

ARTIGO TÉCNICO

REFLEXOS DA VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA FASE DE AVANÇO E DO TEMPO DE OPORTUNIDADE DE INFILTRAÇÃO NO TEMPO DE APLICAÇÃO D'ÁGUA NA IRRIGAÇÃO POR SULCOS PARA UM SOLO FRANCO-ARENOSO¹

JOAQUIM J. DE CARVALHO², CARLOS A.V. DE AZEVEDO³, JACQUELINE HENRIQUE⁴, JOSÉ DANTAS NETO³, VERA L. ANTUNES DE LIMA³, ROBERTO V. PORDEUS⁵

RESUMO: Esta pesquisa teve como objetivo verificar as variabilidades espaciais e temporais no tempo de avanço e no tempo de oportunidade de infiltração d'água e seus reflexos no tempo de aplicação d'água num sistema de irrigação por sulcos com fluxo reduzido para um solo franco-arenoso. As avaliações de campo foram realizadas no perímetro irrigado de São Gonçalo, Sousa - PB, onde foram feitas medições em seis sulcos, equidistantes, de forma a abranger o máximo possível a variabilidade em toda a área, nos 12 eventos de irrigação da estação de cultivo. Observando os tempos de avanço e de oportunidade de infiltração d'água no final da área irrigada em cada evento e em cada sulco ao longo do tempo, verificou-se que a variação espacial no tempo de avanço foi mais expressiva que a variação temporal, enquanto no tempo de oportunidade de infiltração d'água ocorreu o inverso. Ao longo do tempo e do espaço, os valores mínimo e máximo do tempo de avanço e do tempo de oportunidade de infiltração d'água foram, respectivamente, 15 e 62 min, e 1 e 517 min. Essas amplitudes nos referidos tempos geraram variações espaciais máximas no tempo de aplicação d'água, ao longo da estação de cultivo, igual a 41,8%; espacialmente, as variações temporais máximas no tempo de aplicação foram de 71,6%. Esses valores mostram o quanto a heterogeneidade das características de infiltração d'água, bem como da vazão, do perímetro molhado dos sulcos e da lâmina requerida ao longo do tempo e do espaço, afeta a otimização do tempo de aplicação d'água.

PALAVRAS-CHAVE: tempo de avanço, tempo de aplicação d'água, irrigação por sulcos.

REFLEXES OF THE SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF THE ADVANCE PHASE AND OF THE INFILTRATION OPPORTUNITY TIME ON THE WATER APPLICATION TIME IN FURROW IRRIGATION FOR A SANDY-LOAM SOIL

SUMMARY: This research had the objective of verifying the spatial and temporal variabilities in the advance phase and in the infiltration opportunity time, and their reflexes on the water application time in a furrow irrigation system with cutback flow for a sandy-loam soil. The field evaluations were conducted in the irrigation district of São Gonçalo, in the municipality of Sousa, Paraíba State, Brazil, where measurements were made in six equidistant furrows, in order to mostly comprise the variability all over the area, in the twelve irrigation events along the crop season. Observing the advance times and the infiltration opportunity times at the end of the irrigated area in each irrigation event and at each furrow irrigation along the time, it was verified that the spatial variation in the advance time was more expressive than the temporal variation, while in the infiltration opportunity time happened the inverse. Along of time and space, the minimum and maximum values of the advance time and of the infiltration opportunity time were, respectively, 15 and 62 min, and 1 and 517 min. These time amplitudes generated maximum spatial variations in the water application time, along the crop season, equal to 41.8%; spatially, the maximum temporal variations in the water application time was 71.6%. These values show how much the heterogeneity of the infiltration characteristics, as well as of the discharge, furrow wetted perimeter and required water depth, along of time and space, affects the optimization of the water application time.

KEYWORDS: advance time, water application time, furrow irrigation.

¹ Extraído da dissertação de Mestrado do primeiro autor

² M.Sc. Irrigação e Drenagem, UFPB/CCT/DEAg., Bolsista do CNPq.

³ Prof. Dr., Universidade Federal de Campina Grande/CCT/DEAg., Campina Grande - PB.

⁴ M.Sc. Engenharia Agrícola, UFPB/CCT/DEAg., Campina Grande - PB, Bolsista do CNPq.

