão associada à permanência de 95% (Q_{95}) e vazão média anual de longa duração (Q_m) foram obtidas pela metodologia proposta no “Estudo de Regionalização Hidrológica no Estado de São Paulo” (LIAZI et al., 1988), utilizando o programa encontrado no sítio do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo (SIGRH).

3.5 Caracterização da irrigação

Para caracterizar a irrigação na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins selecionou-se 4 propriedades para a realização de um teste de campo para avaliar a uniformidade de distribuição através do coeficiente de uniformidade de Christiansen (1942). Os testes foram realizados com um só aspersor e com uma lateral simples. Os coletores foram dispostos em um espaçamento 2 X 2 m e os aspersores no espaçamento 12 X 12 m e o funcionamento do sistema foi de aproximadamente uma hora.

3.6 Análise dos dados

Os dados foram analisados utilizando-se ferramentas da estatística descritiva constando de valores mínimo, máximo e médio bem como realizou-se análise de variância para verificar se havia diferença entre os locais de coleta de amostra de água e quando foi constatado diferença significativa entre os locais aplicou-se o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, identificando-se os locais que diferiram estatisticamente entre si. Os valores dos resultados das análises de água foram comparados com os padrões recomendados com a resolução do CONAMA, classificação proposta por Ayres e Westcot (1985), e a classificação da USDA obtida pelo programa AquaChem v.3.7.

3.7 Avaliação do impacto ambiental da irrigação

A necessidade de evitar impactos adversos e assegurar benefícios em longo prazo conduz ao conceito de sustentabilidade (FAO, 1995). Assim, com o intuito de verificar se a prática da irrigação causa impactos na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins avaliou-se os possíveis impactos através de indicadores de qualidade e quantidade de água, avaliação visual e o manejo da irrigação, o qual visa verificar o bom uso dessa tecnologia. Geralmente, em grandes projetos de irrigação, é realizado o Estudo de Impacto Ambiental, que prevê os efeitos adversos do projeto e procura estabelecer medidas mitigadoras. Porém, quando a irrigação é realizada em pequenas

proporções como na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins, muitas vezes, o único estudo feito é sobre a quantidade de água para a concessão de outorgas, sendo outros impactos relegados a segundo plano. Entretanto, pode-se verificar a presença de pequenas barragens nos ribeirões que afetam o ecossistema aquático, sem que uma avaliação desse efeito seja conduzida. Daí a importância de realizar estudos de impacto ambiental da irrigação em pequenas áreas irrigadas.

A avaliação foi feita com base em coleta de amostras de água, registros visuais e observações da manutenção e adequação dos sistemas de irrigação utilizados na atividade.

Os sistemas de irrigação utilizados eram por aspersão convencional, adquiridos em lojas agropecuárias e montados pelos próprios agricultores sem auxílio técnico. Isso resulta em sistemas híbridos, com vários tipos de bocais e barras de cano adaptadas ao tamanho da área, já que um projeto adequado não foi elaborado.

O sistema de cultivo de hortaliças foi executado de forma tradicional, por meio do transplante de mudas para culturas como: alface, beterraba, couve, couve-flor, almeirão, etc, e através de sementes para espécies como o rabanete, cenoura, salsa, quiabo, etc. O preparo do solo em algumas propriedades agrícolas foi feito com tração animal e outras utilizando máquinas. O processo de adubação foi feito com base no conhecimento tradicional do agricultor e nas recomendações da loja fornecedora dos fertilizantes.

3.8 Calibração do modelo

Os modelos permitem estudar problemas complexos e sintetizar diferentes tipos de informações. No entanto, os resultados dos modelos são confiáveis apenas tanto quanto as suposições, dados de entrada e parâmetros estimados. Desta maneira há dois problemas: o primeiro é selecionar o modelo adequado para representar o local de estudo (bacia hidrográfica) e o segundo é selecionar valores mais precisos possíveis para os parâmetros do modelo para que o mesmo simule o comportamento da local de estudo. Este processo, pelo qual os parâmetros são escolhidos, é chamado de calibração (SOROOSHIAN; GUPTA, 1995).

O modelo para a microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins (MBHRM) foi calibrado utilizando-se dados levantados em trabalhos anteriores realizados na MBHRM como os de: Casagrande (2005), Machado (2002), Moretti (2001), SEMA (2003) entre outros. Os dados foram usados para alimentar os seguintes componentes do modelo: zona saturada e insaturada, a vazão do rio e a evapotranspiração.

Um modelo conjunto MIKE SHE/11 foi calibrado e validado para a bacia do ribeirão dos Marins com o objetivo de representar as condições hidrológicas observadas durante um período de 37 meses (Novembro de 1998 a Dezembro de 2002), para o qual havia dados suficientes.

O componente evapotranspiração foi calibrado em função dos tipos e da distribuição da vegetação na MBHRM no ano de 2000 de acordo com Casagrande (2005), as quais eram pastagem com 2220,63 ha, cana-de-açúcar com 2019,39, fragmento florestal com 664,43 ha, floresta plantada com 193,93 ha, cultura anual com 240,12 ha, cultura perene com 16,58 ha e área de horticultura com 65 ha. Os valores finais da calibração dos coeficientes do modelo de Kristensen & Jensen (1975) são apresentados na Tabela (5), sendo C_1 e C_2 dependentes da umidade do solo e C_3 dependente da planta.

Thompson et al. (2004), calibraram o modelo usando a vazão medida comparada com a vazão simulada e obtiveram um bom ajuste. Os mesmos autores usaram um período de 36 meses representando as condições hidrológicas, sendo que os dados disponíveis foram suficientes para a calibração e validação do modelo. Para tanto, os autores aplicaram o coeficiente de rugosidade Manning para todo curso d'água e o mesmo foi usado na calibração do modelo. Todos os valores iniciais do período de validação foram especificados a partir do resultado obtido ao final da calibração. A aplicação de um coeficiente de rugosidade uniforme para todos os canais de irrigação foi necessário devido à ausência de dados de campo relevante mais a variação espacial no nível de água foram evidentes no nível de água observado. Deste modo os autores verificaram que o desempenho do modelo foi melhor no período de calibração do que no período de validação, como foi indicado pelo coeficiente de determinação.

O modelo MIKE 11 para a MBHRM foi calibrado para um período de 13 meses (Novembro de 1998 a Dezembro de 1999) comparando-se a vazão observada com a

vazão simulada. Um coeficiente de rugosidade uniforme (n de Manning) foi aplicado em todo o rio, sendo um dos parâmetros utilizado para a calibração. Já para o modelo MIKE SHE os parâmetros utilizados para calibração fazem parte dos componentes citados anteriormente e estão descritos na Tabela 5 com seus respectivos valores finais de calibração. Esses parâmetros são recomendados por DHI (2005) e foram utilizados pelos seguintes autores Thompson, et al. (2004), Henriksen, et al. (2003), Madsen (2003), Jayatilaka, et al. (1998) e Xevi et al. (1997) entre outros.

Tabela 5 – Valores finais dos parâmetros calibrados para o modelo MIKE SHE e MIKE 11

Modelo	Parâmetro	Valor calibrado
MIKE SHE	Coeficiente de Manning para escoamento superficial	$0,35 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$
	Retenção de água na camada superficial	10 mm
	Condutividade hidráulica saturada	$1,5 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$
	C1	0,01
	C2	0,4
	C3	45 (mm dia^{-1})
	Cint	1,5 (mm)
	Aroot*	2,5
MIKE 11	Coeficiente de Manning para o rio	$20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$

*Aroot = massa e distribuição do sistema radicular

3.9 Simulação de cenários

A simulação de cenários foi realizada considerando as operações típicas dos produtores de hortaliças da MBHRM comparando-as com as operações de manejo da irrigação simuladas pelo modelo MIKE SHE/MIKE 11. Assumiu-se que as operações típicas eram menos eficientes do que quando manejadas corretamente, reduzindo o uso da água e degradando menos a qualidade da água, promovendo um ganho ambiental para a bacia.

O objetivo foi testar a capacidade do modelo hidrológico MIKE SHE em pequenas áreas irrigadas da bacia e conseqüentemente detectar problemas relacionados à irrigação e a falta de manejo da água nessas áreas.

O primeiro cenário foi elaborado adotando-se técnica de manejo da água via clima, ou seja, a irrigação era complementar repondo-se a evapotranspiração da

cultura. Essa técnica foi adotada devido à facilidade de acesso a informação de quanto irrigar que os produtores podem obter através de divulgação por meio eletrônico e imprensa. Conjuntamente, durante a simulação, a irrigação foi realizada por dois sistemas de irrigação, aspersão e gotejamento analisando-se as vantagens e desvantagens de cada um na microbacia.

O segundo cenário foi elaborado considerando-se a forma como os agricultores realizavam a irrigação, ou seja, na experiência empírica de cada produtor. Neste cenário adotou-se uma lâmina fixa de 6 mm dia⁻¹ obtida através de informação de campo em propriedades da MBHRM. Este cenário representou a situação oposta ao primeiro e também foi realizada simulação com as duas opções de sistemas que o modelo apresenta.

3.10 Análise do desempenho do modelo

Um modelo é uma boa representação da realidade se puder prever dentro de uma amplitude de calibração e validação um fenômeno observado com aceitável exatidão e precisão (LOAGUE & GREEN, 1991).

De acordo com Vásquez & Feyen (2003) devido à natureza multi-objetiva do problema de calibração e avaliação de um modelo hidrológico, um grupo estatístico multi-objetivo é utilizado para a quantificação de diferentes aspectos do desempenho do modelo.

Segundo Loague & Green (1991), o desempenho de um modelo é aceitável quando não é possível rejeitar a hipótese de que não há diferença entre valores observados e simulados.

Os critérios estatísticos utilizados para a avaliação do modelo são descritos abaixo pelas expressões matemáticas:

(a) Erro Médio Absoluto:

$$EMA = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{n} \quad (6)$$

(b) Coeficiente de eficiência de Nash & Sutcliffe (1970), recomendado pela Sociedade Americana de Engenheiros Civis (ASCE, 1993):

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

(c) Coeficiente de determinação:

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad (8)$$

(d) Coeficiente de Pearson:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \right]^2 \quad (9)$$

em que;

O_i – enésimo valor da descarga observada;

\bar{O} - média dos valores da descarga observada;

S_i – enésimo valor simulado;

\bar{S} – média dos valores simulado;

n – número de observações.

O *COE* é a medida perfeita entre a descarga observada e simulada ($-\infty < COE \leq 1$). Um valor igual a 1 indica perfeito ajuste do modelo, enquanto que valores negativos indicam que a média dos valores observados resulta uma melhor descrição dos dados do que os resultados simulados (SONNENBORG et al., 2003).

O CD é a medida da proporção da variância total dos dados observados explicados pelos dados simulados (LOAGUE & GREEN, 1991). Na Tabela 6 são apresentados alguns valores para os critérios de avaliação de desempenho de modelos.

Tabela 6 – Valores de critérios para avaliação do desempenho do modelo

Desempenho	COE	
	1	2
Excelente	>0,95	>0,85
Muito bom	-	0,85 – 0,65
Bom	0,85 – 0,95	0,50 – 0,65
Aceitável	0,70 – 0,85	-
Ruim	< 0,70	0,20 – 0,50
Muito ruim	-	<0,20

¹Andersen et al.(2001)

²Henriksen et al. (2003)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A água está se tornando escassa não apenas em áreas áridas ou propensas à seca, mas também em regiões onde a chuva é abundante; considera-se escassez da água a quantidade de recursos disponíveis e a qualidade da mesma considerando-se a degradação, o que leva a indisponibilidade de água para usos preponderantes (PEREIRA et al., 2002). De acordo com Bertoni e Tucci (2002), a disponibilidade de precipitação numa bacia durante o ano é o fator determinante para quantificar, entre outros, a necessidade de irrigação de culturas e o abastecimento de água doméstico e industrial.

Na Figura 6 pode-se verificar os valores mensais da média histórica e o total histórico, bem como os valores de precipitação mensais e totais do ano de 2005, o qual abrange o período de coleta e revela a distribuição temporal irregular, caracterizando um período seco de abril a novembro, especialmente porque o ano de 2005 configurou-se por um ano em que a precipitação total (1070 mm) ficou 18% abaixo do total da

média histórica (1272 mm). Contudo o mês de maio com uma precipitação de 160 mm apresentou uma precipitação muito acima da média histórica de 55 mm, resultado oposto foi observado para o mês de fevereiro que historicamente apresenta alta precipitação (181 mm), mas para o ano de 2005 a precipitação foi de 66 mm.

A precipitação tem fundamental importância para a manutenção da qualidade e quantidade da água, quando seu regime é regular, evitando a escassez e diluindo a concentração de poluentes nos rios, além de produzir o escoamento superficial e subsuperficial que carregam sedimentos e nutrientes para águas superficiais e subterrâneas. Entretanto, Toledo e Nicolella (2002), estudaram o índice de qualidade de água em microbacia sob uso agrícola e urbano e observaram que a precipitação não foi significativa sobre a qualidade da água, mas que uma pequena deterioração foi verificada nos meses de chuva. Porém, quando se comparou o período seco com o período úmido na bacia do ribeirão dos Marins não se observou estatisticamente diferença significativa entre os períodos para os parâmetros de qualidade da água.

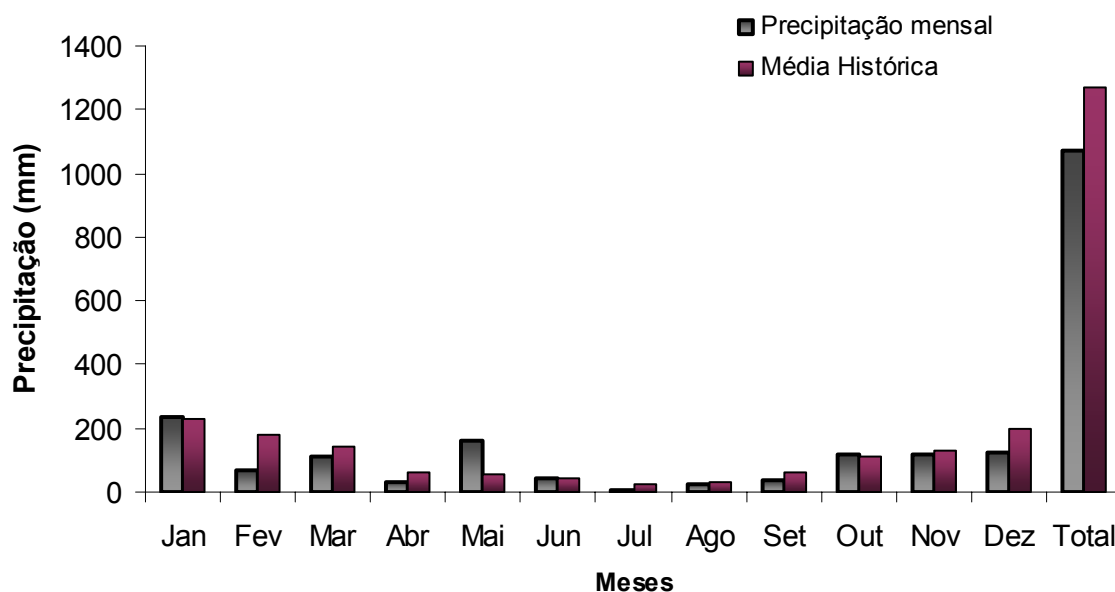


Figura 6 – Valores de precipitação mensal, ano 2005

4.1 Qualidade da água

A análise de variância permitiu verificar que os parâmetros de qualidade da água: oxigênio dissolvido, nitrato, amônia, fósforo total, potássio, sódio e condutividade elétrica da água se diferenciaram significativamente em nível de 5% de probabilidade pelo teste F. Constada à diferença, aplicou-se o teste de Tukey ($p > 0,05$) para identificar quais locais de coleta se diferiram entre si. As Tabelas 7 e 8 apresentam o resumo estatístico da análise de variância e os valores médios seguidos do resultado do teste de Tukey.

A qualidade da água para qualquer uso deve apresentar um nível aceitável de qualidade que não implique prejuízo à atividade para qual é destinada. Na Tabela 9 são apresentados valores médios das concentrações de parâmetros físicos e químicos de qualidade da água, medidos no período de fevereiro a dezembro de 2005, no total de 10 coletas de amostras e na Tabela 10 são apresentados os valores mínimos e máximos. A caracterização da qualidade da água na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins (MBHRM) foi realizada com base na resolução 357 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 2005) e nas diretrizes para interpretação da qualidade da água para irrigação (Tabela 2) e pela classificação da USDA obtidos pelo programa AquaChem v.3.7.

Comparando-se os resultados obtidos com o padrão estabelecido pela resolução CONAMA (2005), limites para a classe 2, observa-se que alguns parâmetros como o nitrato (NO_3^-) no ponto 3 (P3), nitrogênio amoniacal (N-NH_3) nos pontos 3 e 4 (P3 e P4), ferro (Fe^{2+}) do ponto 1 ao 7 (P1-P7), cobre (Cu^{2+}) do ponto 1 ao 7 (P1-P7), oxigênio dissolvido (OD) do ponto 2 ao 7 (P2-P7) e cor pontos 1, 3 e 4 (P1, P3 e P4) não apresentam qualidade compatível com a norma estabelecida pela resolução CONAMA (2005) para classificação de água classe 2. No caso do N-NH_3 , o valor determinado no mês de outubro ($45,9 \text{ mg L}^{-1}$) no ponto 3 está muito acima do padrão CONAMA/357/05 (2 mg L^{-1}). Este ponto localiza-se no ribeirão das Pedras, afluente do ribeirão dos Marins, pela margem direita e abaixo do aterro sanitário e do cemitério de animais, situados na MBHRM, empreendimentos que apresentam grande potencial de degradação da qualidade da água na bacia.

Tabela 7 – Resumo da análise de variância dos parâmetros de qualidade da água: oxigênio dissolvido (OD), nitrato (NO_3^-), amônia (NH_3), fósforo total (PO_4^-), potássio (K), sódio (Na^{2+}) e condutividade elétrica da água (CEa)

Parâmetro de qualidade	Causa da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
OD	Pontos de coleta	6	68,7292	11,45487	9,748491**
	Resíduo	35	41,1264	1,17504	
	Total	41	109,8556		
	C.V. (%)	36,74			
NO_3^-	Pontos de coleta	6	1085,821	180,9702	7,96655**
	Resíduo	70	1590,138	22,71626	
	Total	76	2675,959		
	C.V. (%)	85,28			
NH_3	Local de coleta	6	4667,132	777,8554	11,44666**
	Resíduo	70	4756,837	67,95481	
	Total	76	9423,969		
	C.V. (%)	138,96			
PO_4^-	Local de coleta	6	0,784306	0,130718	4,018873**
	Resíduo	70	2,276818	0,032526	
	Total	76	3,061125		
	C.V. (%)	61,71			
K^+	Local de coleta	6	18501,1	3083,516	14,98576**
	Resíduo	70	14403,41	205,7631	
	Total	76	32904,51		
	C.V. (%)	94,65			
Na^{2+}	Local de coleta	6	29217,22	4869,537	12,3826**
	Resíduo	70	27527,95	393,2565	
	Total	76	56745,17		
	C.V. (%)	55,41			
CEa	Local de coleta	6	2119248	353208	7,178402**
	Resíduo	70	3444298	49204,26	
	Total	76	5563546		
	C.V. (%)	58,77			

**Significativo ao nível de 1%

Tabela 8 – Resumo da análise estatística do teste de Tukey para comparação de médias dos parâmetros de qualidade da água: oxigênio dissolvido (OD), nitrato (NO₃), amônia (NH₃), fósforo total (PO₄), potássio (K), sódio (Na) e condutividade elétrica da água (CEa)

Locais de coleta	Parâmetros de qualidade						
	OD	NO ₃ ⁻	NH ₃	PO ₄ ⁻	K ⁺	Na ²⁺	CEa
P1	5,01 a	2,14 a	0,73 a	0,19 ab	4,5 a	17,51 a	231 a
P2	4,75 a	2,08 a	0,75 a	0,12 b	4,55 a	18,3 a	236 a
P3	2,5 b	14,01 b	24,42 b	0,26 abc	51,59 b	79,35 b	759 b
P4	1,61 b	4,81 a	6,81 a	0,37 ac	18,62 a	42,55 a	398 a
P5	2,51 b	4,48 a	3,43 a	0,42 c	9,28 a	31,26 a	349 a
P6	1,67 b	4,89 a	3,06 a	0,37 ac	9,12 a	31,62 a	352 a
P7	2,57 b	6,68 a	2,29 a	0,28 abc	8,39 a	29,88 a	313 a

Médias na vertical seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Tabela 9 – Concentração média em mg L⁻¹ de amostras de água coletada de fevereiro a dezembro de 2005

Variável	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	¹ Conama	² diretrizes
Na ⁺ mg L ⁻¹	17,5	18,3	79,3	42,5	31,2	31,6	32,8	-	900
Ca ²⁺ mg L ⁻¹	33,5	33,6	51,7	35,0	37,5	39,5	39,0	-	800
Mg ²⁺ mg L ⁻¹	6,1	8,8	27,8	19,4	20,4	22,3	24,3	-	120
PO ₄ ⁻ mg L ⁻¹	0,19	0,12	0,26	0,37	0,42	0,37	0,31	0,1	2
NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	2,14	2,0	14,0	4,8	4,4	4,8	7,3	10,0	10
NH ₃ mg L ⁻¹	0,7	0,7	24,4	6,8	3,4	3,0	2,5	2	-
K ⁺ mg L ⁻¹	4,5	4,5	51,5	18,6	9,2	9,1	9,2	-	2
Fe ²⁺ mg L ⁻¹	0,4	0,5	0,4	0,6	0,5	0,5	0,4	0,3	-
Cu ²⁺ mg L ⁻¹	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,009	-
Zn mg L ⁻¹	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,06	0,18	-
pH	7,5	7,6	7,5	7,5	7,5	7,4	7,6	7,3	8,5
Cea μS cm ⁻¹	231	236	756	398	348	352	344	-	300
OD mg L ⁻¹	5,0	4,8	2,5	1,6	2,5	1,6	3,0	5,0	-
Dureza mg L ⁻¹	111	110	232	159	169	180	185	-	-
Acidez	4,8	4,0	7,3	10	7,3	7,4	6,2	-	-
Alcalinidade	108	124,4	247,5	178,3	167,3	173,6	179,5	-	-
Cor	82,2	71	158,5	114,5	64,8	62,8	70,4	75	-
Sedimentos mg L ⁻¹	26,2	23	21,6	20,1	21,9	22,2	44,5	-	-
Turbidez	15	13	22	17	12	12	17	-	-

P1 – ponto de coleta local 1; P2 – ponto de coleta local 2; P3 – ponto de coleta local 3; P4 – ponto de coleta local 4; P5 – ponto de coleta local 5; P6 – ponto de coleta local 6 e P7 – ponto de coleta local 7

1- Resolução CONAMA 357 (2005)

2- Diretrizes de interpretação da qualidade da água (Tabela 2)

Na Tabela 9 observa-se que o PO₄⁻ apresentou valores superiores ao estabelecido pela resolução CONAMA (2005); somente os valores mínimos em P1 e P2 se enquadraram no padrão.

