

SISTEMA COM AERAÇÃO, DECANTAÇÃO E FILTRAGEM PARA A MELHORIA DA QUALIDADE DE ÁGUA EM IRRIGAÇÃO LOCALIZADA¹

MARCO A. F. LEMOS FILHO², JOSÉ R. ZANINI³, ELCIDES R. S. DA SILVA⁴,
JAIRO O. CAZETTA⁵, ANTÔNIO S. FERRAUDO⁶

RESUMO: A qualidade da água é muito importante para irrigação por gotejamento, pois ela escoar por pequenos bocais dos emissores, podendo ocorrer obstrução devido à deposição dos sólidos em suspensão. Portanto, antes da instalação do projeto, devem-se avaliar parâmetros de qualidade da água, para adotar medidas preventivas, evitando o risco de entupimento do sistema. Este trabalho teve como objetivo avaliar um sistema composto por aeradores com aspersores, sobre leito de pedra, para a precipitação dos íons Fe^{+2} e Mn^{+2} em tanque de decantação, e um conjunto de filtragem composto por três filtros de areia e um de disco, em sistema de irrigação localizada. O trabalho foi realizado na Fazenda Alvorada, no município de Nova Granada - SP, no período de março a outubro de 2008. Foram realizadas determinações de variáveis físicas e químicas da água, ao longo do sistema de aeração, decantação e filtragem, o qual 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. Oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, pH, Fe^{+2} e Fe^{+3} não diferenciaram a qualidade de água entre os pontos do sistema de tratamento, porém a turbidez, sólidos dissolvidos, sólidos em suspensão, ferro total e manganês total reduziram-se significativamente pelo uso do sistema proposto, melhorando a qualidade da água.

PALAVRAS-CHAVE: análises físicas e químicas de água, tratamento de água, precipitação dos íons Fe^{+2} e Mn total.

SYSTEM WITH AERATION, SEDIMENTATION AND FILTERING FOR THE IMPROVING OF WATER QUALITY IN DRIP IRRIGATION

ABSTRACT: Water quality is very important to drip irrigation, as it flows in small diameter holes, and may cause obstruction due to deposition of solid matter. Whence the water must be evaluated before installation of the project. Parameters related to water quality are essential to define conducting measures to avoid the risk of clogging the system. This study aimed to evaluate a system with sprinklers aeration on bedrock, for Fe^{+2} and Mn total precipitation in sedimentation tank and a set of filtering consisting of three sand filters and a disk, installed in drip irrigation system. The study was conducted at Alvorada Farm, in the municipality of Nova Granada - SP, Brazil, from March to October of 2008, when the physical and chemical water analyses were made. It was concluded that: the aeration system, sedimentation and filtration were efficient for improving water quality, reducing the levels of risk of severe to medium obstruction and medium to low obstruction. The variables, dissolved oxygen, electrical conductivity; pH, Fe^{+2} and Fe^{+3} were not significant to indicate differences of water quality among the points of the water treatment. However, the variables such as: turbidity, dissolved solids, suspended solids, total iron and Mn^{+2} were statistically significant for the differentiation of the water quality.

KEYWORDS: physical and chemical analysis of water, water treatment, precipitation of ions Fe^{+2} and Mn total.

¹ Extraído da dissertação de mestrado do primeiro autor.

² Eng^o Agrônomo, Mestre em Agronomia (Ciência do Solo), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, FCAV/UNESP, Jaboticabal - SP, maflf@hotmail.com

³ Eng^o Agrônomo, Doutorando em Agronomia (Ciência do Solo), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, FCAV/UNESP, Jaboticabal - SP.

⁴ Prof. Dr., Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, FCAV/UNESP, Jaboticabal - SP.

⁵ Prof. Dr., Departamento de Tecnologia, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, FCAV/UNESP, Jaboticabal - SP.

⁶ Prof. Dr., Departamento de Ciências Exatas, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, FCAV/UNESP, Jaboticabal - SP.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 2-6-2009

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 14-3-2011

INTRODUÇÃO

O aumento das áreas irrigadas e a escassez de água de boa qualidade para fins de irrigação exigem a geração de tecnologia que viabilize a utilização de água de baixa qualidade para sistemas de gotejamento e microaspersão. Essa tecnologia deve ser eficiente, uma vez que a recuperação total ou parcial de emissores entupidos, além de não ser muito efetiva, é muito onerosa para o produtor (RESENDE et al., 2001).

Durante as últimas três décadas, no Estado de São Paulo, houve grande mudança nas preferências dos produtores quanto à irrigação, passando a ser muito utilizada a irrigação localizada, em substituição à irrigação por aspersão, por se tratar de sistemas com grande eficiência de uso da água e pequeno consumo de energia. Além destas vantagens em relação a outros sistemas, várias outras, como possibilidade de implementar a fertirrigação, de forma eficiente, menor utilização de mão de obra e redução dos riscos de contaminação de alimentos por organismos patogênicos (PATERNIANI, 1991), contribuem para esta opção. Essa mudança é muito mais perceptível em culturas perenes, como café, citros e frutíferas em geral.

A presença de ferro e manganês em águas naturais superficiais é devida às interações da água com o solo (BARROS, 2001). O ferro é um dos elementos mais abundantes, encontrado com maior frequência que o manganês, nos minerais de silicatos das rochas ígneas sob a forma de diversos óxidos, como magnetita, hematita e limonita. Os minerais sulfurados e carbonatados também são fontes importantes de ferro, tais como a pirita e a siderita (MADEIRA et al., 2004). O manganês encontra-se em maiores proporções nas rochas metamórficas e sedimentares, e os dióxidos de manganês, tais como a manganita e a pirolusita, acumulam-se nos solos à medida que os constituintes mais solúveis se separam por lixiviação (BENEFIELD et al., 1982).

