

ESTUDO HIDRÁULICO DE SULCOS LARGOS DE INFILTRAÇÃO

Dirceu Brasil Vieira; Rogério Teixeira da Silva

Departamento de Recursos Hídricos, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, brasilvieira@horizon.com.br

1 RESUMO

Este trabalho tem como objetivo básico, estudar o desempenho hidráulico do sistema de sulcos largos, utilizado para a disposição e o tratamento do efluente das indústrias de sucos cítricos. O efluente é gerado em unidades de produção durante o período de processamento das frutas, tendo como destino final as estações de tratamento que utilizam lagoas anaeróbias ou, alternativamente, o tratamento através de sua disposição na superfície do solo. Tal disposição é feita de diversas formas, como por exemplo, através dos sulcos largos de infiltração, cujos parâmetros de dimensionamento ainda são desconhecidos. O estudo do desempenho hidráulico tem como finalidade determinar parâmetros para o dimensionamento desses sulcos, desse modo a fornecer subsídios aos projetistas. Dessa forma, obteve-se para dois solos diferentes valores do coeficiente de rugosidade (n) de Manning e equações correlacionando a vazão de entrada no sulco com sua declividade.

UNITERMOS: sulco, infiltração, efluentes

VIEIRA, D.B.; SILVA, R.T. da **HIDRAULIC STUDY OF INFILTRATION BROAD FURROWS**

2 ABSTRACT

This study basically aimed to study the hydraulic performance of a wide furrow system used for the disposal and treatment of effluent of the citric juice industries. That effluent is generated in the production units during the fruit processing period and its final destination is the treatment stations that use anaerobic ponds or alternate treatments through its disposal in the soil surface. The disposal can be done in several ways, for example, through the infiltration in wide furrow systems but their dimension parameters are still unknown. The hydraulic performance study aims to determine the project parameters. Thus, for two types of soil, different values were obtained for Manning's Coefficient and the equations related to the furrow inflow and its slope.

KEYWORDS: Furrow, infiltration, effluent

3 INTRODUÇÃO

O emprego de métodos de irrigação para a aplicação de efluentes industriais, com o objetivo de seu tratamento no solo é técnica rotineira em muitos países, proporcionando bons resultados sanitários e menores gastos de implantação e manutenção. Bhamidimarri (1991) afirma, que a irrigação com águas residuárias consiste na descarga controlada de efluentes via aspersão ou sulcos de irrigação. Isso pode ser feito em áreas limpas visando apenas a eliminação do efluente, ou em cultivadas comercialmente, neste caso o objetivo é não só a eliminação do efluente, mas também seu retorno econômico. A aplicação de efluentes líquidos da agroindústria suco-alcooleira no Estado de São Paulo é uma técnica rotineira, que representa um grande benefício econômico à agricultura quer pela sua riqueza em nutrientes, sobretudo potássio e matéria orgânica, quer pela água aplicada, que favorece a rebrota e o desenvolvimento das plantas. Dessa forma, tal técnica é considerada como uma verdadeira fertirrigação.

A utilização do método de irrigação por sulcos de infiltração para aplicação de efluentes líquidos no solo vem sendo feita há muitos anos. O emprego dos chamados sulcos largos para a aplicação de efluentes industriais no solo é originário de experiências australianas, que utilizam a cultura do eucalipto como vegetação consumidora de água. No caso do Brasil, o primeiro trabalho experimental sobre o assunto é devido a Carraro (1995), que conduziu experimento com a aplicação do efluente líquido da indústria de suco cítrico concentrado em cultura de eucalipto da espécie Grandis. Pelos resultados, concluiu que essa técnica de tratamento apresentou um efeito tampão sobre o pH do líquido aplicado e grande capacidade de remoção do teor de matéria orgânica (cerca de 94%), da cor, turbidêz e de sólidos solúveis. O método se mostrou eficiente e não afetou a

vegetação, pois não houve em contato direto com a mesma.

Os sulcos largos, geralmente tem forma trapezoidal ou semi circular, com cerca de 1,0 a 1,5 metros de fundo e 2,0 a 3,0 metros de largura na superfície, mantendo-se uma lâmina hídrica máxima de cerca de 0,30 m no seu interior. Essa configuração aumenta o perímetro molhado do sulco, beneficiando o processo de infiltração. A vazão aplicada nesses sulcos geralmente oscila de 15,0 a 25,0 m³/h. No tratamento de efluentes no solo o objetivo fundamental é a eliminação de maior quantidade possível do mesmo, sem causar problemas de contaminação do lençol freático. Por essa razão, a lâmina aplicada é fixada em função da capacidade de retenção de água do solo, e a profundidade do perfil irrigado depende da profundidade efetiva do sistema radicular da vegetação (geralmente não excede 0,50 m) e da profundidade do lenço freático na área. A declividade do fundo é pequena, variando de 0,05 a 0,15%. Embora a literatura seja ampla no caso de sulcos de infiltração e de faixas de infiltração, no caso de sulcos largos não há estudos, o que dificulta o projetista em estabelecer os parâmetros de dimensionamento.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi o de estudar em dois locais com solos diferentes, o comportamento do processo de aplicação, a fim de determinar parâmetros hidráulicos, que sirvam de subsídios para o dimensionamento de sulcos largos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido em duas áreas de tratamento de efluentes da indústria de sucos cítricos concentrados localizadas em Limeira e Matão pertencentes a Citrosuco Paulista S/A, ambas utilizam como vegetação a cultura do eucalipto. Os solos dessas áreas foram amostrados no

perfil 0 a 100 cm e analisados em laboratório, determinando-se a granulometria, tendo apresentado as seguintes características:

Área A- Citrosuco Matão- solo Areia Franca

Área B- Citrosuco Limeira- solo Franco Argilo Arenoso (Latosolo Vermelho Amarelo)

Foram selecionados 9 sulcos largos em cada área com comprimento ao redor de 100 metros, os quais tiveram a declividade determinada no campo com o nível topográfico, cujos dados constam da Tabela 1. Em cada sulco foi determinada a umidade do solo antes da realização do teste, empregando-se o método gravimétrico, sendo as amostras de solo retiradas em três pontos ao longo de cada sulco, posicionados no início, no meio e no final. O perfil amostrado foi de 0 a 50 cm, sendo os valores de Umidade Atual (UA), a média para cada sulco.