Para o magnésio, de acordo com o limite apresentado na tabela de diretriz para qualidade da água de irrigação, os valores máximos ficaram acima nos pontos 5, 6 e 7. Enquanto que para o potássio, os valores máximos e mínimos do ponto 1 ao 7 ficaram acima do estabelecido pela diretriz.

Os íons ferro e cobre também apresentaram valores acima do estabelecido, mas de acordo com a resolução 357 do CONAMA (2005). Contudo o pH e o zinco apresentaram-se dentro do limite estabelecido pela mesma resolução para águas de classe 2. A cor foi outro parâmetro de qualidade que apresentou valores máximos acima da resolução, enquanto que a CEa os valores máximos ficaram acima do que estabelece a diretriz.

O NO_3^- em P3 e P4 apresentaram valores máximos bem acima do permitido, sendo que em P3 o valor chega a duas vezes mais em relação a P4; porém vale ressaltar que estes pontos localizavam-se próximos a potenciais fontes poluidoras, aterro sanitário (P3) e fonte pontual (P4). Quando o N-NH_3 é observado, nota-se a mesma tendência nos pontos 3 e 4 acompanhados dos demais pontos 5, 6 e 7. A mesma inferência pode ser feita sobre as possíveis causas do aumento de N-NH_3 em P3 e P4 as potenciais fontes de poluição, enquanto que os demais pontos que localizavam-se na área de maior concentração de hortas, podem ter recebido influência antrópica das atividades agrícolas praticadas nas hortas que podem ter contribuído com o aumento de N-NH_3 por lixiviação ou pela erosão do solo proveniente dessas áreas que aumentam o aporte de poluentes no ribeirão dos Marins.

O oxigênio dissolvido (OD) é um dos constituintes mais importantes dos recursos hídricos e é um dos mais usados na avaliação da qualidade, porque está diretamente relacionado com os tipos de organismos que podem sobreviver em um corpo d'água. Este parâmetro foi medido de maio a agosto, e no geral, ao longo do tempo e espaço, somente os pontos 1 e 2 estiveram dentro do limite estabelecido pela resolução 357/05 do CONAMA. O maior valor de oxigênio dissolvido (OD) $6,80 \text{ mg L}^{-1} \text{ O}_2$ ocorreu em junho no ponto 1, enquanto que o menor ocorreu em agosto $0,76 \text{ mg L}^{-1} \text{ O}_2$ no ponto 3.

Tabela 1 – Valores mínimos e máximos das variáveis de qualidade de água da microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins medidos de fevereiro a dezembro de 2005

	P1		P2		P3		P4		P5		P6		P7	
Variável	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Na ⁺ mg L ⁻¹	10,5	34	14,7	26,0	25,0	150,0	17,3	96	15,7	41,5	15,8	43,0	16,4	52,0
Ca ²⁺ mg L ⁻¹	24,6	51,1	24,4	49,9	25,3	100,1	24,5	45	23,7	48,1	28,6	59,3	28,4	53,1
Mg ²⁺ mg L ⁻¹	2,5	12,2	2,5	27,9	7,9	87,4	2,5	105,7	3,7	123,9	2,5	142,1	4,9	160,4
PO ₄ ⁻ mg L ⁻¹	0,02	0,66	0,03	0,38	0,15	0,66	0,11	0,81	0,15	0,95	0,18	0,67	0,15	0,52
NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	0,6	4,0	0,6	8,5	6,6	41,2	0,0	12,6	1,2	8,8	1	7,7	4,9	9,6
NH ₃ mg L ⁻¹	0,17	1,8	0,17	1,68	0,28	53,7	0,6	24,53	0,45	6,7	0,56	7,7	0,34	8,9
K ⁺ mg L ⁻¹	1,7	6,0	1,8	6,5	11,0	106,0	6,9	53,0	6,7	13,0	6,7	13,5	6,5	15,0
Fe ²⁺ mg L ⁻¹	0	2,2	0	2,7	0		0	4,4	0	3,6	0	3,8	0	2,6
Cu ²⁺ mg L ⁻¹	0	0,03	0	0,03	0	0,04	0	0,04	0	0,04	0	0,05	0	0,05
Zn mg L ⁻¹	0,03	0,08	0,03	0,14	0,02	0,08	0,03	0,07	0,03	0,07	0,021	0,08	0,03	0,08
pH	7,2	8,0	7,1	8,2	7,2	8	7,1	8	6,9	8	6,9	7,9	7,1	8,3
CEa μ S cm ⁻¹	170	384	170	339	216	1859	242	600	222	516	220	539	229	519
OD mg L ⁻¹	3,09	6,8	3,2	5,45	1,15	3,65	0,76	4,08	1,8	3,37	0,7	3,05	1,72	4,27
Dureza mg L ⁻¹	50	253	76	141	99	479	107	435	91	510	113	585,5	96	660
Acidez	1	11,9	0,5	11,9	3,5	14,9	3,5	29,8	2,5	19,9	2	15,4	1,5	13,9
Alcalinid	52	175	50	200	108	565	42	372	44	430	50	486	50	592
Cor	48	127	33	129	87	267	40	193	38	113	41	98	44	116
Sedimento mg L ⁻¹	10,7	41	8	39,7	4,7	32,3	2,3	40,7	6,7	37,7	9	37,7	15	107,3
Turbidez	7,47	27	5,06	28	2,12	49	7,08	38	3,65	32	3,23	29	3,89	41

P1 – ponto de coleta local 1; P2 – ponto de coleta local 2; P3 – ponto de coleta local 3; P4 – ponto de coleta local 4; P5 – ponto de coleta local 5; P6 – ponto de coleta local 6 e P7 – ponto de coleta local 7

A Tabela 11 mostra o resultado dos parâmetros de qualidade da água para o período seco e período úmido. Os parâmetros que apresentaram diferença estatística significativa ao nível de 5% de probabilidade foram apenas o cálcio no ponto 3 e turbidez nos pontos 1 e 7.

Para os demais parâmetros, quando comparados com o padrão estabelecido pela diretriz de interpretação de água para irrigação (Tabela 2), o potássio apresentou valor acima do limite recomendado de $0 - 2 \text{ mg L}^{-1}$ para os dois períodos, seco e úmido. O nitrato apresentou restrição de uso de acordo com a diretriz de interpretação apenas no ponto 3 no período seco.

No que se refere à condutividade elétrica, que é um parâmetro de qualidade importante para fins de irrigação e avaliação indireta da salinidade, somente o ponto 3 não se enquadrava no limite estabelecido pela diretriz durante o período seco; os demais pontos em ambos os períodos tiveram a CEa dentro do limite máximo estabelecido. O período seco apresentou maior valor médio em relação ao período úmido exceto para o ponto 4.

Apesar de outros parâmetros de qualidade da água não terem apresentado diferença significativa entre os períodos seco e úmido, isto não significa que os mesmos não sofrem influência da quantidade de precipitação em uma bacia hidrográfica. Em um estudo de qualidade da água, Vanzela (2004) encontrou diferença entre o período seco e úmido para os seguintes parâmetros: turbidez, com uma tendência de aumento durante o período chuvoso; pH, com aumento durante o período seco; ferro, com aumento no período chuvoso; oxigênio dissolvido, com aumento da concentração durante o período seco; cálcio, com concentrações maiores durante o período seco e dureza total com valores de concentração pouco superior durante o período seco. Brito (2005) observou aumento significativo do pH no período das chuvas à medida que se afastava das nascentes e passava pela área irrigada, relacionando esse aumento às atividades agrícolas implementadas na área, porém não se pode inferir a mesma observação para a MBHRM, devido a fatores como a diferença na formação geológica e ao não aumento do pH ao longo da rede de drenagem da MBHRM, apesar da presença de atividades agrícolas, além das bacias serem de tamanhos diferentes bem como o clima.

Tabela 2 – Valores médios da variáveis de qualidade de água da microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins nos períodos seco (PS) e período úmido (PU)

	P1		P2		P3		P4		P5		P6		P7	
Variável	PS	PU	PS	PU	PS	PU	PS	PU	PS	PS	PS	PU	PS	PU
Na ⁺ mg L ⁻¹	17,83	16,87	18,43	18,02	83,36	71,35	38,06	51,55	32,22	26,85	33,35	28,17	36,08	27,25
Ca ²⁺ mg L ⁻¹	34,32	22,67	34,52	22,72	57,08*	26,87*	35,82	23,97	38,86	24,62	40,81	26,2	40,58	25,62
Mg ²⁺ mg L ⁻¹	5,28	7,72	7,07	12,55	25,25	32,97	9,9	38,45	10,31	40,8	10,28	46,52	8,87	51,52
PO ₄ ⁻ mg L ⁻¹	0,21	0,14	0,14	0,08	0,27	0,25	0,43	0,26	0,49	0,29	0,41	0,28	0,33	0,26
NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	1,97	2,48	2,35	1,54	16,42	9,20	4,16	6,13	3,7	6,04	4,27	6,12	7,38	7,29
NH ₃ mg L ⁻¹	5,28	7,72	7,07	12,55	25,25	32,97	9,90	38,45	10,31	40,8	10,28	46,52	8,87	51,52
K ⁺ mg L ⁻¹	4,31	4,90	4,18	5,30	54,93	35,0	14,5	26,87	9,17	9,5	9,08	9,2	9,7	8,3
pH	7,6	7,5	7,6	7,5	7,6	7,5	7,4	7,7	7,4	7,6	7,4	7,5	7,5	7,6
CEa μ S cm ⁻¹	237	238	238	231	774	636	366	463	360	325	367	324	361	316
Dureza mg L ⁻¹	121	91	111	108	246	203	130	218	139	229	141	256	133	275
Turbidez	11*	20*	10	18	19	23	13	23	9	16	9	15	9*	26*

P1 – ponto de coleta local 1; P2 – ponto de coleta local 2; P3 – ponto de coleta local 3; P4 – ponto de coleta local 4; P5 – ponto de coleta local 5; P6 – ponto de coleta local 6 e P7 – ponto de coleta local 7

Brito (2006), utilizou técnicas de análise multivariada na classificação das fontes hídricas superficiais da bacia hidrográfica do Salitre, localizada na Bahia com nascente na Chapada Diamantina e deságue no rio São Francisco, e verificou que de 13 pontos amostrados no rio Salitre e seus afluentes, apenas dois foram classificados como C1 e sete como C2, baseada na resolução do CONAMA, no período sem chuvas. O autor relaciona essa variação na qualidade da água à influência das atividades agrícolas, como a irrigação intensivamente praticada nessa bacia, sendo também favorecida pela ocorrência da redução da vazão do rio Salitre no período sem chuvas, proporcionando maior concentração de solutos nas águas.

Da Figura 7 a 21 são mostrados os parâmetros de qualidade da água: sedimentos; turbidez; nitrato; nitrogênio amoniacal; fósforo; magnésio; cálcio; potássio; sódio; ferro; manganês; dureza; alcalinidade; pH e condutividade elétrica que são importantes na caracterização espacial e temporal da água, bem como se comportam ao longo da rede de drenagem de uma bacia.

