

DISEÑO DEL RIEGO CON INCREMENTO DE GASTO EN SURCOS CERRADOS

Ernesto Vázquez Fernández

Resumen

Se propone el riego con incremento de gasto en surcos cerrados como método alternativo para aumentar la uniformidad de distribución del riego continuo óptimo cuando las pendientes son mayores o iguales que 0.15%. El aumento de este indicador va del 2 al 5% para láminas mínimas infiltradas de 5 a 18 cm. El método sólo requiere dirigir el gasto de alimentación a cada una de las mitades de la parcela después de la etapa de avance del agua, con una labor de campo mínima.

Palabras clave: surcos cerrados, riego con incremento de gasto, riego continuo óptimo, uniformidad de distribución, duración de la etapa de avance.

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de eficiencias altas en el riego por gravedad ha motivado que los agricultores apliquen métodos de riego diferentes al tradicional con gasto constante (riego continuo), entre ellos, el de recorte (cut back) y el riego intermitente cuando los surcos son abiertos. Sakkas y Hart (1968) proponen un criterio para aplicar el riego con recorte al disminuir el número de surcos en cada tendido. Humpherys (en Jensen, 1980) propone un manejo sencillo del agua al dividir la parcela en dos partes iguales y hacer el recorte a la mitad del gasto inicial cuando el gasto de alimentación es constante. Bautista y Wallender (1993b) presentan una estrategia económica que minimiza el costo de agua y de labor en la parcela al emplear riego con recorte de caudal. Camacho et al. (1997) indican eficiencias de aplicación del 53 al 64% del riego con recorte según tres modelos numéricos en surcos abiertos. Con un modelo numérico similar al empleado en

este trabajo para surcos abiertos, calibrado con ensayos de laboratorio en un surco corto de 52.5 m de longitud, el autor calculó eficiencias teóricas máximas del 67% para el riego con recorte y del 70% para el riego intermitente (Vázquez, 1996). En cambio, cuando los surcos son cerrados, la eficiencia de aplicación del riego continuo bien diseñado alcanza eficiencias del 90% (Rendón et al., 1995), por lo que es difícil superarla; no obstante, conforme crece la pendiente y disminuye la conductividad hidráulica, se hace menor la eficiencia (Vázquez y de la Cruz, 1998) y con el incremento de gasto es posible aumentarla. La eficiencia de aplicación para surcos cerrados, si se satisface la dosis o lámina mínima requerida por la planta, equivale a la uniformidad de la distribución de las láminas de agua infiltradas (UD), definida como la relación de la lámina mínima infiltrada en algún lugar del surco entre la lámina media infiltrada a lo largo del mismo (Burt et al., 1997).

Investigador del Instituto de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria. Apdo. Postal 70-472. Coyoacán 04510. México, D.F. México.

Fax: 01 (5) 616 27 98 Telf.: 01 (5) 622 33 45 ext. 18. E-mail: ernesvf@servidor.unam.mx

Artículo recibido el 27 de julio de 1998, recibido en forma revisada el 25 de enero de 1999, el 30 de abril de 1999 y el 1 de marzo de 2000 y aceptado para su publicación el 25 de septiembre de 2000. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

Este trabajo incluye un criterio de manejo basándose en los resultados de un modelo hidrodinámico completo para riego con surcos cerrados (Vázquez y Gracia, 1998) que reproduce todas las fases del riego (avance, almacenamiento, agotamiento y receso), y que emplea la fórmula de Green y Ampt para calcular el gasto de infiltración vertical a través del perímetro mojado de la sección transversal del surco, un gasto base pequeño (0.05 l/s) para determinar las condiciones iniciales de los calados y un solo coeficiente de aspereza de Manning. Se presenta la comparación de la UD máxima para el riego con incremento de gasto (RIG) y la UD máxima del riego continuo, aquí llamado riego continuo óptimo (RCO), producida con un gasto mayor al del RIG. Según los resultados teóricos de 28 surcos que se incluyen en el apéndice, la UD del RIG siempre es mayor que la UD del RCO, por lo que el método que se propone puede ser atractivo para el agricultor, con incrementos de la UD que van del 2 al 5%. El contraste del RIG con el riego continuo (RC) empleando el mismo gasto en ambos produciría incrementos de la eficiencia de aplicación mayores, del 5 al 12%, por lo que sería más favorable para el RIG (ver figura A.1 del apéndice). Se prefiere la comparación con el RCO por ser imparcial; a pesar de que el gasto sea diferente. Se entiende que el RC en estas condiciones no es el que produce la máxima UD, por lo que, para diferenciarlo del RCO, se le denota como RC en la figura A.1. El método ya fue aplicado una vez en el campo sin presencia de desbordamientos; pero, por la falta de mediciones en la distribución de las láminas de infiltración sería conveniente realizar posteriormente una evaluación rigurosa del método en el campo.