⁵ Doutorando UFCG/CCT/DEAg., Campina Grande - PB, Bolsista do CNPq, e-mail: rpordeus@deag.ufcg.edu.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 13-5-2003

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 16-4-2004

INTRODUÇÃO

Considerável atenção tem sido dada à fase de avanço na irrigação por superfície, devido sua influência no tempo de irrigação ao longo da parcela irrigada (CARVALHO et al., 1994). A redução do tempo de avanço resulta em um tempo de infiltração mais uniforme ao longo da área, o qual, por sua vez, resulta em uma lâmina infiltrada mais uniforme se o solo for homogêneo, quanto a sua textura, em toda a área (WALKER & SKOGERBOE, 1987). Conforme SCALOPPI (1986), o início da fase de avanço coincide com o próprio início da irrigação, isto é, no momento em que a vazão é derivada à parcela a ser irrigada e prolonga-se até que a frente de avanço atinja a extremidade final da área. Nesse momento, se o sulco não for fechado no final, começam as perdas d'água por escoamento superficial, e também a lâmina d'água no sulco começa a aumentar, caracterizando, assim, a fase de armazenamento. De acordo com BERNARDO (1995), a velocidade de avanço d'água nos sulcos de irrigação é função dos seguintes fatores: vazão aplicada no sulco, capacidade de infiltração do solo e declividade, rugosidade e comprimento do sulco. Por esse motivo, a fase de avanço deve ser medida na área em que se fará a irrigação, ou simulada para as condições de campo dessa área. Essa fase é de difícil simulação devido à natureza do fluxo superficial, caracterizado como não-permanente e espacialmente variado, reduzindo-se com a distância, como consequência da infiltração (SCALOPPI, 1986).

A fase de avanço possui um comportamento dinâmico ao longo da estação de cultivo, ou seja, está se alterando continuamente, devido às variações temporais nos parâmetros de campo, principalmente as características de infiltração d'água no solo. Por isso, um monitoramento sazonal dessa fase é imprescindível para ter um manejo que favoreça índices satisfatórios de desempenho do sistema. SANTANA (1996) e SANTANA et al. (1997b), monitorando a fase de avanço, ao longo da estação de cultivo (isto é, em cada evento de irrigação), num sistema de irrigação por sulcos do perímetro irrigado de São Gonçalo - PB, observaram que essa fase refletiu variações temporais nas características de infiltração d'água no solo e que seu monitoramento contribuiu substancialmente para balancear as perdas d'água por percolação e escoamento superficial, resultando numa melhoria substancial na eficiência de aplicação de 41% para 71% ao longo da estação de cultivo.

Conforme ENCISO-MEDINA et al. (1998), a maioria dos modelos matemáticos de avaliação da fase de avanço na irrigação por superfície assumem que as características de infiltração d'água no solo, ao longo da área, são descritas por uma única equação. Entretanto, BAUTISTA & WALLENDER (1995), citados por ENCISO-MEDINA et al. (1998) e SANTANA et al. (1997a) detectaram, respectivamente, uma considerável variação espacial e temporal na taxa de infiltração nos sulcos irrigados. Essa suposição, normalmente, é feita por conveniência, isto é, para facilitar o procedimento matemático de simulação dessa fase.

Na irrigação por sulcos, um tempo de aplicação adequado seria dado pela soma do tempo de avanço no final do sulco e o tempo de oportunidade de infiltração requerido para aplicar a lâmina desejada. O ideal é que o tempo de aplicação seja avaliado, em tempo real, para cada evento de irrigação por sulco, devido a variações espaciais e temporais nos parâmetros de campo. De acordo com WALKER (1989) e CHILDS et al. (1993), citados por CARVALHO et al. (1995) e ENCISO-MEDINA et al. (1998), a característica de infiltração d'água no solo é o parâmetro que mais influencia no tempo de aplicação d'água. RAGHUWANSHI (1994), citado por RAGHUWANSHI & WALLENDER (1996), mostrou que a heterogeneidade das características de infiltração ao longo da área afetou fortemente a otimização do tempo de aplicação, bem como da vazão e da aplicação da lâmina requerida. SANTANA (1996) e SANTANA et al. (1997a), realizando um monitoramento sazonal do desempenho de um sistema de irrigação por sulcos do perímetro irrigado de São Gonçalo - PB, avaliaram o tempo de aplicação d'água em cada evento de irrigação, verificando, então, a necessidade de ajuste desse parâmetro para compensar as variações temporais, principalmente nas características de infiltração d'água no solo.