O fenômeno da obstrução de emissores tem sido extensivamente estudado (PUIG-BARGUES et al., 2005; CAPRA & SCICOLONE, 2007; ZHANG et al., 2007). Na irrigação localizada, vários fatores podem comprometer a uniformidade de distribuição de água, tais como a desuniformidade dos emissores, o dimensionamento inadequado do sistema, bem como o entupimento ou o desequilíbrio de vazão dos emissores, causado pelas partículas minerais ou orgânicas presentes na água. Na irrigação por gotejamento, a água escoar por pequenos bocais, podendo causar obstrução desses devido à deposição de materiais em suspensão. O entupimento de emissores é um grave problema associado ao gotejamento, visto que dificulta a operação de sistemas de irrigação, é de difícil detecção, e a limpeza ou substituição dos emissores entupidos é onerosa (VIEIRA et al., 2004).

Segundo NAKAYAMA & BUCKS (1991), a principal causa de entupimento de emissores de irrigação localizada é a água com elevados teores de íons ferro (Fe^{+2}) solúveis que, quando oxidados para a forma Fe^{+3} , precipitam-se, formando aglomerados sólidos. Esses sólidos vão aderindo-se às partes internas do sistema de irrigação, após a filtração, sendo responsáveis por causar obstrução dos emissores. A determinação da causa exata do entupimento do emissor é complexa, uma vez que podem ocorrer interações entre vários agentes presentes na água, agravando o problema de entupimento (RAVINA et al., 1992). Outros contaminantes presentes na água, como algas, areia e silte, entre outros, devem ser removidos, para não ocasionar problemas no sistema de irrigação (CARARO et al., 2006). Além do Fe^{+2} , o manganês (Mn^{+2}) e o enxofre (S) são íons que, no estado reduzido, apresentam-se solúveis em água e quando se oxidam, precipitam-se causando obstrução dos emissores (PIZARRO, 1996).

FEITOSA FILHO et al. (1999) relatam que a ferrugem (limo ferroso) pode desenvolver-se pela ação de bactérias ferruginosas que infectam a água, mesmo que o conteúdo de ferro na água seja pequeno (menor que 1 mg L^{-1}). Para amenizar esses problemas, o procedimento ideal é fazer avaliação da água antes de se instalar qualquer sistema. Assim, podem-se recomendar sistemas de aeração que diminuam os níveis de Fe^{+2} e outros íons solúveis em água, e tanques de decantação para ocorrer a formação de limo ferroso no tanque e a parte que não venha a decantar seja retirada da água pelo sistema de filtração.

A análise estatística multivariada surgiu como importante ferramenta de obtenção de quantidade maior de informação que dificilmente seria gerada com o uso de métodos univariados (FERREIRA, 2008). Na estatística multivariada, considera-se que o fenômeno depende de muitas variáveis. Com isso, não basta conhecer as variáveis isoladamente, mas conhecê-las conjuntamente, pois uma depende da outra, e as informações são fornecidas pelo conjunto e não individualmente (GROBE, 2005).

Considerando-se que muitos sistemas de irrigação apresentam obstrução e que existem poucos estudos para avaliação desse fenômeno, neste trabalho estudou-se o efeito da aeração com aspersores tipo “spray” colocados em leito de pedras, sobre a precipitação dos íons solúveis Fe^{+2} e Mn^{+2} , associados a tanque de decantação e filtração, para obter água com qualidade suficiente para a utilização em irrigação localizada, evitando ou reduzindo problemas de obstrução de emissores. Cabe ainda ressaltar que, cada vez mais, as empresas produtoras de emissores de irrigação localizada investem no desenvolvimento de emissores de menor vazão e emissores antidrenantes para irrigação por pulso, tecnologia essa que é tendência mundial. Sendo esses emissores de menor vazão e antidrenantes bastante suscetíveis a obstruções, fazem-se necessários o estudo e a geração de soluções viáveis para implantação desses sistemas de prevenção.

MATERIAL E MÉTODOS

Sistema de aeração, decantação e filtração

O experimento foi realizado na Fazenda Alvorada, no município de Nova Granada – SP, utilizando água do córrego Samambaia, em cultura de citros (68,53 ha) irrigada. Os gotejadores utilizados foram da marca NETAFIM, modelo RAM 17 Q, vazão nominal de $3,5 L h^{-1}$, autocompensantes, espaçados a cada 0,8 m na linha lateral e a 7 m entre linhas laterais em tubos de polietileno linear de baixa densidade com 17 mm de diâmetro externo e linhas de 120 m de comprimento máximo, com quatro anos em funcionamento.

Nesse sistema, em novembro de 2007, foi instalado um aerador, com aspersores tipo “spray” fixo da marca Fabrimar®, com bocal de diâmetro nominal de 8,8 mm, com vazão de $2,95 m^3 h^{-1}$ à pressão de serviço de 105 kPa, modelo ASFIX AF4, 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 e, portanto, demanda menor potência de bombeamento. A placa côncava e estriada direciona o fluxo ao leito de pedras, fracionando-o antes em grande quantidade de jatos, e estes em gotas de vários tamanhos, favorecendo a aeração (Figura 1); baixo custo e disponibilidade no mercado. No sistema de irrigação, a filtração é realizada por um conjunto formado de filtro de areia (três bujões de 1,2 m de diâmetro, preenchidos com areia de quartzo arestado de granulometria de 1 a 2 mm e instalados em paralelo) e filtro de discos com seção de passagem de 120 mesh ($130 \mu m$).