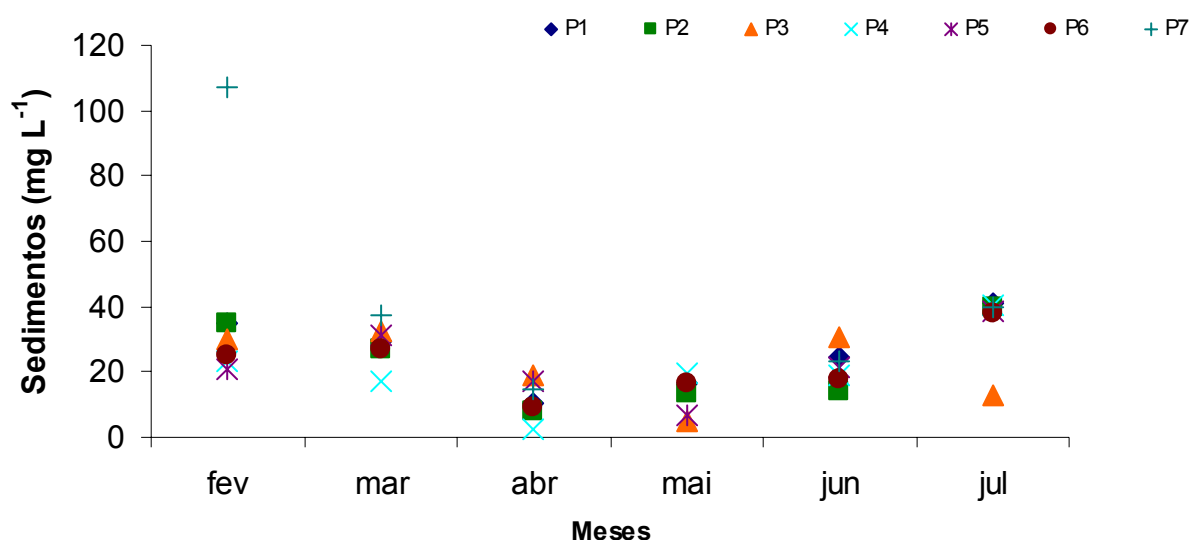


Figura 7 – Variação temporal do sedimentos no ribeirão dos Marins

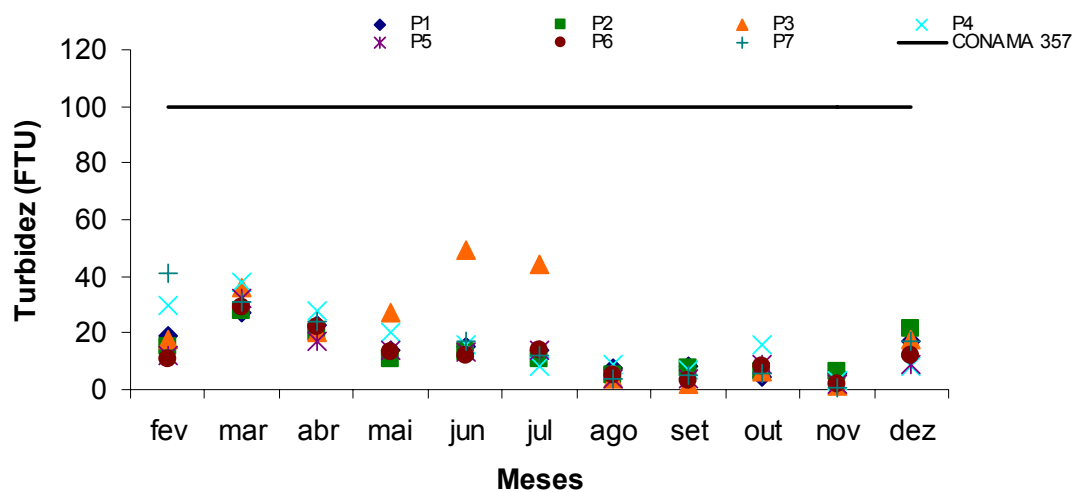


Figura 8 – Variação temporal da turbidez no ribeirão dos Marins

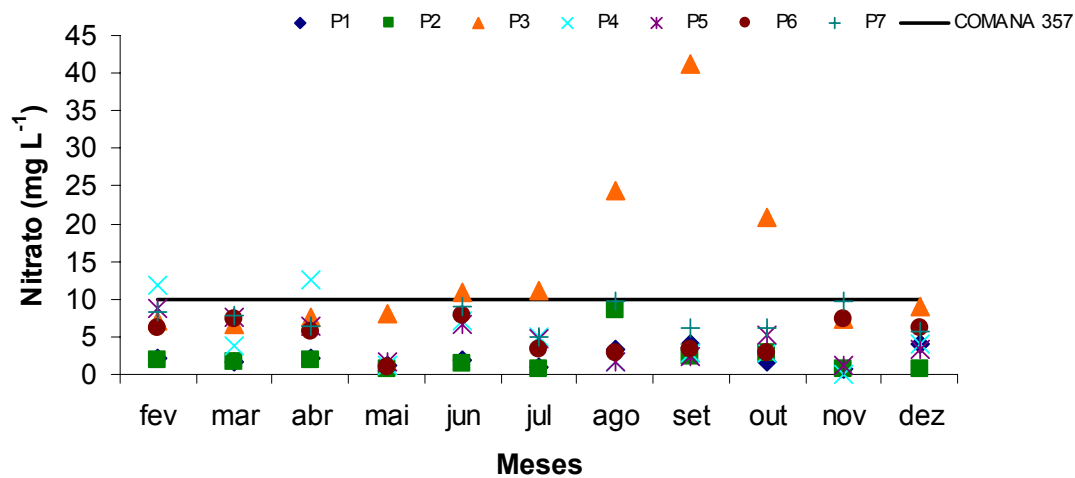


Figura 9 – Variação temporal do nitrato no ribeirão dos Marins

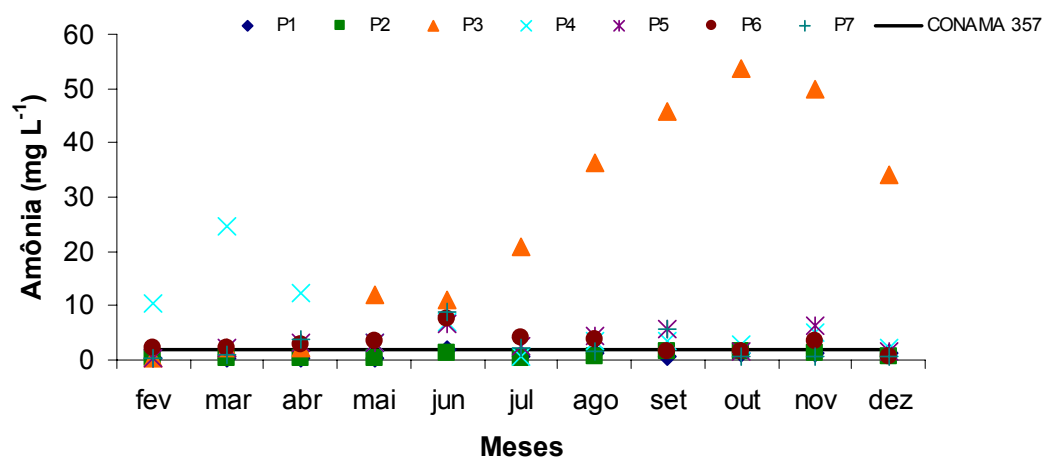


Figura 10 – Variação temporal da amônia no ribeirão dos Marins

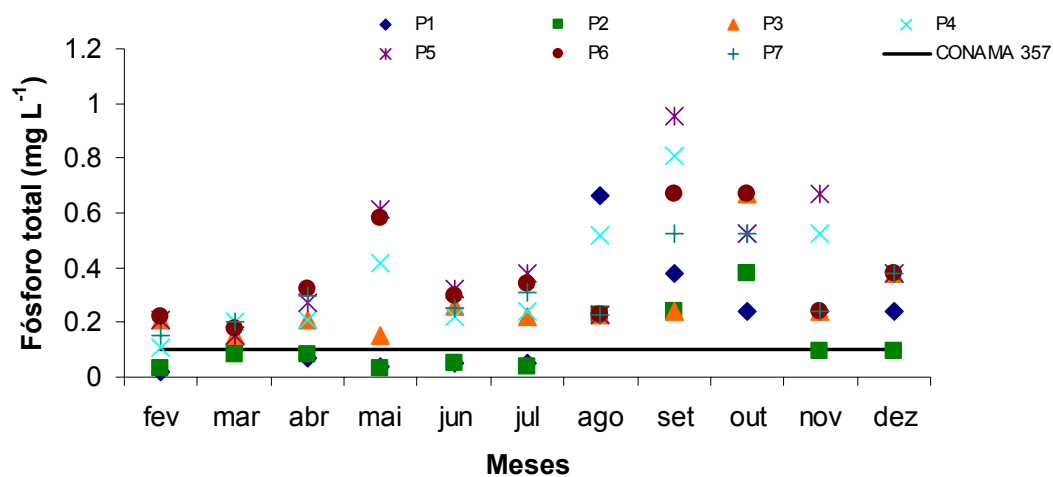


Figura 11 – Variação temporal do fósforo total no ribeirão dos Marins

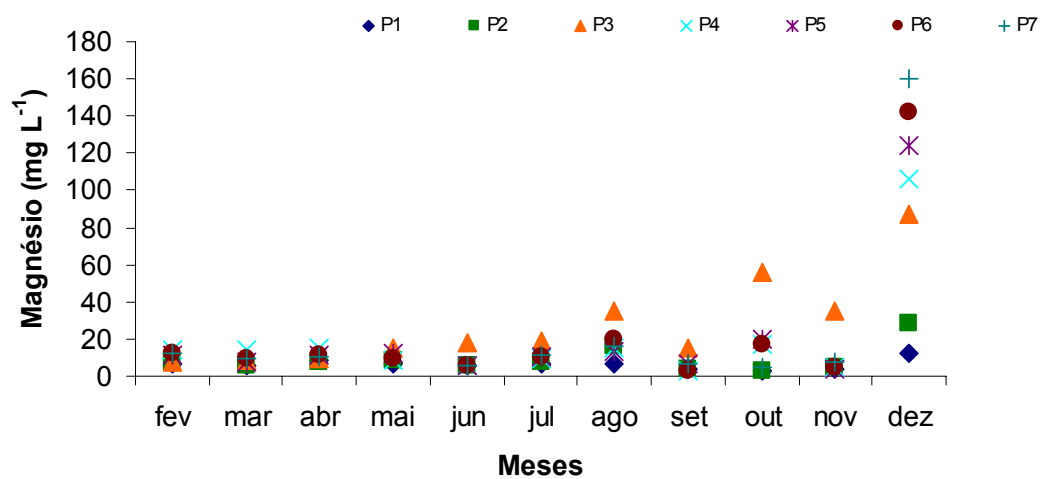


Figura 12 – Variação temporal do magnésio no ribeirão dos Marins

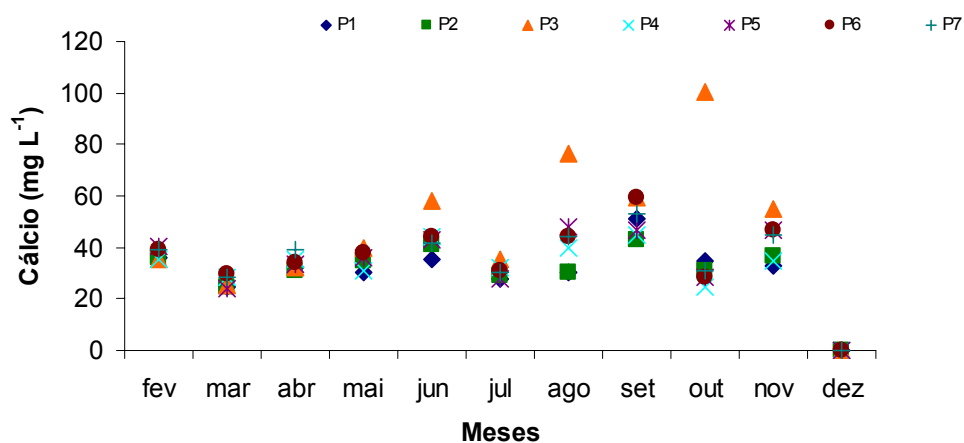


Figura 13 – Variação temporal do cálcio no ribeirão dos Marins

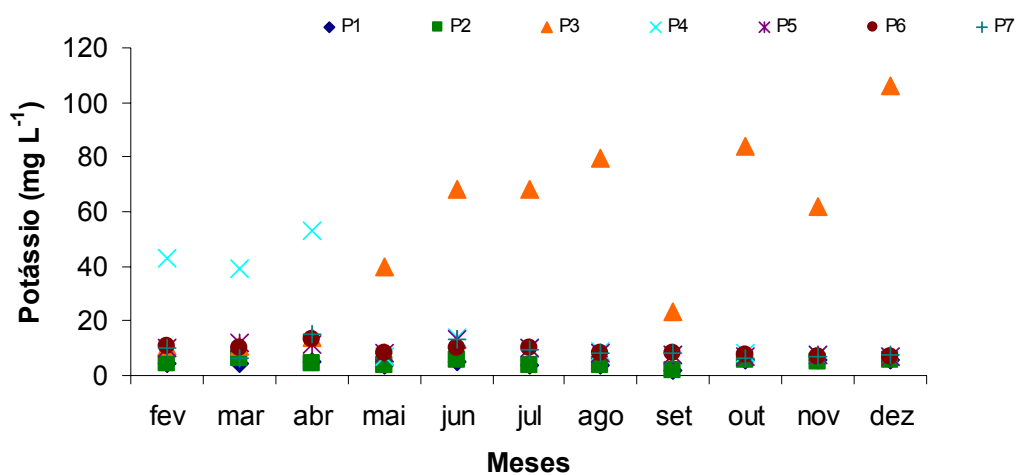


Figura 14 – Variação temporal do potássio no ribeirão dos Marins

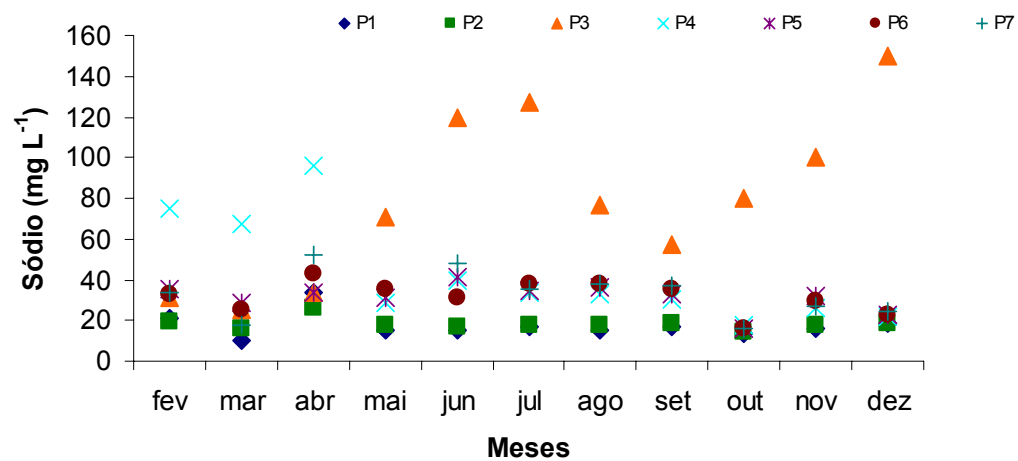


Figura 15 – Variação temporal do sódio no ribeirão dos Marins

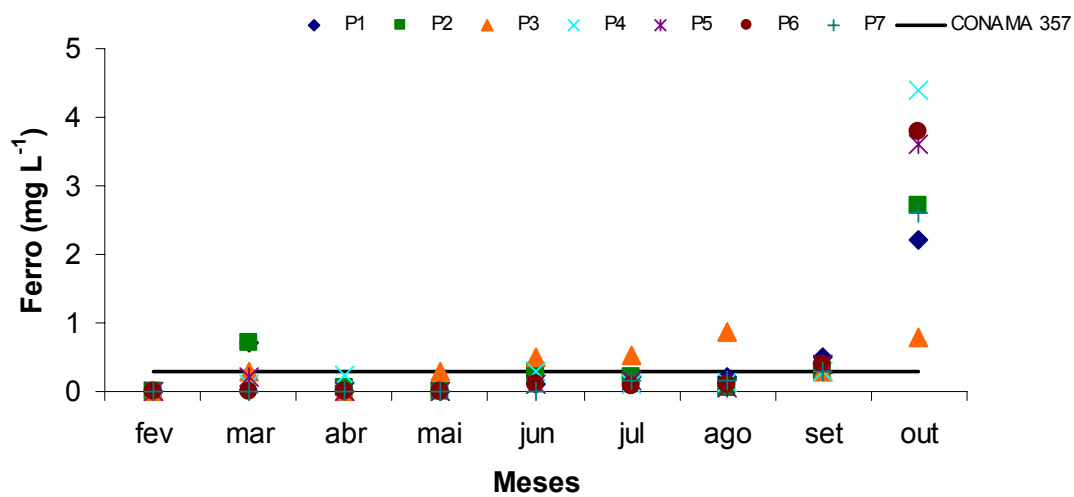


Figura 16 – Variação temporal do ferro no ribeirão dos Marins

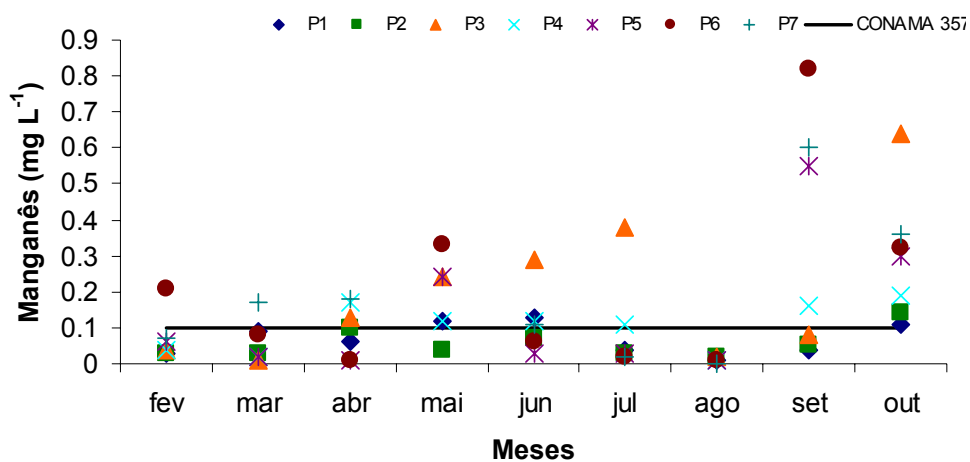


Figura 17 – Variação temporal do manganês total no ribeirão dos Marins

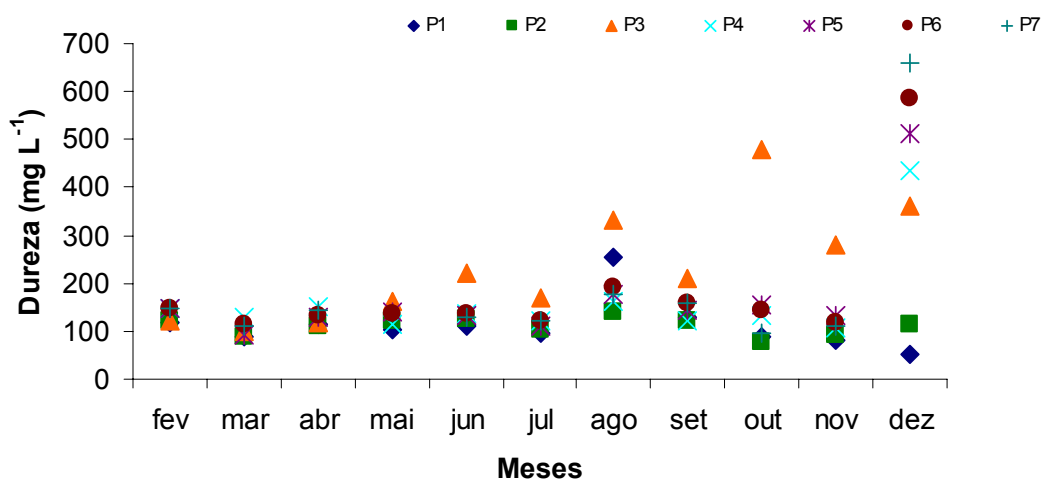


Figura 18 – Variação temporal da dureza no ribeirão dos Marins

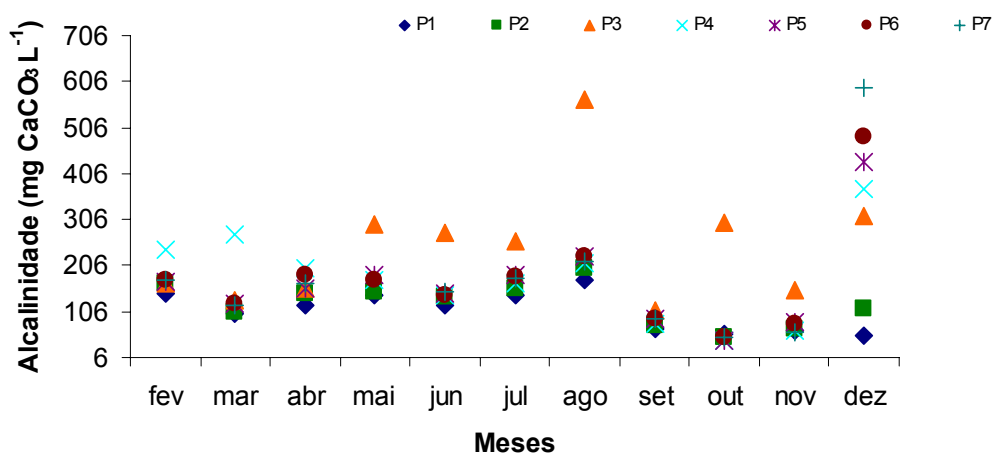


Figura 19 – Variação temporal da alcalinidade total no ribeirão dos Marins

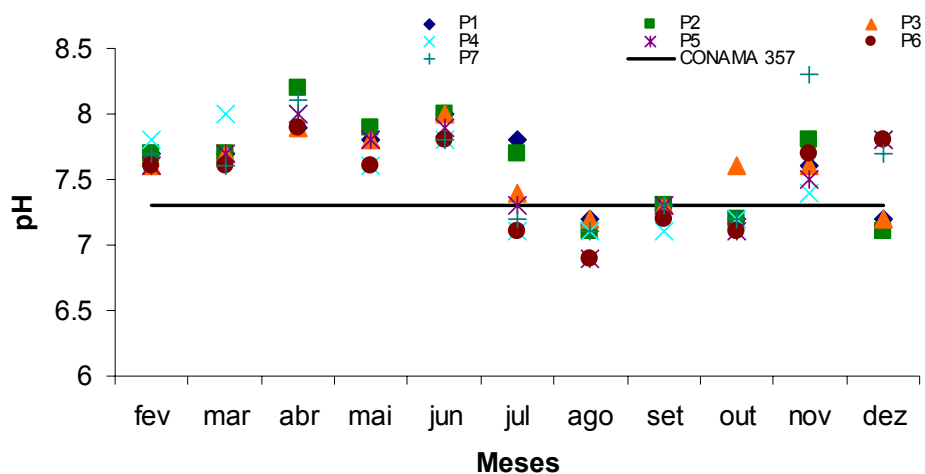


Figura 20 – Variação temporal do pH no ribeirão dos Marins

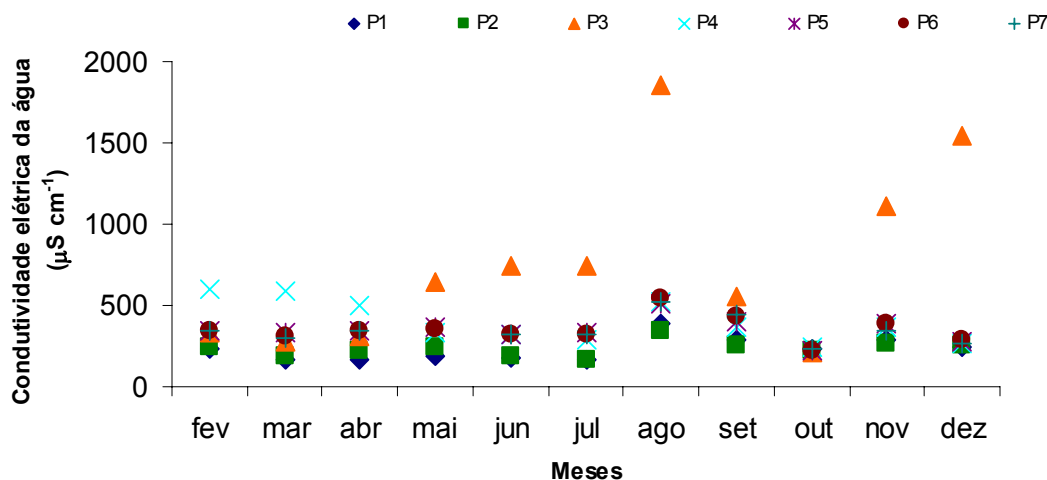


Figura 21 – Variação temporal da condutividade elétrica da água no ribeirão dos Marins

Ecologicamente os efeitos negativos de alguns parâmetros são: alta concentração de sedimentos que afeta os processos fotossintéticos e contribuem para o aporte de defensivos agrícolas que prejudicam o desenvolvimento da comunidade bentônica; a cor é um indicativo da presença de substâncias, geralmente orgânicas; salinidade, a qual é composta por bicarbonatos, cloretos, sulfatos e pelos demais íons do solo, sendo que o teor de cloreto pode ser um indicativo de poluição por esgoto doméstico, no caso do ponto 3; magnésio e cálcio estão intimamente ligados com a dureza da água, bem como ocorrência de precipitação formando carbonatos, o que pode ocasionar aumento de sódio na solução do solo.

No entanto de acordo com a resolução 357 do CONAMA (2005) para uma água de classe 2, que pode ser usada para abastecimento humano, após tratamento convencional, irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esportes e lazer, somente a turbidez e o pH apresentaram-se dentro dos limites estabelecidos pela resolução, enquanto que os outros parâmetros tiveram um ou mais pontos fora do padrão estabelecido.

Vale destacar o comportamento do nitrato na rede de drenagem MBHRM: valores máximos 41,2 e 12,6 mg L⁻¹ nos meses de setembro e abril para os pontos 3 e 4, respectivamente. Esses valores, de acordo com a portaria 514 do Ministério da Saúde, não são recomendados para uso no abastecimento público, enquanto a resolução número 357 do CONAMA (2005) prevê limite máximo de 10 mg L⁻¹ para águas de classe 2. Porém, no aspecto agrônômico, o excesso de nitrogênio causa crescimento excessivo, maturação tardia, tombamento vegetal, pouca frutificação, baixa qualidade da produção e até desequilíbrio nutricional (Ayers & Westcot, 1985).

O fósforo, ao lado do nitrogênio, é importante parâmetro de qualidade de água, pois é responsável pela eutrofização dos corpos de água. Na Figura 21, mostrada anteriormente, observa-se a variação da concentração do fósforo total ao longo do tempo que apresentou valores acima do estabelecido pela resolução número 357 do CONAMA (2005), indicando potencial de eutrofização no ribeirão do Marins, particularmente onde há barragens, caracterizando um ambiente lântico. Quando a descarga do ribeirão é reduzida no período seco, pode haver prejuízo à utilização de suas águas para usos como irrigação, abastecimento urbano e industrial.

O maior valor de sódio no mês de dezembro foi de 150,0 mg L⁻¹, sendo que esse íon tem grande importância no processo de salinização dos solos agrícolas. De acordo com Ayres e Westcot (1985) essa água possui moderada restrição para uso na irrigação por superfície.

4.2 Qualidade da água de irrigação

A qualidade da água de irrigação pode variar significativamente, segundo o tipo e a quantidade de sais dissolvidos. Os sais encontram-se em quantidades relativamente pequenas, porém significativas, e têm sua origem na dissolução ou intemperização das

rochas e solos, incluindo a dissolução lenta do calcário, do gesso e de outros minerais, além de serem transportados pelas águas de irrigação e depositados no solo, onde se acumulam à medida que a água se evapora ou é consumida pelas culturas (AYERS; WESTCOT, 1999). A concentração total de sais da água para irrigação pode ser expressa em relação à sua condutividade elétrica (BERNARDO, 1995).

Os principais parâmetros considerados de importância para irrigação Na, Ca, Mg, Cl, CEa, Fe, pH, apresentaram valores compatíveis para o uso na agricultura irrigada, porém o valor máximo de condutividade elétrica de acordo com a classificação encontrada em Ayers e Westcot (1999) apresentou ligeiro a moerado grau de restrição de uso. Os problemas ocasionados por uma água de má qualidade utilizada na irrigação vão de danos causados aos equipamentos, corrosão, a danos causados às plantas e ao ambiente, tais como: indisponibilidade de nutrientes devido ao aumento do pH ou aumento da concentração de sais na zona radicular.

A Tabela 12 apresenta os resultados de qualidade da água, obtidos com o auxílio do programa AquaChem, observados para o uso na irrigação considerando-se a razão de adsorção e sódio, o sódio e a classificação da água de irrigação quanto ao poder de salinização do solo e acordo como a USDA e também o risco de salinização de acordo com Ayers e Westcot (1999).