O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos das variações espacial e temporal da fase de avanço e do tempo de oportunidade de infiltração no final da área, no tempo de aplicação d'água em sulcos num solo franco-arenoso, visando a otimizar o volume d'água a aplicar ao longo da área irrigada, durante a estação de cultivo.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido num sistema de irrigação por sulcos na estação experimental da Embrapa Algodão, localizada no perímetro irrigado de São Gonçalo, Sousa - PB. A área experimental (parcela agrícola 8B), cultivada com algodão, apresenta classe textural do tipo franco-arenosa, mede 0,62 ha, foi sistematizada com declividade de $0,004 \text{ m m}^{-1}$ no sentido longitudinal e $0,001 \text{ m m}^{-1}$ no sentido transversal. O sistema de irrigação possui 53 sulcos com 73 m de comprimento e espaçados de 1,6 m, e foi operado sob condições de fluxo reduzido, onde se utilizaram dois sifões durante a fase de avanço e um na fase de armazenamento.

Para observar as variações espacial e temporal nos tempos de avanço, oportunidade de infiltração e aplicação d'água no final da área, foram realizadas avaliações para cada evento de irrigação ao longo da estação de cultivo (total de 12), em que se coletaram dados em seis sulcos equidistantes, de forma a abranger ao máximo essas variações ao longo de toda a área irrigada. Para medir a fase de avanço d'água, foram colocadas dez estacas ao longo de cada sulco escolhido, distanciadas a cada 7,3 m, cronometrando-se o tempo de avanço acumulado em cada estaca.

A determinação, em tempo real, do tempo de aplicação d'água foi feita da seguinte forma: imediatamente ao término da fase de avanço, os parâmetros k e a da equação de infiltração de Kostiakov-Lewis foram determinados a partir do ajuste do avanço simulado ao medido, processado pelo modelo matemático computacional SIRTOM. Nessa simulação, foi atribuído à rugosidade da superfície do solo um valor igual a 0,013, utilizado por AZEVEDO (1992) e AZEVEDO et al. (1997a,b) em seu modelo SIRTOM, por ter achado ser esse o valor que mais contribuiu para minimizar as discrepâncias entre o tempo de avanço simulado e o medido. Como era incerta a obtenção da velocidade de infiltração básica em tempo hábil, isto é, se a vazão de saída atingiria um valor constante um pouco antes da duração da fase de armazenamento, adotou-se, tanto na simulação do SIRTOM como na determinação do tempo de oportunidade de infiltração requerido, um valor médio para f_0 igual a $0,000190 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$ determinado na mesma área por SANTANA (1996). De posse da equação de infiltração d'água, o tempo de oportunidade de infiltração para a lâmina d'água requerida pela cultura foi, então, determinado iterativamente, por meio de uma planilha de cálculo feita no Microsoft Excel 7.0. Como em todos os eventos de irrigação, desejou-se estabelecer a condição de irrigação adequada ao longo de toda a área, isto é, a lâmina d'água aplicada no final da área igual à requerida pela cultura; o tempo de aplicação d'água foi, então, dado pela soma do tempo de avanço no final da área com o tempo de oportunidade de infiltração requerido.

Os dados obtidos experimentalmente foram analisados utilizando-se de métodos de estatística descritiva, calculando-se a média aritmética, valores mínimo e máximo, amplitude total, intervalo de 95% de confiança (com desvio-padrão populacional desconhecido) e coeficiente de variação. Para avaliar a hipótese de normalidade dos dados, utilizou-se o método de Kolmogorov-Smirnov, a 5% de probabilidade, citado por COSTA NETO (1997).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 1; 2 e 3, apresentam-se, respectivamente, as variações espacial e temporal dos tempos de avanço, oportunidade de infiltração e aplicação d'água no final da área irrigada num solo franco-arenoso. Demonstrou-se por meio da análise da distribuição de frequência dos dados, ao longo do tempo e do espaço, que ambos os tempos apresentaram distribuição normal.

TABELA 1. Variação espacial e temporal do tempo de avanço, T_{av} (min), na irrigação por sulco, com comprimento de 73 m, declividade $0,004 \text{ m m}^{-1}$, vazão de entrada $1,12 \text{ L s}^{-1}$, no final da área irrigada, num solo franco-arenoso.

