

Uniformidade de distribuição de água em irrigação localizada com sistema de aeração, decantação e filtração¹

Water distribution uniformity in localized irrigation with aeration, sedimentation and filtering system

Elcides Rodrigues da SILVA¹; José Renato ZANINI²; Jairo Osvaldo CAZETTA³; Antônio Sergio FERRAUDO⁴; Marco Antônio Franco LEMOS FILHO⁵

¹Parte da dissertação de mestrado do primeiro autor, Eng^o Agrônomo, Doutorando em Agronomia – Ciência do Solo, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Departamento de Engenharia Rural, FCAV/UNESP - Jaboticabal – SP, e-mail: rodagro@hotmail.com

²Prof. Dr., Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, (FCAV/UNESP), Jaboticabal – SP. e-mail: jrzanini@fcav.unesp.br

³Prof. Dr., Departamento de Tecnologia, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, (FCAV/UNESP), Jaboticabal – SP. e-mail: cazetta@fcav.unesp.br

⁴Prof. Dr., Departamento de Ciências Exatas, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, (FCAV/UNESP), Jaboticabal – SP. e-mail: ferrauo@fcav.unesp.br

⁵Eng^o Agrônomo, M.Sc. em Agronomia – Ciência do Solo, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, (FCAV/UNESP), Jaboticabal – SP. e-mail: mafff@hotmail.com

Resumo:

A pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho de um sistema de aeração, decantação e filtração quanto à prevenção de entupimento dos emissores e avaliar a 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, em seis pontos de amostragens ao longo de um sistema composto por aeradores com aspersores, sobre leito de pedras, e tanque de decantação e conjunto de filtração composto por dois filtros de areia e dois de disco, em sistema de irrigação localizada. O sistema de prevenção 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. As variáveis analisadas: oxigênio dissolvido em água, sólidos em suspensão, sólidos dissolvidos, turbidez, condutividade elétrica (CE), teores de Fe⁺², Fe⁺³, ferro total, Mn total e pH 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 de uniformidade de Christiansen, distribuição e uniformidade estatística (CUC, CUD e Us), utilizados para determinar a uniformidade de distribuição de água, apresentaram valores acima de 80%, sendo classificados como: excelente, bom e muito bom.

Palavras-chave adicionais: obstrução de emissores, qualidade de água para irrigação, coeficiente de uniformidade.

Abstract:

The objective of this study was to evaluate the performance of an aeration, sedimentation and filtration system viewing to prevent the clogging of emitters as well as to evaluate water distribution uniformity in a drip irrigation system at the time of its implementation and a year after using the prevention system. The research was conducted at the 'Estancia Tropical' farm, in the municipality of Barretos, state of São Paulo, Brazil, from March 2008 to February 2009, with water being physically and chemically evaluated at six sampling sites along a system composed of aerators with sprinklers on bed rocks and a settlement tank and a filter assemblage consisting of two sand filters and two disk filters in a localized irrigation system. The prevention system was efficient in improving water quality by reducing clogging risk levels from severe to medium and from medium to low. All the measured variables (oxygen dissolved in water, suspended solids, dissolved solids, turbidity, electrical conductivity, Fe⁺², Fe⁺³, total iron, pH, and total Mn), with the exception of Fe⁺², showed different levels of water quality along the sampling points of the treatment system. Suspended solids, turbidity, dissolved solids, and total iron values were reduced by the use of the proposed system, thus improving water quality. After a year of prevention, the coefficients CUC, CUD, and Us used to determine the uniformity of water distribution showed values above 80%, being so classified as excellent, good, and very good.

Additional keywords: emitters clogging, quality of water for irrigation, uniformity coefficient

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 às 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 os 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 a 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 essenciais 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.

Material e métodos

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 com cultura de citros, irrigada com gotejadores da marca NETAFIM[®], modelo Dripnet, vazão nominal de 1,6 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 com, no máximo, 150 m de comprimento.

Sistema de aeração, decantação e filtragem

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 foi 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 m³ 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 1A); baixo custo e disponibilidade no mercado.

