

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EM
IRRIGAÇÃO LOCALIZADA COM SISTEMA DE AERAÇÃO,
DECANTAÇÃO E FILTRAGEM**

Elcides Rodrigues da Silva

Engenheiro Agrônomo

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

2009

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EM
IRRIGAÇÃO LOCALIZADA COM SISTEMA DE AERAÇÃO,
DECANTAÇÃO E FILTRAGEM**

Elcides Rodrigues da Silva

Orientador: Prof. Dr. José Renato Zanini

Coorientador: Prof. Dr. Jairo Osvaldo Cazetta

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal)

**JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL
Dezembro de 2009**

S586u Silva, Elcides Rodrigues da
Uniformidade de Distribuição de Água em Irrigação Localizada com
Sistema de Aeração, Decantação e Filtragem./ Elcides Rodrigues da
Silva. – – Jaboticabal, 2009
v, 37f. ; il.; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2009
Orientador: José Renato Zanini
Coorientador: Jairo Osvaldo Cazetta
Banca examinadora: Luiz Carlos Pavani e Rubens Duarte Coelho
Bibliografia

1. Obstrução de emissores. 2. Qualidade de água para irrigação.
3 Coeficiente de uniformidade I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.67

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

ELCIDES RODRIGUES SILVA - Nascido em 19 de novembro de 1982 na cidade de Recife - PE. Possui Graduação em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (2007), onde foi bolsista de Iniciação Científica pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (PIBIC/CNPq). Recebeu dois prêmios: primeiro lugar na apresentação de painéis no XVI Congresso de Iniciação Científica da UFRPE e uma bolsa do CNPq, concedida pelo programa Aristides Pacheco Leão, de estímulo a vocações científicas, organizada pela Academia Brasileira de Ciências. Ingressou no curso de mestrado em Agronomia (Produção Vegetal) em agosto de 2007, na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP – Jaboticabal – SP, como bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), desenvolvendo pesquisa na área de hidráulica e irrigação.

À DEUS, que guiou meus passos para a conquista de mais esta etapa.

A minha mãe, Maria Socorro, pela dedicação, dignidade e ensinamentos.

OFEREÇO

A minha mãe Maria Socorro

Pelo amor, esforço, dedicação e por oferecer muito mais que uma formação digna e valores transmitidos de forma tão nobre.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Expresso meus agradecimentos a todas as pessoas e instituições que colaboraram para realização deste trabalho, em especial:

À FCAV/UNESP - Jaboticabal, pela oportunidade;

Ao Sr. Antonio Celso Gomes e família, dono da Estância Tropical, pela disponibilidade da propriedade que foi fundamental para realizarmos este trabalho;

Ao Professor Dr. José Renato Zanini, pela orientação, atenção, paciência, amizade e disponibilidade;

Ao Professor Dr. Jairo Osvaldo Cazetta, pela orientação, atenção, paciência, amizade e disponibilidade do laboratório para realização das análises;

Ao Professor Dr. Antonio Sergio Ferraudo, pelas sugestões e colaboração nas análises estatísticas;

Aos membros da banca de qualificação Prof. Dr. Antonio Sergio Ferraudo e Prof. Dr. José Marques Júnior, e membros da banca de defesa da dissertação Prof. Dr. Rubens Duarte Coelho e Prof. Dr. Luiz Carlos Pavani pelas valiosas contribuições;

Aos meus amigos inesquecíveis de Recife Fábio Rafael, Amanda Marília, Rodrigo Ferreira, Fabiana Maranhão e Romero Azevedo;

À Camila Barreto pela atenção e apoio incondicional nos momentos difíceis que antecederam o início desta jornada;

Aos Amigos da República CanaBrava: Barrigueira, Bitcha, Tiú, Peia, Xinxá, Mourão, Randapi, k-lango e Buteco;

À Juçara, pela amizade, confiança e apoio nesta empreitada;

Aos funcionários da Biblioteca pelo carinho, atenção, ótimo atendimento e boas conversas, Neli, Mabel, Tieko e os demais.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural da FCAV/UNESP - Jaboticabal, Miriam e Davi, pela atenção e apoio;

Aos amigos da UFRPE: Albert Einstein, Adriana Figueiredo, Anildo Caldas, Jaime Roma, José Marcelo, Bruno Toríbio, Aroldo Campos, Cleivton Lima, Thiciano Leão

À Jacqueline Ferraça pelo apoio, carinho e atenção nos momentos importantes deste ciclo;

Aos meus amigos Marco Antonio Franco Lemos, Juvenal Caetano, Paulo Eduardo, Victor Costa, Giovanni, Deivson, Giba, pela convivência e alegrias compartilhadas;

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e que ficaram no anonimato, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	iv
SUMMARY	v
I. INTRODUÇÃO	1
II. REVISÃO DE LITERATURA	3
Água: aspectos gerais	3
Irrigação localizada e obstrução de emissores	4
Uniformidade de distribuição de água	8
III. MATERIAL E MÉTODOS.....	11
Sistema de aeração, decantação e filtração	11
Pontos de amostragem	15
Coleta de amostras	17
Avaliação da qualidade de água quanto ao risco de entupimento dos emissores.....	18
Avaliação da uniformidade de irrigação na área experimental.....	19
Análise estatística.....	20
IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
Análise multivariada dos dados	25
Coeficientes de uniformidade.....	29
V. CONCLUSÕES	32
VI. REFERÊNCIAS.....	33

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Fotografias do sistema de aeração (A), do tanque de decantação e da cobertura com tela de sombreamento (B)	12
Figura 2. Esquema geral do sistema de aeração, decantação e filtração com indicação dos pontos de amostragem	13
Figura 3. Perfil longitudinal do sistema de aeração e decantação com escala horizontal de aproximadamente 1:300 e escala vertical de aproximadamente 1:100.	13
Figura 4. Fotografias do sistema de aeração (A) e do tanque de decantação (B) em momento de limpeza (sem tela de sombreamento)	14
Figura 5. Fotografias dos pontos de amostragem: (A) PA1, (B) PA2 , (C) PA3 , (D) PA4 , (E) PA5 e (F) PA6	16
Figura 6. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos com a formação de grupos dos pontos de amostragem (PA) segundo os parâmetros utilizados para avaliação da qualidade da água.....	26
Figura 7. Médias padronizadas das características físico-químicas da água para cada grupo, segundo análise de agrupamentos não-hierárquica “k-means”	27
Figura 8. Dispersão (gráfico “biplot”) dos pontos de amostragem em função das características físico químicas da água.	28

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Classificação dos sistemas de irrigação por gotejamento segundo o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD).....	9
Tabela 2. Classificação dos sistemas de irrigação por gotejamento segundo o Coeficiente de Uniformidade estatística (US)	10
Tabela 3. Recomendações de coleta e preservação de amostras hídricas	17
Tabela 4. Parâmetros, métodos e referências utilizados para a análise da água dos pontos de amostragem	18
Tabela 5. Classificação da água para irrigação localizada.....	19
Tabela 6. Valores médios dos parâmetros de qualidade da água e classificação quanto ao risco de obstrução de emissores para os pontos de amostragem	22
Tabela 7. Análise de variância para cada variável dos grupos formados pela análise não-hierárquica de agrupamento “k-means”	27
Tabela 8. Correlação entre componentes principais (CP1 e CP2) e características físicas e químicas da água.....	29
Tabela 9. Resultado dos índices de uniformidade de distribuição de água calculados durante as duas etapas da pesquisa.	30

UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EM IRRIGAÇÃO LOCALIZADA COM SISTEMA DE AERAÇÃO, DECANTAÇÃO E FILTRAGEM

RESUMO: A pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho de um sistema de aeração, decantação e filtragem, quanto à prevenção de entupimento dos emissores e avaliar uniformidade de distribuição da água no sistema de irrigação por gotejamento na época de sua implantação e após um ano de utilização do sistema de prevenção. O trabalho foi realizado na Fazenda Estância Tropical, no município de Barretos – SP, no período de março de 2008 a fevereiro de 2009, realizando-se determinações físicas e químicas da água, ao longo do sistema de aeração, decantação e filtragem, que foi eficiente para a melhoria da qualidade de água, reduzindo os níveis de risco de entupimento de severo para médio e de médio para baixo. Todas as variáveis analisadas diferenciaram a qualidade da água entre os pontos de amostragem do sistema de tratamento, com exceção do Fe^{+2} . Para sólidos em suspensão, turbidez, sólidos dissolvidos e ferro total, os valores reduziram-se pelo uso do sistema proposto, melhorando a qualidade da água. Após um ano de funcionamento do sistema de prevenção, os coeficientes utilizados para determinar a uniformidade de distribuição de água apresentaram valores acima de 80%, sendo classificados como excelente, bom e muito bom.

Palavras-chave: obstrução de emissores; qualidade de água para irrigação; coeficiente de uniformidade

WATER DISTRIBUTION UNIFORMITY IN LOCALIZED IRRIGATION WITH AERATION, SEDIMENTATION AND FILTERING SYSTEM

SUMMARY: The research aimed to evaluate the performance of aeration, sedimentation and filtration system for the prevention of emitters clogging and evaluate the water distribution uniformity of one drip irrigation system at the time of its implementation and after a year using the prevention system. The research was conducted in the Estancia Tropical farm, in the municipality of Barretos – SP, Brazil, from March 2008 to February 2009, carrying out physical and chemical determinations of water along the aeration, sedimentation and filtration system, which was efficient for improving water quality by reducing levels of risk of clogging of severe to medium and medium to low. All variables differed water quality between the collection points of the treatment system with the exception of Fe^{+2} . For suspended solids, turbidity, dissolved solids and total iron values were reduced by the use of the proposed system, improving water quality. After a year of prevention, the coefficients used to determine the uniformity of water distribution had values above 80%, being classified as excellent, good and very good.