Eventos	Sulcos de Irrigação						Média Espac. ^a	Valor		Amp Tot. ^b	I. C. (95%) ^c		C.V. ^f (%)
	1	2	3	4	5	6		Mín.	Máx.		L. I. ^d	L. S. ^e	
1	48	62	33	31	32	27	39	27	62	35	25	53	34,6
2	33	33	26	16	18	16	24	16	33	17	15	32	34,3
3	34	35	25	17	17	18	24	17	35	18	15	33	34,6
4	43	34	25	18	19	17	26	17	43	26	15	37	40,3
5	31	39	23	23	17	18	25	17	39	22	16	34	33,4
6	45	40	30	23	21	20	30	20	45	25	19	41	35,3
7	38	51	25	19	21	18	29	18	51	33	15	42	45,9
8	45	51	26	22	19	15	30	15	51	36	14	45	49,8
9	49	47	27	24	20	16	31	16	49	33	16	45	46,1
10	50	46	36	26	24	21	34	21	50	29	21	47	35,9
11	46	46	30	24	33	16	33	16	46	30	20	45	36,8
12	47	39	29	29	31	18	32	18	47	29	22	43	30,7
Média Temp. ^g	42	44	28	23	23	18	30						
Valor	Mín.	31	33	23	16	17	15	15					
	Máx.	50	62	36	31	33	27	62					
Amp. Total	19	29	13	15	16	12	47						
I. C. (95%)	L. I.	38	38	26	20	19	16	27					
	L. S.	47	49	30	26	26	20	32					
C.V. (%)	15,7	19,6	13,6	20,5	26,3	17,6	38,5						

^amédia espacial; ^b amplitude total; ^c estimativa do intervalo a 95% de confiança; ^d limite inferior; ^e limite superior; ^f coeficiente de variação, e ^g média temporal. A quantificação dos parâmetros estatísticos na diagonal corresponde à variação do tempo de avanço no final da área irrigada ao longo do tempo e do espaço.

TABELA 2. Variação espacial e temporal do tempo de oportunidade de infiltração, τ (min), na irrigação por sulco, com comprimento de 73 m, declividade $0,004 \text{ m m}^{-1}$, vazão de entrada $1,12 \text{ L s}^{-1}$, no final da área irrigada, num solo franco-arenoso.

Eventos	Sulcos de Irrigação						Média Espac. ^a	Valor		Amp Tot. ^b	I. C. (95%) ^c		C.V. ^f (%)
	1	2	3	4	5	6		Mín.	Máx.		L. I. ^d	L. S. ^e	
1	147	221	311	269	249	271	245	147	311	164	186	304	23,0
2	1	1	1	3	1	6	2	1	6	5	0	4	94,2
3	12	10	21	38	26	64	29	10	64	54	7	50	70,7
4	33	26	26	77	45	127	56	26	127	101	14	97	71,5
5	41	51	130	66	68	134	82	41	134	93	39	124	49,3
6	61	86	85	127	81	90	88	61	127	66	66	111	24,4
7	89	52	127	195	107	237	135	52	237	185	62	207	51,4
8	266	229	272	349	271	508	316	229	508	279	209	423	32,3
9	222	187	367	416	333	517	340	187	517	330	212	469	36,0
10	286	344	268	413	245	400	326	245	413	168	252	400	21,6
11	268	368	287	349	227	398	316	227	398	171	247	385	20,8
12	161	124	139	198	147	336	184	124	336	212	102	267	42,6
Média Temp. ^g	132	142	170	208	150	257	177						
Valor	Mín.	1	1	1	3	1	6	1					
	Máx.	286	368	367	416	333	517	517					
Amp. Total	285	367	366	413	332	511	516						
I. C. (95%)	L. I.	64	61	89	114	80	146	144					
	L. S.	200	222	250	303	220	369	209					
C.V. (%)	80,9	89,9	74,5	71,5	73,8	68,1	77,7						

^a média espacial; ^b amplitude total; ^c estimativa do intervalo a 95% de confiança; ^d limite inferior; ^e limite superior; ^f coeficiente de variação, e ^g média temporal. A quantificação dos parâmetros estatísticos na diagonal corresponde à variação do tempo de oportunidade de infiltração no final da área irrigada ao longo do tempo e do espaço.

TABELA 3. Variação espacial e temporal do tempo de aplicação, Tap (min), na irrigação por sulco, com comprimento de 73 m, declividade 0,004 m m⁻¹, vazão de entrada 1,12 L s⁻¹, no final da área irrigada, num solo franco-arenoso.