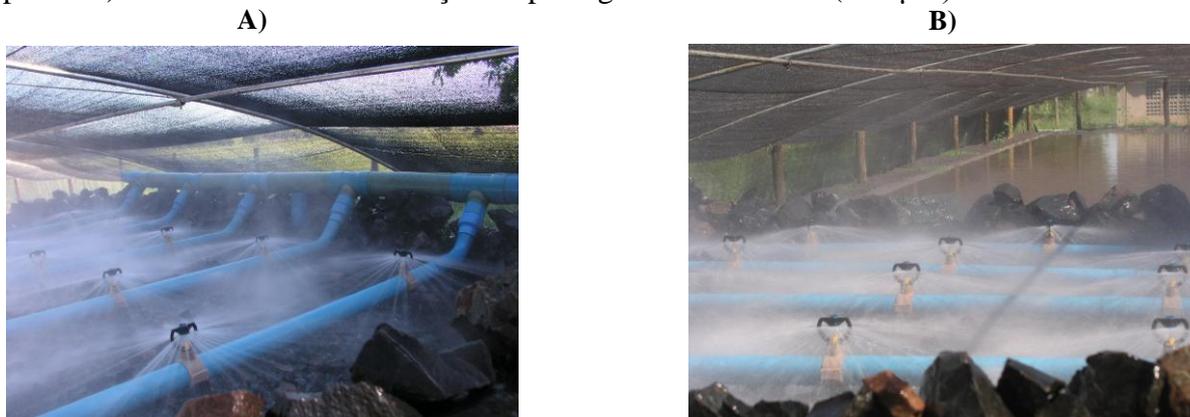


FIGURA 1. Sistema de aeração (A), tanque de decantação e da cobertura com tela de sombreamento (B). **Aeration system (A), sedimentation tank, and cover with screen shading (B).**

O espaçamento entre as linhas de aspersores e entre aspersores na linha é de 0,6 m, sendo utilizadas quatro linhas laterais com oito aspersores e uma linha lateral com nove aspersores. A instalação dos aspersores foi feita sobre um leito de pedra basáltica arestada (classificada como pedra de mão, de 10 a 30 cm de diâmetro), com 12 m de comprimento, 5 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 as pedras por contato superficial (Figura 1). Os aspersores ficam a 15 cm de altura sobre o leito de pedra. A vazão do sistema é de $120,95 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, e a condução da água do córrego até o aerador é feita utilizando tubos de PVC de diâmetro nominal de 150 mm.

O tanque de decantação possui paredes com inclinação de 45° e as seguintes dimensões aproximadas: largura de 15 m, profundidade de 3 m e comprimento de 35 m, resultando em seção de 27 m^2 . Assim, sendo a vazão de $120,95 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, a velocidade média da água no tanque é de $3,5 \text{ m h}^{-1}$; portanto, o tempo disponível para decantação é de aproximadamente 10 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).

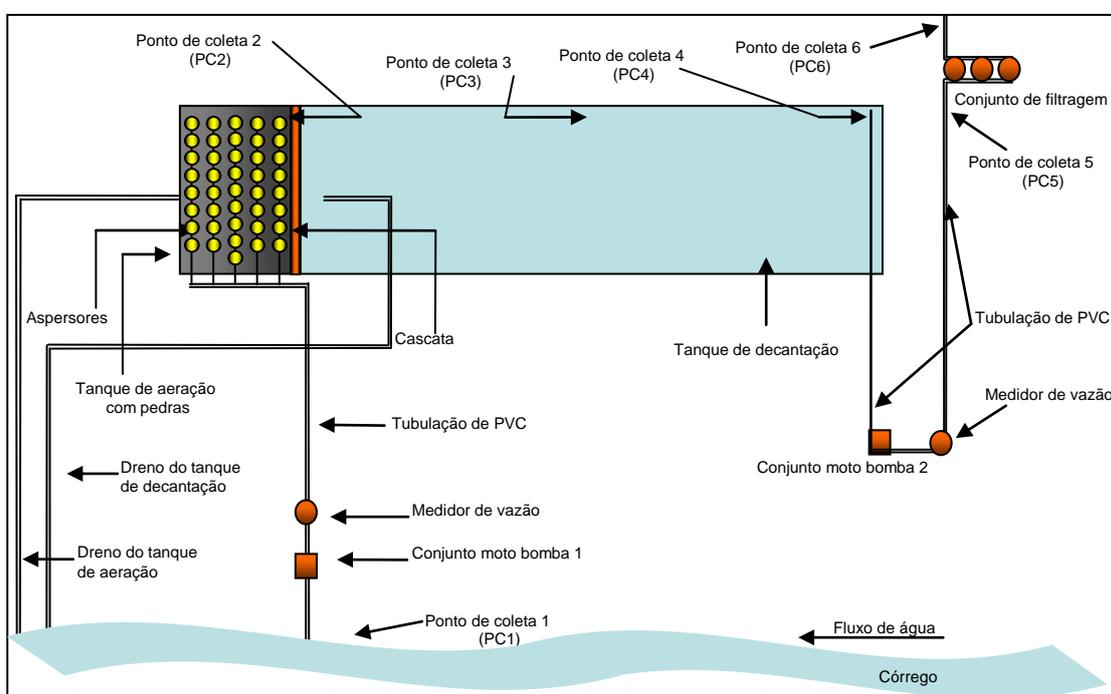


FIGURA 2. Esquema geral dos sistemas de aeração, decantação e filtragem. **General scheme of the aeration, sedimentation and filtration systems.**

Pontos de coleta

Os pontos de coleta de amostra de água (PC) foram os seguintes: (PC1) - captação de água no córrego, a 0,2 m de profundidade e 0,6 m de distância da margem; (PC2) - no início do tanque de decantação logo após o aerador, na cascata; (PC3) - no ponto médio do tanque de decantação, a 0,2 m de profundidade e 0,6 m de distância da borda; (PC4) - no ponto final do tanque de decantação, a 0,2 m de profundidade e 0,6 m de distância da borda; (PC5) - após o conjunto motobomba 2 e antes do sistema de filtragem, em uma saída lateral da automação; (PC6) - após o sistema de filtragem, em um tubo de saída lateral.

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

As avaliações da qualidade da água tiveram início em 30 de março de 2008, sendo os parâmetros físicos e químicos monitorados em média a cada 15 dias, até outubro de 2008, totalizando 12 amostragens subdivididas em dois períodos de análises, de março a maio, com cinco

amostragens como período chuvoso, e de junho a outubro, com sete amostragens como período da seca. Nos meses de junho e julho, por serem os meses em que a irrigação é suprimida para que a cultura sofra estresse hídrico, só foi ligado o sistema para a coleta durante um dia no mês, assim as amostragens foram realizadas a cada 30 dias.