O espaçamento entre as linhas de aspersores e entre aspersores na linha foi de 2 m x 0,6 m, sendo utilizadas 2 linhas laterais com 9

aspersores por linha. A instalação dos aspersores foi feita 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 atuar na aeração, funciona, também, como um pré-filtro

de partículas que aderem às rochas por contato superficial (Figura 1). Os aspersores ficam a 15 cm de altura sobre o leito de rocha. A vazão do sistema é de $53,1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, e a condução da água do córrego até o aerador é feita utilizando tubos de PVC de diâmetro nominal de 100 mm.

A



B



Figura 1 - Sistema de aeração (A), do tanque de decantação e da cobertura com tela de sombreamento (B). *Aeration system (A), of the sedimentation tank, and of the covering with shading screen (B).*

O tanque de decantação possui paredes com inclinação de 45° e as seguintes dimensões aproximadas: largura de 10 m, profundidade média de 3 m e comprimento de 28 m, resultando em seção de 23 m^2 . Assim, com 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 (Figura 1B).

No sistema de irrigação, a filtragem foi 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 ($130 \mu\text{m}$).

Pontos de amostragem

Os pontos de amostragem 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 mo-

tobomba 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 lateral (Figura 2).

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

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, o sistema foi ligado para a coleta durante 1 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 dissolvidos, turbidez, condutividade elétrica (CE), teores de 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, por meio do método eletroquímico, utilizando oxímetro digital manual portátil, marca Hanna Instruments, modelo HI 9147, à prova de água, com sonda galvanizada e sistema de recarga de bateria. As leituras foram efetuadas imediatamente após coletadas as amostras.

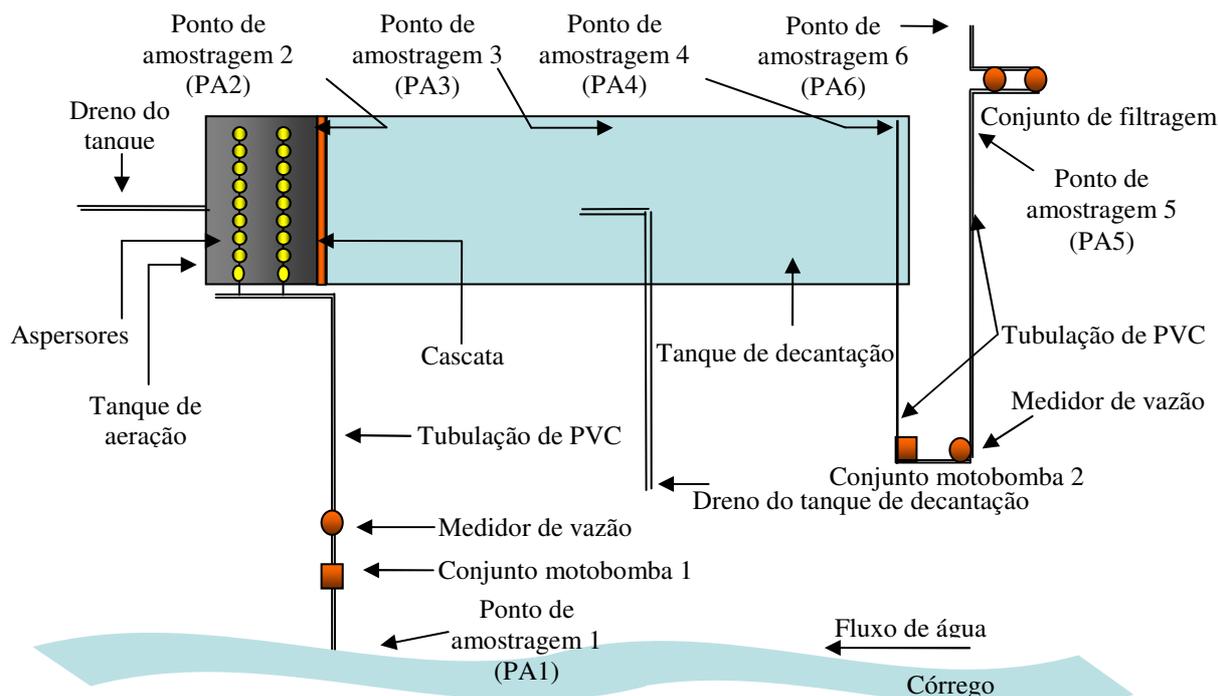


Figura 2 - Esquema geral do sistema de aeração, decantação e filtração com indicação dos pontos de coleta de amostras de água. *Scheme of the aeration, sedimentation and filtration system and the water sampling points*