Eventos	Sulcos de Irrigação						Média Espaç. ^a	Valor		Amp. Tot. ^b	I. C. (95%) ^c		C.V. ^f (%)
	1	2	3	4	5	6		Mín.	Máx.		L. I. ^d	L. S. ^e	
1	195	283	344	300	281	298	284	195	344	149	232	335	17,3
2	34	34	27	19	19	22	26	19	34	15	19	33	27,0
3	46	45	46	55	43	82	53	43	82	39	37	68	28,2
4	76	60	51	95	64	144	82	51	144	93	46	117	41,8
5	72	90	153	89	85	152	107	72	153	81	69	145	33,7
6	106	126	115	150	102	110	118	102	150	48	100	137	15,0
7	127	103	152	214	128	255	163	103	255	152	101	225	36,1
8	311	280	298	371	290	523	346	280	523	243	248	443	26,8
9	271	234	394	440	353	533	371	234	533	299	255	486	29,7
10	336	390	304	439	269	421	360	269	439	170	289	431	18,8
11	314	414	317	373	260	414	349	260	414	154	284	414	17,8
12	208	163	168	227	178	354	216	163	354	191	141	292	33,2
Média Temp. ^g	175	185	197	231	173	276	206						
Valor	Mín.	34	34	27	19	19	22	19					
	Máx.	336	414	394	440	353	533	533					
Amp. Total.	302	380	367	421	334	511	514						
I. C. (95%)	L. I.	103	101	116	135	101	165	174					
	L. S.	246	269	279	327	245	387	238					
C.V. (%)	64,2	71,6	65,0	65,6	65,8	63,5	66,7						

^amédia espacial; ^bamplitude total; ^cestimativa do intervalo a 95% de confiança; ^dlimite inferior; ^elimite superior; ^fcoeficiente de variação, e ^gmédia temporal. A quantificação dos parâmetros estatísticos na diagonal corresponde à variação do tempo de aplicação no final da área irrigada ao longo do tempo e do espaço.

Observa-se, por meio do coeficiente de variação (C.V.), que, ao longo da estação de cultivo, a variação espacial nos tempos de avanço, oportunidade e aplicação oscilaram de 30,7 a 49,8%; de 20,8 a 94,2%, e de 15,0 a 41,8%, respectivamente. Ao longo do sentido transversal da área irrigada, a variação temporal nos tempos de avanço, oportunidade e aplicação oscilaram de 13,6 a 26,3%; de 68,1 a 89,9%, e de 63,5 a 71,6%, respectivamente. Baseando-se nos limites de coeficiente de variação propostos por WARRICK & NIELSEN (1980), pode-se assegurar que, ao longo do tempo, os tempos de avanço e aplicação apresentaram variação espacial média ($12\% \leq C.V. \leq 60\%$), enquanto o tempo de oportunidade apresentou variação espacial de média a alta ($C.V. > 60\%$). Ao longo do sentido transversal da área, o tempo de avanço apresentou variação temporal de baixa ($C.V. < 12\%$) a média, enquanto os tempos de oportunidade e aplicação apresentaram variação temporal alta ($C.V. > 60\%$). As maiores desuniformidades nos tempos de avanço, oportunidade e aplicação ao longo do espaço ocorreram, respectivamente, no oitavo, segundo e quarto eventos de irrigação; ao longo do tempo, a maior desuniformidade no tempo de avanço ocorreu no sulco de irrigação 5; já nos tempos de oportunidade e aplicação, ocorreu no sulco de irrigação 2. Isso pode ser confirmado, verificando que são nesses eventos e sulcos de irrigação que se têm os maiores coeficientes de variação e proporção entre a amplitude total e a média aritmética.

Na irrigação por sulcos, as variações do tempo de aplicação d'água são conseqüências de variações no tempo de avanço d'água no final da área (Tav) e no tempo de oportunidade de infiltração requerido (τ) para estabelecer a condição de irrigação adequada, isto é, sem nenhum déficit de umidade ao longo de toda a área, mas sem perdas excessivas d'água. Nesta pesquisa, o sistema de

irrigação foi manejado na condição acima mencionada, não apenas por ser ela a ideal para a cultura, mas também por facilitar a análise do tempo de aplicação, afetando o desempenho do sistema, uma vez que, numa irrigação adequada, a eficiência de armazenamento e a uniformidade de distribuição d'água são 100%, restando apenas na análise a eficiência de aplicação d'água. Variações em T_{av} são influenciadas por variações na vazão de entrada, nas características de infiltração, na seção transversal de fluxo e na rugosidade da superfície, considerando, obviamente, que o comprimento e a declividade dos sulcos se manterão constantes; já as variações em τ são reflexos apenas das variações nas características de infiltração e na lâmina d'água requerida.