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

Para caracterizar o efeito do sistema de aeração, foi quantificado o teor de oxigênio dissolvido em água (OD) no momento da coleta das amostras, pelo método eletroquímico, utilizando oxímetro digital manual portátil, marca Hanna Instruments, modelo HI 9147, com sonda galvanizada. As leituras foram efetuadas imediatamente após a coleta das amostras, envolvendo períodos de chuvas e de estiagem.

Para a 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 (Tabela 1).

TABELA 1. Classificação da água para irrigação localizada. **Classification of irrigation water for drip irrigation.**

Fatores de Entupimento	Níveis de Risco		
	Baixo (B)	Moderado (M)	Severo (S)
Sólidos em suspensão ($mg L^{-1}$)	< 50	50 – 100	> 100
		Físico	
		Químico	
pH	< 7,0	7,0 – 8,0	> 8,0
Sólidos dissolvidos ($mg L^{-1}$)	< 500	500 – 2000	> 2000
Condutividade elétrica ($dS cm^{-1}$)	< 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) e BRASIL (2005).

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).

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 (2005), especificadas na Tabela 2.

TABELA 2. Parâmetros, métodos e referências utilizados para a análise da água dos pontos de coleta. **Parameters, methods and references used for the analysis of the water from the collect points.**

Parâmetro	Metodologia	Referência
pH	PH-2	APHA 4500-H+ B
Oxigênio dissolvido	Método eletroquímico - Oxímetro digital	–
Sólidos em suspensão	Gravimétrico	APHA 2540 D
Sólidos totais	Gravimétrico	APHA 2540 B
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 de absorção atômica	APHA 3500-Fe B
Manganês total	Digestão ácida / Espectrofotômetro de absorção atômica	APHA 3500-Mn B

Análise estatística

Preservando a estrutura multivariada contida nos dados, foram aplicados três métodos estatísticos multivariados, visando a classificar os pontos de coletas em grupos: análise de agrupamentos hierárquica, análise de agrupamentos não hierárquica *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 agrupamentos hierárquica (SNEATH & SOKAL, 1973) foi realizada, calculando-se a distância euclidiana entre os pontos de coleta, para o conjunto das dez variáveis, e utilizando o algoritmo de Ward para a obtenção dos agrupamentos dos pontos de coleta similares. A identificação dos pontos de coleta nos grupos também foi feita pelo *k-means* (HAIR et al., 2005), que pertence à classe dos métodos de agrupamentos não hierárquicos que complementam os resultados na discussão dos grupos, pois este método minimiza a variância dos acessos dentro de cada grupo.

A discriminação dos pontos de coleta foi feita por meio 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 coleta por componentes principais). A adequação desta análise é verificada pela quantidade da informação total das variáveis originais retida pelos componentes principais que mostram autovalores superiores à unidade (KAISER, 1958). Autovalores inferiores à unidade não dispõem de informação relevante. Todas as análises estatísticas foram processadas no software STATISTICA versão 7.0 (STATISTICA, 2004).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3, estão apresentados os valores médios obtidos para as variáveis risco de entupimento do sistema de irrigação e porcentagem de redução proporcionada pelo sistema de aeração, decantação e filtração. Observa-se que o ponto de captação PC1 caracteriza-se por apresentar os piores valores para as variáveis analisadas, comparado com os demais pontos de coleta, demonstrando que o sistema de tratamento proporcionou melhoria da qualidade da água.

Os valores para sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos foram reduzidos, saindo-se do PC1, com água classificada como moderado (M) risco de entupimento, passando para o PC6, depois do sistema de filtração, com remoção de 61% e 56% para essas duas variáveis, respectivamente. Os

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. A ausência de matas ciliares e a 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.

TABELA 3. Valores médios dos parâmetros de qualidade da água e classificação quanto ao risco de obstrução de emissores para os pontos de coleta do sistema de aeração, tanque de decantação e filtragem. **Average values of water quality parameters and classification of the obstruction risk of emitters to the sampling points of the aeration, sedimentation tank and filtration systems.**

Sólidos em Suspensão (mg L ⁻¹)						
Pontos de coleta	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Média	67,5	52,3	45,1	40,6	35,4	26,5
Risco de entupimento	M	M	B	B	B	B
Remoção (%)	-	23	33	40	48	61
Turbidez (NTU)						
Pontos de coleta	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Média	41,7	36,9	23,3	19,8	18,0	12,4
Risco de entupimento**	A	A	A	A	A	A
Remoção (%)	-	12	44	53	57	70
Sólidos Dissolvidos (mg L ⁻¹)						
Pontos de coleta	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Média	509,6	411,6	359,9	327,6	303,8	226,7
Risco de entupimento	M	B	B	B	B	B
Remoção (%)	-	19	29	36	40	56
pH*						
Pontos de coleta	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Média	6,0	6,3	6,3	6,6	6,6	6,6
Risco de entupimento	B	B	B	B	B	B
Elevação (%)	-	5	6	10	11	10
Condutividade Elétrica (dS cm ⁻¹)						
Pontos de coleta	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Média	0,0361	0,0357	0,0364	0,0354	0,0346	0,0346
Risco de entupimento	B	B	B	B	B	B
Remoção (%)	-	1,2	-	1,8	4,0	4,2
Ferro Total (mg L ⁻¹)						
Pontos de coleta	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Média	2,1	3,0	2,0	1,2	0,8	0,5
Risco de entupimento	S	S	S	M	M	M
Remoção (%)	-	-	4	44	63	75
Mn Total (mg L ⁻¹)						
Pontos de coleta	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Média	0,02	0,13	0,02	0,01	0,01	0,00
Risco de entupimento	B	M	B	B	B	B
Remoção (%)	-	-	-	35	52	78

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

Para os resultados de turbidez, identifica-se que sempre estiveram abaixo do limite máximo estabelecido na Resolução N° 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 70%, do PC1 para o PC6.

Os valores médios de pH para todos os pontos de coleta foram classificados como baixos ($\text{pH} < 7,0$), 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. Em relação à condutividade elétrica, observou-se baixo risco de obstrução para todos os pontos de coleta de amostras.