Tabela 12 – Valores de condutividade elétrica da água, razão de adsorção de sódio, sódio, classificação e risco de salinização

(continua)

Local de amostragem	CEa	RAS	Sódio	Classificação	Risco de salinização	*Diretrizes
P1						
25/02/2005	230	0,84	0,39	C1	Baixo	Nenhuma
31/03/2005	170	0,49	0,27	C1	Baixo	Nenhuma
27/04/2005	170	1,39	0,65	C1	Baixo	Nenhuma
17/05/2005	190	0,65	0,32	C1	Baixo	Nenhuma
27/06/2005	180	0,64	0,30	C1	Baixo	Nenhuma
23/07/2005	170	0,76	0,39	C1	Baixo	Nenhuma
19/08/2005	384	0,42	0,13	C2	Médio	Nenhuma
29/09/2005	285	0,42	0,13	C2	Médio	Nenhuma
25/10/2005	254	0,56	0,23	C2	Médio	Nenhuma
23/11/2005	287	0,73	0,40	C2	Médio	Nenhuma
20/12/2005	249	1,14	0,80	C1	Baixo	Nenhuma

Tabela 12 – Valores de condutividade elétrica da água, razão de adsorção de sódio, sódio, classificação e risco de salinização

(continuação)						
Local de amostragem	Cea	RAS	Sódio	Classificação	Risco de salinização	*Diretrizes
P2						
25/02/2005	250	0,76	0,35	Limite C1 – C2	Baixo/médio	Nenhuma
31/03/2005	190	1,26	1,13	C1	Baixo	Nenhuma
27/04/2005	220	1,08	0,51	C1	Baixo	Nenhuma
17/05/2005	250	0,69	0,31	Limite C1 – C2	Baixo/médio	Nenhuma
27/06/2005	190	0,64	0,29	C1	Baixo	Nenhuma
23/07/2005	170	0,77	0,38	C1	Baixo	Nenhuma
19/08/2005	339	0,66	0,28	C2	Médio	Nenhuma
29/09/2005	257	0,65	0,28	C2	Médio	Nenhuma
25/10/2005	221	0,70	0,32	C1	Baixo	Nenhuma
23/11/2005	261	0,81	0,42	C2	Médio	Nenhuma
20/12/2005	253	4,80	2,24	C2	Médio	Nenhuma
P3						
25/02/2005	330	1,23	0,56	C2	Médio	Nenhuma
31/03/2005	280	1,09	0,55	C2	Médio	Nenhuma
27/04/2005	310	1,34	0,62	C2	Médio	Nenhuma
17/05/2005	650	2,43	0,95	C2	Médio	Nenhuma
27/06/2005	750	3,52	1,19	Limite C2 – C3	Médio/alto	Ligeira/Moderada
23/07/2005	740	4,28	1,65	C2	Médio	Ligeira/Moderada
19/08/2005	1859	1,83	0,50	C3	Alto	Ligeira/Moderada
29/09/2005	558	1,82	0,50	C2	Médio	Nenhuma
25/10/2005	216	2,30	0,79	C1	Baixo	Nenhuma
23/11/2005	1114	2,82	1,19	C3	Alto	Ligeira/Moderada
20/12/2005	1543			C3	Alto	Ligeira/Moderada
P4						
25/02/2005	600	2,68	1,10	C2	Médio	Nenhuma
31/03/2005	590	2,56	1,13	C2	Médio	Nenhuma
27/04/2005	500	3,40	1,38	C2	Médio	Nenhuma
17/05/2005	330	1,17	0,55	C2	Médio	Nenhuma
27/06/2005	320	1,51	0,65	C2	Médio	Nenhuma
23/07/2005	290	1,33	0,60	C2	Médio	Nenhuma
19/08/2005	517	1,11	0,44	C2	Médio	Nenhuma
29/09/2005	368	1,11	0,44	C2	Médio	Nenhuma
25/10/2005	242	1,28	0,58	C1	Baixo	Nenhuma
23/11/2005	363	1,50	0,80	C2	Médio	Nenhuma
20/12/2005	267			C2	Médio	Nenhuma
P5						
25/02/2005	350	1,26	0,52	C2	Médio	Nenhuma
31/03/2005	330	1,30	0,68	C2	Médio	Nenhuma
27/04/2005	340	1,30	0,57	C2	Médio	Nenhuma
17/05/2005	370	1,16	0,49	C2	Médio	Nenhuma
27/06/2005	320	1,58	0,69	C2	Médio	Nenhuma
23/07/2005	330	1,42	0,67	C2	Médio	Nenhuma
19/08/2005	516	1,18	0,44	C2	Médio	Nenhuma
29/09/2005	395	1,18	0,44	C2	Médio	Nenhuma
25/10/2005	222	1,31	1,31	C1	Baixo	Nenhuma
23/11/2005	392	1,44	1,44	C2	Médio	Nenhuma
20/12/2005	272	0,44	0,10	C2	Médio	Nenhuma

Tabela 12 – Valores de condutividade elétrica da água, razão de adsorção de sódio, sódio, classificação e risco de salinização

						(conclusão)
Local de amostragem	Cea	RAS	Sódio	Classificação	Risco de salinização	*Diretrizes
P6						
25/02/2005	350	1,18	0,49	C2	Médio	Nenhuma
31/03/2005	310	1,04	0,49	C2	Médio	Nenhuma
27/04/2005	350	1,63	0,71	C2	Médio	Nenhuma
17/05/2005	360	1,33	0,57	C2	Médio	Nenhuma
27/06/2005	320	1,18	0,51	C2	Médio	Nenhuma
23/07/2005	320	1,50	0,68	C2	Médio	Nenhuma
19/08/2005	539	1,19	0,43	C2	Médio	Nenhuma
29/09/2005	437	1,19	0,43	C2	Médio	Nenhuma
25/10/2005	220	1,31	0,52	C1	Baixo	Nenhuma
23/11/2005	389	1,51	0,69	C2	Médio	Nenhuma
20/12/2005	283			C2	Médio	Nenhuma
P7						
25/02/2005	350	1,22	0,50	C2	Médio	Nenhuma
31/03/2005	300	0,75	0,36	C2	Médio	Nenhuma
27/04/2005	350	1,90	0,80	C2	Médio	Nenhuma
27/06/2005	310	1,61	0,71	C2	Médio	Nenhuma
23/07/2005	320	1,39	0,63	C2	Médio	Nenhuma
19/08/2005	519	1,24	0,47	C2	Médio	Nenhuma
29/09/2005	444	1,24	0,47	C2	Médio	Nenhuma
25/10/2005	229	1,31	0,52	C1	Baixo	Nenhuma
23/11/2005	343	1,54	0,72	C2	Médio	Nenhuma
20/12/2005	269			C2	Médio	Nenhuma

P1 – ponto de coleta local 1; P2 – ponto de coleta local 2; P3 – ponto de coleta local 3; P4 – ponto de coleta local 4; P5 – ponto de coleta local 5; P6 – ponto de coleta local 6 e P7 – ponto de coleta local 7

*Diretrizes de interpretação da qualidade da água (Tabela 2)

Verifica-se que as águas da MBHRM classificaram-se em C1 e C2, com exceções do ponto 3 nos meses de agosto e dezembro, classificando-os com baixo e médio risco de salinização de acordo com a classificação proposta pelo USDA, apresentado por Bernardo (1995).

De acordo com a classificação para águas salinas apresentada por Ayers e Westcot (1999), as águas do ribeirão dos Marins utilizada para irrigação classificaram-se com nenhum grau de restrição de uso, exceto o ponto 3 que apresentou ligeiro/moderado grau de restrição de uso durante os meses de junho a agosto, período seco, e novembro e dezembro, período úmido. Isso evidencia o cuidado que deve ser observado nas diferentes classificações e diretrizes para qualidade da água, tanto para uso na irrigação quanto para outros usos preponderantes, pois as condições climáticas

e os solos variam de um lugar para o outro, implicando em limites que devem ser estabelecidos de acordo com as condições brasileiras.

Nas Figuras 22 a 28 pode-se observar a variação da condutividade elétrica ao longo do período. O ponto 3 (Figura 24) apresentou valores altos nos meses de agosto e dezembro, classificando-se em águas de classe 3 (classificação USDA), indicando que a concentração de sais na água usada para irrigação apresenta potencial para salinização do solo na ausência de uma manejo adequado da irrigação e pela falta de um monitoramento periódico. Porém, para que se possa fazer correta interpretação da qualidade da água para irrigação, os parâmetros analisados devem estar relacionados com seus efeitos no solo, na cultura e no manejo da irrigação (BERNARDO, 1995). No entanto, nas pequenas propriedades, não há manejo da irrigação e menos ainda preocupação com a qualidade da água usada para irrigar as culturas e os efeitos que a mesma acarreta ao ambiente. Contudo, a precipitação anual na região de Piracicaba colabora para que não ocorra o acúmulo de sais no solo da bacia, exceto quando o cultivo é realizado em ambiente protegido, como é o caso de algumas propriedades na bacia.

Uma água de classe C2 (salinidade entre 250 e 750 micromhos cm^{-1} a 25° C) pode ser utilizada sempre que houver um grau moderado de lixiviação. Já uma água de classe C3 (salinidade entre 750 e 2250 micromhos cm^{-1} a 25° C) não pode ser utilizada em solos com deficiência de drenagem.

Na MBHRM a irrigação é utilizada no cultivo das seguintes hortaliças: beterraba, cenoura, cebolinha, salsa, alface, almeirão, couve, couve-flor, rabanete, quiabo, chicória, rúcula, repolho, entre outras hortaliças, que apresentam diferentes níveis de tolerância à concentração de sais. Assim, de acordo com a tabela de tolerância das culturas apresentada por Ayers e Westcot (1999), as hortaliças cultivadas na MBHRM apresentam-se moderadamente tolerantes: beterraba e abobrinha italiana; moderadamente sensíveis: alface, berinjela, brócolis, couve, couve-flor, rabanete, repolho e sensíveis: cenoura. Portanto, verifica-se que cuidados na utilização da água de irrigação e na seleção de cultivares de hortaliças devem ser observados pelos produtores.

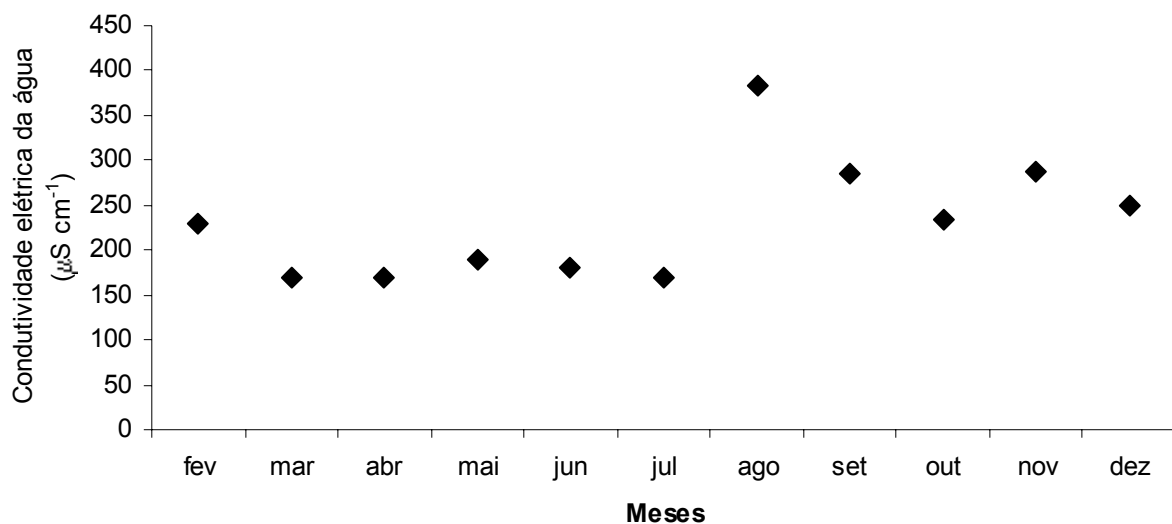


Figura 22 – Variação da condutividade elétrica da água na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins ao longo do ano, ponto 1

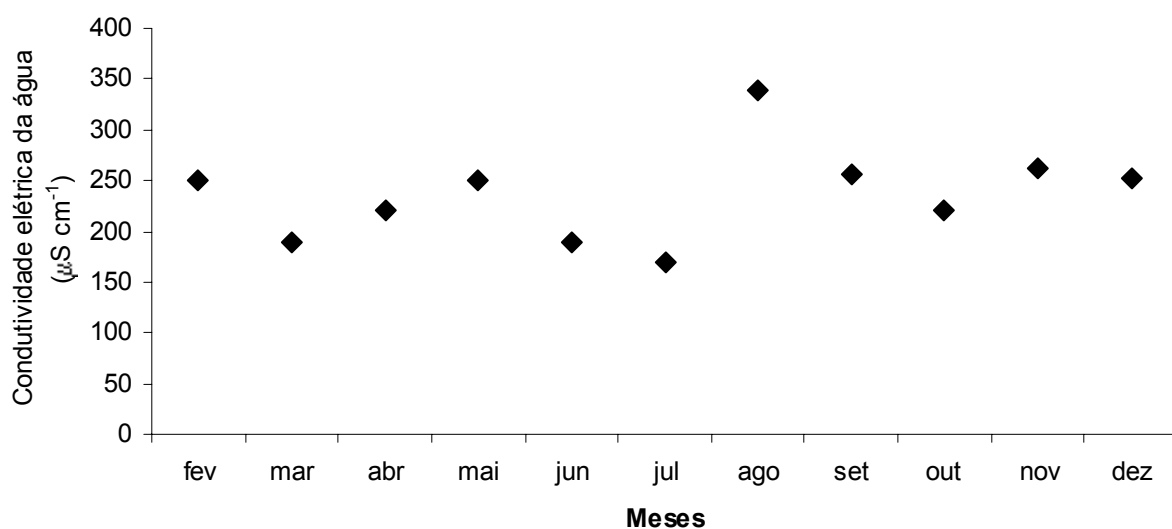


Figura 23 – Variação da condutividade elétrica da água na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins ao longo do ano, ponto 2

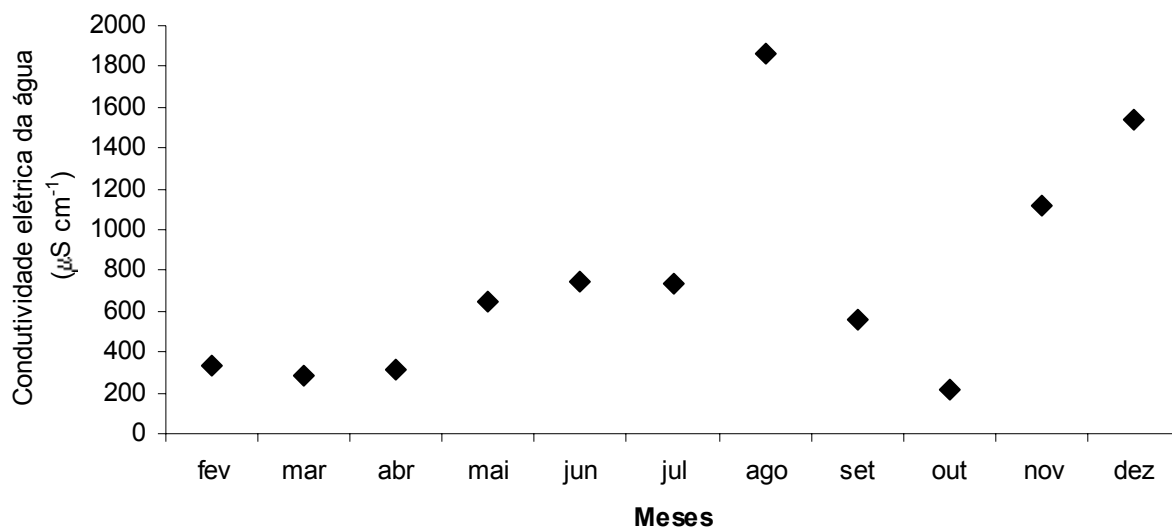


Figura 24 – Variação da condutividade elétrica da água na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins ao longo do ano, ponto 3

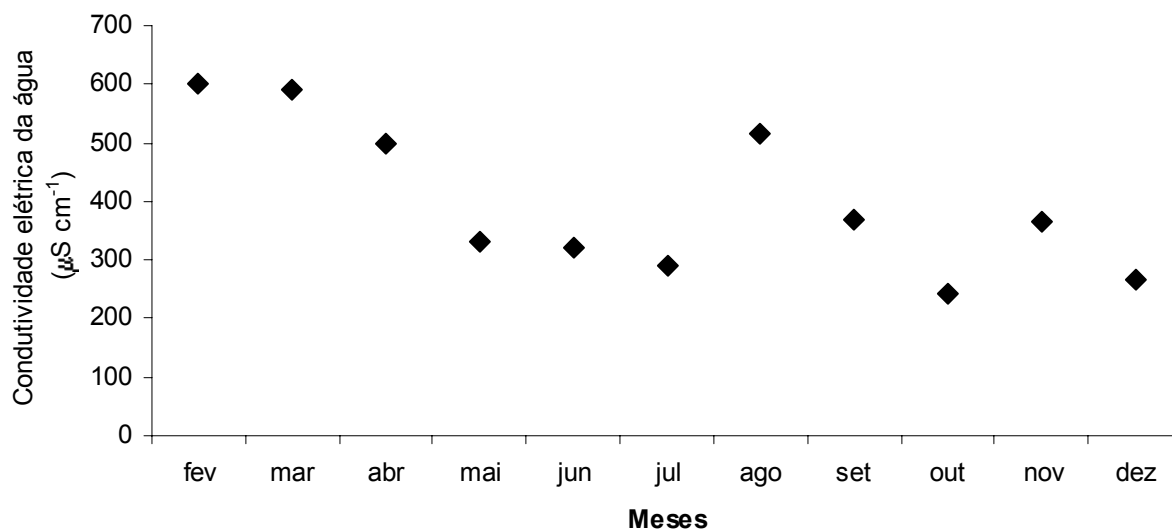


Figura 25 – Variação da condutividade elétrica da água na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins ao longo do ano, ponto 4

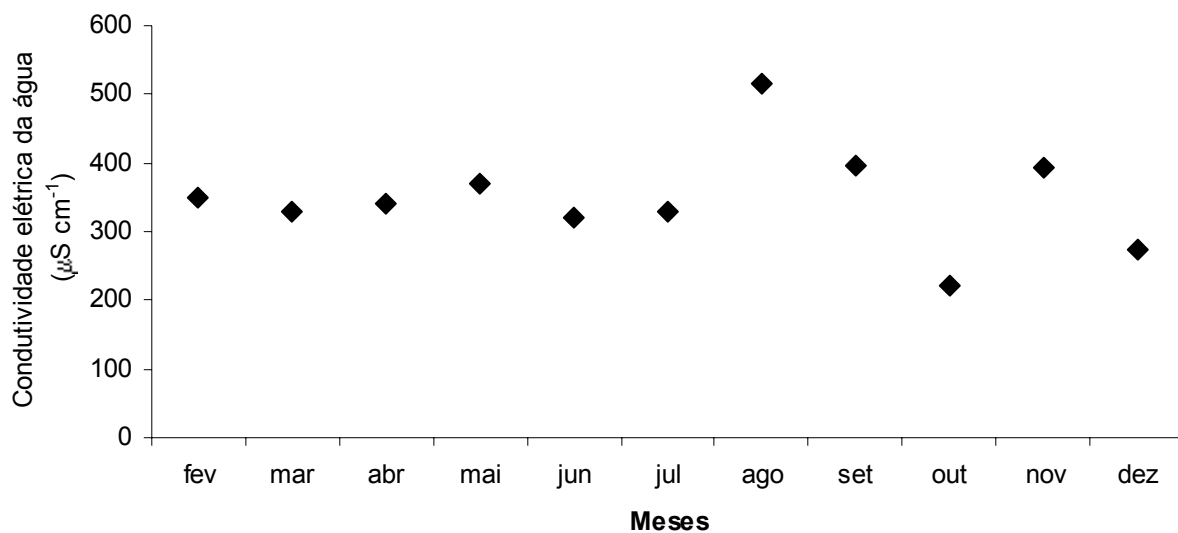


Figura 26 – Variação da condutividade elétrica da água na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins ao longo do ano, ponto 5

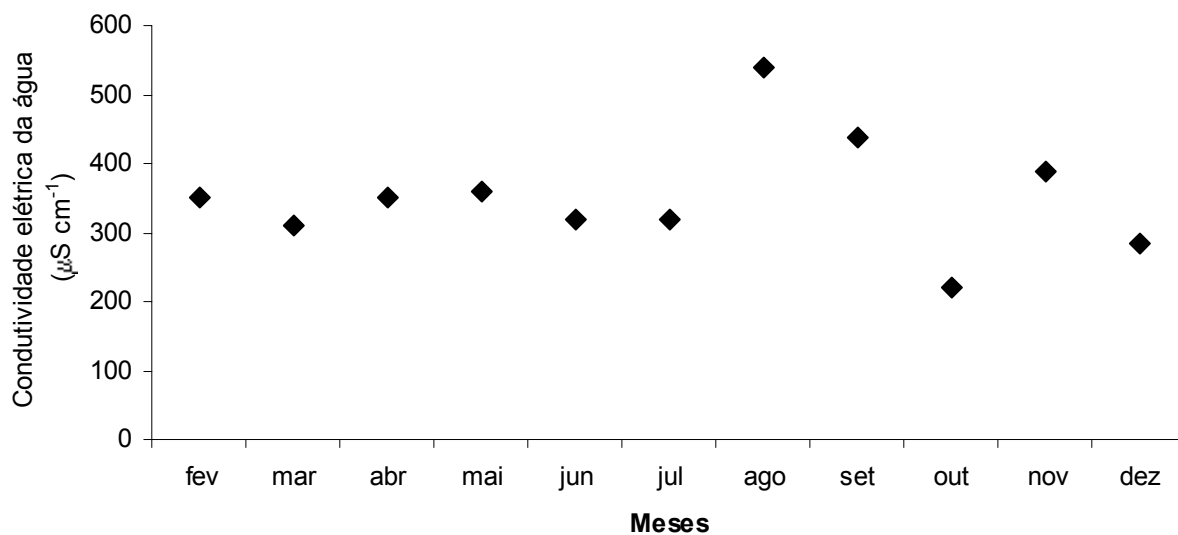


Figura 27 – Variação da condutividade elétrica da água na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins ao longo do ano, ponto 6

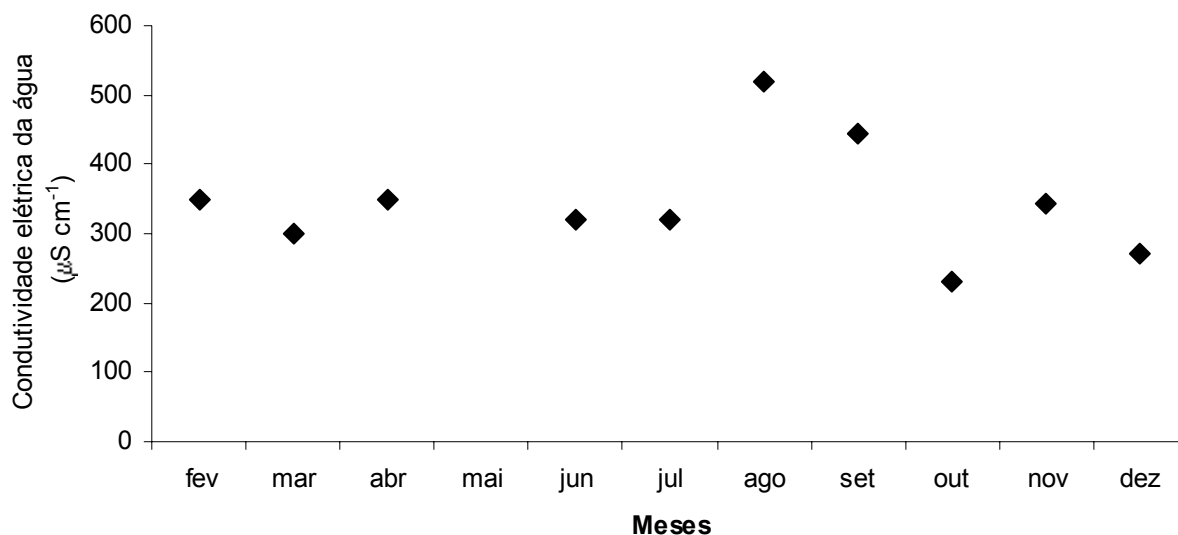


Figura 28 – Variação da condutividade elétrica da água na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins ao longo do ano, ponto 7

Vanzela (2004), estudou a qualidade da água para irrigação na microbacia do córrego Três Barras no município de Marinópolis, São Paulo e verificou que a CEa variou de 89,0 a 961,0 $\mu\text{S cm}^{-1}$, sendo que em um dos pontos amostrais 25% das amostras apresentaram valores de alto risco de salinização de acordo com a classificação USDA. Brito (2005), em estudo de qualidade da água para a bacia do rio Salitre (BA), observou que as fontes superficiais não apresentaram riscos de salinização, com apenas 35% delas sendo classificadas como C3 e C4, porém 75% e 78% das fontes subterrâneas apresentaram sérios riscos de salinização, sendo classificadas como C3 e C4.