Tabela 1 Relação de sulcos selecionados

Sulco	Área A		Área B	
	L (m)	I (%)	L (m)	I (%)
01	98,2	0,140	146,0	0,190
02	105,5	0,140	147,0	0,045
03	106,0	0,040	147,0	0,060
04	106,1	0,060	140,0	0,150
05	106,0	0,110	141,0	0,195
06	106,0	0,100	142,0	0,115
07	106,0	0,080	142,0	0,140
08	108,0	0,060	142,0	0,175
09	112,0	0,130	143,0	0,180

L = comprimento do sulco; I = declividade do sulco.

Com base em valores normalmente utilizados neste tipo de tratamento, selecionou-se valores da vazão de entrada para os sulcos (q_e) de aproximadamente 15,0; 30,0 e 45,0 m³/h. O abastecimento foi feito a partir de uma tubulação de 0,15 m de diâmetro da rede de distribuição de efluentes local, ligada por um registro a uma mangueira flexível de 0,10 m de diâmetro. A calibração da vazão de entrada em cada campanha de medição foi realizada empregando o método direto, isto é

recolhendo a água em um tambor de 200 L e cronometrando-se o tempo de enchimento. Foram colocadas estacas a cada 10 metros até o final do sulco, onde foi instalada uma calha WSC, previamente calibrada, que permitiu a medição da vazão de saída do sulco (q_s).

Dessa forma procedeu-se ao Teste de Avanço e de Infiltração em cada sulco, segundo metodologia descrita por Bernardo (1982), obtendo-se o Tempo de Avanço (T_a) e a Equação de Infiltração (eq. 1). A eficiência de aplicação de água (E_a) nos sulcos foi calculada com a seguinte equação (2) citada por Bernardo (1982)

$$E_a = \frac{Z_f}{Z_m} \times 100 \quad \text{eq. (1)}$$

$$Z_m = \frac{Q \cdot T_i}{L \cdot S} \times 3600 \quad \text{eq. (2)}$$

Sendo: E_a = eficiência de aplicação, em %; Z_f = lâmina infiltrada no final do sulco, em mm; Z_m = lâmina média infiltrada, em mm; Q = vazão de entrada no sulco, em L/s; T_i = tempo de irrigação, em horas; S = largura da faixa, em m (igual ao perímetro molhado para sulcos largos)

A eficiência de distribuição (ED) foi obtida com a equação 3:

$$ED = \frac{Z_f}{(Z_i + Z_f)/2} \quad \text{eq. (3)}$$

Sendo: Z_i = lâmina infiltrada no início do sulco, em mm. A lâmina infiltrada no final do sulco (Z_f) é fixada igual a lâmina hídrica líquida (H_i), calculada com a fórmula:

$$H_i = \frac{CC - UC}{10} \cdot Dg \cdot h \quad \text{eq. (4)}$$

sendo: CC = umidade do solo suposto na capacidade de campo, em % em relação ao peso seco; UC = umidade crítica, em % em relação ao peso seco (obtida na curva característica da água do solo correspondendo ao potencial matricial de 1,0 atmosferas); Dg = densidade de partículas,

em g/cm³ e h = profundidade do perfil molhado, em cm.

Com o auxílio do Programa INFILTRAÇÃO (Silva 2002), calculou-se todos os dados hidráulicos de cada sulco, sua equação de infiltração e as características hidráulicas, bem como determinou-se a eficiência de distribuição e de aplicação de água de cada sulco. Ainda o programa permite a simulação de situações, com a finalidade de obter valores de maior eficiência de irrigações maiores (eq. 5).

O estudo hidráulico foi baseado na equação de Chezy, com coeficiente rugosidade de Manning: citada por Azevedo Netto & Villela (1969), na qual isolou-se o coeficiente.

$$\eta = \frac{A \cdot \sqrt{I} \cdot R_H^{2/3}}{Q} \quad \text{eq. (5)}$$

Sendo: Q = vazão, em m³/s; A = área molhada do sulco, m²; I = declividade do fundo do sulco, em m/m; R_H = raio hidráulico do sulco, em m; η = coeficiente de Manning. O raio hidráulico é a relação entre o perímetro molhado do sulco (PM) e a sua área molhada (A).