O teor de ferro total na água do córrego, encontrado no ponto de captação (PC1), foi de $2,10 \text{ mg L}^{-1}$, classificado como severo (S) quanto ao risco de obstrução de emissores. Os valores decresceram a partir do PC3, ao longo da passagem da água pelo sistema de aeração e decantação, chegando até o PC6, com $0,50 \text{ mg L}^{-1}$, com nível de risco moderado. A redução do ferro total do PC1 para o PC6 foi de 75%.

Os teores de manganês apresentaram-se baixos em todos os pontos de coleta, exceto para o PC2, ponto esse em que se acumulam grandes quantidades de aglomerados que contêm íons como manganês e ferro, de modo que os demais pontos apresentam valores representando baixo risco. A redução do risco desde o ponto PC2 (aerador) para o PC6 foi de 78%, demonstrando que o manganês foi precipitado no tanque de decantação e no sistema de filtração.

O dendrograma obtido pela análise de agrupamentos (Figura 3) indica que a variação de 3,90 para 4,60 permitiu a divisão dos pontos de coleta em dois grupos distintos: I e II. No grupo I, ficaram concentrados os pontos com baixa qualidade de água e, no grupo II, os pontos com média à alta qualidade de água, em relação a problemas de entupimento devido a fatores físicos e químicos.

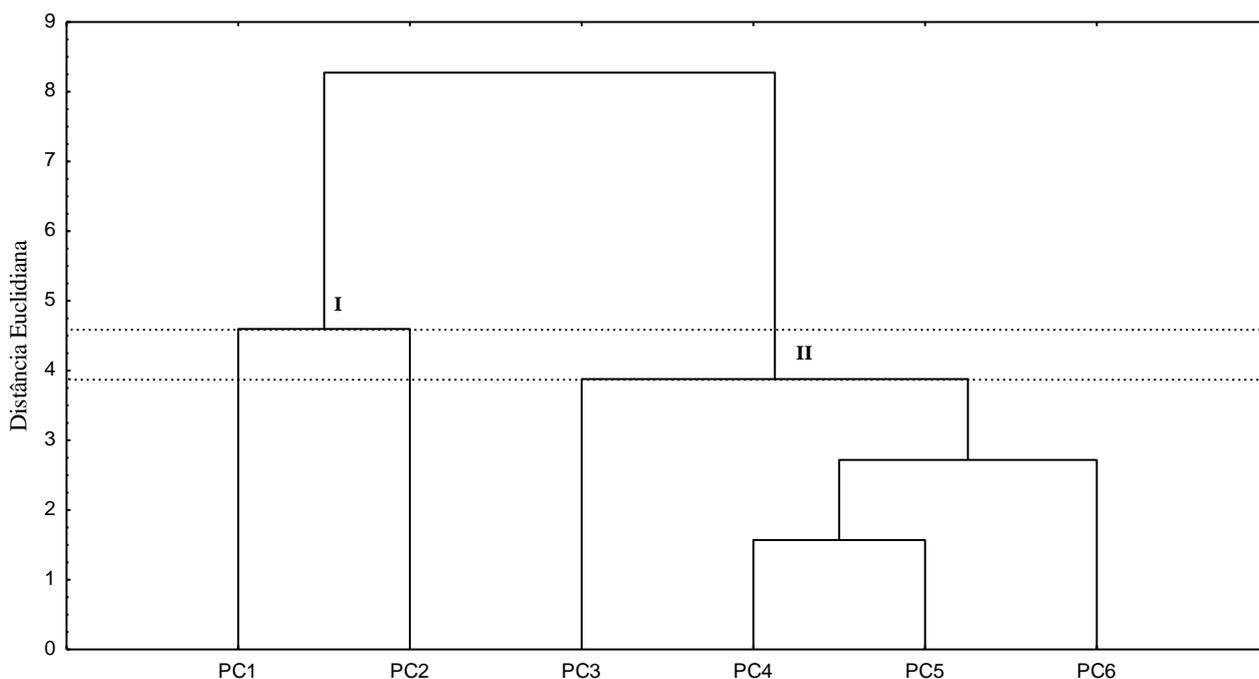


FIGURA 3. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos com a formação de grupos dos pontos de coleta (PC) segundo os parâmetros utilizados para a avaliação da qualidade da água. **Dendrogram resulted from hierarchical cluster analysis showing groups of sampling points (PC) according to the parameters used for evaluation of water quality.**

Considerando o número de grupos igual a dois, aplicou-se o método de agrupamentos *k-means*, que confirma a ordenação obtida na análise de agrupamentos por método não hierárquico. Na Tabela 4, é mostrada a importância individual das variáveis na diferenciação dos grupos I e II.

TABELA 4. Análise de variância para cada variável dos grupos formados pela análise não hierárquica de agrupamentos *k-means*. **Analysis of variance for each variable of the groups formed by non-hierarchical *k-means* clusters.**

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)	0,381	1	70,620	70	0,377	0,541
Turbidez (NTU)	49,198	1	21,802	70	157,961	0,000
Condutividade elétrica (CE)	0,142	1	70,858	70	0,140	0,709
pH	0,157	1	70,843	70	0,155	0,695
Sólidos dissolvidos	33,557	1	37,444	70	62,733	0,000
Sólidos em suspensão	49,756	1	21,244	70	163,949	0,000
Fe ⁺²	2,501	1	68,499	70	2,555	0,114
Fe ⁺³	0,023	1	70,977	70	0,023	0,879
Ferro total	4,651	1	66,349	70	4,907	0,029
Mn total	6,121	1	64,879	70	6,604	0,012

*Prob. - probabilidade (P)

O grupo I, constituído pelos pontos de coleta PC1 (córrego) e PC2 (sistema de aeração), ficou caracterizado por apresentar risco de entupimento de moderado a severo em relação aos valores da Tabela 1. No grupo II, estão dispostos os pontos de coleta 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.