Uma comparação com os valores encontrados para a microbacia dos Marins é difícil, pois a variabilidade espacial entre as bacias é grande e há a diferença na geologia das regiões, fator que influencia a qualidade da água. Existe também a escassez de trabalhos de qualidade de água para irrigação dentro do estado de São Paulo, somente a CETESB faz anualmente um relatório com a qualidade das águas interiores do estado.

Um estudo do diagnóstico ambiental e análise temporal da adequabilidade do uso e cobertura do solo na MBHRM foi realizado por Casagrande (2005). O autor concluiu

com base no levantamento e análise realizada, que os recursos hídricos da bacia estão sendo degradados e que fontes potenciais de contaminação dos solos, águas subterrâneas e corpos d'água foram identificadas na MBHRM, o que tem comprometido a qualidade d'água utilizada para irrigação de hortaliças.

4.3 Quantidade de água

As Figuras 29 e 30 mostram os resultados da caracterização das vazões medidas na MBHRM nos períodos de 1999/2000 e 2002/2003. Observa-se que no período de 2002/2003 as vazões, apesar de serem menores em relação ao período 1999/2000, ocorreram com maior regularidade no período de estiagem. No período 2002/2003 a maior vazão ocorreu em março de 2003 ($0,48 \text{ m}^3/\text{s}$), sendo que a menor vazão média foi medida de agosto a outubro de 2003, a qual foi 60% menor do que a maior vazão média registrada no período 1999/2000. Na Tabela 13 consta o resultado obtido pela metodologia de regionalização das variáveis hidrológicas para o Estado de São Paulo.

De acordo com as Figuras 29 e 30 observa-se que a maior vazão média do período de estudo ($1,2 \text{ m}^3/\text{s}$) foi superior em relação à vazão média obtida pelo SIGRH de $0,217 \text{ m}^3/\text{s}$. A menor vazão do período 1999/2000 representou 3,5% da $Q_{7,10}$ e para o período 2002/2003 representou 9%, quando comparadas com os valores estimados para a sub-bacia Monjolinho.

A vazão total $0,02125 \text{ m}^3/\text{s}$ utilizada pelos produtores de hortaliças ainda é baixa quando comparada com a vazão média estimada com a metodologia de regionalização para a microbacia do ribeirão dos Marins; essa vazão total representou 3,31%.

Tabela 13 – Resultados de vazão média, vazão com 95% de permanência e vazão mínima de 7 dias consecutivos ($T=10$) obtido pela metodologia de regionalização das variáveis hidrológicas para o Estado de São Paulo

	Sub-bacia Monjolinho	Bacia dos Marins
Precipitação anual média (mm)	1300	1338
$Q_m (\text{m}^3 \text{ s}^{-1})$	0,217	0,641
$Q_{95\%} (\text{m}^3 \text{ s}^{-1})$	0,114	0,233
$Q_{7,10} (\text{m}^3 \text{ s}^{-1})$	0,095	0,143

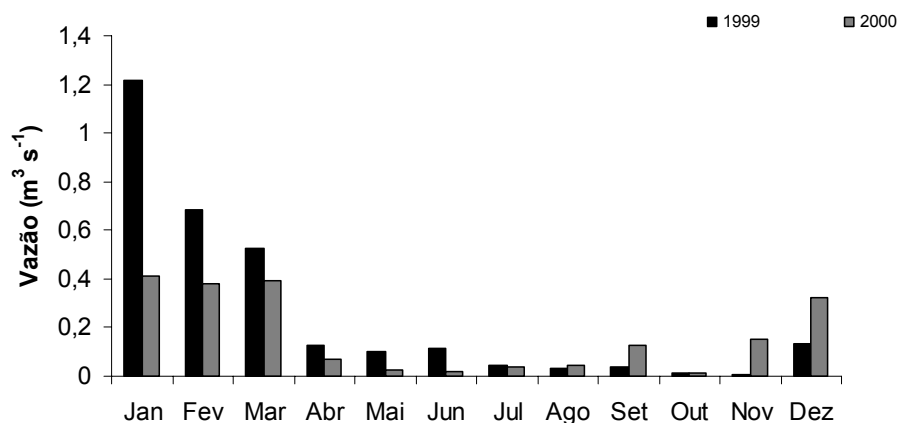


Figura 29 – Vazões médias registradas na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins (fonte: Moreti, 2001)

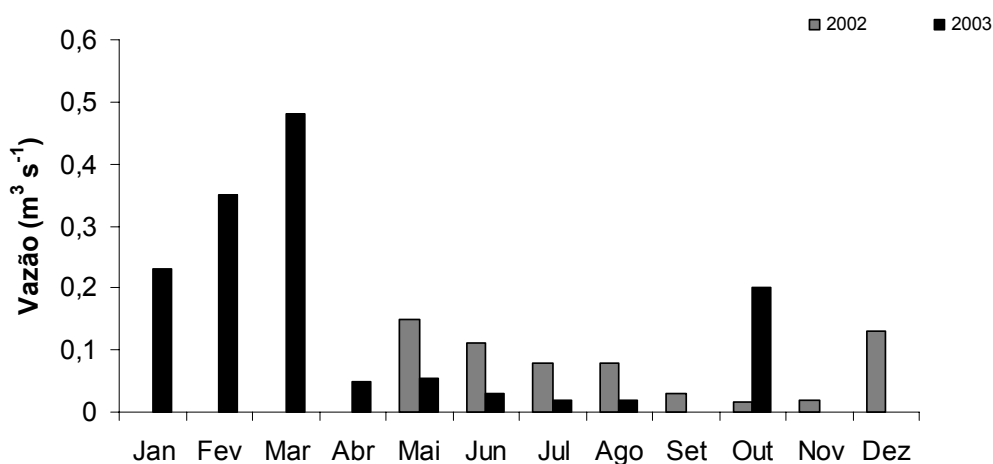


Figura 30 – Vazões médias registradas na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins (fonte: SEMA, 2003)

No entanto quando comparada com a vazão média do período de 2002 a 2003, existe risco de falta de água para irrigação, visto que a maior vazão média registrada no período de estiagem foi de $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$ e a vazão total representou 35,4% no mesmo período. Já para a $Q_{95\%}$ e $Q_{7,10}$ estimada para a microbacia dos Marins os percentuais subiram para 9% e 14,8%, respectivamente.

4.4 Sistemas de irrigação e manejo

A Tabela 14 apresenta os resultados dos testes de campo realizados em quatro propriedades produtoras de hortaliças da avaliação dos sistemas de irrigação em relação à eficiência, medida através da uniformidade de distribuição, representada pelo coeficiente de uniformidade de Christiansen (1942), CUC.

Pereira et al. (2002), afirmam que a avaliação de campo fornece boas informações para os produtores melhorarem o manejo da irrigação, introduzir mudanças, mesmo que limitadas, além de informações úteis para projetistas e controle de qualidade dos projetos e serviços relacionados com a irrigação.

De acordo com os resultados, verificou-se que a uniformidade de distribuição de água pelos sistemas de irrigação ficou dentro do limite de 65 a 85% apresentado por Keller e Bliesner (1990) e de 70 a 80% apresentado por Marouelli et al. (2001). Estes testes evidenciaram que os sistemas utilizados na produção de hortaliças operam dentro dos padrões mínimos de uniformidade durante o desenvolvimento fenológico da cultura, contribuindo para a economia de água e insumos. Entretanto, Brito (2003) verificou que o aumento nas variáveis de qualidade das águas em áreas sob influência da irrigação resultaram da baixa eficiência dos sistemas de produção, envolvendo não apenas o manejo da irrigação e do solo, mas também dos agroquímicos aplicados, evidenciando a necessidade de um manejo adequado desses fatores de produção, de forma a garantir a sua sustentabilidade, objetivando obter elevadas produtividades.

Nascimento et al. (1999), estudaram a uniformidade de distribuição de água na superfície e no perfil do solo irrigado com um microaspersor e constatou que a baixa uniformidade de precipitação não exerceu influência na uniformidade de distribuição no perfil do solo. Isso indica que a uniformidade de distribuição dos sistemas de irrigação dos agricultores da MBHRM provavelmente garante uma boa umidade no perfil do solo, fato que pode ser confirmado pelos resultados de umidade do solo medidos durante uma estação de cultivo, que propiciou uma umidade adequada do solo para o bom desenvolvimento das hortaliças. Dechmi et al. (2003), atribui à baixa eficiência a inadequada estrutura de irrigação, pobre manejo da irrigação e/ou insuficiente disponibilidade de água. Portanto, os autores alertam que os produtores rurais devem mudar os sistemas de irrigação na busca de eficiência, já que a água é considerada

não apenas um limitado recurso mas também um fator de produção e um relevante insumo econômico. Pereira et al. (2002), enfatizam que o melhoramento da irrigação está relacionado com a alta uniformidade de irrigação, a qual implica em melhores projetos, apropriada seleção de equipamento para irrigação, manutenção cuidadosa e extensa avaliação de campo. Segundo os autores, quando uma melhor uniformidade é atingida, existe também condições para atingir alta eficiência e aplicar água de baixa qualidade com menos impacto ao ambiente. Dentro deste contexto os produtores da MBHRM necessitam adequar a produção de hortaliças à nova realidade da agricultura irrigada em busca da sustentabilidade, bem como a nova lei de cobrança pelo uso da água e a aplicação de água de baixa qualidade na produção, visto que a qualidade da água discutida anteriormente não é boa.

Tabela 14 – Coeficientes de uniformidade determinados em 4 propriedades agrícolas da microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins

Propriedades	CUC%
A	77
B	75
C	71
D	64
Média	71

O manejo da irrigação é fundamental para a sustentabilidade da irrigação, mas na MBHRM os pequenos agricultores não o utilizam, e obtém uma irrigação adequada para a produção de hortaliças através do conhecimento empírico e baseado pela experiência; porém, muitas vezes o uso é inadequado e o manejo da irrigação promove o uso mais eficiente e racional da água garantindo a atividade por mais tempo. Outra vantagem do manejo da irrigação é responder às questões clássicas de: quando e quanto irrigar? O momento de irrigar é muito importante para manter a maior disponibilidade de água no solo e, assim, reduzir os problemas relacionados à extração de água pelas plantas (AYERS; WESTCOT, 1999).

Para tanto as Figuras de 31 a 34 mostram as curvas características de retenção de água no solo determinadas nas propriedades produtoras de hortaliças, as quais

auxiliaram na avaliação do manejo da irrigação através do manejo da tensão de água no solo, utilizando a técnica de tensiometria. Contudo, as irrigações foram realizadas pelos produtores sem interferência das leituras obtidas, pois o intuito do manejo era justamente observar se a irrigação era praticada racionalmente.

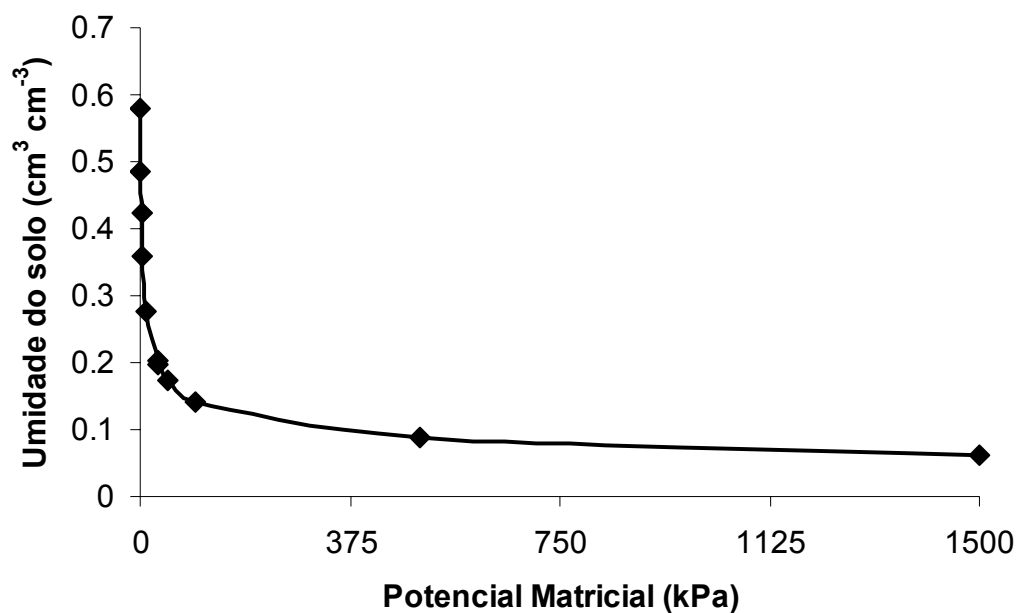


Figura 31 – Curva característica de retenção de água no solo, propriedade 1, profundidade de 0-20 cm

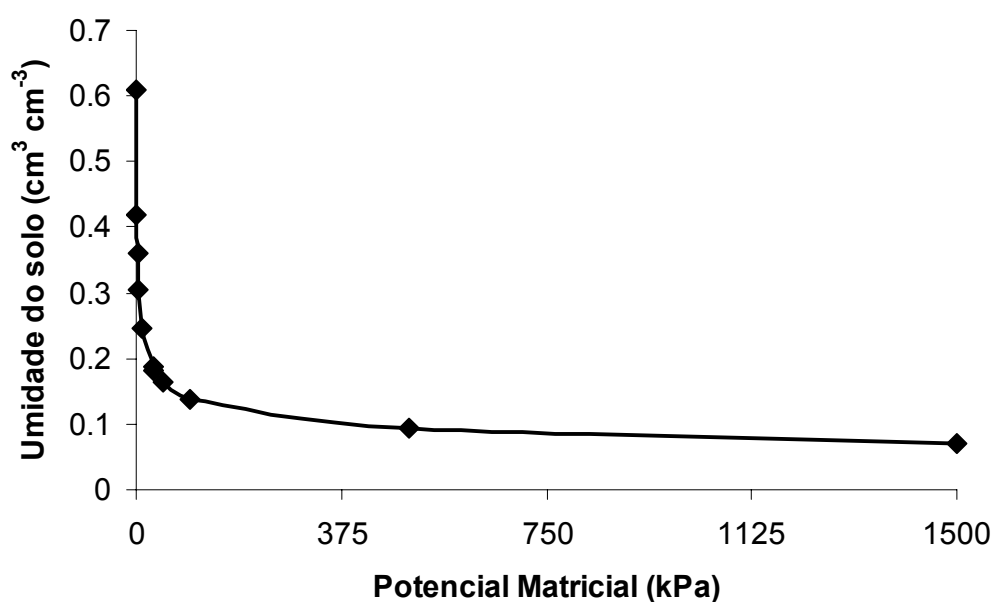


Figura 32 – Curva característica de retenção de água no solo, propriedade 1, profundidade de 20-40 cm

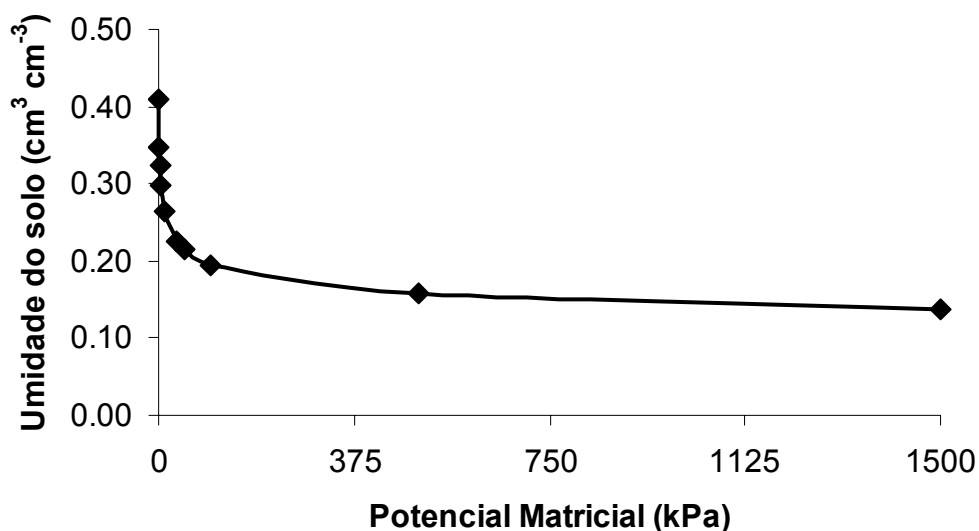


Figura 33 – Curva característica de retenção de água no solo, propriedade 2, profundidade de 0-20 cm

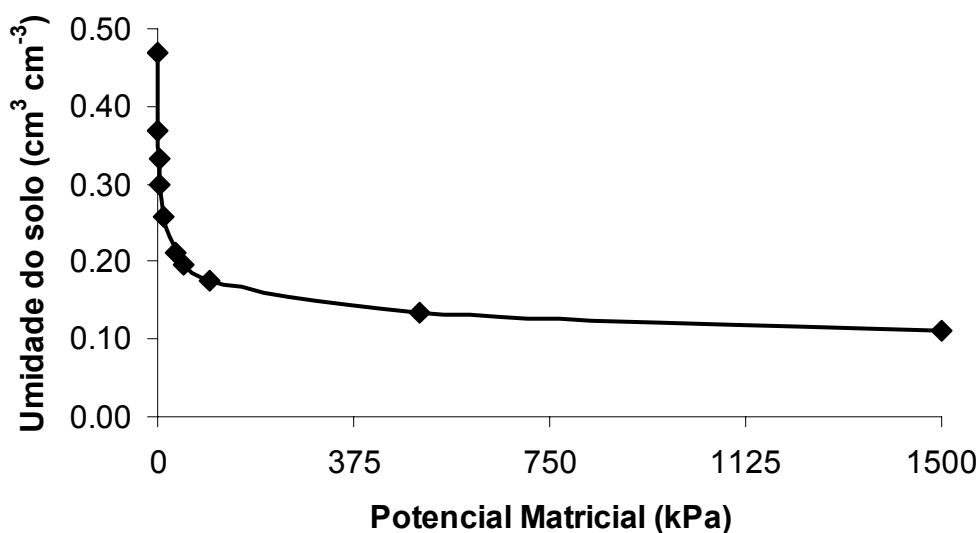


Figura 34 – Curvas característica de retenção de água no solo, propriedade 2, profundidade de 20-40 cm

As leituras de tensiômetros apresentaram diferenças estatísticas significativas em nível de 5% de probabilidade para as diferentes áreas (2 irrigadas, 1 não irrigada e 1 de vegetação nativa). Essa diferença pode ser atribuída à variabilidade espacial das propriedade físicas do solo e à diferença de manejo entre as propriedades bem como à área de vegetação nativa que não sofria interferência antrópica.

As figuras de 35 a 38 apresentam os resultados das leituras tensiométricas ao longo de uma estação de cultivo na propriedade 1 em uma área irrigada e outra área sem irrigação.