Quando a frente de molhamento atingia a calha de saída em cada uma das estacas cravadas ao longo do sulco no espaçamento de 10 x 10 m, assinalou-se com uma pequenas estacas cravadas no solo junto ao nível da água em cada margem. Mediu-se também a altura da lâmina hídrica. A determinação do perímetro molhado foi realizada com uma trena, medindo-se a distância entre os marcadores de cada margem nas diferentes estacas, de tal sorte que com os dados obtidos determinou-se o valor médio em cada sulco para o teste em questão. A velocidade da água nos sulcos foi calculada utilizando-se a fórmula da continuidade, ou seja, dividindo-se a vazão de entrada pela área média de escoamento ao longo do sulco, medida em cada estaca.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam parâmetros medidos dos sulcos utilizados nos testes, bem como os valores de coeficiente “n” de Manning calculados, respectivamente para as Área A Matão e B Limeira esta com duas repetições (R1 e R2). Para Matão o valor médio obtido foi 0,058, enquanto que para Limeira na primeira repetição a média foi 0,085 e na segunda 0,086. Pelos dados observa-se que há uma variação elevada nos valores do coeficiente de Manning para cada tipo de solo, em função da vazão de entrada. Vazões maiores, proporcionam maiores valores de velocidade, o que se traduz em valores do coeficiente menores. De um modo geral, observa-se que os valores do coeficiente de Manning são mais elevados na Área B, sendo semelhantes na duas repetições, evidenciando a influência da natureza do solo, o qual é mais argiloso. Tais valores são relativamente elevados para canais artificiais, segundo R.E. Horton, citado por Brighetti (1988). O valor médio do coeficiente “n” da Área corresponde a canais naturais com meandros, zonas mortas, regiões pouco profundas com pedras. Para a Área B trata-se de canais com pequenas velocidades e zonas mortas. A variação de dados do coeficiente “n” traduzida por valores de desvio padrão elevados, deve-se em grande parte a variação do formato de cada sulco ao longo do seu comprimento, pequenas velocidades e zonas mortas. Por outro lado, os valores de perímetro molhado (PM), são inferiores nos sulcos da Área A, com areia franca, que os da Área B, Franco Arenoso Argiloso líquido, proporcionando valores de “n” de Manning elevados. Nesse contexto, recomenda-se todo cuidado na construção dos sulcos largos, de modo a construí-los mais uniformemente possíveis tanto na forma, quanto na declividade.

Tabela 2 Parâmetros medidos e valores do coeficiente de Manning - Área-A Matão

S/t	qe m ³ /h	Ta (min)	I (m/m)	Pm (m)	A (m ²)	UA (%)	Rh (m)	V (m/s)	n
1.1	36,0	48,0	0,0014	1,130	0,0855	15,54	0,0757	0,1170	0,057
1.2	27,7	50,0	0,0014	1,152	0,0960	15,17	0,0833	0,0802	0,089
1.3	17,1	72,0	0,0014	1,120	0,0808	8,96	0,0721	0,0588	0,110
MÉDIA	26,93	56,67	0,0014	1,134	0,0870	13,223	0,0770	0,0850	0,085
2.1	27,7	52,7	0,0014	1,156	0,0979	15,06	0,0846	0,0786	0,092
2.2	32,7	20,3	0,0014	1,178	0,1083	13,88	0,0919	0,0839	0,091
2.3	18,0	61,5	0,0014	1,138	0,0893	8,27	0,0785	0,0560	0,122
MÉDIA	26,13	44,86	0,0014	1,157	0,0990	12,403	0,0850	0,0730	0,102
3.1	25,7	73,26	0,0004	1,152	0,0960	12,93	0,0833	0,0744	0,051
3.2	36,0	25,24	0,0004	1,090	0,0665	8,41	0,0610	0,1504	0,021
3.3	21,1	25,97	0,0004	1,092	0,0675	16,35	0,0618	0,0869	0,036
MÉDIA	27,60	41,49	0,0004	1,111	0,0770	12,563	0,0690	0,1040	0,036
4.1	25,7	74,25	0,0006	1,108	0,0751	15,17	0,0677	0,0951	0,043
4.2	40,0	33,25	0,0006	1,150	0,0950	9,37	0,0826	0,1170	0,04
4.3	40,0	24,0	0,0006	1,096	0,0694	15,71	0,0633	0,1602	0,024
MÉDIA	35,23	43,83	0,0006	1,118	0,0800	13,417	0,0710	0,1240	0,036
5.1	27,7	45,28	0,0011	1,106	0,0741	24,55	0,0670	0,1038	0,053
5.2	36,0	40,0	0,0011	1,130	0,0855	29,34	0,0757	0,1170	0,051
5.3	15,6	65,03	0,0011	1,104	0,0732	29,79	0,0663	0,0592	0,092
MÉDIA	26,43	50,10	0,0011	1,113	0,0780	27,893	0,0700	0,0930	0,065
6.1	30,0	70,0	0,0011	1,152	0,0960	25,71	0,0833	0,0869	0,073
6.2	40,0	33,3	0,0011	1,108	0,0751	32,07	0,0677	0,1480	0,037
6.3	16,4	32,1	0,0011	1,110	0,0760	29,48	0,0685	0,0599	0,093
MÉDIA	28,80	45,14	0,0011	1,123	0,0820	29,087	0,0730	0,0980	0,068
7.1	36,0	66,9	0,0008	1,124	0,0827	23,07	0,0735	0,1210	0,041
7.2	40,0	43,1	0,0008	1,114	0,0779	31,28	0,0699	0,1426	0,034
7.3	30,0	24,0	0,0008	1,132	0,0865	36,37	0,0764	0,0964	0,053
MÉDIA	35,33	44,68	0,0008	1,123	0,0820	30,240	0,0730	0,120	0,043
8.1	24,0	48,3	0,0006	1,102	0,0722	23,85	0,0655	0,0923	0,043
8.2	40,0	42,9	0,0006	1,124	0,0827	31,09	0,0735	0,1344	0,032
MÉDIA	32,00	45,65	0,0006	1,113	0,0775	27,47	0,0695	0,1134	0,038
9.1	27,7	23,5	0,0013	1,048	0,0466	19,30	0,0444	0,1653	0,027
9.2	37,0	20,1	0,0013	1,096	0,0694	22,60	0,0633	0,1482	0,039
9.3	17,1	21,3	0,0013	1,064	0,0542	24,02	0,0509	0,0877	0,056
MÉDIA	27,27	21,66	0,0013	1,069	0,0570	21,973	0,0530	0,1340	0,041
M.GERAL	27,35	43,72	0,0010	1,080	0,0800	20,67	0,0679	0,1036	0,058
DES. PAD.	10,27	18,53	0,00036	0,023	0,0140	8,350	0,0165	0,0343	0,028

S/t = Sulco/teste; qe = vazão de entrada; Ta = tempo de avanço; I = declividade do sulco; Pm = perímetro molhado médio; A = área da seção de escoamento; UA = umidade do solo; Rh = raio hidráulico; V = velocidade do líquido; n = coeficiente de Manning.