Keywords: emitters clogging; quality of water for irrigation; uniformity coefficient

I. INTRODUÇÃO

Um grande problema da irrigação por gotejamento é o processo de entupimento de emissores e tubulações, sendo frequentemente a principal causa da variação de vazão dentro do sistema, pois pequena porcentagem de emissores entupidos pode resultar em grande redução na uniformidade de distribuição de água (NAKAYAMA & BUCKS, 1991). Baixa uniformidade significa excesso de água em certos pontos do campo e falta em outros. Para atender as necessidades hídricas das plantas em posições críticas, aumenta-se a aplicação de água na irrigação da área, podendo haver percolação da água, aumento do consumo de energia, lixiviação de nutrientes e contaminação subterrânea (CAPRA & SCICOLONE, 2004).

Diversos fatores podem provocar o entupimento parcial ou a total obstrução dos emissores e tubulações, prejudicando o fluxo de água e a sua distribuição ao longo da linha de adução, de derivação e principalmente nas laterais, reduzindo, conseqüentemente a eficiência do sistema. Dentre tais fatores, destacam-se o de natureza química, relacionado à precipitação de elementos como ferro e manganês; natureza física, como partículas de areia, silte, argila, restos de material plástico e pequenos animais (formigas, aranhas, ovos de lesmas, etc.); e de natureza biológica, relacionada a bactérias e algas. Embora informações quanto aos fatores que causam o entupimento estejam disponíveis, o controle por medidas preventivas nem sempre tem êxito (CARARO et al., 2006).

Diversas medidas podem ser adotadas, isoladas ou em conjunto, para prevenir a ocorrência de distúrbio de vazão, tais como: adequação do equipamento, planejamento e manejo do sistema, filtragem, descargas de água periódicas ao final das linhas de irrigação e seleção de emissor mais adequado. O conjunto de medidas adotadas visando reduzir ou evitar o entupimento de emissores irá variar em função da fonte causadora do entupimento. A avaliação sistemática do sistema de irrigação e o monitoramento da qualidade da água são essências para prevenir o entupimento (NAKAYAMA & BUCKS, 1991).

Devem-se estudar novas alternativas de tratamentos de água para irrigação por gotejamento, eficientes, economicamente viáveis e ambientalmente seguras. Uma dessas alternativas é a utilização combinada de sistema de aeração e decantação como medida preventiva da obstrução de gotejadores.

Como a água de irrigação nem sempre é a ideal, uma forma de conviver com as obstruções é o tratamento da água com o intuito de reduzir os níveis de obstrução (AYERS & WESTCOT, 1999). No caso específico da água para uso na irrigação, uma alternativa citada por PIZARRO (1996), para resolver o problema do excesso de Fe^{+2} e Mn^{+2} consiste em provocar a oxidação desses elementos por meio de aeração artificial. Em seguida, é feita a retenção dos precipitados por meio de filtros, antes da entrada da água nas tubulações e nos emissores do sistema de irrigação. Desse modo, o uso do decantador constitui solução para redução de sólidos em suspensão (areia, limos e argila) e de alguns precipitados químicos, como os de ferro, que se formam no processo de aeração da água.

A presente pesquisa teve por objetivo principal avaliar o desempenho de um sistema de aeração e decantação quanto à prevenção de entupimento dos emissores e avaliar a uniformidade de distribuição da água no sistema de irrigação por gotejamento, em duas etapas: na época de sua implantação e após um ano de utilização do sistema de aeração e decantação.

II. REVISÃO DE LITERATURA

Água: aspectos gerais

A água é um componente essencial à vida na Terra e é parte indispensável para a manutenção de todos os ecossistemas. No entanto, a água vem se tornando escassa em qualidade e quantidade no planeta. Desse modo, deve ser utilizada de forma racional e a sua conservação deve ser constante, seja no meio rural ou urbano (SANTOS, 2005). É um elemento essencial para a manutenção da produção agrícola, e biodiversidade dos sistemas terrestres e aquáticos. Por isso, segundo TUNDISI (2003), os recursos hídricos superficiais e os subterrâneos são estratégicos para o homem, plantas e animais. É continuamente renovada pela ação do ciclo hidrológico. Entretanto, a multiplicidade de usos muitas vezes resulta em alterações tanto de quantidade como de qualidade (SIMONASSI, 2001).

Em função das condições geográficas, climáticas e meteorológicas, a água distribui-se de modo irregular no tempo e no espaço. Aliado a essas condicionantes, as ações antrópicas podem alterar significativamente o regime hidrológico numa determinada região, dependendo da amplitude das alterações causadas nas condições naturais (SIMONASSI, 2001).

A água é um recurso extremamente reduzido. A água renovável no planeta, que ocorre sobre os continentes, corresponde a 110 mil km³. Desse total, 44 mil km³/ano (40%) alimentam os cursos d'água e recarregam os aquíferos (lençóis subterrâneos). Essa é a parcela da água tradicionalmente enfocada na gestão de recursos hídricos. Ela é denominada de água azul. Dessa parcela provém a água dos três principais usos consuntivos: o uso nas moradias, na indústria e na agricultura irrigada (CHRISTOFIDIS, 2008).

Apesar de se tratar de um recurso reconhecidamente valioso, nas últimas décadas observou-se despreocupação quanto à crescente deterioração da qualidade das águas, devido principalmente à sua aparente abundância (SIMONASSI, 2001). O

seu reuso pode ser comprometido pela qualidade, que se deteriora em função do grande aporte de resíduos e rejeitos oriundos das atividades antrópicas (LEMES, 2001).

O crescimento populacional demandou maior captação de água para o contínuo desenvolvimento das atividades humanas, provocando queda na qualidade deste recurso em suas fontes naturais. Diante deste panorama, é clara a necessidade de utilizar este recurso natural com maior racionalidade, através de técnicas que permitam aproveitamento mais eficiente da água, nas mais diversas atividades humanas, entre elas, a irrigação. A irrigação, além de tudo, não pode e não deve competir com o uso da água destinado ao abastecimento público. Desta forma, as águas utilizadas para irrigação serão cada vez mais escassas e de pior qualidade.

Irrigação localizada e obstrução de emissores

Dentre os métodos de irrigação conhecidos, a irrigação localizada é o método cujo uso mais cresceu nas últimas décadas devido à maneira racional e econômica do uso da água. A utilização do sistema de irrigação por gotejamento na agricultura viabilizou soluções para diversos problemas enfrentados pelos agricultores, tais como: o cultivo de solos de baixa a média fertilidade natural; de terrenos acidentados; consumo de energia e mão-de-obra, que nos dias atuais é mais limitante a agricultura irrigada e aumentou a eficiência no uso da água, permitindo assim a otimização da produção agrícola (LEITE, 1995). Mas, se por um lado esse sistema reduz a quantidade de água necessária à produção dos alimentos, necessita também de águas de melhor qualidade. Esses sistemas, por terem emissores de água com diâmetro de saída reduzido e sujeitos ao entupimento por partículas sólidas em suspensão na água, podem ter a eficiência de distribuição de água às plantas diminuída no decorrer de sua utilização. Além disso, a má distribuição da água às plantas causa queda da produção da lavoura (AIROLDI, 2007).

O fenômeno da obstrução de emissores tem sido extensivamente estudado (PUIG-BARGUES et al., 2005; CAPRA & SCICOLONE, 2007; ZHANG et al., 2007). O entupimento pode ocorrer por diversas causas: areia, silte, argila, algas, zooplânctons,

larvas e ovos de lesmas, plástico (oriundo do corte de tubulações durante a instalação e manutenção do sistema), precipitados de ferro e manganês (LOPEZ et al., 1997).

Todas as impurezas presentes na água, com exceção dos gases dissolvidos, correspondem aos sólidos (PORTO et al., 1991), que em águas naturais, originam-se, do processo de erosão natural dos solos e do intemperismo das rochas (CARVALHO, 1994).

Os sólidos suspensos, em altas concentrações constituem-se em um dos principais problemas de qualidade de água para a irrigação, pois podem ocasionar sérios problemas de obstrução física em sistemas de irrigação localizada (NAKAYAMA & BUCKS, 1986).

Com relação aos sólidos dissolvidos, dificilmente ocasionam obstrução física nos equipamentos, no entanto, havendo interação com outros sais formando precipitados ou favorecendo o crescimento de biofilme, pode ocorrer obstrução de emissores (NAKAYAMA & BUCKS, 1986). Além disso, como os sais fazem parte dos sólidos dissolvidos (PORTO et al. 1991), o seu excesso na água de irrigação pode provocar salinização do solo, dificultando ou impedindo a absorção de água pelas plantas (AYERS & WESTCOT, 1999).

Se a água apresentar valores acima de 50 mg L⁻¹ de sólidos suspensos e 500 mg L⁻¹ de sólidos dissolvidos, já pode ocorrer danos moderados, por entupimento de emissores, em sistemas localizados (NAKAYAMA & BUCKS, 1986).

A concentração de matéria em suspensão: silte, argila, partículas finas de matéria orgânica e inorgânica, compostos orgânicos solúveis, plâncton e outros organismos microscópios são responsáveis pela turbidez da água. A turbidez de uma amostra de água é o grau de atenuação de intensidade que um feixe de luz sofre ao atravessá-la (e essa redução se dá por absorção e espalhamento, uma vez que as partículas que provocam turbidez nas águas são maiores que o comprimento de onda da luz branca), devido à presença de sólidos em suspensão (CETESB, 2003). De forma geral, os valores de turbidez vão de 0 a 1000 unidades nefelométricas (NTU) e valores baixos indicam poucas partículas em suspensão na água. A turbidez para a irrigação é

um indicativo que determina a presença de sedimentos em suspensão na água, que em excesso pode causar problemas a sistemas de irrigação localizada.

O potencial hidrogeniônico (pH) representa a concentração de íons de hidrogênio H^+ (em escala logarítmica), dando indicação sobre a condição de acidez, neutralidade ou alcalinidade da água (VON SPERLING, 1996). Para a irrigação, valores de pH levemente ácidos são favoráveis para melhor qualidade da água para irrigação localizada; os valores de pH são classificados como baixos ($<7,0$), médios ($7,0-8,0$) e altos ($>8,0$) (NAKAYAMA & BUCKS, 1986).