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 contidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação da água para irrigação localizada. *Classification of the irrigation water for drip irrigation.*

Fatores de entupimento	Níveis de Risco		
	Baixo (B)	Moderado (M)	Severo (S)
Sólidos em suspensão (mg L^{-1})	< 50	Físico 50 - 100	> 100
pH	< 7,0	Químico 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) < 100 NTU		Inadequado (I) > 100 NTU

NTU - unidade nefelométrica de turbidez. Fontes: NAKAYAMA & BUCKS (1991), AYERS & WESTCOT (1999), BRASIL (2005) e CAPRA & SCICOLONE (2004). * NTU - nephelometric turbidity unit. Sources: NAKAYAMA & BUCKS (1991), AYERS & WESTCOT (1999), BRASIL (2005) and CAPRA & SCICOLONE (2004). The numbers after the comma are decimals. Example: 1,1 = one and one tenth.

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, 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).

Avaliação da uniformidade de irrigação na área experimental

A verificação da 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 a 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 - 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). Foi medida a vazão de dois gotejadores em sequência, para cada um dos pontos, obtendo-se um total de 32 gotejadores em cada um dos dois setores avaliados, anotando-se o volume coletado durante 3 minutos, utilizando-se de cronômetro e proveta graduada.

Análise estatística

Considerando a estrutura multivariada contida nos dados, foram aplicados três métodos estatísticos exploratórios multivariados, visando a 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 zero 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 este 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 variá-

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

Resultados e discussão

Na Tabela 2, 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 caracterizaram-se por apresentar os piores valores para as variáveis analisadas, comparados com os demais pontos de amostragem, demonstrando que o sistema de tratamento proporcionou melhoria da qualidade da água.

Os valores para sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos foram reduzidos, saindo do PA1 com água classificada como de moderado risco de entupimento (M), passando para o PA6, depois do sistema de filtração, com remoção de 62,2% e 51,9% para essas duas variáveis, respectivamente. Os valores mais altos 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.

Tabela 2 - Valores médios dos parâmetros de qualidade da água e classificação quanto ao risco de obstrução de emissores para os pontos de amostragem. *Mean values of the water quality parameters and classification of the risk of obstruction of emitters in the sampling points.*

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. *A = acceptable; B = low; M = médium; S = severe ** for the pH, the referred percentage is of elevation. The numbers after the comma are decimals. Example: 1,1 = one and one tenth.*

Os valores médios de pH para todos os pontos de amostragem foram classificados como de baixo risco (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 in-

crustações 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 condu-

tividade 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 filtração.

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 2), 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 microrganismos, 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 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 decantação de Fe total no percurso do tanque, e os que não decantaram, ficaram retidos 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 reprecipitação seja mais uniforme e eficiente, pois, na Tabela 2, pode-se observar o comportamento do teor de ferro total à medida que se avança nos pontos de coleta, retratando a distribuição diferenciada ao longo do sistema, eviden-

ciando 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 3) 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 1. 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 3, é mostrada a importância individual das variáveis na diferenciação dos grupos I e II.

Na Figura 4, 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 a 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 e, assim, a água nesses pontos apresenta melhor qualidade e menor risco de dano. O grau de significância pode ser observado pelas maiores distâncias entre os pontos (Figura 4).

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 vari-

abilidade 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*.