Tabela 3 Parâmetros medidos e valores do coeficiente de Manning - Área-B Limeira R1

S/t	q _e (m ³ /h)	T _a (min)	I (m/m)	P _m (m)	A (m ²)	U _A (%)	R _h (m)	V (m/s)	n
1.1	34,4	42,8	0,00190	2,31	0,214	12,73	0,0926	0,0447	0,200
1.2	34,3	38,4	0,00190	2,35	0,217	19,50	0,0923	0,0439	0,203
1.3	32,7	35,3	0,00190	2,34	0,219	25,63	0,0936	0,0415	0,217
MÉDIA	33,8	38,84	0,00190	2,33	0,217	19,29	0,0928	0,0434	0,207
2.1	45,0	27,5	0,00045	1,92	0,143	19,97	0,0745	0,0874	0,043
2.2	42,4	26,0	0,00045	1,90	0,146	21,52	0,0768	0,0807	0,048
2.3	40,0	21,6	0,00045	1,88	0,133	24,28	0,0707	0,0835	0,043
MÉDIA	42,47	25,02	0,00045	1,90	0,141	21,92	0,0740	0,0839	0,045
3.1	55,4	39,6	0,00060	1,88	0,132	20,08	0,0702	0,1166	0,036
3.2	48,0	30,58	0,00060	1,94	0,134	26,23	0,0691	0,0995	0,041
MÉDIA	48,62	31,72	0,00060	1,91	0,136	22,74	0,0711	0,1000	0,041
4.1	55,4	27,1	0,00150	1,69	0,109	25,18	0,0645	0,1412	0,043
4.2	48,0	21,1	0,00150	1,66	0,085	36,17	0,0512	0,1569	0,034
MÉDIA	50,67	26,62	0,00150	1,75	0,110	28,03	0,0623	0,1327	0,039
5.1	45,0	58,5	0,00195	1,86	0,141	24,55	0,0758	0,0887	0,089
5.2	42,4	45,9	0,00195	1,69	0,108	29,34	0,0639	0,1091	0,065
5.3	40,0	42,4	0,00195	1,82	0,128	29,79	0,0703	0,0868	0,087
MÉDIA	42,47	48,93	0,00195	1,79	0,126	27,89	0,0700	0,0949	0,084
6.1	55,4	33,3	0,00115	1,78	0,130	25,71	0,0730	0,1184	0,050
6.2	40,0	27,0	0,00115	1,97	0,170	32,07	0,0863	0,0654	0,101
6.3	36,0	22,5	0,00115	1,94	0,138	29,48	0,0711	0,0725	0,075
MÉDIA	43,80	27,56	0,00115	1,90	0,146	29,09	0,0768	0,0854	0,075
7.1	42,4	52,6	0,00140	1,91	0,137	23,07	0,0717	0,0860	0,075
7.2	37,9	48,0	0,00140	1,89	0,136	31,28	0,0720	0,0774	0,084
7.3	28,8	36,2	0,00140	1,92	0,128	36,37	0,0667	0,0625	0,098
MÉDIA	36,37	45,62	0,00140	1,91	0,134	30,24	0,0701	0,0753	0,086
8.1	55,4	35,4	0,00175	1,71	0,130	23,85	0,0760	0,1184	0,063
8.2	36,0	33,6	0,00175	1,68	0,110	31,09	0,0655	0,0909	0,075
8.3	30,0	18,5	0,00175	1,66	0,103	36,52	0,0620	0,0809	0,081
MÉDIA	40,47	29,16	0,00175	1,68	0,114	30,49	0,0678	0,0967	0,073
9.1	45,0	59,6	0,00180	1,80	0,128	19,30	0,0711	0,0977	0,075
9.2	37,9	52,4	0,00180	1,75	0,109	22,60	0,0623	0,0966	0,069
9.3	32,7	53,2	0,00180	1,85	0,148	24,02	0,0800	0,0614	0,128
MÉDIA	38,53	55,04	0,00180	1,80	0,128	21,97	0,0711	0,0852	0,091
M.Geral	41,62	37,23	0,00142	1,885	0,1390	26,013	0,0729	0,0880	0,085
D. Pad.	8,010	12,206	0,00053	0,1951	0,0340	5,9136	0,0101	0,0280	0,051

S/t = Sulco/teste; q_e = vazão de entrada; T_a = tempo de avanço; I = declividade do sulco; P_m = perímetro molhado médio; A = área da seção de escoamento; U_A = umidade do solo; R_h = raio hidráulico; V = velocidade do líquido; n = coeficiente de Manning.