A condutividade elétrica determina a capacidade que água tem de conduzir a corrente elétrica. Quanto maior a concentração de íons da solução, maior será a condutividade elétrica. Os íons originam-se da dissociação de rochas e solos, incluindo a dissolução lenta do calcário, do gesso e de outros minerais. Para a irrigação, o principal problema do excesso de sais na água é a salinização do solo (AYERS & WESTCOT, 1999).

O oxigênio dissolvido é uma variável química importante para as condições ambientais, embora não seja um parâmetro utilizado na caracterização da qualidade de água para irrigação. Através da medição da concentração de oxigênio dissolvido, pode-se estimar os efeitos de resíduos oxidáveis sobre águas receptoras e a eficiência do tratamento dos esgotos durante a oxidação bioquímica, embora na prática, não seja um parâmetro utilizado na caracterização da qualidade de água para a irrigação, pode ser um indicativo da poluição (MORAES, 2001), da concentração de sólidos dissolvidos (LARCHER, 2000) e de matéria orgânica (VON SPERLING, 1996) na água. Outro fato a se considerar, é que a concentração de oxigênio dissolvido influencia diretamente a oxidação de ferro na água, pois em pH igual a 7, meio miligrama por litro de O_2 já é o suficiente para precipitar íons ferrosos (LIMA, 1993).

Na região Sudeste do Brasil encontram-se, com frequência, águas que apresentam elevados teores de ferro total, elemento esse que pode provocar sérios problemas de entupimento, sobretudo quando presente em forma reduzida, podendo precipitar-se no interior das tubulações quando oxidado, favorecendo, ainda, o desenvolvimento de ferrobactérias (CORDEIRO, 2002).

O ferro é um elemento que tem a sua origem na dissociação de compostos de rochas e solos, sendo um elemento abundantemente encontrado nas águas naturais, superficiais e subterrâneas (ESTEVES, 1998). Apresenta-se nas formas insolúvel em substâncias (Fe^{+3}) e dissolvida (Fe^{+2}), sendo que a forma dissolvida ocorre mais onde existe baixa concentração de oxigênio dissolvido (LIBÂNIO, 2005).

O ferro, atualmente, é um dos principais problemas na água de irrigação, devido a sua capacidade de obstruir fisicamente as tubulações e emissores dos sistemas localizados. Isso ocorre porque o ferro reduzido (Fe^{+2}), e, portanto solúvel, ao atravessar o sistema de filtragem, pode se oxidar, tornando-se insolúvel (Fe^{+3}). Após a oxidação, fica retido nas paredes do tubo, provocando o aumento nas perdas de carga, comprometendo o projeto de irrigação (HERNANDEZ et al., 2001). Segundo NAKAYAMA & BUCKS (1986), o ferro total em concentrações acima de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ na água de irrigação, já pode precipitar e ocasionar danos moderados pela obstrução de tubulação e emissores.

O Fe^{+2} e o Mn^{+2} são íons metálicos que ocorrem em muitas partes da crosta terrestre, os quais têm a água como solvente. Eles são encontrados em diferentes concentrações, que podem ou não causar problemas de obstrução em sistemas de irrigação por meio de incrustações que diminuem os diâmetros internos dos tubos (VARNER et al., 2000). Segundo PIZARRO (1996), uma das alternativas para evitar problemas com o Fe^{+2} e o Mn^{+2} é provocar a oxidação dos mesmos por meio de aeração artificial, tornando-os menos solúveis e fazendo com que essas partículas fiquem retidas na filtragem.

A remoção de ferro pode ser realizada por aeração, favorecendo a oxidação à forma insolúvel (LIBÂNIO, 2005). Para a irrigação, essa aeração deve ser antes de entrar no sistema de irrigação.

O tratamento para recuperação de emissores totalmente ou parcialmente entupidos seja pelas causas de origem química, física e biológica, além de mais oneroso, nem sempre é eficiente, portanto, o produtor deve avaliar cuidadosamente, antes da instalação do projeto, parâmetros relacionados à qualidade da água, qualidade

do equipamento a ser adquirido, manejo do sistema a ser adotado, além de outros, para adotar medidas preventivas para o risco de entupimento do sistema.

Uniformidade de distribuição de água

A uniformidade de distribuição de água às plantas pelo sistema de irrigação está diretamente ligada ao problema de entupimentos dos gotejadores. Segundo CAPRA & SCICLONE (2004), a detecção de emissores entupidos e posterior limpeza ou reposição são processos difíceis e que exigem elevado investimento. O entupimento de emissores reduz grandemente a uniformidade de distribuição de água às plantas, pois baixa uniformidade significa que há excesso de água em certos pontos do campo e falta em outros. Para atender as necessidades hídricas das plantas localizadas em posição crítica, aumenta-se o consumo de água utilizada na irrigação da área, podendo haver percolação profunda da água, aumento no consumo de energia e lixiviação de nutrientes. Desta forma, pode-se afirmar que, quanto maior o valor do coeficiente de distribuição de água de um sistema, menor serão as lâminas aplicadas para se atingir máxima produção (PUIG-BARGUES et al., 2005).

Para determinação da uniformidade de distribuição de água em sistemas de irrigação por gotejamento, deve-se medir a vazão de um determinado número de emissores utilizando-se do método volumétrico e diversas linhas laterais.

Diversos são os índices para avaliação da uniformidade de distribuição de água em linhas de gotejamento, sendo o primeiro, proposto por CHRISTIANSEN (1942). Este coeficiente ainda é bastante utilizado pela sua grande popularidade. O Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) é apresentado na equação 1.

$$CUC = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - \bar{q}|}{n \bar{q}} \right] \quad (1)$$

em que:

CUC – Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (%)

q_i – vazão de cada emissor, $L\ h^{-1}$;

$\bar{q}$ – vazão média dos emissores, $L\ h^{-1}$; e

n – número de emissores.

O limite mínimo de CUC aceitável em um sistema de irrigação por gotejamento é de 80% (BERNARDO et al., 2006).

Outro índice bastante utilizado para avaliações de campo, como sugere ASAE (1998), é o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), conforme equação 2. Na Tabela 1 é apresentada a classificação dos sistemas de irrigação localizada de acordo com o valor do CUD, proposta por FAVETTA & BOTREL (2001).

$$CUD = 100 \left(\frac{qn}{\bar{q}} \right) \quad (2)$$

em que:

CUD – Coeficiente de uniformidade de distribuição (%);

qn – média das menores vazões, representando 25% do total das vazões avaliadas; e

$\bar{q}$ – média de todas as vazões coletadas.

Tabela 1. Classificação dos sistemas de irrigação por gotejamento segundo o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD).

CUD (%)	Avaliação
> 90	Excelente
80 - 90	Bom
70 - 80	Regular
< 70	Ruim

O Coeficiente de Uniformidade Estatística (equação 3) também quantifica a uniformidade de aplicação de água, como sugere a ASAE (1998).

$$US = 100 \left(1 - \frac{Sq}{\bar{q}} \right) \quad (3)$$

em que:

Us – Coeficiente de Uniformidade Estatística (%);

Sq – desvio-padrão da vazão do emissor; e

$\bar{q}$ – média de todas as vazões coletadas.

Na Tabela 2 é apresentada a classificação dos sistemas de irrigação localizada de acordo com o valor de uniformidade estatística (US), proposta por FAVETTA & BOTREL (2001).

Tabela 2. Classificação dos sistemas de irrigação por gotejamento segundo o Coeficiente de uniformidade estatística (US).

US (%)	Avaliação
> 90	Excelente
80 - 90	Muito bom
70 - 80	Regular
60 - 70	Péssimo
< 60	Inaceitável

III. MATERIAL E MÉTODOS

Sistema de aeração, decantação e filtração

O experimento foi realizado na Fazenda Estância Tropical, no município de Barretos – SP, utilizando água proveniente de um córrego próximo a uma área de 22 ha de cultura de citros irrigada com gotejadores da marca NETAFIM, modelo Dripnet, vazão nominal de $1,6 \text{ L h}^{-1}$ autocompensantes, com espaçamento de 0,6 m na linha lateral e de 7 m entre linhas laterais, em tubos de polietileno linear de baixa densidade, com 16 mm de diâmetro externo e linhas de 150 m de comprimento máximo.

O sistema de irrigação foi implantado em novembro de 2007, e nessa mesma época foi instalado um aerador e tanque de decantação, localizados entre o córrego de captação de água para irrigação e o cabeçal de controle do sistema de irrigação. O sistema de aeração é constituído por aspersores tipo “spray” fixo, da marca Fabrimar®, modelo ASFIX AF4, com bocal de diâmetro nominal de 8,8 mm, e vazão de $2,95 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ à pressão de serviço de 105 kPa, com difusor de placa fixa estriada e côncava, de cor azul, que trabalha a pressões de 70 a 140 kPa, produzindo 36 jatos radiais, que cobrem 360° de molhamento. Esse aspersor foi escolhido pelos seguintes aspectos: necessita de baixa pressão; a placa côncava e estriada direciona o fluxo ao leito de pedras fracionando-o antes em grande quantidade de jatos e esses em gotas de vários tamanhos, favorecendo a aeração (Figura 1); baixo custo e disponibilidade no mercado.

O espaçamento entre as linhas de aspersores e entre aspersores na linha foi de $2 \times 0,6 \text{ m}$, sendo utilizadas 2 linhas laterais com 9 aspersores por linha. Os aspersores foram instalados a 15 cm de altura, sobre um leito de fragmentos de rocha basáltica não intemperizada (classificada como pedra-de-mão, de 10 a 30 cm de diâmetro), com 6 m de comprimento, 3,2 m de largura e espessura de 0,5 m, que além de ajudar na aeração, funciona, também, como um pré-filtro de partículas que aderem às pedras por contato superficial (Figura 1). A vazão do sistema é de $53,1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e para a condução da água do córrego até o aerador foram utilizados tubos de PVC de diâmetro nominal de 100 mm.