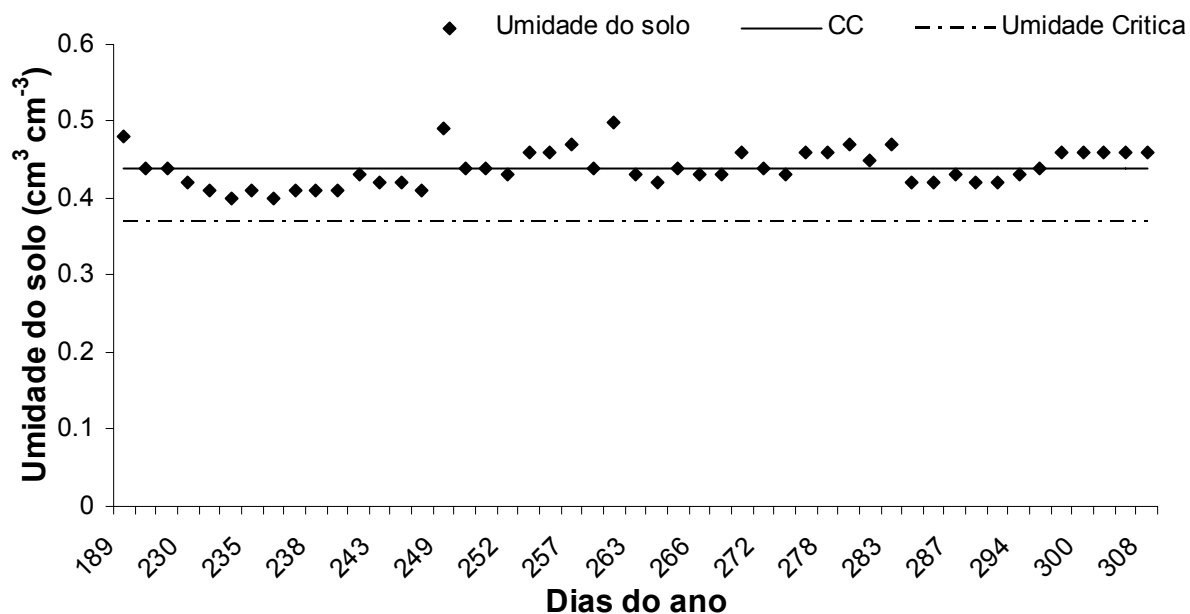


Figura 35 – Umidade do solo na área de estudo irrigada da propriedade 1, profundidade de 0-20 cm

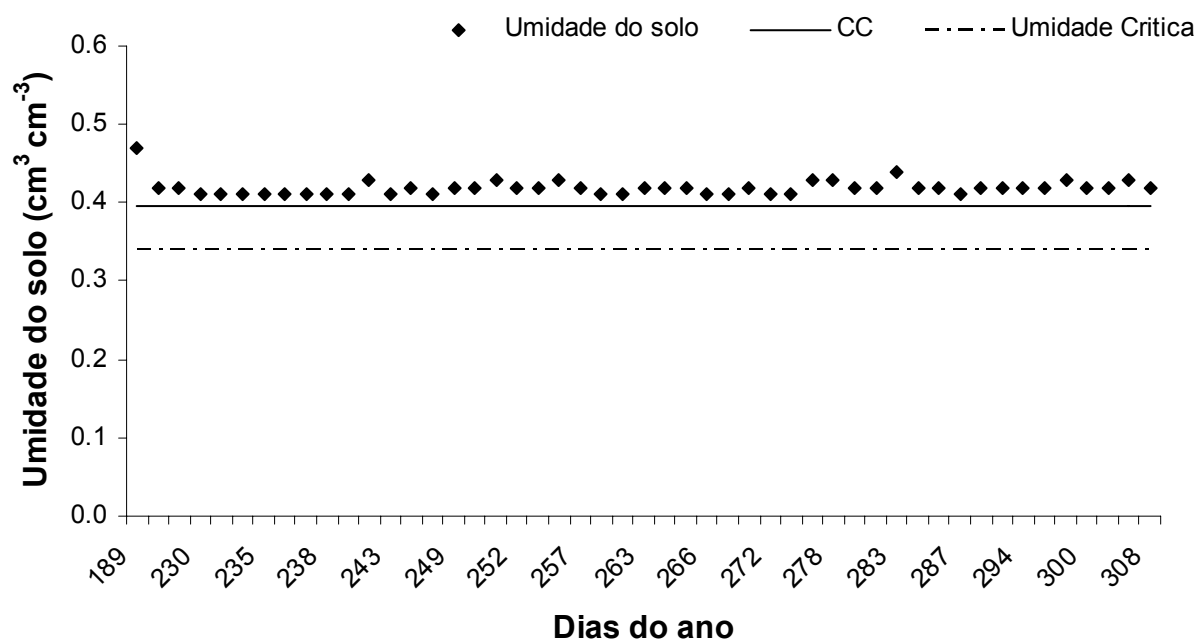


Figura 36 – Umidade do solo na área de estudo irrigada da propriedade 1, profundidade de 20-40 cm

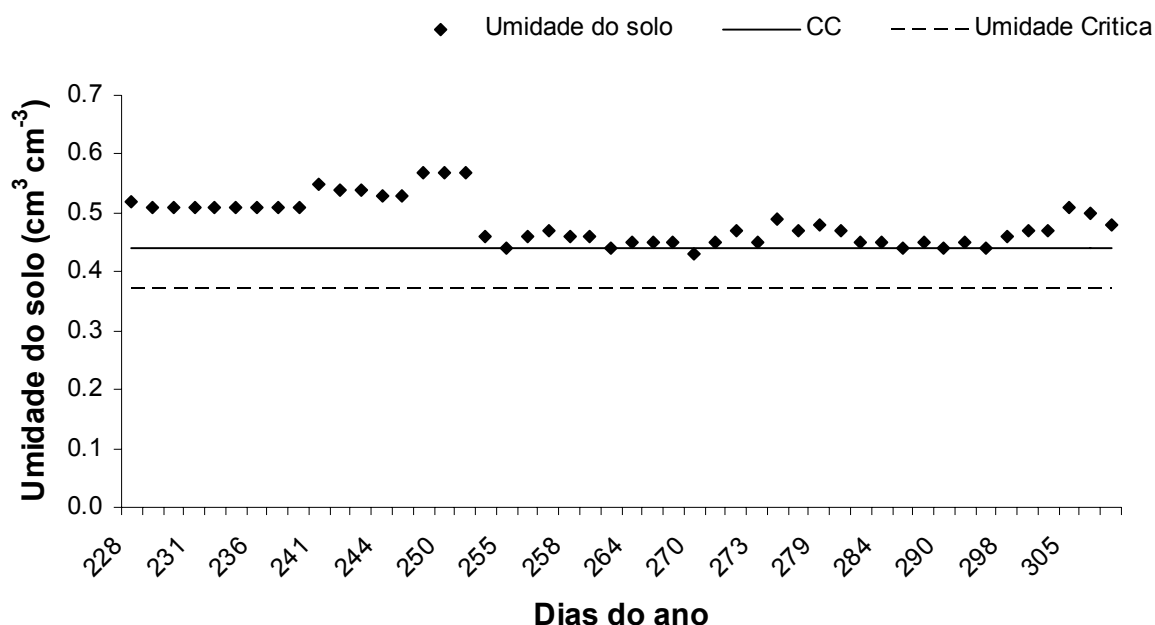


Figura 37 – Umidade do solo na área de estudo não irrigada da propriedade 1, profundidade de 0-20 cm

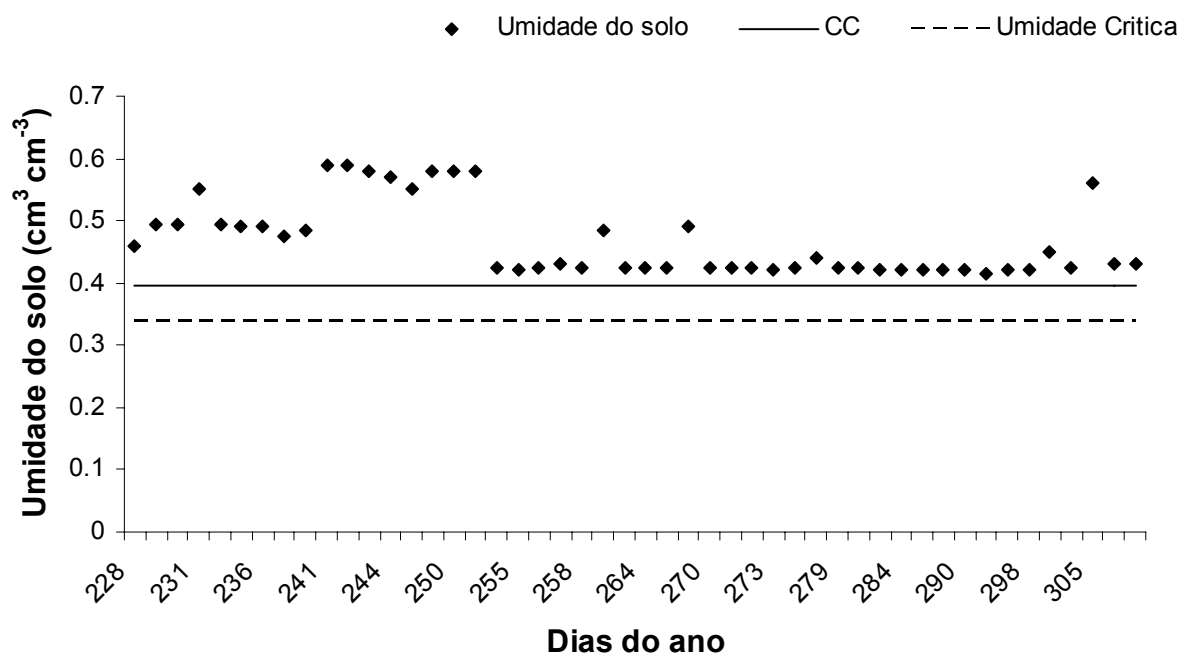


Figura 38 – Umidade do solo na área de estudo não irrigada da propriedade 1, profundidade de 20-40 cm

Na propriedade 1, para a camada de 0,0-0,20 m da área irrigada a umidade do solo ficou próxima da capacidade de campo, enquanto que para a camada de 0,20-0,40 m a umidade do solo ficou próxima da saturação. O valor médio de umidade foi de 0,438 e 0,42 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para as camadas de de 0,0-0,20 m e 20,0-0,40 m,

respectivamente. Nesta propriedade o produtor praticava a irrigação manualmente com o auxílio de uma mangueira e distribuía água na área. O uso de irrigação manual é uma prática comum dos agricultores da MBHRM.

Na área sem irrigação da propriedade 1 a umidade do solo também ficou próxima da saturação nas duas camadas. A umidade média para esta área foi de 0,484 e 0,468 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente para as camadas de 0,0-0,20 m e 0,20-0,40 m. Esses resultados indicam que há um excesso de umidade na camada de 0,20-0,40 m podendo ocasionar perda de água por percolação.

As Figuras de 39 a 42 mostram a umidade do solo na propriedade 2 para uma área irrigada e uma área de vegetação nativa.

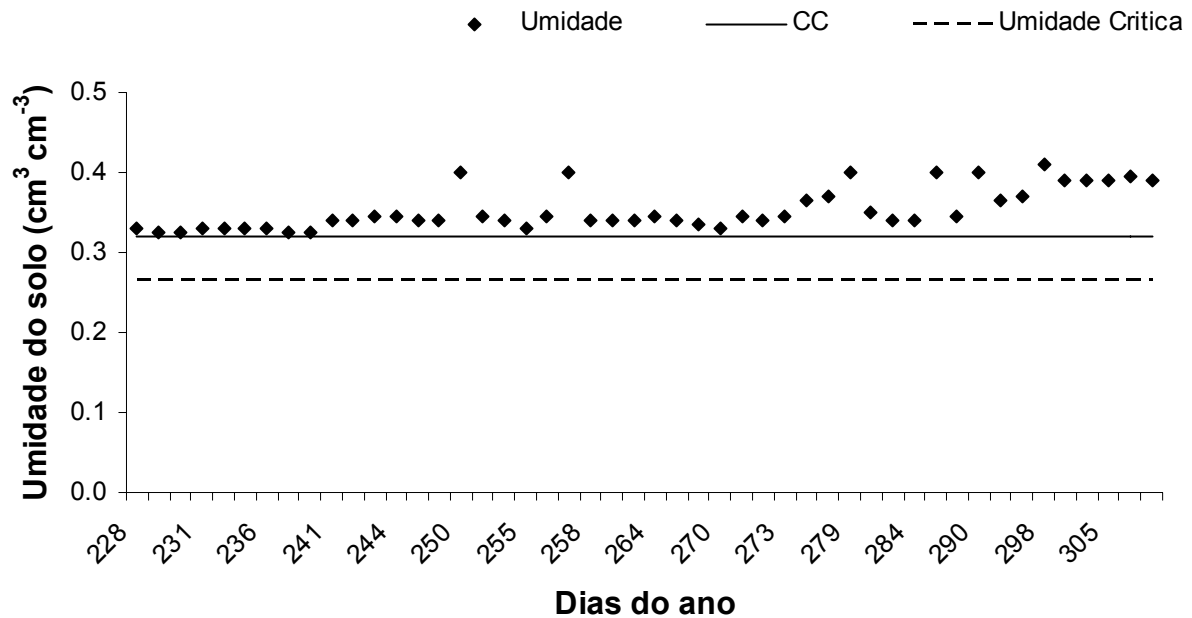


Figura 39 – Umidade do solo na área de estudo irrigada da propriedade 2, profundidade de 0-20 cm

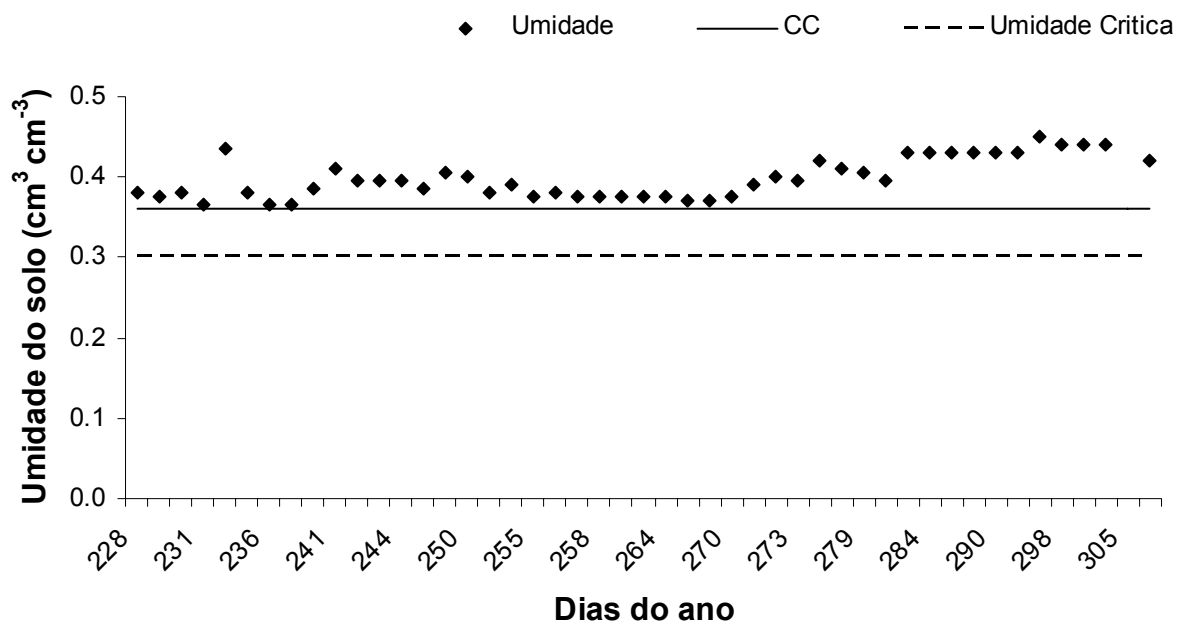


Figura 40 – Umidade do solo na área de estudo irrigada da propriedade 2, profundidade de 20-40 cm

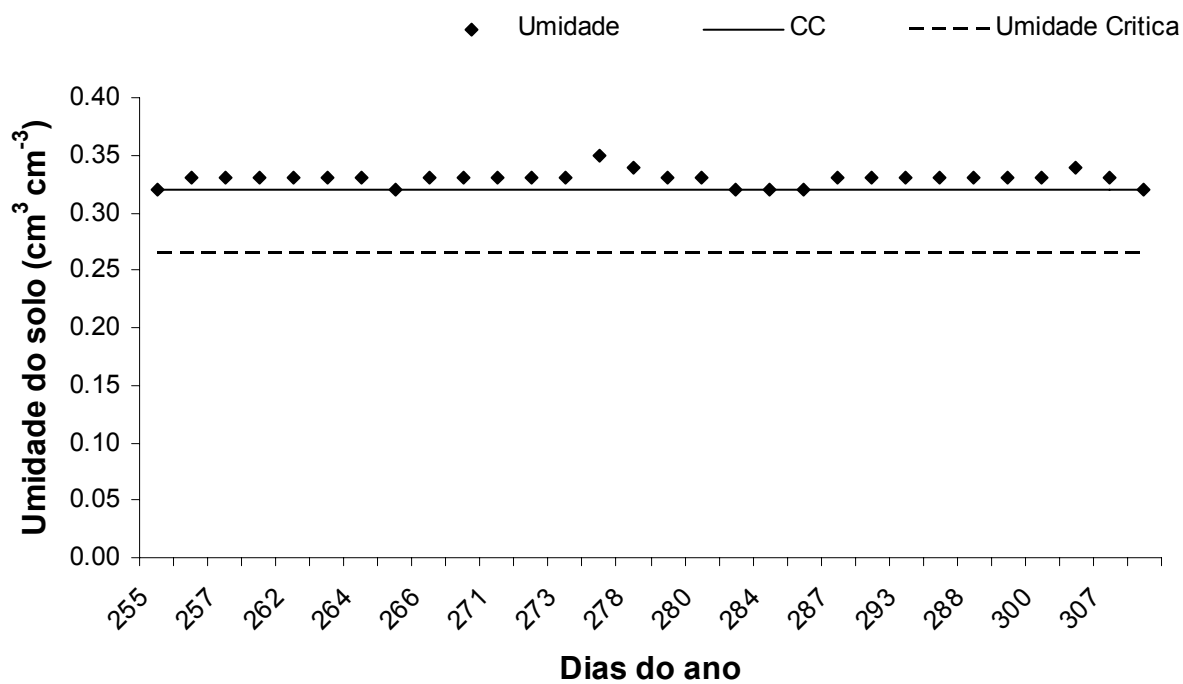


Figura 41 – Umidade do solo na área de estudo adjacente na propriedade 2, profundidade de 0-20 cm

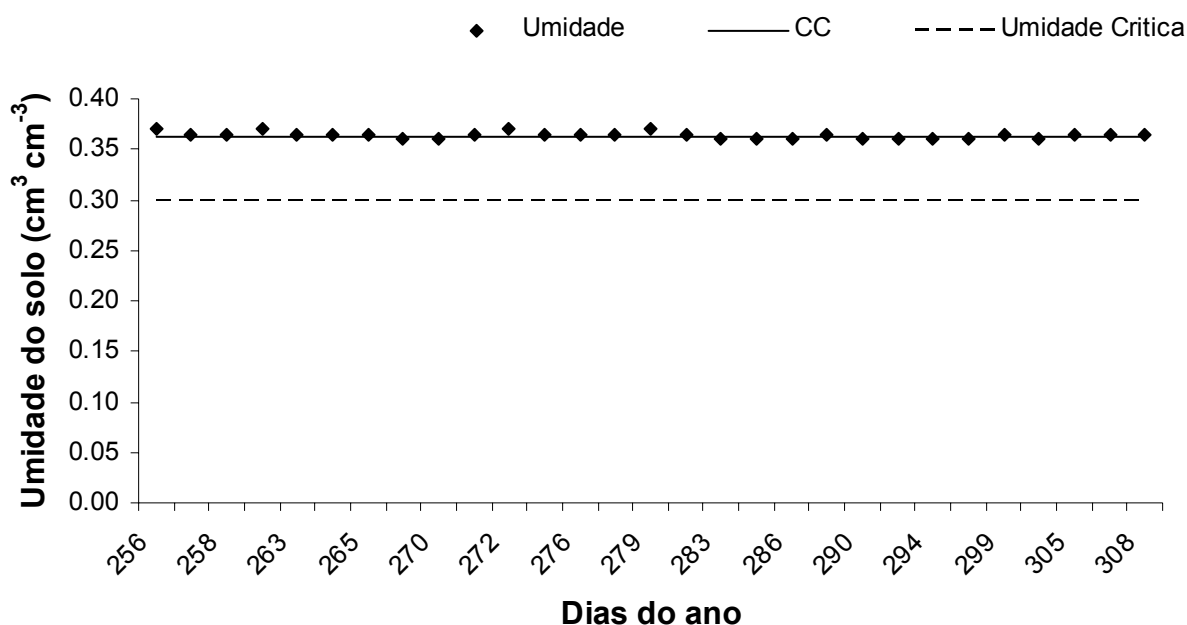


Figura 42 – Umidade do solo na área de estudo adjacente na propriedade 2, profundidade de 20-40 cm

Nessa propriedade verificou-se que a umidade ficou próxima da saturação durante o período de cultivo. O valor médio de umidade do solo nesta área foi de $0,354 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ na profundidade de 0,0-0,20 m e $0,402 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ na profundidade de 0,20-0,40 m. Na área de vegetação natural a umidade do solo apresentou um comportamento semelhante ao da área irrigada, próximo da saturação. Os valores médios para esta área foram de $0,330$ e $0,360 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para as camadas de 0,0-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente.