Tabela 4 Parâmetros medidos e coeficiente de Manning - Área-B Limeira R2

S/t	q _e (m ³ /h)	T _a (min)	I (m/m)	P _m (m)	A médio (m ²)	UA (%)	R _h (m)	V (m/s)	n
1.1	34,4	28,1	0,00190	2,176	0,1801	19,20	0,0828	0,0531	0,156
1.2	32,7	28,7	0,00190	2,178	0,1930	18,20	0,0886	0,0471	0,184
1.3	42,4	32,3	0,00190	2,359	0,2343	27,51	0,0993	0,0503	0,186
MÉDIA	36,5	29,7	0,0019	2,238	0,2020	21,60	0,0902	0,0502	0,175
2.1	48,0	32,3	0,00045	2,025	0,1470	23,40	0,0726	0,0907	0,041
2.2	55,4	21,6	0,00045	1,941	0,2298	23,47	0,1184	0,0670	0,076
2.3	42,4	19,6	0,00045	2,044	0,1736	28,78	0,0850	0,0678	0,060
MÉDIA	48,6	24,5	0,00045	2,003	0,1830	25,20	0,0920	0,0752	0,059
3.1	55,4	43,9	0,00060	2,082	0,1739	26,44	0,0835	0,0885	0,053
3.2	28,8	30,9	0,00060	1,899	0,1178	27,23	0,0620	0,0679	0,057
3.3	37,9	35,1	0,00060	1,793	0,1196	23,91	0,0667	0,0880	0,046
MÉDIA	40,7	36,7	0,00060	1,925	0,1370	25,90	0,0707	0,0815	0,052
4.1	55,4	32,6	0,00150	1,730	0,1136	28,12	0,0656	0,1355	0,047
4.2	48,0	24,1	0,00150	1,824	0,1208	35,77	0,0662	0,1104	0,057
4.3	45,0	20,9	0,00150	1,898	0,1453	30,01	0,0766	0,0860	0,081
MÉDIA	49,5	25,9	0,00150	1,817	0,1270	31,30	0,0695	0,1106	0,062
5.1	45,0	52,4	0,00195	2,007	0,1861	25,65	0,0927	0,0672	0,135
5.2	37,9	41,6	0,00195	1,634	0,0899	23,55	0,0550	0,1171	0,055
5.3	42,4	39,2	0,00195	1,951	0,1733	24,27	0,0888	0,0679	0,129
MÉDIA	41,8	44,4	0,00195	1,864	0,1500	24,50	0,0788	0,0841	0,106
6.1	55,4	34,0	0,00115	1,894	0,1370	24,99	0,0724	0,1123	0,052
6.2	45,0	32,8	0,00115	2,049	0,2096	32,01	0,1023	0,0597	0,124
6.3	37,9	25,5	0,00115	1,990	0,1537	26,50	0,0772	0,0685	0,090
MÉDIA	46,1	30,7	0,00115	1,978	0,1670	27,80	0,0840	0,0802	0,089
7.1	55,4	47,4	0,00140	2,018	0,1602	25,25	0,0794	0,0960	0,072
7.2	37,9	50,0	0,00140	2,021	0,1763	34,00	0,0872	0,0597	0,123
7.3	28,8	20,5	0,00140	1,828	0,1049	40,71	0,0574	0,0763	0,073
MÉDIA	40,7	39,3	0,00140	1,956	0,1470	33,30	0,0747	0,0773	0,089
8.1	55,4	29,8	0,00175	1,574	0,0952	18,56	0,0605	0,1616	0,040
8.2	40,0	35,9	0,00175	1,783	0,1267	26,97	0,0710	0,0877	0,082
8.3	34,3	34,1	0,00175	1,784	0,1117	32,91	0,0626	0,0853	0,077
MÉDIA	43,2	33,2	0,00175	1,714	0,1110	26,10	0,0647	0,1115	0,066
9.1	30,0	20,0	0,00180	1,677	0,1067	18,10	0,0636	0,0781	0,087
9.2	36,0	36,0	0,00180	1,559	0,0726	19,09	0,0465	0,1378	0,040
9.3	42,4	42,55	0,00180	1,860	0,1408	20,99	0,0757	0,0837	0,091
MÉDIA	36,1	32,9	0,00180	1,699	0,1070	19,40	0,0619	0,0999	0,073
M. Geral	42,578	33,026	0,00140	1,910	0,1479	26,133	0,0763	0,0856	0,086
D. Pad.	8,7073	9,177	0,00050	0,189	0,0422	5,611	0,0161	0,0282	0,043

S/t = Sulco/teste; q_e = vazão de entrada; T_a = tempo de avanço; I = declividade do sulco; P_m = perímetro molhado médio; A = área da seção de escoamento; UA = umidade do solo; R_h = raio hidráulico; V = velocidade do líquido; n = coeficiente de Manning.

As tabelas 5, 6 e 7 apresentam os dados obtido nos testes de infiltração, relacionando os valores de vazão de entrada no sulco com a lâmina infiltradas, respectivamente para Matão (Área A) e Limeira (Área B) repetições R1 e R2. Constam também os valores da Eficiência de Aplicação (EA) e da Eficiência de Distribuição (ED). Os dados de vazão de entrada foram ordenados de forma decrescente e agrupados em classes. A cada dado foi inserido o valor da infiltração correspondente, determinando-se a seguir o valor médio da

vazão de entrada em cada classe (Q_e med.) e da Infiltração média (F med.).

Os valores de infiltração média contra vazão de entrada média, da tabela 5, referentes a Matão, foram processados no Programa AJUSTE obtendo-se por regressão linear a seguinte equação:

$$F = 16,674 + 1,024.Q_e \text{ com } r^2 = 0,8750 \text{ eq. (6)}$$

sendo: F = infiltração acumulada no sulco, em mm; Q_e = vazão de entrada no sulco, em m^3/h .