Na Figura 4, são indicadas as médias padronizadas das características físicas e químicas da água para cada grupo, segundo análise de agrupamentos pelo método não hierárquico *k-means*. Para OD, CE, pH, Fe⁺² e Fe⁺³, os valores não apresentam diferenças significativas ($p > 0,05$), indicando que essas variáveis não foram representativas para a diferenciação dos grupos.

Em PC1 e PC2 (grupo I), os valores elevados de turbidez, sólidos dissolvidos, sólidos em suspensão, ferro total e Mn total caracterizam a água como de alto risco de dano a sistemas de irrigação localizada. Já o grupo II (PC3 a PC6) é caracterizado por níveis menores dessas variáveis; assim, a água nesses pontos apresenta melhor qualidade e menor risco de dano. O nível de significância pode ser observado na Figura 4, pelas maiores distâncias entre os pontos.

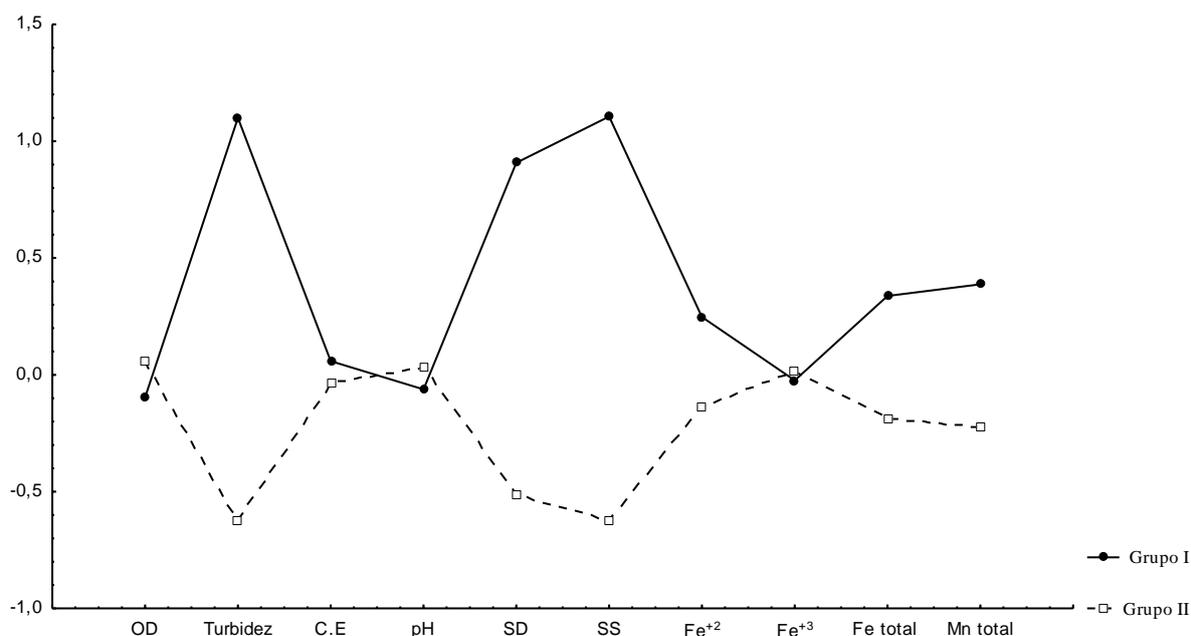


FIGURA 4. Médias padronizadas das características físico-químicas da água para cada grupo, segundo análise de agrupamentos não hierárquica *k-means*. **Average standard of physical and chemical characteristics of water for each group, according to analysis of non-hierarchical *k-means* clusters.**

A análise de componentes principais permitiu uma única distribuição dos pontos de coleta (componente principal 1 x componente principal 2), visto que somente dois autovalores foram superiores a um: maior autovalor 6,75 (componente com melhor retenção da variabilidade original) e o segundo maior autovalor 2,05 (componente com melhor retenção da variabilidade, excluindo a variabilidade retida no primeiro componente). Os dois componentes principais juntos possibilitaram ordenação bidimensional dos pontos de coleta 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 88% [67,5% (primeiro componente) + 20,5% (segundo componente)] (Figura 5).

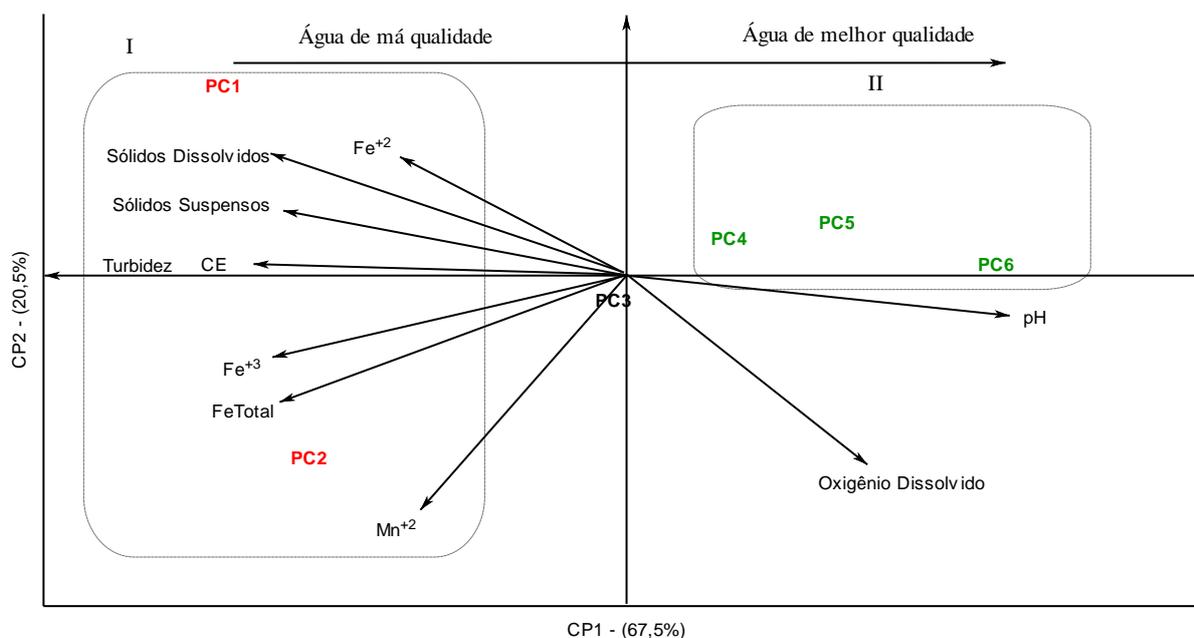


FIGURA 5. Dispersão (gráfico *biplot*) dos pontos de coleta em função das características físico-químicas da água. **Dispersion (*biplot graph*) of the sampling points depending on the physicochemical characteristics of water.**