Verifica-se que o tempo de aplicação médio no primeiro evento de irrigação foi de 284 min, bem maior que do segundo ao sétimo eventos de irrigação, devendo-se isso, principalmente, à rugosidade e porosidade do solo elevadas por um recente preparo de solo, como também à necessidade de elevar o teor de água atual do solo à capacidade de campo; do segundo ao sétimo eventos de irrigação, o tempo de aplicação médio apresentou uma diminuição substancial, variando crescentemente de 26 a 163 min devido, portanto, à redução na porosidade drenável ocasionada por rearranjo estrutural do solo, que diminuiu o tempo de avanço no final da área (Tabela 1). Do oitavo evento de irrigação em diante, o tempo de aplicação continuou crescendo, mas agora apresentando valores superiores ao do primeiro evento (exceto para o último evento). O aumento crescente no tempo de aplicação d'água, do segundo ao décimo primeiro eventos de irrigação, mostra, principalmente, que o efeito das reduções na capacidade de infiltração d'água do solo (CARVALHO, 1998), nesse parâmetro operacional (por meio de reduções no tempo de avanço no final da área) foi menor que os efeitos dos aumentos da seção transversal de fluxo (CARVALHO, 1998) e da rugosidade, ambos aumentando o tempo de avanço (Tabela 1) e da diminuição das taxas de infiltração e aumento na lâmina requerida (CARVALHO, 1998), que aumentaram o tempo de oportunidade de infiltração requerido para conseguir a condição de irrigação adequada. Deve-se lembrar que, a partir do segundo evento de irrigação, a rugosidade passou por um processo de diminuição, mas, depois de certo tempo, foi aumentando com o surgimento de plantas invasoras no interior dos sulcos. As variações temporais (CARVALHO, 1998) nas vazões de entrada também, certamente, tiveram influência no tempo de aplicação.

A média, a estimativa de intervalo a 95% de confiança e o coeficiente de variação dos tempos de avanço, oportunidade de infiltração e aplicação d'água no final da área, obtidos ao longo do tempo e do espaço, foram, respectivamente, de 30; 177 e 206 min; de 27 a 32 min, de 144 a 209 min, e de 174 a 238 min, e de 38,5; 77,7 e 66,7%. Esses valores mostram o quanto a heterogeneidade das características de infiltração, bem como da vazão, do perímetro molhado dos sulcos e da lâmina requerida ao longo do tempo e do espaço, afetam a otimização do tempo de aplicação.

Na Figura 1, ilustra-se a variação espacial e temporal da fase de avanço num solo franco-arenoso. As variações no tempo de avanço d'água ao longo dos sulcos foram consequência, principalmente, da redução do fluxo superficial pela taxa de infiltração no sentido longitudinal dos sulcos. Essas variações apresentaram comportamento diferenciado tanto ao longo do tempo como no sentido transversal da área, como um reflexo de diferentes vazões de entrada e de variações, tanto no sentido transversal como longitudinal da área, nos parâmetros de campo, principalmente infiltração d'água e seção transversal de fluxo, que variou ao longo dos sulcos. Verifica-se que as variações no tempo de avanço ao longo dos sulcos foram diminuindo ao longo do tempo como efeito, principalmente, da redução da capacidade de infiltração d'água no solo, que foi certamente maior que o aumento na seção transversal de escoamento.

Apesar de tratar-se de um solo franco-arenoso, observa-se que o tipo de variação no tempo de avanço ao longo dos sulcos foi praticamente linear, exceto nos sulcos 1 e 2, nos quais se constatam curvas de avanço com certo grau de não-linearidade, demonstrando, assim, que ao longo desses sulcos ocorreram variações nos parâmetros de campo maiores que nos demais. O avanço no sulco 2, no terceiro evento de irrigação, exhibe um caso evidente de variação espacial nos parâmetros de campo,

porque, no trecho de 35 a 42 m, a taxa de avanço diminuiu bruscamente, como conseqüência, provavelmente, de um alargamento na seção transversal de fluxo nesse trecho. Vencido esse obstáculo, a taxa de avanço voltou ao normal. Isso mostra a importância da equação de infiltração d'água no solo obtida a partir do ajuste do avanço simulado ao medido, pois esse tipo de equação incorpora todas as variações em parâmetros de campo que contribuem para variações no tempo de avanço ao longo dos sulcos, que têm conseqüências nas estimativas do tempo de aplicação d'água, através do tempo de oportunidade de infiltração requerido no final da área, e da taxa de percolação, mediante um prognóstico do perfil de infiltração.