Tabela 5 Valores da vazão de entrada e da infiltração obtidos na Área A- Mirassol

S/t	Q_e m^3/h	EA %	ED %	F Mm	classe	Q_e m^3/h	F mm	Q_e méd. m^3/h	Fméd. mm			
1.1	36,0	50,18	48,32	71,67	35- 40	40	42,24	38,10	52,43			
1.2	27,7	53,88	52,00	61,47		40	44,63					
1.3	17,1	59,47	59,15	51,96		40	41,11					
2.1	27,7	49,93	49,58	61,95		40	60,54					
2.2	32,7	53,48	69,91	24,65		40	65,85					
2.3	18,0	55,10	66,22	36,23		37	33,57					
3.1	25,7	58,38	53,70	62,83		36	71,67					
3.2	36,0	58,62	64,70	38,17		36	38,17					
3.3	21,1	49,76	72,35	23,33		36	43,30					
4.1	25,7	39,77	40,79	85,04		36	83,23					
4.2	40,0	57,4	64,12	42,24	30- 35	32,7	24,65	30,90	49,19			
4.3	40,0	63,73	59,67	44,63		30	65,72					
5.1	27,7	64,15	62,95	44,12		30	32,66					
5.2	36,0	64,45	64,95	43,30		25- 30	27,7			61,95	27,03	56,98
5.3	15,6	55,64	70,20	32,22			27,7			61,47		
6.1	30,0	58,31	53,16	65,72			27,7			44,12		
6.2	40,0	51,80	66,50	41,11			27,7			26,46		
6.3	16,4	66,64	68,73	23,60			25,7			62,83		
7.1	36,0	48,22	46,53	83,23			25,7			85,04		
7.2	40,0	63,06	55,12	60,54			20- 25			24		
7.3	30,0	60,82	63,65	32,66	21,1			23,33				
8.1	24,0	54,09	52,35	52,30	15- 20			18	36,23	16,840		
8.2	40,0	57,3	25,39	65,85			17,1	51,96				
9.1	27,7	42,51	71,48	26,46		17,1	18,03					
9.2	37,0	57,7	66,11	33,57		16,4	23,60					
9.3	17,1	67,8	72,42	18,03		15,6	32,22					

S/t = sulco/tratamento; Q_e = vazão de entrada; EA = eficiência de aplicação; ED = eficiência de distribuição; Q_e m.ed. = vazão média na classe; F méd. = infiltração média na classe.

Tabela 6 Dados obtidos na Área B- Limeira R1

S/t	Qe	EA	ED	F	CLASSE	Qe	Qe med.	F	F med.
1.1	34,4	58,34	41,65	61,19		55,4		77,85	
1.2	34,3	63,49	57,65	51,57		55,4		68,32	
1.3	32,7	63,46	51,78	46,68	55 - 60	55,4	55,40	56,09	
2.1	45,0	60,37	66,69	43,90		55,4		83,18	71,36
2.2	42,4	57,33	68,7	41,05		48,0		36,80	
2.3	40,0	45,13	73,2	34,04		48,0		59,08	
3.1	55,4	64,55	56,82	83,18	45 - 50	45,0	46,20	43,90	
3.2	48,0	63,79	63,45	59,08		45,0		108,82	
4.1	55,4	63,06	61,55	56,09		45,0		105,62	70,84
4.2	48,0	59,25	70,19	36,80		42,4		41,05	
5.1	45,0	51,09	47,79	105,62		42,4		69,49	
5.2	42,4	57,92	54,14	69,49	40 -45	42,4		83,57	
5.3	40,0	59,12	54,50	60,84		40,0		34,04	
6.1	55,4	65,52	61,24	68,32		40,0		60,84	
6.2	40,0	67,41	60,52	41,65		40,0	41,20	41,65	55,11
6.3	36,0	58,32	72,35	30,48		37,9		67,60	
7.1	42,4	58,82	53,77	83,57		37,9		78,76	
7.2	37,9	59,84	56,20	67,60	35 - 40	36,0		30,48	
7.3	28,8	70,24	60,86	39,73		36,0	37,97	50,67	56,88
8.1	55,4	62,8	56,29	77,85		34,4		61,19	
8.2	36,0	61,66	57,63	50,67		34,3		51,57	
8.3	30,0	53,26	76,79	22,70	30 -35	32,7		46,68	
9.1	45,0	50,09	46,67	108,82		32,7		69,60	
9.2	37,9	55,52	51,55	78,76		30,0	32,82	22,70	50,35
9.3	32,7	59,48	55,12	69,60	25 -30	28,8	28,80	39,73	39,73

As tabelas 9, 10 e 11, apresentam valores de declividade e infiltração obtidos em Matão e em Limeira R1 e R2. De forma análoga, as relações vazão de entrada e infiltração, procurou-se obter uma correlação entre declividade do fundo do sulco e a vazão de entrada no sulco.

Os dados das duas repetições R1 e R2 referentes a Limeira, estão apresentados nas tabelas 6 e 7. Na tabela 8 estão os valores médios das duas repetições aos quais aplicou-se

o Programa Ajuste (Zullo Jr. & Arruda, 1995), obtendo-se a seguinte equação de regressão linear:

$$F = 0,8862 + 1,301.Q_e \text{ com } r^2 = 0,9770. \text{ eq. (7)}$$

sendo: F = infiltração acumulada no sulco, em mm; Q_e = vazão de entrada no sulco, em m³/h.