A ordenação dos pontos de coleta, segundo os dois primeiros componentes principais, confirma a ordenação dos pontos de coleta em dois grupos obtida pelas análises de agrupamentos, hierárquica e não hierárquica, com exceção do ponto PC3.

A representação gráfica e a correlação das variáveis nos componentes principais (Figura 5 e Tabela 5) permitiram caracterizar as variáveis que mais discriminaram na formação dos grupos I e II. Os sólidos dissolvidos (-0,98), sólidos suspensos (-0,98), turbidez (-0,99), CE (-0,75), Fe^{+2} (-0,64), Fe^{+3} (-0,92), ferro total (-0,86), Mn^{+2} (-0,80) e oxigênio dissolvido (-0,91) são responsáveis pela discriminação do grupo I, localizado à esquerda (CP1: correlações negativas), enquanto a variável pH (0,91) é responsável pela discriminação do grupo II, localizado à direita (correlação positiva). No segundo componente principal, somente a variável pH discriminou os pontos de coleta localizados na parte superior do gráfico (Figura 5), indicando que esses pontos de coleta apresentam maior valor de pH.

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 1). Por sua vez, o grupo II é caracterizado por apresentar pontos de coleta (PC4, PC5 e PC6) com água de menores riscos de entupimento, segundo a classificação de NAKAYAMA & BUCKS (1991).

TABELA 5. Correlação entre componentes principais (CP1 e CP2) e características físico-químicas da água. **Correlation among principal components and the water physicochemical characteristics.**

Variável	CP1	CP2
Sólidos dissolvidos	-0,9803	0,1857
Sólidos em suspensão	-0,9797	0,1986
Turbidez	-0,9897	-0,0089
Condutividade elétrica (CE)	-0,7517	-0,0107
Fe ⁺²	-0,6404	0,3865
Fe ⁺³	-0,9152	-0,3112
Ferro total	-0,8648	-0,4856
Mn total	-0,5376	-0,8039
Oxigênio dissolvido (OD)	0,4049	-0,9053
pH	0,9105	-0,1791

Analisando-se conjuntamente as variações do Fe⁺², Fe⁺³, ferro total e oxigênio dissolvido do ponto de captação de água (PC1) até o final do sistema (PC6) (Figura 6), verifica-se que as baixas concentrações do Fe⁺² e Fe⁺³ mantiveram-se desde o PC1 até o fim do sistema (PC6), o que poderia ser justificado pelo fato de haver bom nível de oxigênio dissolvido (OD) e pH a partir de 6,0, fazendo com que já no PC1 praticamente todo o ferro estivesse na forma de óxidos ou hidróxidos de Fe⁺³, complexos de Fe⁺³ com matéria orgânica ou imobilizado em microrganismos, revelando pouco, Fe⁺² e Fe⁺³ livre, mas grandes teores de ferro total que foram elevados no PC1 e PC2.

Assim, do PC2 até o PC6, verifica-se redução contínua nos teores do ferro total, significando que este foi decantado (PC2 a PC5) e retido na filtragem (PC6). Com esses 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 decantação de Fe total no percurso do tanque, e os que não decantaram ficaram retidos na filtragem.

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 suspendendo novamente todo o material insolúvel, o que pode fazer com que a reprecipitação seja mais uniforme e eficiente, pois, na Figura 6, pode-se observar a variação do teor de ferro total à medida que se avança nos pontos de coleta, retratando a distribuição diferenciada ao longo do sistema, evidenciando nítida melhoria da qualidade da água. Os valores com nível severo (PC1, PC2 e PC3) reduziram-se para nível moderado (PC4, PC5 e PC6), com 75% de redução deste parâmetro do PC1 - 2,1 mg L⁻¹ para o PC6 - 0,5 mg L⁻¹. Em relação ao OD, o teor aumentou do PC1 para o PC2, mantendo-se em nível elevado e praticamente constante do PC3 até o PC6.

Os dados encontrados nesta pesquisa são semelhantes aos obtidos por VANZELA (2004) e FRANCO & HERNANDEZ (2009) para o ferro total, com médio a alto risco de dano a sistemas de irrigação localizada.