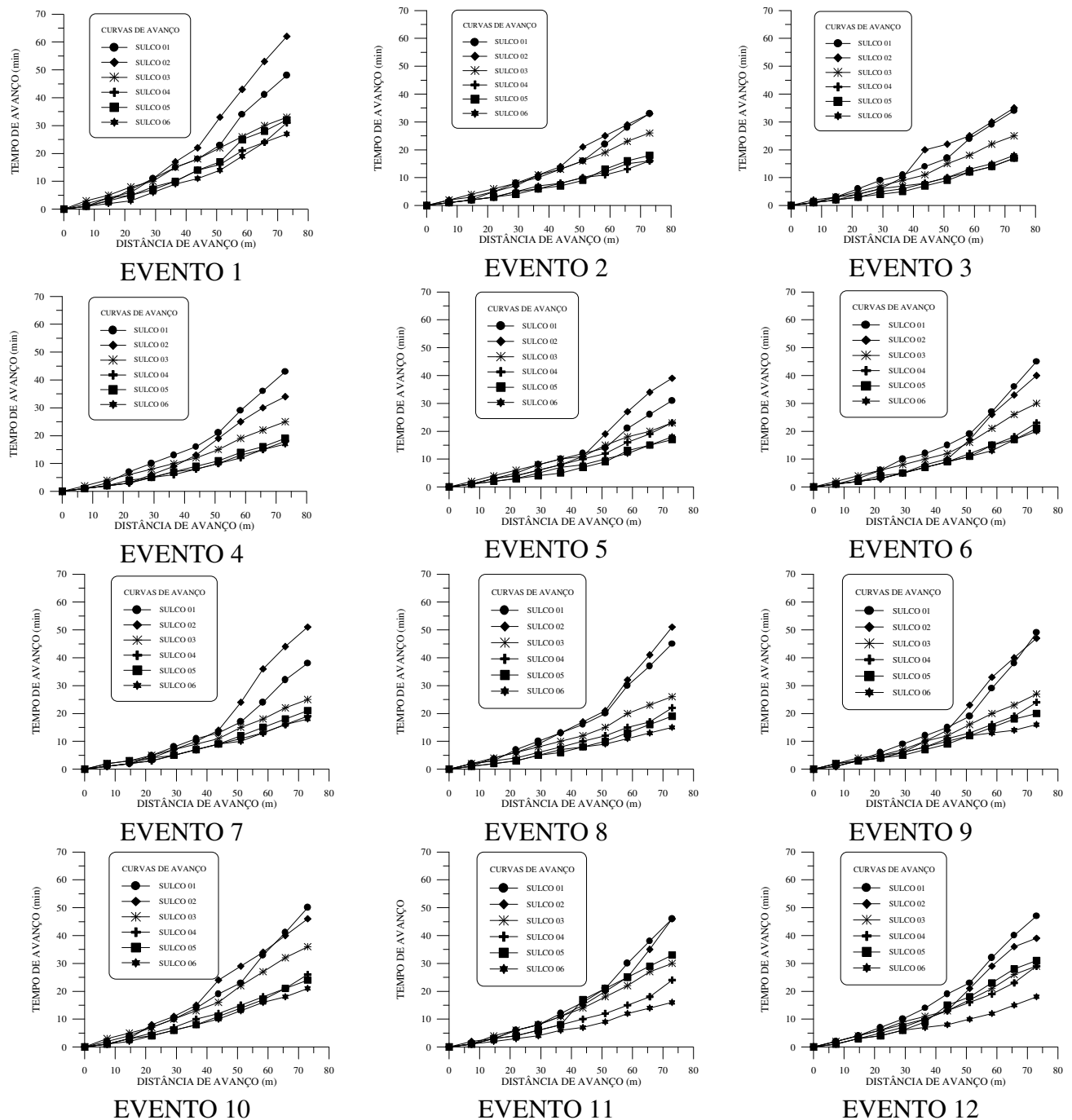


FIGURA 1. Variação espacial e temporal da fase de avanço, na irrigação por sulco, com comprimento de 73 m, declividade $0,004 \text{ m m}^{-1}$, vazão de entrada $1,12 \text{ L s}^{-1}$, no final da área irrigada, num solo franco-arenoso.