De acordo com Marouelli et al. (1996), para as hortaliças produzidas na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins, a tensão de água no solo em que se deve promover a irrigação para a obtenção da produtividade máxima está entre 40 e 70 kPa, o equivalente a 400-700 cmH₂O. A Tabela 15 mostra os valores de umidade crítica, capacidade de água disponível, capacidade de campo e ponto de murcha permanente para as duas propriedades da bacia.

Mantendo a umidade do solo próximo da saturação pode ocorrer a lixiviação de nutrientes causando a contaminação das águas superficiais e subterrâneas da MBHRM, além causar prejuízo econômico aos agricultores devido a perda do fertilizante aplicado ou redução da produção.

Tabela 15 – Valores de umidade na capacidade de campo, ponto de murcha permanente, umidade crítica, lâmina de água disponível e lâmina real disponível na profundidade de 0,20 – 0,40 m, para as duas propriedades da bacia

Umidade	Área irrigada 1	Área irrigada 2
θ_{CC}	0,396	0,36
θ_{PMP}	0,257	0,204
θ_{Uc}	0,34	0,3
LTD (mm)	55,6	62,4
LRD (mm)	22,4	24,0

Na Tabela 15 de umidade do solo, verifica-se que a lâmina total disponível foi de 55,6 e 62,4 mm para as áreas 1 e 2 respectivamente. A lâmina real disponível foi de 22,4 e 24,0 mm para as respectivas áreas, o que representou 40 e 38% da água total disponível para as hortaliças. Contudo, a lâmina real disponível é utilizada pela planta após as irrigações que elevam a umidade do solo para atender a evapotranspiração da cultura, porém com as perdas por evaporação e pela drenagem natural dos solos a umidade é reduzida, implicando em uma nova irrigação para manter a umidade próxima a capacidade de campo. Deste modo a ausência de manejo da irrigação na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins pode induzir os agricultores a irrigar em excesso ou déficit.

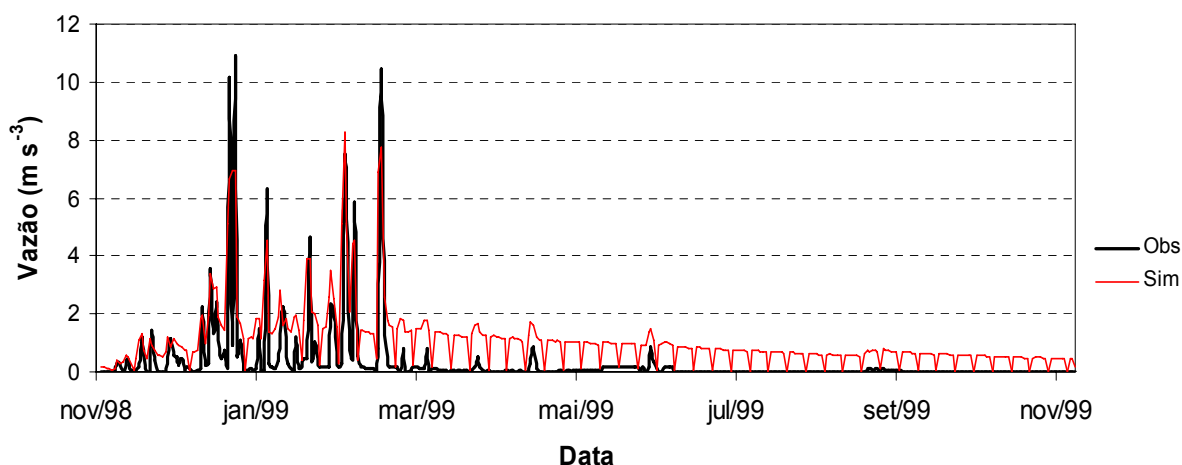
Ines et al. (2002) afirmam que a umidade atual do solo é um potencial recurso na agricultura, pois deve ser considerado quando seleciona-se variedades com sistema radicular profundo, o qual pode aproveitar-se da umidade atual. Assim, com a adoção do manejo os produtores rurais da bacia economizariam água e insumos, pois a umidade do solo mantida acima da capacidade de campo favorece a lixiviação de nutrientes acarretando prejuízo ao agricultor e ao meio ambiente, já que a água percolada fora da zona radicular atinge o lençol freático e posteriormente os corpos d'água, contaminando-os.

4.5 Avaliação do desempenho do modelo MIKE SHE/11

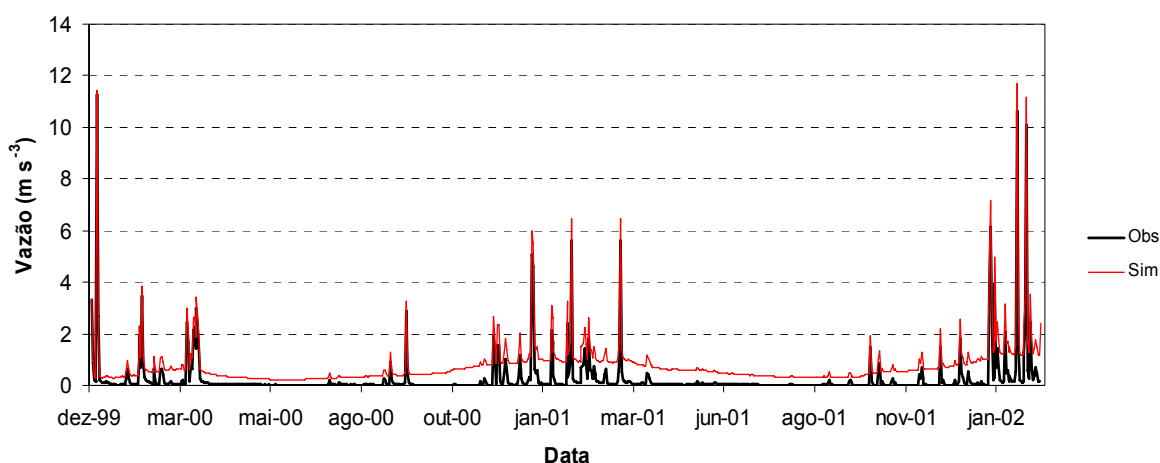
A Tabela 16 apresenta os resultados finais dos parâmetros utilizados na calibração e validação do modelo, enquanto que a Figura 43 mostra a comparação da vazão observada com a simulada.

Tabela 16 – Valores estatísticos de avaliação do modelo para os períodos de calibração e validação

Período de calibração		Período de validação	
CD	0,83	CD	0,65
R ² Pearson	0,75	R ² Pearson	0,96
EMA	0,00	EMA	0,00
COE	0,99	COE	0,99



a)



b)

Figura 43 – Comparação dos resultados da vazão observada e simulada para o período de calibração (a) e validação (b)

Os critérios de avaliação de desempenho mostram que o modelo foi bem calibrado apresentando um desempenho excelente de acordo com o COE (Tabela 16) e desempenho muito bom de acordo com os demais critérios utilizados. Para o período de validação o modelo teve um desempenho excelente considerando-se o COE e demais critérios com exceção do CD que apresentou um valor de 0,65; entretanto, este

critério não afeta o desempenho geral do modelo que pode ser comprovado pela Figura (43) onde a comparação da vazão observada com a vazão simulada apresentou um COE de 0,99 para ambos os períodos.

O COE é um dos critérios mais utilizados em estudos de bacias hidrográficas de diferentes tamanhos na modelagem de componentes do ciclo hidrológico. Singh et al. (1999) obteve um desempenho aceitável do modelo MIKE SHE no estudo da modelagem hidrológica de uma pequena bacia hidrográfica com o objetivo de planejamento da irrigação, com um COE de 0,68.

Andersen et al. (2001) estudaram a construção e a validação de um modelo hidrológico para a bacia do rio Senegal e obtiveram valores de COE variando de 0,69 a 0,9. Esses resultados confirmam que o modelo MIKE SHE/11 para a MBHRM teve um bom ajuste dos dados disponíveis para a MBHRM, tanto para o período de calibração quanto para o período de validação.

4.6 Simulações

Os cenários simulados não apresentaram diferença estatística significativa ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. A simulação, período de janeiro de 2000 a fevereiro de 2002, da área irrigada (65 ha) com o sistema de gotejamento apresentou o maior volume médio de 0,2 m³, já os cenários 1 e 2 para o sistema de aspersão os volumes médios foram 0,15 e 0,18 m³, respectivamente (Tabela 17).

Tabela 17 – Valores dos volumes médios aplicados na área irrigada durante a simulação

Cenários	Volumes médios (m³)
Irrigação por aspersão com manejo	0,15 a
Irrigação por aspersão sem manejo	0,18 a
Irrigação por gotejamento com manejo	0,20 a
Irrigação por gotejamento sem manejo	0,20 a

Na simulação de cenários realizada como o modelo hidrológico MIKE SHE comparando-se os métodos de irrigação por aspersão contra o método de irrigação localizada por gotejamento, cenário 1, constatou-se que o método por aspersão foi superior em economia de água aplicando um volume total de 122 m³, enquanto que o método de irrigação localizada por gotejamento o volume aplicado foi de 161 m³. A

diferença de volume total aplicado foi de 39 m³ que representou 32% a mais de água aplicada por este método. Neste cenário esperava-se melhor desempenho do sistema por gotejamento considerado superior em economia de água em relação ao sistema por aspersão convencional, pois aplica água direto ao solo próximo à planta.

No cenário 2, quando a demanda hídrica foi fixada em 6 mm dia⁻¹, o volume de água aplicada pelo sistema por aspersão subiu para 143 m³, o que representou um acréscimo de 17%, ou seja um volume de 22 m³ a mais de água aplicado na área irrigada. Porém, este volume ainda foi menor quando comparado com o sistema por gotejamento; o volume total aplicado no sistema por aspersão ficou 12% abaixo, o que significou um volume de 19 m³ a menos de água aplicada na área irrigada. Este resultado confirma que o bom desempenho do sistema por aspersão na simulação pode ser atribuído à aplicação da água junto com a precipitação.

A diferença entre os volumes totais aplicados nos cenários 1 e 2 foi pequena devido à área irrigada ter um tamanho pequeno e a demanda fixa de 6 mm ser próxima à maior demanda da região de Piracicaba; porém, quando uma área irrigada maior é considerada este volume representa um volume significativo.

De acordo com Jayatilaka et al. (1998), quando realiza-se a modelagem de pequenas áreas irrigadas é fundamental estabelecer as condições de fronteiras para o lençol freático, evitando o efeito do mesmo na área irrigada. Na simulação de cenários da MBHRM não analisou-se a influência do lençol freático, pois não havia medida de campo da alteração da profundidade do mesmo. Outro aspecto que pode influenciar o desempenho de um modelo é calibração, mesmo que bem realizada não há garantia que todas as variáveis do modelo atinjam um bom ajuste.

Modelar uma área irrigada é um processo complexo, mas de grande importância para alcançar o uso eficiente da água e atingir um gerenciamento sustentável para a irrigação (LOHANI et al., 1993).

A Figura 44 ilustra os volumes mensais de irrigação para o cenários 1 e 2 de janeiro de 2000 a fevereiro 2002. Na Figura 45 são mostrados a variação da umidade do solo na zona não saturada e na zona radicular simulada ao longo do período. Uma análise detalhada da umidade atual do solo é necessária quando se pratica a irrigação, pois permite uma irrigação adequada as condições físico-hídricas do solo.

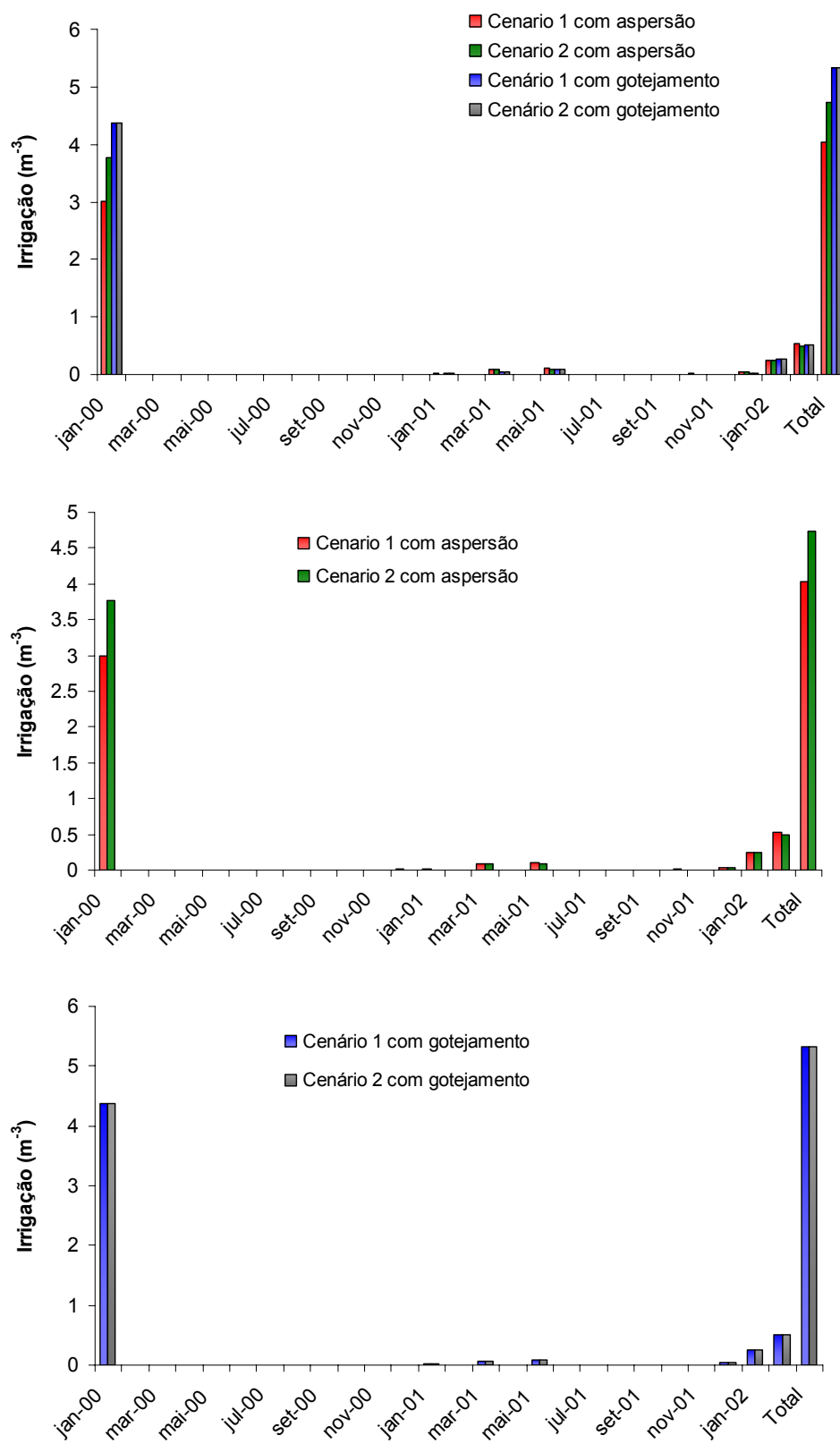


Figura 44 – Volumes de irrigação para os cenários simulados

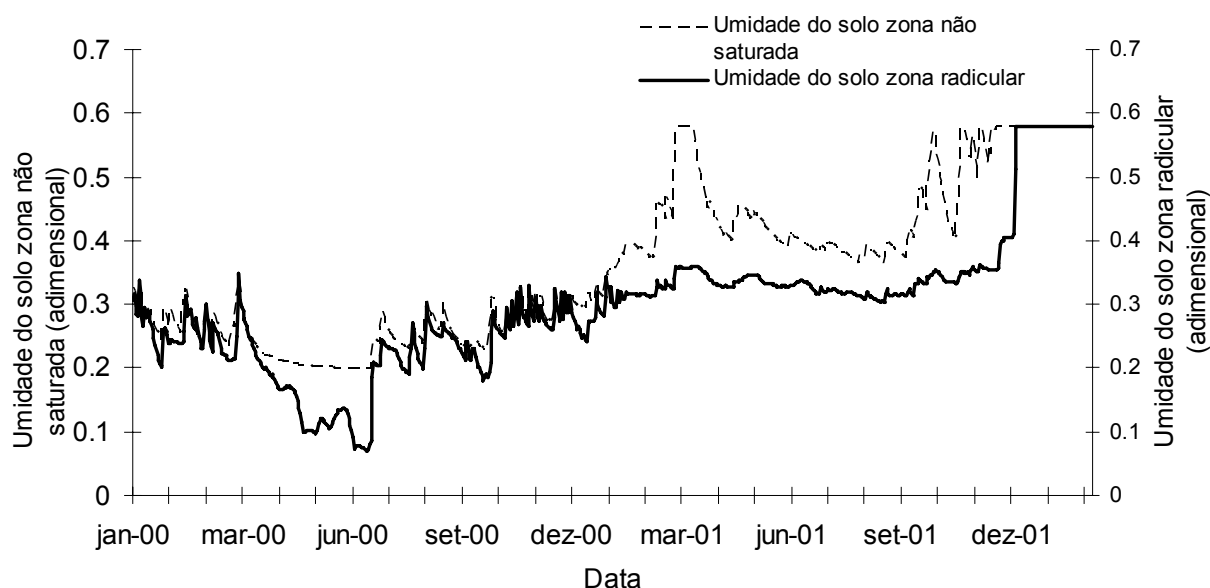


Figura 45 – Variação temporal da umidade do solo período de simulação

Segundo Carter et al. (1999), o controle de perda de água é um passo muito importante no aspecto de um bom gerenciamento da água, ou seja, aplicação de água com critério conduz a economia de água no setor agrícola e maior disponibilidade de água para outros usos, daí a necessidade da prática da irrigação considerando a umidade atual do solo para que a mesma atenda a necessidade hídrica das hortaliças garantindo a produção potencial sem uso excessivo da água.

Com a simulação de cenários para a MBHRM, assumindo-se que as operações típicas eram menos eficientes, o risco que estas apresentaram foram relacionados com o escoamento superficial e a infiltração que ocorreram na área irrigada bem como na microbacia como um todo ilustrados na Figura 46. Observa-se um escoamento de 218 mm para o ribeirão, o qual pode conter partículas de solo contribuindo para a alteração da qualidade da água superficial, enquanto que a infiltração ocorrida no período foi de 923 mm, a qual também percola pelo perfil do solo contendo fertilizantes ou agroquímicos que alteram a qualidade da água subterrânea. Este cenário pode ser confirmado pelo levantamento realizado por SEMA (2003), que relata que o histórico de desmatamento indiscriminado da mata ciliar e o mau uso do solo que delimitam a microbacia, têm provocado à diminuição do volume de água, a perda da fertilidade do solo, aumento do escoamento superficial, redução das áreas úteis para agricultura e

pecuária, assoreamento de nascentes e do leito dos ribeirões, entre outros fatores que comprometem diretamente a qualidade e a quantidade das águas, ou seja há uma necessidade imediata de praticar uma atividade irrigada sustentável.

O balanço hídrico (Figura 46) extraído dos resultados da simulação feita para a MBHRM para o período modelado, ou seja, de 1/1/2000 a 25/02/2002, observa-se que a precipitação excedeu a evapotranspiração e a Figura 48 mostra como foi a distribuição diária desses componentes do ciclo hidrológico.