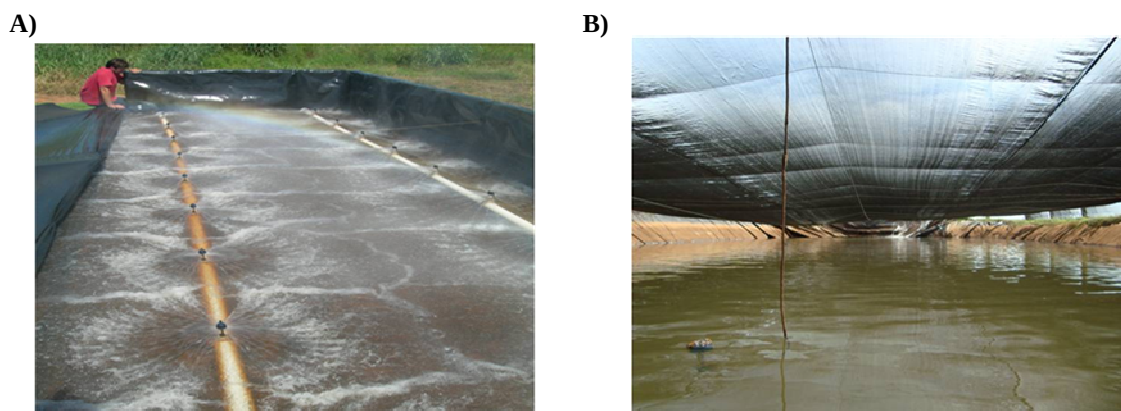


Figura 1. Fotografias do sistema de aeração (A), do tanque de decantação e da cobertura com tela de sombreamento (B).

O tanque de decantação possui paredes com inclinação de 45° e as seguintes dimensões aproximadas: largura de 10 m, profundidade de 3 m e comprimento de 28 m, resultando em seção de 23 m^2 . Assim, sendo a vazão de $53,1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, a velocidade média da água no tanque é de $2,3 \text{ m h}^{-1}$, sendo, portanto, o tempo disponível para decantação de aproximadamente 12 horas, que corresponde ao tempo de percurso da água do início ao final do tanque. O tanque apresenta cobertura com tela de sombreamento de 80%, para diminuir o desenvolvimento de algas (Figuras 1 e 2).

O sistema de aeração tem um desnível para o tanque de decantação fazendo assim uma cascata (Figuras 2, 3 e 4). Além disso os tanques de aeração e decantação têm drenos de fundo para se fazer, periodicamente, a limpeza das impurezas que vão se depositando. Também, a captação da água para o conjunto de irrigação é feita na profundidade média do tanque de decantação (Figura 3). Assim, os pontos de amostragem PA5 (depois do conjunto motobomba e antes da filtragem) e PA6 (depois do sistema de filtragem) são de água da profundidade média do tanque de decantação (Figuras 2 e 3).

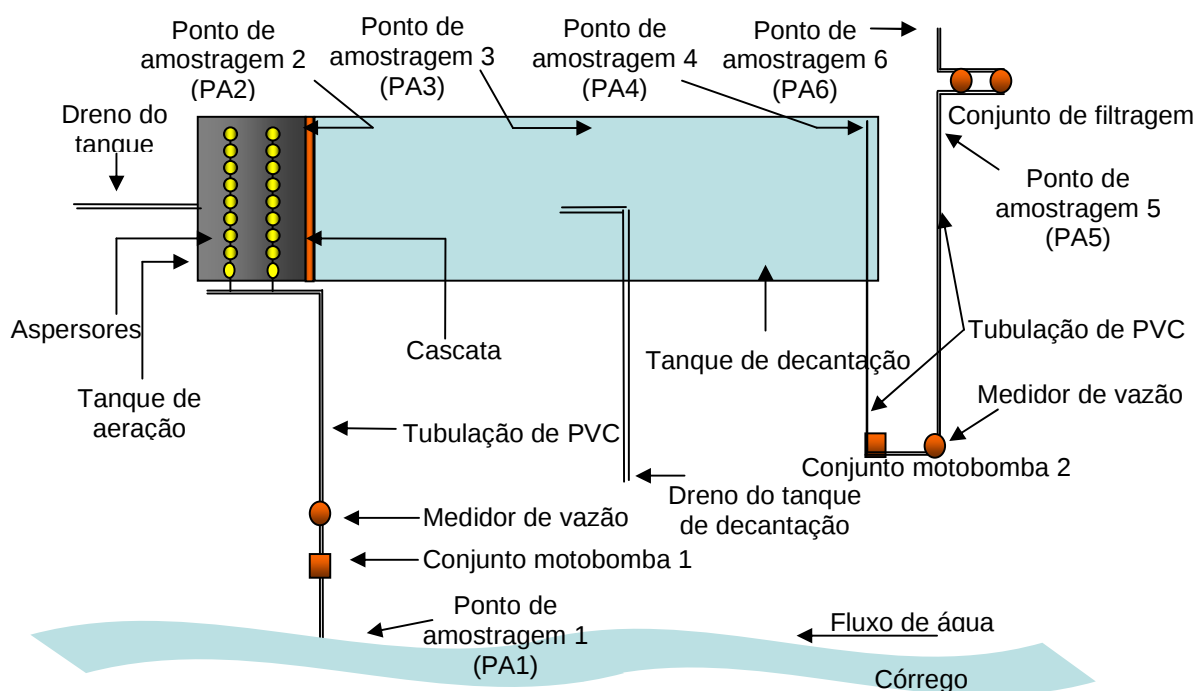


Figura 2. Esquema geral do sistema de aeração, decantação e filtragem com indicação dos pontos de amostragem.

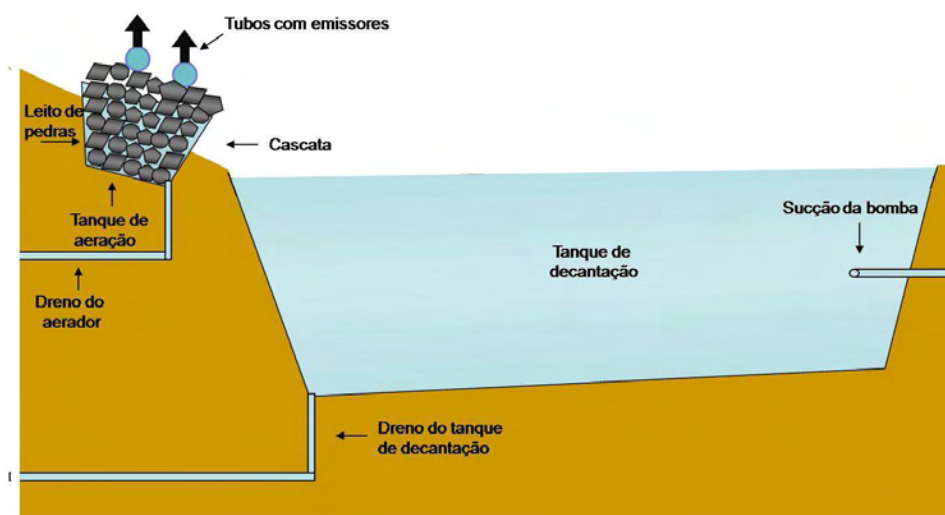


Figura 3. Perfil longitudinal do sistema de aeração e decantação com escala horizontal de aproximadamente 1:300 e escala vertical de aproximadamente 1:100.

No sistema de irrigação a filtragem é realizada por um conjunto formado de filtro de areia (dois cilindros de 1,2 m de diâmetro, com areia de quartzo arestado de granulometria de 1 a 2 mm e instalados em paralelo) e dois filtros de discos com seção de passagem de 120 mesh (130 μ m).

Na Figura 4, tem-se o tanque de aeração e decantação em processo de limpeza, sem os emissores e sem tela de sombreamento, onde pode-se observar a cascata e todo o tanque de decantação.

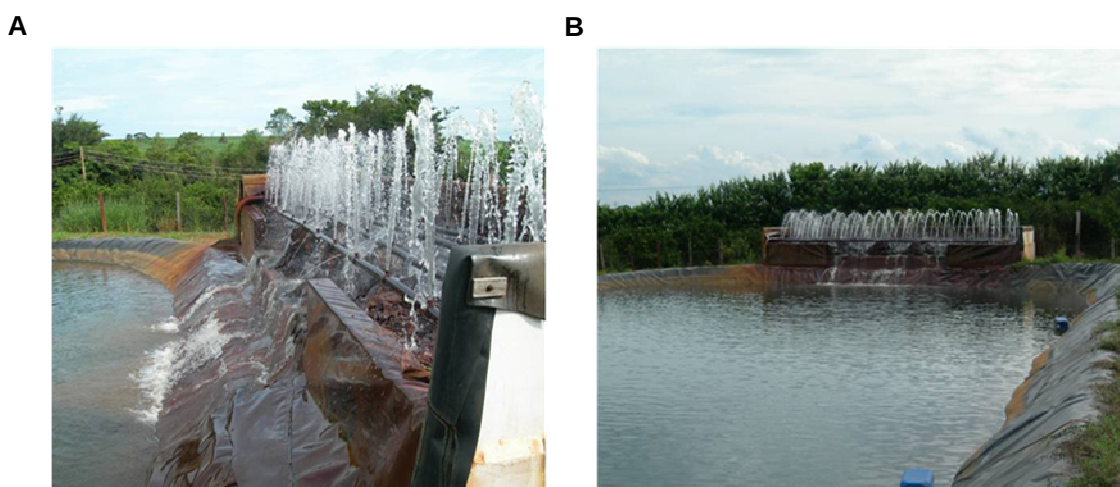


Figura 4. Fotografias do sistema de aeração (A) e do tanque de decantação (B) em momento de limpeza (sem tela de sombreamento).