Tabela 7 Dados dos testes de infiltração obtidos na Área A- Limeira repetição R2

S/t	Qe	EA	ED	F	CLASSE	Qe	Qe med.	F acum.	Fac.med
1.1	34,4	70,33	56,63	39,74		55,4		67,01	
1.2	32,7	87,94	41,31	30,59		55,4		106,2	
1.3	42,4	59,93	51,71	21,56		55,4		63,31	
2.1	48,0	60,93	58,17	54,15		55,4		64,23	
2.2	55,4	42,19	70,64	43,34		55,4		93,54	
2.3	42,4	59,87	73,90	24,47	55 - 60	55,4	55,4	43,34	72,94
3.1	55,4	53,71	50,42	93,54		48,0		54,15	
3.2	28,8	66,87	66,44	37,94		48,0		34,99	
3.3	37,9	61,81	57,87	50,78		45,0		31,69	
4.1	55,4	59,44	57,26	64,23		45,0		82,53	
4.2	48,0	48,38	71,97	34,99	45 - 50	45,0	46,2	58,46	52,36
4.3	45,0	93,82	55,76	31,69		42,4		21,56	
5.1	45,0	46,09	39,78	82,53		42,4		24,47	
5.2	37,9	63,06	56,08	54,86		42,4		55,41	
5.3	42,4	60,21	64,39	55,41		42,4		65,75	
6.1	55,4	59,3	62,94	63,31	40 -45	40,0	41,8	52,94	49,64
6.2	45,0	58,34	42,67	58,46		37,9		50,78	
6.3	37,9	55,64	70,57	36,77		37,9		54,86	
7.1	55,4	41,24	41,32	106,2		37,9		36,77	
7.2	37,9	59,69	56,58	69,08		37,9		69,08	
7.3	28,8	99,52	54,28	27,58	35 - 40	36,0	37,52	53,73	53,04
8.1	55,4	63,91	59,68	67,01		34,4		39,74	
8.2	40,0	63,97	56,28	52,94		34,3		49,01	
8.3	34,3	64,4	52,79	49,01		32,7		30,59	
9.1	30,0	94,46	70,79	27,4	30 -35	30,0	32,85	27,4	36,69
9.2	36,0	37,61	50,90	53,73		28,8		37,94	
9.3	42,4	31,26	48,75	65,75	25 -30	28,8	28,8	27,58	32,76

Tabela 8 Valores médios Área B- Limeira

CLASSE	Qe(m ³ /h)			F(mm)		
	R1	R2	R med.	R1	R2	R med.
55- 60	55,40	55,44	55,42	72,94	71,36	72,15
45- 50	46,20	46,20	46,20	52,36	70,84	61,60
40- 45	41,20	41,80	41,50	49,64	55,10	52,37
35- 40	37,97	37,52	37,75	53,04	56,88	54,96
30- 35	32,82	32,85	32,84	36,69	50,35	43,52
25- 30	28,80	28,80	28,80	32,76	39,73	36,25

Tabela 9 Valores da declividade e da infiltração acumulada para Matão

S/t	I	F	CLASSE	I	I médio	F	F médio	
1.1	0,0014	71,67	0,0012- 0,0014	0,0014	0,001375	71,67		
1.2	0,0014	61,47		0,0014		61,47		
1.3	0,0014	51,96		0,0014		51,96		
2.1	0,0014	61,95		0,0014		61,95		
2.2	0,0014	24,65		0,0014		24,65		
2.3	0,0014	36,23		0,0014		36,23		
3.1	0,0004	62,83		0,0013		26,46		
3.2	0,0004	38,17		0,0013		33,57		
3.3	0,0004	23,33		0,0013		18,03		42,89
4.1	0,0006	85,04	0,0010- 0,0012	0,0011	0,0011	44,12		
4.2	0,0006	42,24		0,0011		43,3		
4.3	0,0006	44,63		0,0011		32,22		
5.1	0,0011	44,12		0,0011		65,72		
5.2	0,0011	43,3		0,0011		41,11		
5.3	0,0011	32,22		0,0011		23,6		38,30
6.1	0,0011	65,72	0,008- 0,0010	0,0008	0,0008	83,23		
6.2	0,0011	41,11		0,0008		60,54		
6.3	0,0011	23,6		0,0008		32,66		
7.1	0,0008	83,23	0,006- 0,008	0,0006	0,0006	52,3	57,18	
7.2	0,0008	60,54		0,0006		65,85		
7.3	0,0008	32,66		0,0006		85,04		
8.1	0,0006	52,3		0,0006		42,24		
8.2	0,0006	65,85		0,0006		44,63		59,44
9.1	0,0013	26,46		0,004- 0,006		0,0004		0,0004
9.2	0,0013	33,57	0,0004		38,17			
9.3	0,0013	18,03	0,0004		23,33	41,44		

Tabela 10 Valores da declividade e da infiltração acumulada para Limeira R1

I	F	CLASSE	I médio	I	F	F médio
0,0019	61,19	0,00165- 0,00195	0,00185	0,00195	105,62	66,98
0,0019	51,57			0,00195	69,49	
0,0019	46,68			0,00195	60,84	
0,00045	43,9			0,0019	61,19	
0,00045	41,05			0,0019	51,57	
0,00045	34,04			0,0019	46,68	
0,0006	83,18			0,0018	108,82	
0,0006	59,08			0,0018	78,76	
0,0015	56,09			0,0018	69,6	
0,0015	36,8			0,00175	77,85	
0,00195	105,62			0,00175	50,67	
0,00195	69,49			0,00175	22,7	
0,00195	60,84			0,0015	56,09	

Tabela 10 Valores da declividade e da infiltração acumulada para Limeira R1 (continuação)

I	F	CLASSE	I médio	I	F	F médio
0,00115	68,32			0,0015	36,8	
0,00115	41,65			0,0014	83,57	
0,00115	30,48			0,0014	67,6	
0,0014	83,57	0,00135- 0,00165	0,00144	0,0014	39,73	56,76
0,0014	67,6			0,00115	68,32	
0,0014	39,73			0,00115	41,65	
0,00175	77,85	0,00105- 0,00135	0,00115	0,00115	30,48	46,82
0,00175	50,67			0,0006	83,18	
0,00175	22,7			0,0006	59,08	
0,0018	108,82			0,00045	43,9	
0,0018	78,76			0,00045	41,05	
0,0018	69,6	0,0045- 0,0-075	0,00051	0,00045	34,04	39,66