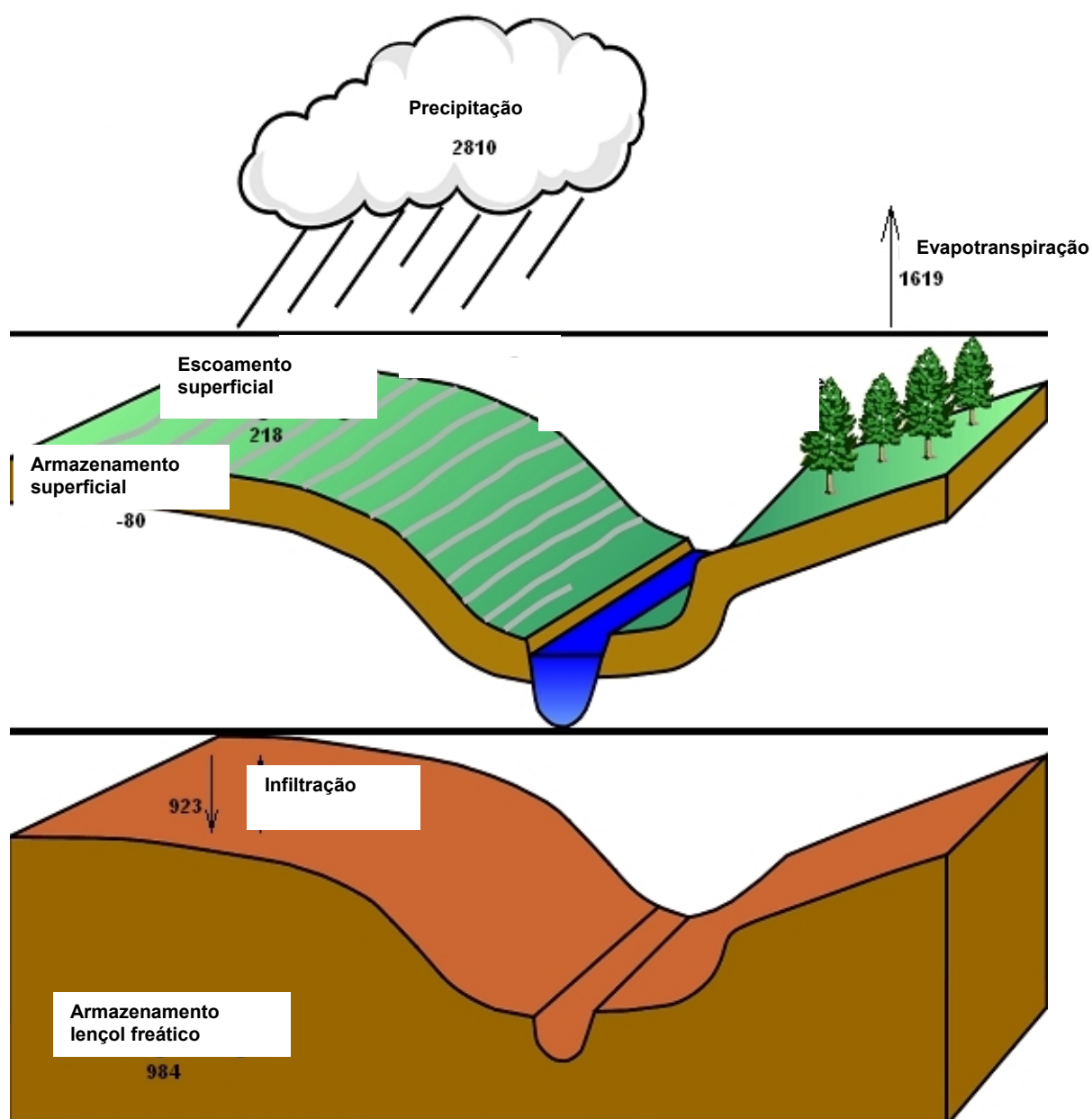


Figura 46 – Balanço Hídrico do período simulado, janeiro de 2000 a fevereiro de 2002

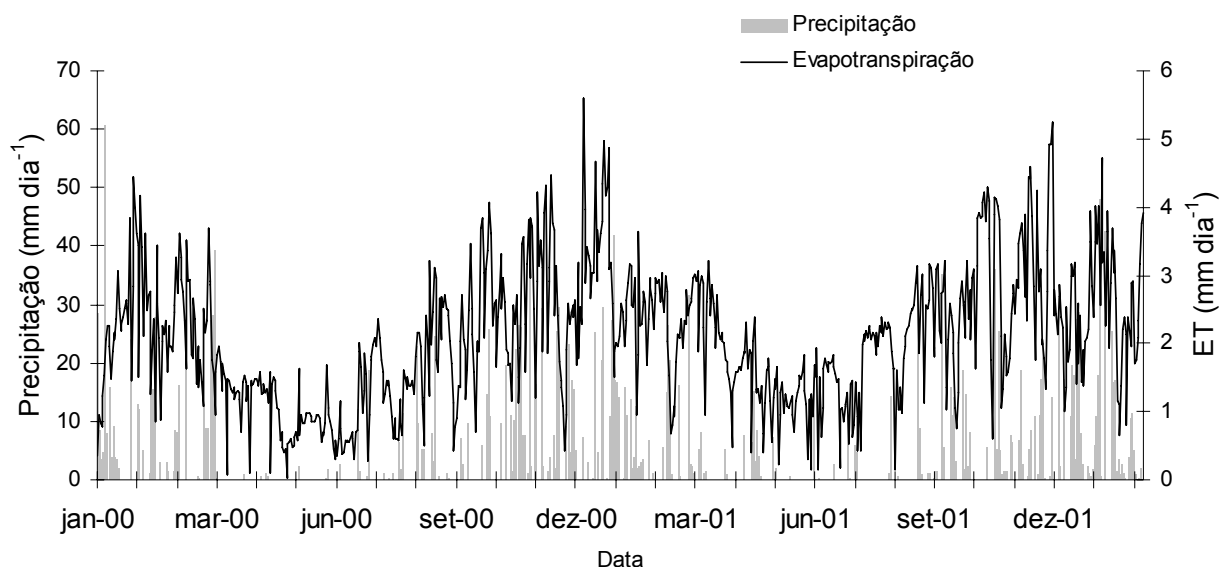


Figura 47 – Variação temporal da precipitação e da evapotranspiração para o período simulado

No geral, a simulação de cenários em pequenas áreas irrigadas com fins de manejo da irrigação e gerenciamento de recursos hídricos demonstrou o potencial do modelo hidrológico MIKE SHE em simular o volume de água aplicado ao solo através da irrigação por diferentes métodos e considerando a MBHRM como um todo. O uso do modelo permite a simulação de vários cenários até o ponto em a que melhor situação é atingida; no entanto, houve falta de dados de série histórica para a realização de cenários futuros, os quais poderiam simular a expansão da área irrigada ou o volume máximo de água que poderia ser captado da MBHRM para o uso na irrigação sem comprometer outros usos.

O modelo teve um desempenho bom para o propósito deste trabalho e pode ser melhor explorado com outras combinações de cenários ou estudo mais detalhado do ciclo hidrológico da microbacia do ribeirão dos Marins. Um dos fatores que permitiu uma boa avaliação do modelo MIKE SHE foi a quantidade de opções oferecida no momento de realizar simulações durante o estudo da área irrigada. Outra vantagem do modelo é a possibilidade de estudar a expansão da irrigação considerando os diferentes usos e cobertura do solo que permite fazer uma análise detalhada de qual uso interfere mais ou menos na qualidade e quantidade da água, gerando informações essenciais para o gerenciamento dos recursos hídricos.

Por outro lado, quando usa-se modelos como o MIKE SHE há dificuldades, tais como a quantidade de dados de entrada que o modelo necessita e a quantidade e tipos de dados disponíveis para o local de estudo. Neste estudo a falta de dados de solo medidos em campo como a condutividade hidráulica e infiltração dificultaram a calibração e possivelmente influenciaram os resultados dos parâmetros relacionados aos mesmos.

4.7 Impacto ambiental

Com a análise dos dados de quantidade e qualidade da água e a simulação de cenários para a área irrigada há informações necessárias para inferir que o impacto ambiental da irrigação sobre os recursos hidrológicos da microbacia do ribeirão dos Marins está relacionado com a falta de manejo da água que ocasionou umidade do solo desuniforme ao longo do ciclo após as irrigações. A qualidade da água de acordo com a resolução 357 do CONAMA não é boa, porém quando analisada de acordo com os padrões específicos para irrigação a mesma pode ser utilizada sem risco para o ambiente. Porém, o impacto pode ser representado pelos parâmetros de qualidade da água, se não for observado a concentração dos íons que são utilizados como fertilizantes pelos agricultores, pela quantidade utilizada que não segue nenhum tipo de manejo para controle do quanto e quando irrigar as hortaliças.

De acordo com Cai et al. (2003), problemas de qualidade de água têm sido provocados ou agravados pela alteração na vazão dos rios acompanhado de práticas inadequadas de irrigação e inadequadas de drenagem, fatos que ocorrem nas propriedades produtoras de hortaliças que não praticam o manejo da irrigação e não têm acompanhamento técnico para elaboração e execução do projeto de irrigação.

A perda de água também é outro fator importante na redução da quantidade de água que a bacia retém (Figura 48) que apresenta vazamento na tubulação por falta de manutenção adequada tornando a atividade grande consumidora de água e ineficiente no uso dos recursos hídricos. De acordo com Carter et al. (1999) minimizar a perda não significa somente aperfeiçoar o uso da água, mas associar a irrigação com outras técnicas agrícolas, o que não ocorre nas propriedades da bacia porque os produtores não utilizam técnicas de conservação de solo e água.

O uso do modelo também poderá prevenir futuros impactos ambientais oriundos da irrigação na MBHRM através de um monitoramento constante do movimento da água no solo, seja por infiltração, recarga do lençol freático ou do escoamento superficial.



Figura 48 – Detalhe do vazamento de água em uma propriedade produtora de hortaliças na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins por falta de manutenção adequada

5 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos nas condições em que este trabalho foi realizado conclui-se que:

- a) A agricultura irrigada provoca pouco impacto na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins;
- b) De acordo com as classificações proposta por Ayers e Westcot e USDA a água pode ser considerada boa para ser utilizada na agricultura, mas de acordo com a resolução 357/05 do CONAMA se encontra fora do padrão estabelecido para uso na irrigação de hortaliças;
- c) A umidade do solo ficou próxima da saturação indicando a necessidade de manejo da irrigação;
- d) Na simulação da área irrigada realizada com a prática do manejo a irrigação permitiu economia de água;
- e) Os produtores da bacia não utilizam a água de forma sustentável e racional apesar do baixo volume utilizado na área irrigada;
- f) O modelo apresentou um bom potencial na avaliação dos recursos hídricos na MBHRM;
- g) A área irrigada da microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins ainda apresenta uma porcentagem pequena do total; conseqüentemente, consome pouca água.

REFERÊNCIAS

American Society Civil Engineers. Task Committee on Defenition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Committee, Irrigation and Drainage Division. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.119, n.3, p.429-442, 1993.

ANDERSEN, J.; REFSGAARD, J.C.; JENSEN, K.H. Distributed hydrological modelling of Senegal river basin – model construction and validation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n.247, p.200-214, 2001.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 17th.ed. Washington D.C.: American Public Health Association, 1995. 2198p.

AYRES, R.S.; WESTCOT, D.W. **Water quality for agriculture**. FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 1985. 174p.

AYERS, R.M.; WESTCOT, D.W. **A Qualidade da água na agricultura**. Trad. de H.R. Greye, J.F. de Medeiros e F.A.V. Damasceno. Campina Grande: UFPB, 1999, 153p.

BENETTI, A.; BIDONE, F. O meio ambiente e os recursos hídricos. In: TUCCI, C.E.M. (Org) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3 rd ed. Porto Alegre, Editora da UFRS/ABRH, 2002. cap.22, p.849-870.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6.ed. Viçosa, Imprensa Universitária, 1995. 657p.

BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M. Precipitação. In: TUCCI, C.E.M. (Org) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3.ed. Porto Alegre: Editora da UFRS/ABRH, 2002. cap.5, p.177-231.

BRAGA, B. **Introdução à engenharia ambiental**. São Paulo, Prentice Hall, 2002b. p.72-122.

BRAGA, B.; PORTO, M.; TUCCI, E.M. Monitoramento de quantidade e qualidade das águas. In: REBOUÇAS, A.C., BRAGA, B., TUNDISI, J.G. (Org). **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 2.ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2002a. cap.19, p.635-649.

BRITO, L.T.L. **Avaliação de impactos das atividades antrópicas sobre os recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Salitre, BA, e classificação das fontes hídricas**. 2003. 184p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Campina Grande.

BRITO, L.T.L.; SRINIVASAN, V.S.; SILVA, A.S. et al. Influência das atividades antrópicas na qualidade das águas da bacia hidrográfica do rio Salitre. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.4, p.596-602, 2005.

BRITO, L.T.L. et al. Uso de análise multivariada na classificação das fontes hídricas superficiais da bacia hidrográfica do Salitre. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.1, p.58-66, 2006.

CAI, X.; MCKINNEY, D.A.; LADSON, L.S. A framework for sustainable analysis in water resources management and application to the Syr Darya Basin. **Water Resources Research**, Washington,DC, v.38, n.6, p.1-13, 2002.

CAI, X.; MCKINNEY, D.A.; ROSEGRANT, M.K. Sustainability analysis for irrigation water management in the Aral Sea region. **Agricultural Systems**, Barking Essex, v.76, p.1043-1066, 2003.

CARTER, R.; KAY, M.; WEATHERHEAD, K. Water losses in smallholder schemes. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.40, p-15-24, 1999.

CASAGRANDE, C.A. **Diagnóstico ambiental e análise temporal da adequabilidade do uso e cobertura do solo na bacia do ribeirão dos Marins, Piracicaba – SP.**, 2005. 136p. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

CHRISTIANSEN, J.E. The uniformity of application of water by sprinkler systems. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.22, n.3, p.89-92, 1941.

CLYMA, W.; SHAFIQUE, M.S. **Basi-wide water management concepts for the new millennium**. 2001. Disponível em: <<http://asae.frymulti.com/request.asp?JID=5&AID=3822&CID=sca2001&T=2>>. Acesso em: 14 ago. 2006.

CLYMA, W.; SHAFIQUE, M.S.; van SCHILFAARDE, J. **Irrigated agriculture: managing toward sustainability**, New York. Encyclopedia of Water Science, 2003, p.437-442.

COIMBRA, R.M. Monitoramento da qualidade da água. In: PORTO, R. L.; BRANCO, S. M.; CLEARY, R. W. (Org). **Hidrologia ambiental**. São Paulo: EDUSP, 1991. cap.4, p.391-411.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **Relatório de qualidade das águas interiores do estado de São Paulo 2004**. São Paulo: CETESB, 2005. 297p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA n.357 de 17 de março de 2005**. Brasília: D.O.U. 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>>. Acesso em: 6 abr. 2005.

COORDENADORIA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA INTEGRAL - CATI. **Programa estadual de microbacias hidrográficas: plano da microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins**. Piracicaba: Casa da Agricultura de Piracicaba - CATI / SAA, 2001. 70 p.

DECHMI, F.; PLAYÁN, E.; FACI, J.M.; TEJERO, M. Analysis of an irrigation district in northeastern Spain I: characterization and water assessment. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, n.61, p.75-92, 2003.

DHI MIKE SHE Water Movement: user guide. Horsholm: Danish Hydraulic Institute 2005, 454p.

DOUGHERTY, T.C.; HALL, A.W. **Environmental impact assessment of irrigation and drainage projects**. FAO. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1995. 74p.

FAO. **Food production: the critical role of water**. Roma, 1996. 127p. (World Food Summit)

FAO. **Small-scale irrigation for arid zone: principles and options**, 1997. Disponível em <<http://www.fao.org/docrep/W3094E/W3094E00.htm>>. Acesso em: 24 ago. 2006.

FELICIDADE, N.; MARTINS, R.C.; LEME, A.A. A água como valor social: considerações acerca de uma prática acadêmica em torno do tema. In: FELICIDADE, N.; MARTINS, R.C.; LEME, A.A. (Org). **Uso e gestão dos recursos hídricos no Brasil: velhos e novos desafios para a cidadania**. 2.ed. São Carlos: Rima, 2004. cap.1, p.3-16.

GONÇALVES, C.S.; RHEINHEIMER, D.S.; PELLEGRINI, J.B.R.; KIST, S.L. Qualidade da água numa microbacia hidrográfica de cabeceira situada em região produtora de fumo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.3, p.391-399, 2005.

Genuchten, M.T. van. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p.892-898, 1980.

HENRIKSEN, H.J.; TROLDBORG, L.; NYEGAARD, P. Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrology model for Denmark. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n.280, p.52-71, 2003.

HILL, R.W.; WALTER, I.A. **Irrigation Impact on river flows**. New York: Encyclopedia of Water Science, 2003, p.473-477.

INES, A.V.M.; GUPTA, A.; LOOF, R. Application of GIS and crop growth models in estimating water productivity. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, n.54, p.205-225, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Base de Informações por setor censitário**: Resultados do Universo do Censo Demográfico 2000. IBGE, 2002.CD-ROM.

JAYATILAKA, C.J.; STORM, B.; MUDGWAY, L.B. Simulation of water flow on irrigation bay scale with MIKE-SHE. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n.208, p.108-130, 1998.

KELLER J.; BLIESNER R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Ed.Van Nostrand Reinhold.,1990. 652p.

KRISTENSEN, K.J; JENSEN, S.E. A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration. **Nordic Hydrology**, Copenhagen, n.6, p.170-188, 1975.

LOAGUE, K.; GREEN, R.E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, Amsterdam, v.7, p.51-73, 1991.

LOHANI, V. K.; REFSGAARD, J. C.; CLAUSEN, T.; ERLICH, M.; STORM, B. application of she for irrigation-command-area studies in India. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v..119, n.. 1, p.34-49,1993.

MACHADO, R.E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. 154p. Tese (Doutorado, na área de irrigação e drenagem), – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002

MADSEN, H. Parameter estimation in distributed hydrology catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives. **Advances in Water Resources**, Southampton, n.26, p.205-216, 2003.

MARKOWITZ, A.; GREEN, L.T.; LAINE, J. The 3c's: communicate, coordinate, collaborate doing together what we can't do alone. Herndon. **Water Resources Impact**, v.5, n.5, p.03-07, sept, 2003.

MARQUELLI, W.A.; SILVA, W.L.C.; SILVA, H.R. **Manejo da irrigação em hortaliças**. 5 ed.. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Hortaliças, Brasília: EMBRAPA-SPI, 1996. 72p.

MARQUELLI, W.A.; SILVA, W.L.C.; SILVA, H.R. **Irrigação por aspersão em hortaliças: qualidade da água, aspectos do sistema e método prático de manejo**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica e Embrapa Hortaliças, 2001. 111p.

MERTEN, G.H.; MINELLA, J.P. Qualidade da água em bacias hidrográficas rurais: um desafio atual para a sobrevivência futura. **Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável**, Porto Alegre, v.3, n.4, p.33-38, out/dez., 2002.

MORETTI, L.R. **Avaliação da erosão superficial em pequenas bacias hidrográficas rurais**. 2001. 128p. Tese (Doutorado na área de engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

NASCIMENTO, T.; SOARES, J.M.; AZEVEDO, C.A .V. de Uniformidade de distribuição de água na superfície e no perfil do solo irrigado com o microaspersor Rain-Bird QN-14. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.3, p. 304-308, 1999.

NASH, J.E.; SUTCLIFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models, part 1: discussion of principles. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.10, p.282-290, 1970.

ONGLEY, D. **Control of water pollution from agriculture**. FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 1996. 101p.

PEREIRA, L.S.; OWEIS, T.; ZAIRI, A. Irrigation management under water scarcity. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, n.57, p.175-206, 2002.

PETERS, C.A.; WARD, R.C. A framework for 'constructing' water quality monitoring programs. **Water Resources Impact**, Herndon, v.5, n.5, p.3-7, sept, 2003.

PETERSON, H.G. Field irrigation and water quality. Agriculture and Agri-Food Canada-Prairie Farm Rehabilitation Administration, 1999. Disponível em: <http://www.agr.gc.ca/pfra/water/fieldirr_e.htm> Acesso em: 17 ago. 2006.

PORTO, R.L.L.; BRANCO, S.M.; CLEARY, R.W. **Hidrologia ambiental**, 3.ed., EDUSP, São Paulo: 1991. 414p.

REFSGAARD, J.C.; SETH, S.M.; BATHURST, J.C.; ERLICH, M. Application of the SHE to catchments in India part 1: general results. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n.140, p1-23,1992.

ROSEGRANT, M.W.; RINGLER, C. Impact on food security and rural development of transferring water out of agriculture. **Water Policy**, New York, v.1, n.6, p.567-586, 2000.

SAKTHIVADIVEL, R.; SALLY, H. **Irrigation Management for the tropics**. New York: Encyclopedia of Water Science, 2003, p. 483 – 489.

SALATI, E.; LEMOS, H. M. de; SALATI, E. Água e o desenvolvimento sustentável. In: REBOUÇAS, A.C., BRAGA, B., TUNDISI, J.G. (Org). **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 2.ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2002. cap.2, p.39-63.

SANZ, G.L. Irrigated agriculture in the Guadiana River high basin (Castilha-La Mancha, Spain): environmental and socioeconomic impacts. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.40, p.171-181, 1999.

SECRETARIA DE AGRICULTURA E ABASTECIMENTO DE PIRACICABA – SEMA. **Relatório 2002/2003**. Projeto de pesquisa na microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins: levantamento da qualidade e quantidade de água e potencial para a implantação do programa de produção de alimentos e recuperação ambiental, Piracicaba: SEMA, CENA, ESALQ, SEMAE, 2003. 63p.

SINGH, R.; SUBRAMANIAN, K.; REFSGAARD, J.C. Hydrological modelling of small watershed using MIKE SHE for irrigation planning. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, n.41, p.149-166, 1999.

SKOGERBOE, G.V. **Irrigated agriculture, social impacts of**. New York: Encyclopedia of Water Science, 2003, p. 443 – 445.

SONNENBORG, T.O. Transient modeling of regional groundwater flow using parameter estimates from steady-state automatic calibration. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n.273, p.188-204, 2003.

SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V.K. Model Calibration. In: SINGH, V.P.(Ed.). **Computer models of watershed hydrology**. Colorado: Water Resources Publications, 1995. cap.2, p.23-68.

THOMPSON, J.R.; REFSTRUP SØRENSEN, H., GAVIN H., REFSGAARD, A. Application of the coupled MIKE SHE/MIKE 11 modeling system to a lowland wet grassland in southeast England. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n.293, p.151–179, 2004.

TOLEDO, G. de; NICOLELLA, G. Índice de qualidade de água em microbacia sob uso agrícola e urbano. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.59, n.1, p.181-186, jan./mar., 2002.

VANZELA, L.S. Qualidade de água para a irrigação na microbacia do córrego Três Barras no município de Marinópolis, SP. Ilha Solteira, 2004. 91p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”. Ilha Solteira, 2004

VÁSQUEZ, R.F.; FEYEN, J. Effect of potential evapotranspiration estimates on effective parameters and performance of the MIKE-SHE code applied to a medium size catchment. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n.270, p.309-327, 2003.

XEVI, E.; CHRISTIAENS, K.; ESPINO, A. Calibration, validation and sensitivity analysis of the MIKE-SHE model using the Neuenkirchen catchment as case study. **Water Resources Management**, Dordrecht, n.11, p.219-242, 1997.