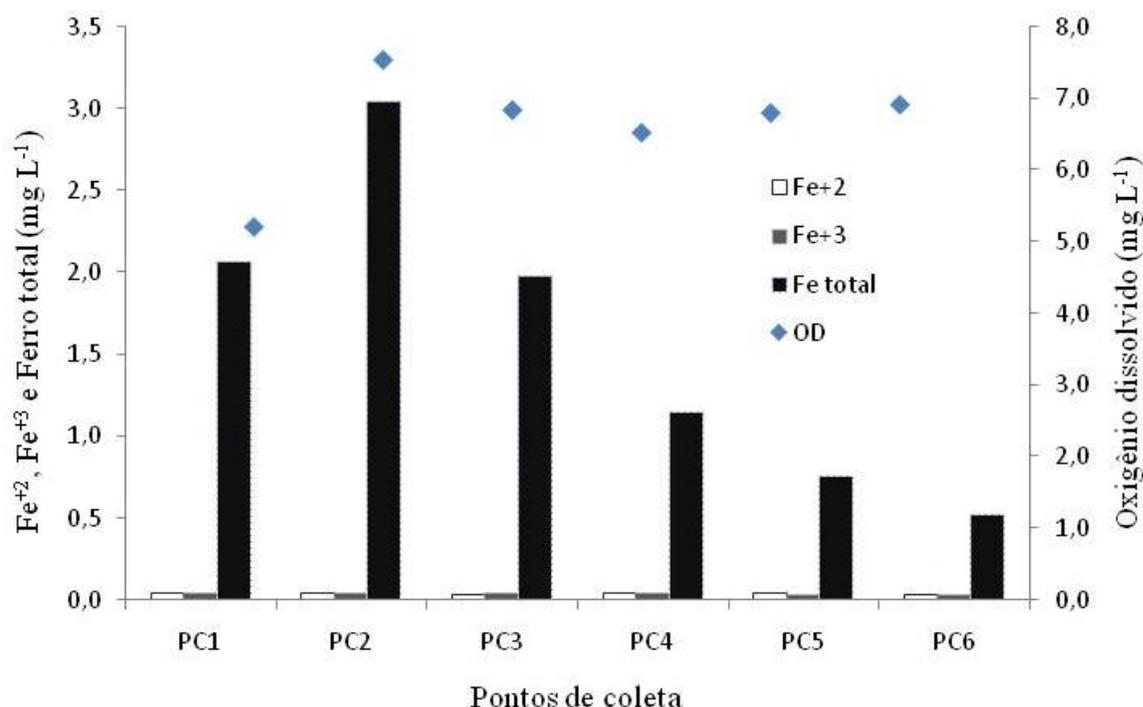


FIGURA 6. Concentrações de Fe⁺², Fe⁺³, Fe total e oxigênio dissolvido (OD) ao longo do sistema de aeração, decantação e filtração. **Concentrations of Fe⁺², Fe⁺³, total iron and dissolved oxygen (OD) along the aeration, sedimentation and filtration systems.**

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, mas o sistema de tratamento reduziu significativamente a turbidez e as concentrações de sólidos dissolvidos, sólidos em suspensão, ferro total e Mn total.

Os teores de Fe⁺² e Fe⁺³ livres foram baixos e 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.

REFERÊNCIAS

APHA. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21th. ed., New York: AWWA, WPCF, 2005. 1.368 p.

BARROS, A.R.B. *Remoção de íons metálicos em água utilizando diversos adsorventes*. 2001. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

BENEFIELD, L.D.; JUDKINS JÚNIOR, W.; WEAND, B.L. *Process chemistry for water and wastewater treatment*. Engiewood Cliffs: Prentice Hall, 1982. p.35-54.

BRASIL. *Resolução Nº 357, de 17 de março de 2005*. Brasília-DF: Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2005.

CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Recycling of poor quality urban wastewater by drip irrigation systems. *Journal Cleaner Production*, v.15, p. 1.529-1.534, 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.
- FEITOSA FILHO, J.C.; BOTREL, T.A. ; PINTO, J.M. Desempenho de um sistema de aeração de reservatório de água constituído por tubos verticais ranhurados com descarga submersa. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.17, n.3, p.20-35, 1999.
- FERREIRA, D.F. *Estatística Multivariada*. Lavras: Ed. UFLA, 2008. 662 p.
- FRANCO, R.A.M. ; HERNANDEZ, F.B.T. Qualidade da água para irrigação na microbacia do Coqueiro, Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, p.772-780, 2009. Online
- GROBE, J.R. *Aplicações da estatística multivariada na análise de resultados em experimentos com solos e animais*. 2005. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAN, R.L.; BLACK, W. *Análise multivariada de dados*. 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2005. 593 p.
- KAISER, H.F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis, *Psychometrika*, Williamsburg, v.23, p.187-200, 1958.
- LIBÂNIO, M. *Fundamentos de qualidade e tratamento de água*. Campinas: Átomo, 2005. 444 p.
- MACEDO, J.A.B. *Métodos laboratoriais de análises físico-químicas e microbiológicas*. 3.ed. Belo Horizonte: CRQ-MG, 2005. 450 p.
- MADEIRA, V.S. ; MOREIRA, R.F.P.M. ; JOSÉ, H.J.; HUMERES, E. Removal of iron from water using adsorbent carbon. *Separation Science and Technology*, New York, v.39, n.2, p.271-285, 2004.
- NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. *Irrigation Science*, New York, v.12, p.187-192, 1991.
- PATERNIANI, J.E.S. *Utilização de mantas sintéticas não tecidas na filtração lenta em areia de águas de abastecimento*. 1991. 245 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.
- PIZARRO, F. *Riegos localizados de alta frecuencia*. 3.ed. Madrid: Mundi Prensa, 1996. 471 p.
- PUIG-BARGUES, J.; ARBAT, G.; BARRAGAN, J.; RAMIREZ DE CARTAGENA, F. Hydraulic performance of drip irrigation subunits using WWTP effluents. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.77, p.249-262, 2005.
- RAVINA, I.; PAZ, E.; SOFER, Z.; MARCU, A.; SHISHA A.; SAGI, G. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. *Irrigation Science*, v.13, p.129-139, 1992.
- RESENDE, R.S.; CASARINI, E.; FOLEGATTI, M.V.; COELHO, R.D. Ocorrência de entupimento de origem biológica em sistemas de irrigação por gotejamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.5, p.156-160, 2001.
- SNEATH, P.H.; SOKAL, R.R. *Numerical taxonomy: the principles and practice of numerical classification*, San Francisco, 1973. 573 p.
- STATISTICA. *Data analysis software system, Version 7.0* Cary: StatSoft Inc., 2004. Disponível em: <www.statsoft.com>
- VANZELA, L.S. *Qualidade de água para irrigação na microbacia do córrego Três Barras no município de Marinópolis - SP*. 2004. 96 f. Dissertação (Mestrado em Sistema de Produção) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

VIEIRA, G.H.S.; MANTOVANI, E.C.; SILVA, J.G.F.; RAMOS, M.M.; SILVA, C.M.
Recuperação de gotejadores obstruídos devido à utilização de águas ferruginosas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.8, n.1, p.1-6, 2004.

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*, New York, n.56, p.120-129, 2007.