Pontos de amostragem

Os pontos de amostragem (Figura 5) de água (PA) foram os seguintes:

- (PA1) - captação de água no córrego, a 0,2 m de profundidade e 0,6 m de distância da margem;
- (PA2) - no início do tanque de decantação logo após o aerador, na cascata;
- (PA3) - no ponto médio do tanque de decantação, a 0,2 m de profundidade e 0,6 m de distância da borda;
- (PA4) - no ponto final do tanque de decantação, a 0,2 m de profundidade e 0,6 m de distância da borda;

(PA5) - após o conjunto motobomba 2 e antes do sistema de filtragem, em uma saída lateral da automação;

(PA6) - após o sistema de filtragem, em um tubo de saída da adutora (Figura 2).

Em todas as datas de coleta foram retiradas amostras de todos os 6 pontos, sendo que as análises de pH e de oxigênio dissolvido em água foram realizadas no local e as demais análises foram realizadas em laboratório.

Para se dar início às coletas, o sistema já estava em pleno funcionamento por 10 horas ininterruptamente. As amostragens sempre foram realizadas no período da manhã, entre as 8 e as 12 horas, tomando-se o devido cuidado de não fazer turbilhonamento na água para não serem desprendidas impurezas depositadas na parede do tanque de decantação.



Figura 5. Fotografias dos pontos de amostragem: (A) PA1, (B) PA2, (C) PA3, (D) PA4, (E) PA5, (F) PA6.

Coleta das amostras

As avaliações da qualidade da água tiveram início em 19 de março de 2008, sendo os parâmetros físicos e químicos monitorados em média a cada 15 dias, até fevereiro de 2009, totalizando 20 amostragens. Nos meses de junho e julho, por serem os meses em que a irrigação é suprimida para que a cultura sofra estresse hídrico, para que ocorra uma florada mais uniforme e intensa, só foi ligado o sistema para a coleta durante 1 dia no mês, assim as amostragens foram realizadas a cada 30 dias.

As coletas de amostras de água foram realizadas procurando-se evitar contaminação ou variação dos constituintes a serem analisados entre o período da amostragem e a realização das análises em laboratório, seguindo-se recomendações de tipo de frasco, volume e período de validade, segundo MACEDO (2005), apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Recomendações de coleta e preservação de amostras hídricas.

Parâmetro	Preservação	Frasco	Período entre coleta e análise	Volume mínimo da amostra (mL)	Observação
pH	Analisar imediatamente	Polietileno	Até 24 h	50	Usualmente medido em campo
Oxigênio dissolvido em água	Analisar imediatamente	Polietileno	Imediato	300	Usualmente medido em campo
Sólidos em suspensão	Refrigerar a 10 °C	Polietileno	Até 7 dias	200	–
Sólidos dissolvidos	Refrigerar a 10 °C	Polietileno	Até 7 dias	200	–
Turbidez	Refrigerar e evitar exposição da amostra a luz	Polietileno	Até 48 h	200	–
Condutividade elétrica (CE)	Analisar imediatamente	Polietileno	Imediato	500	–
Ferro (Fe ⁺² e Fe ⁺³) e ferro total	5 mL de HNO ₃ por L	Polietileno	Até 180 dias	1000	–
Manganês	5 mL de HNO ₃ por L	Polietileno	Até 180 dias	1000	–

As amostras de água foram tomadas sem repetições e armazenadas em garrafas de polietileno de dois litros, bem higienizadas e acondicionadas em caixas de isopor

com gelo, sendo posteriormente levadas a laboratório. Para a determinação dos parâmetros foram seguidas as normas descritas em APHA (1998), especificadas na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros, métodos e referências utilizados para a análise da água dos pontos de amostragem.

Parâmetro	Metodologia	Referência
pH	Peagômetro, Digimed, DM PH-2	APHA 4500-H+ B
Oxigênio dissolvido	Método eletroquímico - Oxímetro digital	–
Sólidos em suspensão	Gravimétrico	APHA 2540 D
Sólidos dissolvidos	Gravimétrico	APHA 2540 C
Turbidez	Turbidímetro, Garden City, Helliage	APHA 2130 B
Condutividade elétrica	Condutivímetro, Digimed, CD-21	APHA 2510
Ferro (Fe^{+2} e Fe^{+3})	Método da Fenantrolina	APHA 3500-Fe B
Ferro total	Digestão ácida/Espectrofotômetro absorção Atômica	de APHA 3500-Fe B
Manganês total	Digestão ácida/Espectrofotômetro absorção Atômica	de APHA 3500-Mn B

Avaliação da qualidade de água quanto ao risco de entupimento dos emissores

Para classificação da água utilizada em sistema de irrigação localizada em relação a problemas de entupimento devido a parâmetros físicos e químicos, foram observados os níveis de risco de obstrução para irrigação localizada (Tabela 5), assim identificando a efetividade do sistema de aeração e decantação. Além desta avaliação foi calculada a porcentagem de redução ou elevação para cada parâmetro avaliado, considerando o ponto de amostragem 1 (PA1) como a base para se identificar a redução ou elevação do parâmetro em questão, também identificando-se a efetividade do sistema.

Foram avaliados os seguintes parâmetros relacionados com a qualidade de água para irrigação localizada: oxigênio dissolvido em água, sólidos em suspensão, sólidos dissolvidos, turbidez, condutividade elétrica (CE), Fe^{+2} , Fe^{+3} , ferro total, Mn e pH.

Para caracterizar o efeito do sistema de aeração, o teor de oxigênio dissolvido em água (OD) foi quantificado no momento da coleta das amostras, através do método eletroquímico, utilizando oxímetro digital portátil, marca Hanna Instruments, modelo HI 9147, à prova de água, com sonda galvanizada.

Tabela 5. Classificação da água para irrigação localizada.

Fatores de entupimento	Níveis de Risco		
	Baixo (B)	Moderado (M)	Severo (S)
Físico			
Sólidos em suspensão (mg L^{-1})	< 50	50 - 100	> 100
Químico			
pH	< 7,0	7,0 – 8,0	> 8,0
Sólidos dissolvidos (mg L^{-1})	< 500	500 – 2000	> 2000
Condutividade elétrica (dS m^{-1})	< 0,7	0,7 – 3,0	> 3,0
Ferro total (mg L^{-1})	< 0,2	0,2 – 1,5	> 1,5
Manganês (mg L^{-1})	< 0,1	0,1 – 1,5	> 1,5
Turbidez	Aceitável (A)		Inadequado (I)
	< 100 NTU*		> 100 NTU

* NTU = unidade nefelométrica de turbidez. Fontes: NAKAYAMA & BUCKS (1991), AYERS E WESTCOT (1999), BRASIL (2005) e CAPRA & SCICOLONE (2004).

Avaliação da uniformidade de irrigação na área experimental

A uniformidade de distribuição da água no sistema de irrigação por gotejamento foi avaliada em duas etapas: na época de sua implantação e após um ano de utilização do sistema de aeração e decantação para melhoria da qualidade da água. A avaliação da uniformidade de irrigação na área experimental baseou-se nos três índices: CUC - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CHRISTIANSEN, 1942); CUD - Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (ASAE, 1998) e US - Coeficiente de Uniformidade Estatística (ASAE, 1998).

Para a coleta de dados de vazão dos gotejadores foram usadas quatro linhas laterais tomadas alternadamente à esquerda e à direita da linha de derivação (início,

1/3, 2/3 e final da linha de derivação) e dentro de cada linha lateral foi utilizado o mesmo critério (início, 1/3, 2/3 e final da linha lateral), conforme metodologia proposta por KARMELI & KELLER (1974). Para cada um dos pontos foi medida a vazão de dois gotejadores em sequência, obtendo-se um total de 32 gotejadores em cada um dos dois setores avaliados, anotado-se o volume coletado durante 3 minutos, utilizando-se cronômetro e proveta graduada.

Análise estatística

Considerando a estrutura multivariada contida nos dados foram aplicados três métodos estatísticos exploratórios multivariados, visando classificar os pontos de amostragem em grupos: análise de agrupamento por método hierárquico, análise de agrupamento por método não-hierárquico *k-means* e análise de componentes principais. Todas as análises multivariadas foram realizadas após a padronização das variáveis em que cada uma ficou com média 0 e variância 1. A análise de agrupamento por método hierárquico foi realizada calculando-se a distância euclidiana entre os pontos de amostragem, para o conjunto das dez variáveis e utilizando o algoritmo de Ward para a classificação dos grupos. A identificação dos pontos de amostragem nos grupos também foi feita pelo *k-means* (HAIR et al., 2005) que pertence à classe dos métodos de agrupamento não-hierárquicos que complementam os resultados na discussão dos grupos, pois esse método minimiza a variância dos pontos de amostragem dentro de cada grupo.

A discriminação dos pontos de coleta foi feita através da análise de componentes principais, que permite condensar a quantidade da informação original contida em p variáveis ($p = 10$, neste estudo) em novas variáveis latentes ortogonais denominadas componentes principais, que são combinações lineares das variáveis originais criadas com os dois maiores autovalores da matriz de covariância dos dados (HAIR et al., 2005). Desta forma, o conjunto inicial de dez variáveis passou a ser caracterizado por duas novas variáveis latentes, o que possibilitou sua localização em figuras bidimensionais (ordenação dos pontos de amostragem por componentes principais). A adequação desta análise é verificada pela quantidade da informação total das variáveis

originais retida pelos componentes principais cujos autovalores são superiores à unidade (KAISER, 1958). Todas as análises estatísticas foram processadas no software STATISTICA versão 7.0 (STATISTICA, 2004).

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 6 estão apresentados os resultados médios das variáveis, risco de entupimento ao sistema de irrigação e porcentagem de redução proporcionada pelo sistema de aeração, decantação e filtração. Observa-se que os pontos de amostragem PA1 e PA2 caracterizam-se por apresentar os piores valores para as variáveis analisadas, comparado com os demais pontos de amostragem, demonstrando que o sistema de tratamento proporcionou melhoria da qualidade da água.

Tabela 6. Valores médios dos parâmetros de qualidade da água e classificação quanto ao risco de obstrução de emissores para os pontos de amostragem.