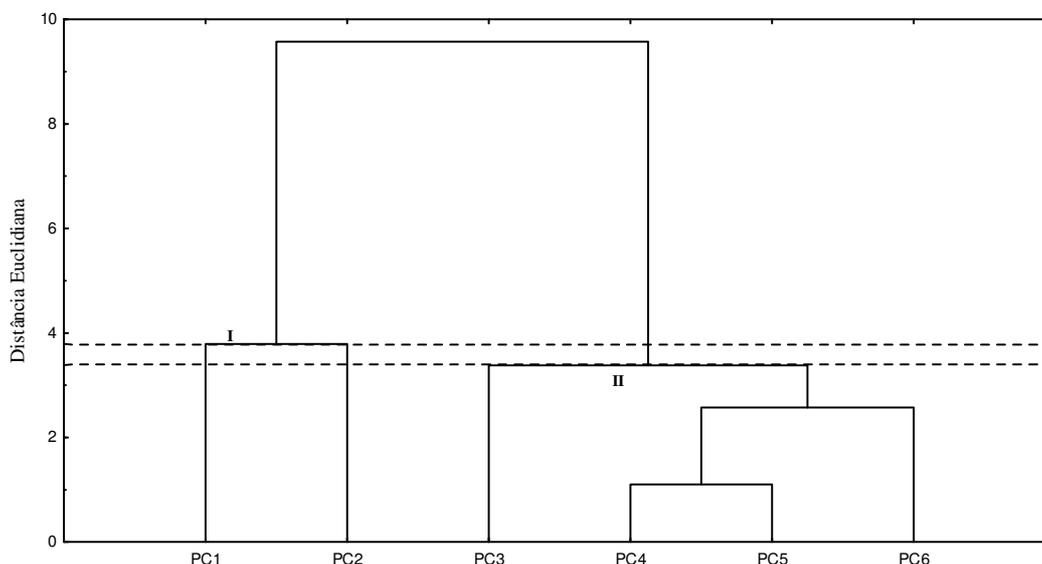


Figura 3 - Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamento com a formação de grupos dos pontos de amostragem (PA), segundo os parâmetros utilizados para a avaliação da qualidade da água. *Dendrogram resulting from hierarchical cluster analysis showing groups of sampling points (PC) according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

Tabela 3 - Análise de variância para cada variável dos grupos formados pela análise não-hierárquica de agrupamento *k-means*. *Analysis of variance for each variable of the groups formed by non-hierarchical cluster k-means.*

Variáveis	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). Prob. – probability (p). The numbers after the comma are decimals. Example: 1,1 = one and one tenth.

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 5). 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.

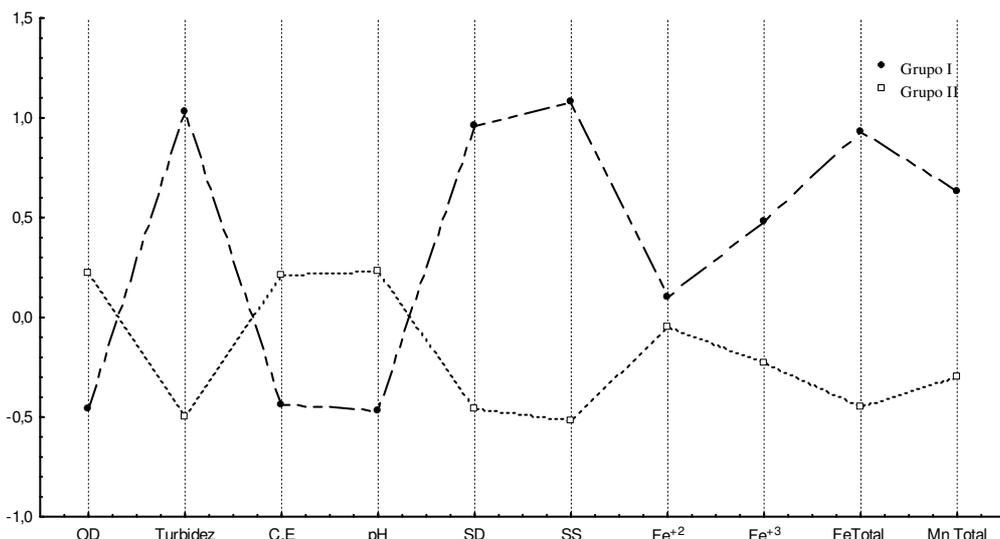


Figura 4 - Médias padronizadas das características físico-químicas da água para cada grupo, segundo análise de agrupamento não-hierárquica *k*-means. *Standard means of physical and chemical characteristics of water for each group, according to non-hierarchical group *k*-means analysis.*

A representação gráfica (Figura 5) e a correlação das variáveis nos componentes principais (Tabela 4) 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) é responsável 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 1). 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).