Tabela 11 Valores da declividade e da infiltração acumulada para Limeira R1

S/t	I	F	CLASSE	I medio	I	F	F médio
1.1	0,0019	39,74			0,00195	82,53	
1.2	0,0019	30,59			0,00195	54,86	
1.3	0,0019	21,56			0,00195	55,41	
2.1	0,00045	54,15			0,0019	39,74	
2.2	0,00045	43,34			0,0019	30,59	
2.3	0,00045	24,47			0,0019	21,56	
3.1	0,0006	93,54			0,0018	27,4	
3.2	0,0006	37,94			0,0018	53,73	
3.3	0,0006	50,78			0,0018	65,75	
4.1	0,0015	64,23			0,00175	67,01	
4.2	0,0015	34,99			0,00175	52,94	
4.3	0,0015	31,69	0,00165- 0,00195	0,00185	0,00175	49,01	50,04
5.1	0,00195	82,53			0,0015	64,23	
5.2	0,00195	54,86			0,0015	34,99	
5.3	0,00195	55,41			0,0015	31,69	
6.1	0,00115	63,31			0,0014	106,2	
6.2	0,00115	58,46			0,0014	69,08	
6.3	0,00115	36,77	0,00135- 0,00165	0,00145	0,0014	27,58	55,63
7.1	0,0014	106,2			0,00115	63,31	
7.2	0,0014	69,08			0,00115	58,46	
7.3	0,0014	27,58	0,00105- 0,00135	0,00115	0,00115	36,77	52,85
8.1	0,00175	67,01			0,0006	93,54	
8.2	0,00175	52,94			0,0006	37,94	
8.3	0,00175	49,01			0,0006	50,78	
9.1	0,0018	27,4			0,00045	54,15	
9.2	0,0018	53,73			0,00045	43,34	
9.3	0,0018	65,75	0,0045- 0,0-075	0,00045	0,00045	24,47	43,19

A aplicação do Programa AJUSTE, a seguinte correlação linear:

$$F = 27,14508 + 20533,28.I \text{ com } r^2 = 0,9720 \text{ eq. (8)}$$

Na tabela 12 estão os valores médios das duas repetições realizadas em Limeira.

Aplicando-se a esses dados Análise de Regressão Linear com o emprego do Programa Ajuste, obteve-se a seguinte equação:

$$F = 33,1289 + 17919,73.I \text{ com } r^2 = 0,9660 \text{ eq. (9)}$$

Igualando-se essas duas equações (6) e (8) obteve-se a equação (10) que fornece a vazão de entrada, em função da declividade do fundo do sulco, para o solo, mais arenoso de Matão. De forma, análoga igualando-se as equações (7) e (9), obtém-se a equação (11) para o solo mais argiloso de Limeira.

$$Q_e = \frac{10,471 + 20533,8I}{1,024} \text{ eq. (10)}$$

$$Q_e = \frac{32,243 + 1719,73I}{1,301} \text{ eq. (11)}$$

Sendo: I = declividade do fundo do sulco, em m/m; Q_e = vazão de entrada no sulco, m³/h.

6 CONCLUSÃO

Pelas condições da pesquisas e pelos resultados obtidos conclui-se que os sulcos largos utilizados para tratamento de efluentes industriais líquidos no solo, apresentam grande resistência hidráulica, devido a sua pequena declividade e condições superficiais, o que confere uma velocidade de deslocamento do líquido muito baixa, o que todavia beneficia o processo de infiltração e dessa forma o tratamento. Obteve-se duas equações empíricas, um para o solo de Matão (Areia Franca) e outra para o solo de Limeira (Franco Argilo Arenoso), que permitem relacionar a vazão de entrada com a declividade do sulco, o que é um indicativo para o projetista para fixar tal vazão na elaboração do projeto, devendo ser empregada nos testes de avanço e de infiltração na elaboração do projeto, como um valor indicativo.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores externam seus agradecimentos às empresas Citrosuco Paulista S/A, de Matão, SP e Bascitrus Agroindústria S/A, de Mirassol, por permitirem a condução da pesquisa em suas áreas de tratamento de efluentes, bem como a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro.

Tabela 12. Valores médios Área B Limeira

CLASSE	I (m/m)			F (mm)		
	R1	R2	R med.	R1	R2	R med.
0,00165- 0,00195	0,00185	0,00185	0,00185	66,98	71,36	69,17
0,00135- 0,00165	0,00144	0,00145	0,00145	56,76	70,84	55,63
0,00105- 0,00135	0,00115	0,00115	0,00115	46,82	55,1	52,87
0,0045- 0,0-075	0,00051	0,00045	0,00048	39,66	56,88	43,19

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO NETTO, J.M.; VILLELA, S. M. **Manual de hidráulica**. 5ª ed. São Paulo; Edgard Bluchner, 1969. 279 p.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 2. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1982. 463 p.

BHAMIDIMARRI, S.M.R. **Appopriate industrial waste mangement technogies: the New Zeland industry**. Water Science & Technology. v. 24, n. 1, p. 89-95, 1991.

BRIGHETTI, G. **Elaboração de projetos de irrigação**. Brasília: Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior, 1988. 47 p.

CARRARO, V. **Tratamento de efluente bruto cítrico líquido no solo por meio de sulcos largos de infiltração**. Campinas, 1995. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

SILVA, R.T. **Parâmetros de Projetos de Sulcos Largos de Infiltração**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, SP. 2002.

ZULLO JR, J.; ARRUDA, F. B. **Programa Computacional para Ajuste de Equações em Dados Experimentais**. 23P. Instituto Agrônômico de Campinas, 1986. (BOLETIM Técnico n. 113).