Sólidos em suspensão (mg L ⁻¹)						
Pontos de amostragem	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6
Média	83,5	86,5	68,2	56,8	48,7	31,6
Risco de entupimento*	M	M	M	M	B	B
Remoção (%)	-	-	18,3	32,0	41,7	62,2
Turbidez (NTU)						
Pontos de amostragem	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6
Média	34,2	33,0	26,1	20,6	17,9	11,4
Risco de entupimento	A	A	A	A	A	A
Remoção (%)	-	3,6	23,7	39,7	47,4	66,7
Sólidos dissolvidos (mg L ⁻¹)						
Pontos de amostragem	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6
Média	547	502	449	388	338	263
Risco de entupimento	M	M	B	B	B	B
Remoção (%)	-	8,2	17,9	29,1	38,2	51,9
pH**						
Pontos de amostragem	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6
Média	5,78	6,26	6,29	6,42	6,47	6,46
Risco de entupimento	B	B	B	B	B	B
Elevação (%)	-	8,4	9,0	11,1	12,0	11,8
Condutividade elétrica (dS m ⁻¹)						
Pontos de amostragem	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6
Média	0,035	0,035	0,034	0,032	0,031	0,030
Risco de entupimento	B	B	B	B	B	B
Remoção (%)	-	-	1,12	7,36	9,97	13,74

Mn total (mg L ⁻¹)						
Pontos de amostragem	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6
Média	0,04	0,06	0,03	0,02	0,01	0,01
Risco de entupimento	B	B	B	B	B	B
Remoção (%)	-	-	22,1	39,0	66,2	80,5
Ferro total (mg L ⁻¹)						
Pontos de amostragem	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6
Média	1,84	1,60	1,15	0,95	0,77	0,50
Risco de entupimento	S	S	M	M	M	M
Remoção (%)	-	-	37,4	48,1	58,3	72,6
Oxigênio dissolvido (mg L ⁻¹)						
Pontos de amostragem	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6
Média	5,3	7,5	6,9	6,9	6,9	7,1
Fe ⁺² (mg L ⁻¹)						
Pontos de amostragem	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6
Média	0,038	0,038	0,036	0,037	0,037	0,036
Fe ⁺³ (mg L ⁻¹)						
Pontos de amostragem	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6
Média	0,044	0,043	0,039	0,039	0,039	0,039

* A = aceitável; B = baixo; M = moderado; S = severo; **para o pH a porcentagem referida é de elevação

Os valores para sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos foram reduzidos, saindo-se do PA1, com água classificada como de moderado risco de entupimento (M), passando para o PA6, depois do sistema de filtragem, com remoção de 62,2% e 51,9% para essas duas variáveis, respectivamente. Os mais altos valores de sólidos em suspensão e dissolvidos encontrados no ponto de captação devem-se principalmente à degradação sofrida pela maioria dos mananciais da região de estudo, pois a ausência de matas ciliares e grande porcentagem de solos degradados sem a utilização de técnicas conservacionistas favorecem o transporte de materiais sólidos (areia, silte, argila) e detritos orgânicos carregados pelo escoamento superficial. A concentração média de sólidos suspensos é baixa no PA6, decorrente do fato de o reservatório de decantação utilizado como fonte de abastecimento da irrigação ter água com baixa velocidade, havendo sedimentação do material em suspensão na água.

Para os resultados de turbidez, identifica-se que sempre estiveram abaixo do limite máximo estabelecido na Resolução Nº 357/2005 do CONAMA (BRASIL, 2005), que é de 100 NTU. Embora não tenha sido identificado risco para essa variável, o sistema proporcionou redução de 66,7%, do PA1 para o PA6.

Os valores médios de pH para todos os pontos de amostragem foram classificados como de baixo risco ($\text{pH} < 7,0$), indicando não haver risco de obstrução ao sistema de irrigação localizada. Segundo LIBÂNIO (2005), valores muito baixos de pH podem causar corrosão e valores altos podem originar problemas de incrustações nas tubulações. O ideal é que o pH da água de irrigação por gotejamento esteja próximo de 6,5 (NAKAYAMA & BUCKS, 1991), valor alcançado em PA6.

A condutividade elétrica da água sofreu contínuo decréscimo a partir do PA2 até o PA6. Em todas as amostragens os valores de condutividade elétrica medidos mantiveram-se estáveis apresentando baixo risco de obstrução a sistemas de irrigação localizada. Estes valores indicam que a água utilizada para a irrigação tem salinidade muito baixa e pouco variou ao longo da avaliação.

O teor de ferro total na água do córrego encontrado no ponto de captação (PA1) foi de $1,84 \text{ mg L}^{-1}$, classificado como severo (S), quanto ao risco de obstrução de emissores. Os valores decresceram a partir do PA2, ao longo da passagem da água pelo sistema de decantação, chegando até o PA6 com $0,50 \text{ mg L}^{-1}$, com nível de risco moderado. A redução do ferro total do PA1 para o PA6 foi de 72,6%.

Os teores de manganês apresentaram-se de baixo risco em todos os pontos de amostragem, de forma tal que este parâmetro não representou qualquer risco ao sistema de irrigação por gotejamento. A redução do teor desde o ponto PA1 para o PA6 foi de 80,5%, demonstrando que o manganês foi precipitado no tanque de decantação e no sistema de filtragem.

Analisando-se conjuntamente as variações do Fe^{+2} , Fe^{+3} , ferro total e oxigênio dissolvido do ponto de captação de água (PA1) até o final do sistema (PA6) (Tabela 6), verifica-se que as baixas concentrações do Fe^{+2} e Fe^{+3} mantiveram-se desde o PA1 até o fim do sistema (PA6) o que poderia ser justificado pelo fato de haver bom nível de oxigênio dissolvido (OD), fazendo com que já no PA1 praticamente todo o ferro

estivesse na forma de óxidos ou hidróxidos de Fe^{+3} , complexos de Fe^{+3} com matéria orgânica ou imobilizado em microorganismos, revelando pouco Fe^{+2} e Fe^{+3} livre, mas grandes teores de ferro total que foram elevados no PA1 e PA2. Assim, do PA1 até o PA6, verifica-se redução contínua nos teores do ferro total, significando que este foi decantado (PA2 a PA5) e retido na filtração (PA6). Com estes dados é possível afirmar que o sistema de aeração, embora tenha induzido aumento no teor de OD não foi importante para a oxidação de Fe^{+2} para Fe^{+3} , pois os níveis de Fe^{+2} eram baixos já no ponto de captação e permaneceram praticamente inalterados ao longo de todo o sistema. Entretanto, o sistema de aeração contribuiu para a decantação de Fe total no percurso do tanque e o que não decantou ficou retido na filtração. Dessa forma, a eficiência do sistema na diminuição no teor de ferro total da água parece estar relacionada mais a processos físicos (turbilhonamento da água) que pode estar ressuspendendo todo o material insolúvel, o que pode fazer com que a re-precipitação seja mais uniforme e eficiente, pois, na Tabela 6, pode-se observar o comportamento do teor de ferro total à medida que se avança nos pontos de amostragem, retratando a distribuição diferenciada ao longo do sistema, evidenciando nítida melhoria da qualidade da água. Os valores com nível severo (PA1 e PA2) reduziram-se para nível moderado (PA3, PA4, PA5 e PA6), com 72,6% de redução deste parâmetro do (PA1 – $1,84 \text{ mg L}^{-1}$) para o (PA6 – $0,5 \text{ mg L}^{-1}$). Em relação ao OD, o teor aumentou do PA1 para o PA2, com 42% de elevação, mantendo-se em nível elevado e praticamente constante do PA3 até o PA6.

Análise multivariada dos dados

O dendrograma obtido pela análise de agrupamento (Figura 6) indica que a variação da distância euclidiana de 3,38 para 3,80 permitiu a divisão dos pontos de coleta em dois grupos distintos: I e II. No grupo I ficaram os pontos de amostragem com baixa qualidade de água e, no grupo II os pontos com média a alta qualidade de água, em relação a problemas de entupimento devido a fatores físicos e químicos. O grupo I, constituído pelos pontos de amostragem PA1 (córrego) e PA2 (sistema de aeração), ficou caracterizado por apresentar risco de entupimento de moderado a severo em

relação aos valores da Tabela 5. No grupo II estão dispostos os pontos de amostragem ao longo do tanque de decantação e após o mesmo, que apresentam características físico-químicas da água com níveis de risco entre baixo e moderado.

Considerando o número de grupos igual a dois, aplicou-se o método de agrupamento *k-means* que confirma a ordenação obtida na análise de agrupamento por método não-hierárquico. Na Tabela 7 é mostrada a importância individual das variáveis na diferenciação dos grupos I e II.

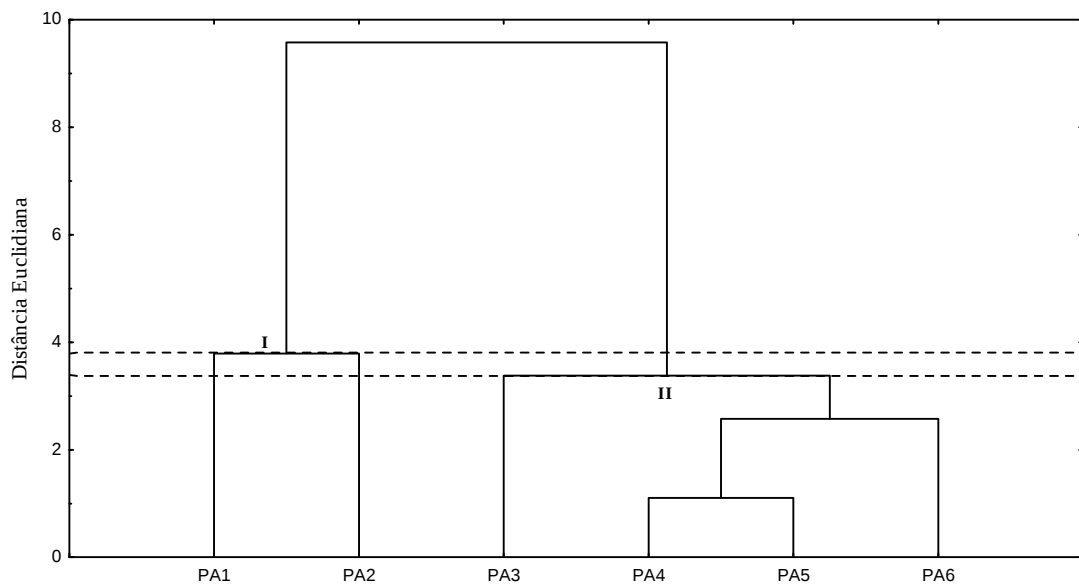


Figura 6. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamento com a formação de grupos dos pontos de amostragem (PA), segundo os parâmetros utilizados para avaliação da qualidade da água.