CONCLUSÕES

Ao longo do tempo e do espaço, os valores mínimo e máximo do tempo de avanço, do tempo de oportunidade e do tempo de aplicação foram 15 e 62 min; 1 e 517 min, e 19 e 533 min, respectivamente. Essas amplitudes nos referidos tempos geraram variações espaciais máximas, ao longo da estação de cultivo, iguais a 49,8%; 94,2% e 41,8% nos tempos de avanço, oportunidade de infiltração e aplicação, respectivamente. Espacialmente, as variações temporais máximas foram 26,3%; 89,9% e 71,6% nos tempos de avanço, oportunidade de infiltração e aplicação, respectivamente.

Esses valores mostram o quanto a heterogeneidade das características de infiltração, bem como da vazão, do perímetro molhado dos sulcos e da lâmina requerida ao longo do tempo e do espaço, afeta a otimização do tempo de aplicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, C.A.V. de. *Real - time solution of the inverse furrow advance problem*. 1992. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Irrigação Agrícola) - Universidade de Utah, Utah, 1992.
- AZEVEDO, C.A.V.; WALKER, W.R.; MERKLEY, G.P. Modelo de ondas cinemáticas na solução do problema inverso da irrigação por sulco em tempo real. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.1, n.1, p.35-41, 1997a.
- AZEVEDO, C.A.V.; WALKER, W.R.; MERKLEY, G.P. Otimização não-linear na solução do problema inverso da irrigação por sulcos em tempo real. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.1, p.43-9, 1997b.
- BERNARDO, S. *Manual de irrigação*. 6.ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1995. 657 p.
- CARVALHO, D.F. de; OLIVEIRA, L.F.C. de; PRUSKI, F.F.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. Influência do perfil geométrico do sulco no desempenho da irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., 1995, Viçosa. *Anais...* Viçosa: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1995.
- CARVALHO, D.F.; SOARES, A.A.; RAMOS, M.M.; MARTINS, J.H. Simulação das fases de avanço e recessão nas irrigações contínuas e intermitentes, utilizando o modelo zero-inércia. *Engenharia na Agricultura, Série Irrigação e Drenagem/Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais*, v.1, n.34, p.1-13, 1994.
- CARVALHO, J.J. de. *Efeito da variação espacial e temporal do tempo de aplicação no desempenho do sistema de irrigação por sulcos*. 1998. 102 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1998.
- COSTA NETO, P.L. de O. *Estatística*. 15.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1997. 264 p.
- ENCISO-MEDINA, J.; MARTIN, D.; EISENHAEUER, D. Infiltration model for furrow irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.124, n.2, p.73-80, 1998.
- RAGHUWANSHI, N.S.; WALLENDER, W.W. Modeling seasonal furrow irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.122, n.4, p.235-42, 1996.
- SANTANA, E.F. *Monitoramento sazonal do desempenho de um sistema de irrigação por sulco no perímetro irrigado de São Gonçalo - PB*. 1996. 96 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1996.
- SANTANA, E.F. de; AZEVEDO, C.A.V.; BARRETO, A.N.; DANTAS NETO, J.; BEZERRA, J.R.C. Monitoramento sazonal do desempenho de um sistema de irrigação por sulcos no perímetro irrigado de São Gonçalo - PB. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26., 1997,

Campina Grande. *Anais...* Campina Grande: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1997a.1 CD ROM.

SANTANA, E.F.; AZEVEDO, C.A.V.; BARRETO, A.N.; DANTAS NETO, J.; BEZERRA, J.R.C. Monitoramento espacial e temporal da fase de avanço no sulco na cultura do algodoeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 1., 1997, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: EMBRAPA, 1997b. p.368-71.

SCALOPPI, E.J. Sistema de irrigação por superfície. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v.12, n.139, p.12-26, 1986.

WALKER, W.R.; SKOGERBOE, G.V. *Surface Irrigation: theory and practice*. New Jersey: Prentice-Hall, 1987. 470 p.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.) *Application of soils physics*. New York: Academic Press, 1980. cap.13, p.319-44.