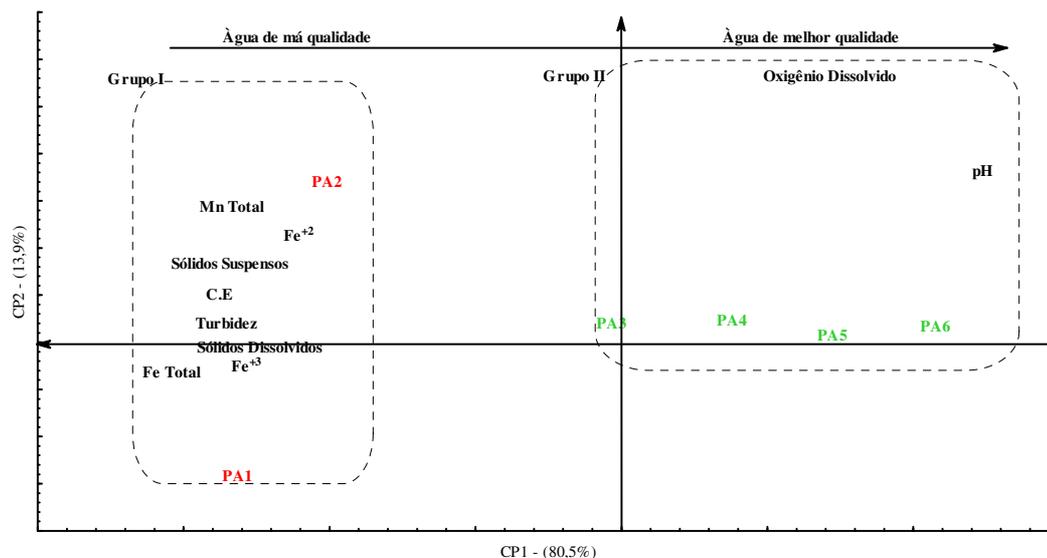


Figura 5 - Dispersão (gráfico *biplot*) dos pontos de amostragem em função das características físico-químicas da água. *Dispersion (biplot graph) of the sampling points as a function of the physico-chemical characteristics of the water.*

Tabela 4 - Correlação entre componentes principais (CP1 e CP2) e características físico-químicas da água. *Correlation among principal components (CP1 and CP2) and the physicochemical characteristics of water.*

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

The numbers after the comma are decimals. Example: 1,1 = one and one tenth.

Coefficientes de uniformidade

Observa-se, na Tabela 5, que houve pouca redução nos valores médios do CUC, após um ano de funcionamento do sistema de aeração, decantação e filtragem. 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 5 - Resultado dos índices de uniformidade de distribuição de água calculados durante as duas etapas da pesquisa. *Indexes of water distribution uniformity calculated during the two stages of the research.*

Etapas*	Índices de Uniformidade					
	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. *Stage 1 : implementation of the aeration and decantation system. Stage 2 : a year after implementation. ** Indices of uniformity classified according to MANTOVANI (2002) and FAVETTA & BOTREL (2001). *** Reduction of the uniformity indexes during the two stages. The numbers after the comma are decimals. Example: 1,1 = one and one tenth.*

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% dos 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 ao 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.

Conclusões

O sistema com aeração, decantação e filtragem 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 e teores de Fe⁺² e Fe⁺³ praticamente não variaram no sistema de trata-

mento, 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 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 filtragem apresentou valores acima de 80%, sendo classificados como bom, muito bom e excelente, confirmando a viabilidade de utilização do sistema.

Referências

APHA - American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21th. ed., New York: AWWA, WPCF, 1998. 1360p.

ASAE - AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. E.P 458: **Field evaluation of microirrigation systems**. St. Joseph, 1998. 7p.

AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. Tradução de H. R. GHEY; MEDEIROS, F.A.V. Damasceno, Campina Grande: UFPB, 1999. 153p.

BERNARDO, S.; SOARES A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006. 625p.

BRASIL. Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, CONAMA. 2005.

CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Emitter and filter test for wastewater reuse by drip irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 68, n.2, p.135-149, 2004.

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.

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

FAVETTA, G.M.; BOTREL, T.A. Uniformidade de sistemas de irrigação localizada: validação de equações. **Scientia Agricola**, Piracicaba, 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, 593p.

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

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

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

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

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

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

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

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, n.1-3, p.249-262, 2005.

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