Na Figura 7 são indicadas as médias padronizadas das características físicas e químicas da água para cada grupo, segundo análise de agrupamento pelo método não-hierárquico *k-means*. Para Fe^{+2} o valor não apresentou diferença significativa ($p > 0,05$), indicando que essa variável não foi representativa para diferenciação dos grupos.

No PA1 e PA2 (grupo I) os valores elevados de turbidez, sólidos dissolvidos, sólidos em suspensão e ferro total, caracterizam a água como de alto risco de dano a sistemas de irrigação localizada. Já o grupo II (PA3 a PA6) é caracterizado por níveis menores dessas variáveis, assim a água nesses pontos apresenta melhor qualidade e

menor risco de dano. O grau de significância pode ser observado na Figura 7, pelas maiores distâncias entre os pontos.

Tabela 7. Análise de variância para cada variável dos grupos formados pela análise não-hierárquica de agrupamento *k-means*.

Variável	Soma de quadrados entre grupos	Graus de Liberdade	Soma de quadrados dentro dos grupos	Graus de liberdade	Valores de F	Prob. (p)
Oxigênio dissolvido (OD)	12,312	1	106,688	118	13,618	0,001
Turbidez (NTU)	61,543	1	57,457	118	126,392	0,001
Condutividade elétrica (CE)	11,175	1	107,825	118	12,230	0,001
pH	12,938	1	106,062	118	14,394	0,001
Sólidos dissolvidos	53,036	1	65,964	118	94,875	0,001
Sólidos em suspensão	66,799	1	52,201	118	151,000	0,001
Fe ⁺²	0,565	1	118,435	118	0,563	0,455
Fe ⁺³	13,132	1	105,868	118	14,637	0,001
Ferro total	49,700	1	69,300	118	84,627	0,001
Mn total	22,915	1	96,085	118	28,141	0,001

* Prob. – probabilidade (p)

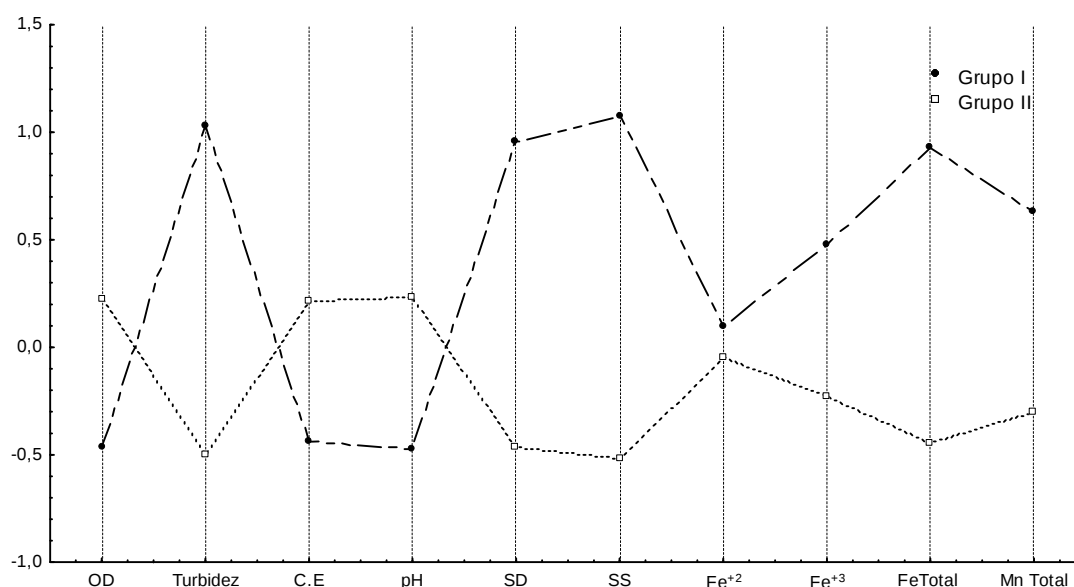


Figura 7. Médias padronizadas das características físico-químicas da água para cada grupo, segundo análise de agrupamento não-hierárquica *k-means*.

A análise de componentes principais permitiu uma única distribuição dos pontos de amostragem (componente principal 1 x componente principal 2), visto que somente dois autovalores foram superiores a um: maior autovalor 8,05 (componente com melhor retenção da variabilidade original) e o segundo maior autovalor 1,39 (componente com melhor retenção da variabilidade excluindo a variabilidade retida no primeiro componente). Os dois componentes principais juntos possibilitaram ordenação bidimensional dos pontos de amostragem e das variáveis, permitindo a construção de um gráfico “biplot”. A quantidade da informação total das variáveis originais, retida nos dois componentes principais, foi de 94,4% [80,5% (primeiro componente) + 13,9% (segundo componente)] (Figura 8). A ordenação dos pontos de amostragem segundo os dois primeiros componentes principais confirma a ordenação dos pontos de amostragem em dois grupos, obtida pelas análises de agrupamento por método hierárquico e não-hierárquico.

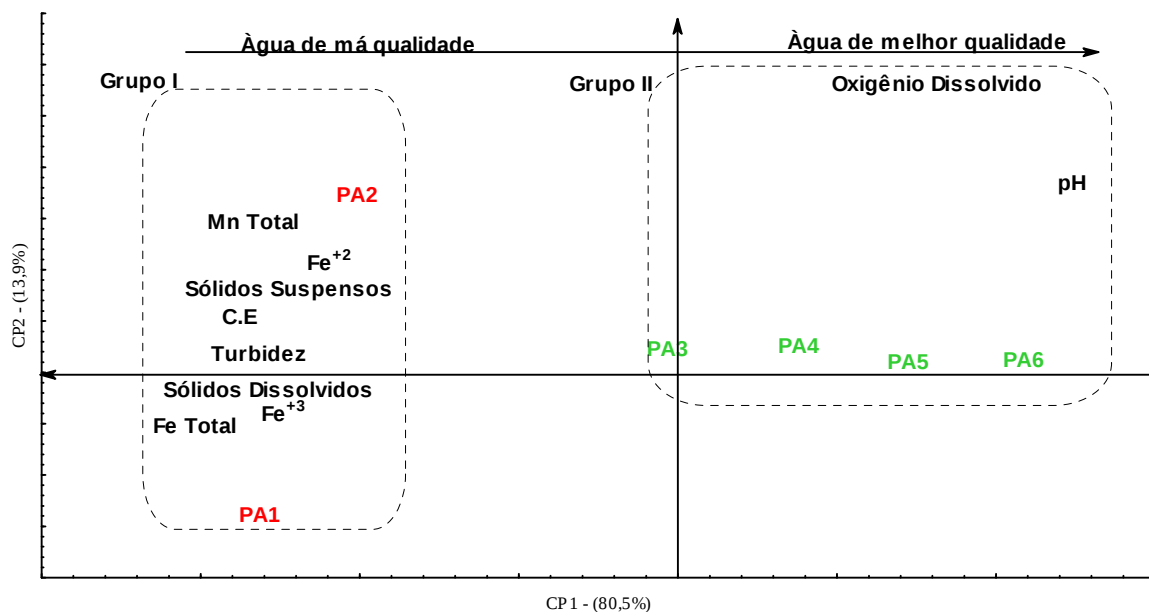


Figura 8. Dispersão (gráfico “biplot”) dos pontos de amostragem em função das características físico químicas da água.

A representação gráfica (Figura 8) e a correlação das variáveis nos componentes principais (Tabela 8) permitiram caracterizar as variáveis que mais discriminaram na formação dos grupos I e II. Os sólidos dissolvidos (-0,98), sólidos em suspensão (-0,98), turbidez (-0,99), CE (-0,93), Fe^{+2} (-0,81), Fe^{+3} (-0,94), ferro total (-1,00) e Mn total (-0,91) são responsáveis pela discriminação do grupo I, localizado à esquerda (CP1: correlações negativas), enquanto a variável oxigênio dissolvido (0,88) e pH (0,84) são responsáveis pela discriminação do grupo II, localizado à direita (correlação positiva). No segundo componente principal, somente as variáveis oxigênio dissolvido e pH discriminaram os pontos de amostragem localizados na parte superior do gráfico, indicando que esses pontos de amostragem apresentaram maiores valores de pH e OD.

A partir dos resultados da análise de componentes principais, observa-se que o grupo I é caracterizado por apresentar variáveis com valores médios que caracterizam níveis de risco de entupimento dos emissores de moderado a severo (Tabela 5). Por sua vez, o grupo II é caracterizado por apresentar pontos de amostragem (PA4, PA5 e PA6) com água de menores riscos de entupimento, segundo a classificação de NAKAYAMA & BUCKS (1991).

Tabela 8. Correlação entre componentes principais (CP1 e CP2) e características físico-químicas da água.

Variável	CP1	CP2	Variável	CP1	CP2
Sólidos dissolvidos	-0,98	-0,02	Fe^{+3}	-0,94	-0,08
Sólidos em suspensão	-0,98	0,16	Ferro total	-1,00	-0,05
Turbidez	-0,99	0,06	Mn total	-0,91	0,41
Condutividade elétrica (CE)	-0,93	0,13	Oxigênio dissolvido (OD)	0,46	0,88
Fe^{+2}	-0,81	0,35	pH	0,84	0,53

Coeficientes de uniformidade

Observa-se na Tabela 9 que houve pouca redução nos valores médios do CUC, após um ano de funcionamento do sistema de aeração, decantação e filtração. O CUC para a etapa de implantação do sistema de aeração e decantação foi de 98,3%,

passando para 92,9% um ano após, o que permite classificar a uniformidade de distribuição de água do sistema como excelente tanto no início das avaliações, quanto na última avaliação.

Tabela 9. Resultado dos índices de uniformidade de distribuição de água calculados durante as duas etapas da pesquisa.

Índices de Uniformidade						
Etapas*	CUC (%)	Classificação**	CUD (%)	Classificação	US (%)	Classificação
1	98,3	Excelente	97,1	Excelente	97,9	Excelente
2	92,9	Excelente	88,9	Bom	83,8	Muito bom
1-2***	5,4		8,2		14,1	

* Etapa 1: implantação do sistema de aeração e decantação, Etapa 2: um ano após utilização do sistema de aeração e decantação. ** Classificação dos índices de uniformidade segundo MANTOVANI (2002) e FAVETTA & BOTREL (2001). *** Redução dos índices de uniformidade durante as duas etapas.

Segundo PUIG-BARGUES et al., (2005), quanto maior o valor do CUC, menor é a lâmina de irrigação necessária para alcançar produtividade máxima e de acordo com BERNARDO et al. (2006), o limite mínimo de CUC aceitável em sistema de irrigação por gotejamento é de 80%. Nesta pesquisa, o uso do sistema de aeração, decantação e filtragem contribuiu para manter os valores médios do CUC sempre acima de 90%.

O CUD mostrou-se mais sensível às variações da uniformidade de aplicação que o CUC, pois em seu cálculo, utilizam-se os valores médios dos 25% menores valores das vazões (menor quartil). Observa-se que o valor médio do CUD decresceu 8,2% após um ano de implantação do sistema de aeração e decantação, passando de 97,1% (excelente) para 88,9% (bom), demonstrando maior rigor deste coeficiente, em comparação com o CUC.

O coeficiente de uniformidade estatística apresentou a maior variação (14,1%) com 97,9% na primeira etapa de avaliação, classificando-se como excelente de acordo com FAVETTA & BOTREL (2001), porém na última avaliação caiu para 83,8%, classificando-se como muito bom. De modo geral, para os três coeficientes de uniformidade, os setores irrigados antes da implantação do sistema de aeração, decantação e filtragem apresentaram classificação excelente, (acima de 90%), o que

era de se esperar, devido o sistema de irrigação ser novo. Após um ano de implantação e funcionamento do sistema de aeração, decantação e filtragem os valores foram acima de 80%, sendo classificados como bom, muito bom e excelente.

V. CONCLUSÕES

O sistema com aeração, decantação e filtração melhorou a qualidade da água, reduzindo os níveis de risco de entupimento de severo para médio e de médio para baixo para irrigação localizada.

Os níveis de oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, pH, Fe^{+2} e Fe^{+3} praticamente não variaram no sistema de tratamento, mas o mesmo reduziu significativamente a turbidez e as concentrações de sólidos dissolvidos, sólidos em suspensão, ferro total e Mn total melhorando a qualidade da água pelo uso do sistema proposto.

Os teores de Fe^{+2} e Fe^{+3} livres foram baixos e praticamente constantes ao longo do sistema, indicando que a eficiência de remoção de ferro total deveu-se à precipitação do ferro já oxidado e presente na forma insolúvel no ponto de captação.

A uniformidade de distribuição de água após um ano de implantação e funcionamento do sistema de aeração, decantação e filtração apresentou valores acima de 80%, sendo classificados como bom, muito bom e excelente, confirmando a viabilidade de utilização do sistema.

VI. REFERÊNCIAS

- AIROLDI, R.P.S. **Análise do desempenho de gotejadores e da prevenção do entupimento em irrigação com água residuária**. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade de São Paulo, Piracicaba – USP. 140p. 2007.
- APHA - American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21. ed., New York, AWWA, WPCF, 1998. 1360 p.
- ASAE - AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. E.P 458: **Field evaluation of microirrigation systems**. St. Joseph, Estados Unidos, 1998. 7p.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. Tradução de GHEY, H.R.; MEDEIROS, J.F.; DAMASCENO, F.A.V. Campina Grande: UFPB, 1999. 153 p.
- BERNARDO, S.; SOARES A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.
- BRASIL. **Resolução Nº 357 de 17 de março de 2005**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). 2005.
- CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Emitter and filter test for wastewater reuse by drip irrigation. **Agricultural Water Menagement**, Amsterdam, v.68, p.135–149, 2004.
- CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Recycling of poor quality urban wastewater by drip irrigation systems. **Journal Cleaner Production**. v.15, 1529–1534. 2007.
- CARARO, D.C.; BOTREL, T.A.; HILLS, D.J.; LEVERENZ, H.L. Analysis of clogging in drip emitters during wastewater irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.22, n.2, p. 251-257, 2006.

CARVALHO, N. de O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. 372p.

CHRISTOFIDIS, D. O futuro da irrigação e a gestão das águas. **Item**, Brasília, n.80, p.40-47, 2008.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkler**. Berkeley: California Agricultural Station, 1942. 212p. (Bulletin 670).

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo CETESB**. São Paulo: 2003. 264p.

CORDEIRO, E.A. **Influência do tratamento de água ferruginosa no desempenho de sistema de irrigação por gotejamento**. Viçosa: UFV, 92f. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola).

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro: FINEP, 1998. 575p.

FAVETTA, G.M.; BOTREL, T.A. Uniformidade de sistemas de irrigação localizada: Validação de Equações. **Scientia Agricola**, v.58, n.2, p.427-430, abr./jun. 2001.

HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAN, R.L.; BLACK, W. **Análise multivariada de dados**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2005, 593 p.

HERNANDEZ, F.B.T.; SILVA, C. R.; SASSAKI, N.; BRAGA, R. S. Qualidade de água em um sistema irrigado no noroeste paulista. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz de Iguaçu. **Anais do XXX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001. 1 CD-ROM.

KAISER, H.F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis, **Psychometrika**, v.23; p.187-200, 1958.

KARMELI, D.; KELLER, J. Evaluation of a trickle irrigation system. In: **INTERNACIONAL DRIP IRRIGATION CONGRESS**, 2, Riverside, 1974. p.287-292.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. Tradução de C. H. B. A. Prado e A. C. Franco. São Carlos: RiMa,. 531p. 2000.

LEITE, J.A.O. **Avaliação da susceptibilidade de tubogotejadores ao entupimento por precipitados químicos de carbonato de cálcio**. 1995. 64f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1995.

LEMES, M.J.L. **Avaliação de metais e elementos-traço em águas e sedimentos das bacias hidrográficas dos rios Mogiguaçu e Pardo, São Paulo**. 2001. 248f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Instituto Enérgetica e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas: Átomo, 2005. 444p.

LIMA, A. F. **Problemas de engenharia sanitária**. Recife: UFPE, 1993. 319p.

LOPEZ, R.J.; ABREU, J.M.H.; REGALADO,A.P.; HERNANDEZ, J.F.G. **Riego localizado**. 2.ed Madri: Mundi-Prensa, 1997.405p.

MACEDO, J.A.B. **Métodos laboratoriais de análises físico-químicas e microbiológicas**. 3. ed. Belo Horizonte: CRQ-MG, 2005. 450 p.

MANTOVANI, E.C. **Avalia:** manual do usuário. Viçosa: DEA/UFV–PNP&D/café Embrapa, 2002.

MORAES, A. J. **Manual para a avaliação da qualidade da água**. São Carlos: RiMa,. 44p. 2001.

NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. **Trickle irrigation for crop production**. St. Joseph: ASAE, 1986. 383p.

NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. **Irrigation Science**, v.12, p.187-92, 1991.

PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia**. 3 ed. Madrid: Mundi Prensa, 1996, 471p.

PORTO, M.F.A.; BRANCO, S.M.; LUCA, S.J. Caracterização da qualidade de água. In: BRANCO, S.M. **Hidrologia Ambiental**. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo / ABRH, cap. 2, p. 27-66. 1991.

PUIG-BARGUES, J.; ARBAT, G.; BARRAGAN, J.; RAMIREZ DE CARTAGENA, F. Hydraulic performance of drip irrigation subunits using WWTP effluents. **Agriculture Water Management**. 77, 249–262. 2005.

SANTOS, W.L. **O processo de urbanização e impactos ambientais em bacias hidrográficas: o caso do Igarapé Judia-Acre-Brasil**. 163p. 2005.

STATISTICA. **Data analysis software system, Version 7.0**, StatSoft Inc., 2004. Disponível em: <www.statsoft.com>

SIMONASSI, J.C. **Caracterização da Lagoa do Peri, através da análise de parâmetros físico-químicos e biológicos, como subsídio ao gerenciamento dos recursos hídricos da Ilha de Santa Satarina, SC, Brasil**. 2001. 72f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2001.

TUNDISI, J.G. O futuro dos recursos: recursos hídricos. São Paulo, n. 1, out. 2003. Disponível em: **Revista MultiCiência**. www.multiciencia.unicamp.br/artigos. Acesso em: 25 n. 2009.

VARNER, D. ; SKIPTON, S. ; HAY, D. ; JASA, P. **Drinking water: iron and manganese**. University of Nebraska: Neb Guide, G96 – 1280 - A. <http://www.ianr.unl.edu/pubs/water/g1280.htm>.2000.

VON SPERLING, M. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, 246p. 1996.

ZHANG, J., ZHAO, W., WEI, Z., TANG, Y., LU, B.,. Numerical and experimental study on hydraulic performance of emitters with arc labyrinth channels. **Computers and Electronics in Agriculture.** n.56, 120–129. 2007.