RIEGO CON INCREMENTO DE GASTO

El aspecto práctico de usar un gasto constante sobre una batería de surcos abiertos también puede aprovecharse para surcos cerrados, lográndose un aumento en la UD. El procedimiento consiste en regar la batería completa de surcos con un gasto constante hasta que termina la etapa de avance del agua (tiempo que tarda en llegar el agua desde la cabecera al extremo inferior del surco), como en el riego continuo; después, el gasto de alimentación constante se aplica en una mitad de la batería de surcos, lo que hace que el gasto se incremente al doble hasta un tiempo de riego determinado previamente para infiltrar la dosis de diseño, que generalmente se presenta en torno a 2/3 de la longitud del surco en las simulaciones numéricas, posterior-

mente se aplica el gasto constante en la otra mitad de la parcela, dejándose de regar la primera, hasta un tiempo adicional igual a la diferencia del tiempo de riego de la primera mitad menos la duración de la etapa de avance, con ello, también en la segunda mitad de surcos el gasto se incrementa al doble. En las figuras 1 y 2 se muestran los hidrogramas de entrada en las mitades de la batería de surcos; en la figura 1 Q_i es el gasto inicial, t_a es la duración de la etapa de avance y T_r el tiempo de riego; en la figura 2, siendo Q_i el mismo gasto inicial, se observa que el riego es con incremento de gasto discontinuo y que el tiempo de riego ($2T_r - t_a$) de la batería de surcos se alcanza después de la discontinuidad. El número de surcos en cada batería se determina de acuerdo con el gasto óptimo, es decir, aquél que produce la máxima eficiencia. Según los resultados de 28 simulaciones numéricas que se muestran en el apéndice, el gasto óptimo inicial para el RIG en cada surco es menor que el del RCO. Se emplearon surcos con pendientes de 0.15 a 0.3%, conductividades hidráulicas de 0.013 a 0.083 cm/min correspondientes a texturas de suelo de franca a arenosa (Cuenca, 1989), secciones transversales parabólicas y un valor constante del coeficiente de aspereza de Manning. Asimismo, un intervalo de valores de las diferencias de tensiones del suelo (antes y después del riego) que, multiplicadas por las diferencias de humedad del mismo, proporciona el otro parámetro de la fórmula de Green y Ampt (el primero es la conductividad hidráulica). La UD se calculó con la relación Z_m/Z_p , donde Z_m es la lámina mínima infiltrada y Z_p el promedio de ellas a lo largo del surco. Se insiste en que cuando se satisface la dosis o la lámina mínima requerida por la planta (como se supone en todas las simulaciones numéricas del apéndice) en surcos cerrados, la eficiencia de aplicación es idéntica a la uniformidad de distribución.

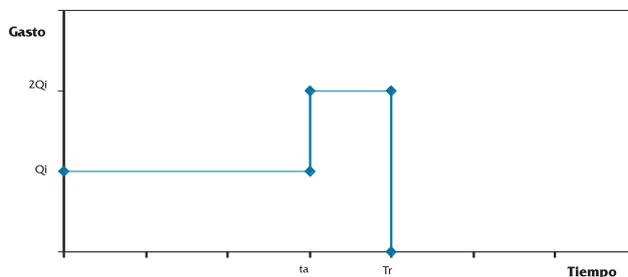


Figura 1. Hidrograma para el riego con incremento de gasto normal

En la figura 3 se concentran los resultados de las UD de las tablas del apéndice con dosis de 5 a 18 cm, donde se observa que la relación conveniente entre el tiempo de riego (T_r) y la duración de la

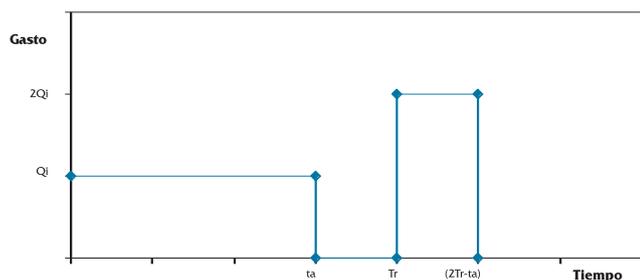


Figura 2. Hidrograma para el riego con incremento de gasto discontinuo

etapa de avance (t_a) para producir la máxima UD es 1.33. Con esta relación, que es la mostrada en las figuras 1 y 2, los calados máximos al final del surco no ocasionan desbordamientos. Cabe aclarar que el gasto del RCO es mayor que el del RIG para $Tr/t_a=1.33$, pero es muy próximo o igual al del RIG para $Tr/t_a=1.67$ (ver tablas A.2 y A.6 del apéndice).

GEOMETRÍA DE LOS SURCOS

En la modelación del riego por surcos es común calcular la geometría con las siguientes expresiones (Bautista y Wallender, 1993a).

$$A = \sigma_1^1 y \sigma^2 \quad (1)$$

$$R = \rho_1 A \rho^2 \quad (2)$$

Donde A es el área hidráulica del surco, R es el radio hidráulico, y el calado del flujo y σ_1 , σ_2 , ρ_1 , ρ_2 son parámetros que se determinan mediante un

ajuste por regresión lineal simple. Con las ecuaciones 1 y 2 se obtiene el perímetro mojado (P) con la relación $P = A/R$.

En la tabla 1 se muestran los parámetros de las secciones transversales empleadas en este trabajo, donde los correspondientes a los surcos Schwankl y Tarboton fueron tomados de Bautista y Wallender (1993a), el llamado Córdoba se tomó de Camacho et al. (1997) y el surco Pb es una parábola obtenida para una profundidad de 30 cm y 75 cm de separación en los bordes. La figura 4 muestra la variación del perímetro mojado con la profundidad del surco. El surco Tarboton presenta los mayores perímetros mojados porque es menos profundo y más ancho.

Surco	σ_1	σ_2	ρ_1	ρ_2
Schwankl	1	1.696	0.333	0.508
Tarboton	1.5	1.715	0.3145	0.5335
Pb	0.913	1.5	0.43	0.555
Córdoba	1.0409	1.6383	0.4981	0.596

Tabla 1. Parámetros de los surcos

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al aumentar la UD del RIG los tiempos de riego en las parcelas son menores que con el RCO. El incremento de este indicador se explica porque durante el proceso de infiltración, en la fase de avance, las láminas son mayores en la cabecera; después, en la fase de almacenamiento, por ser ma-

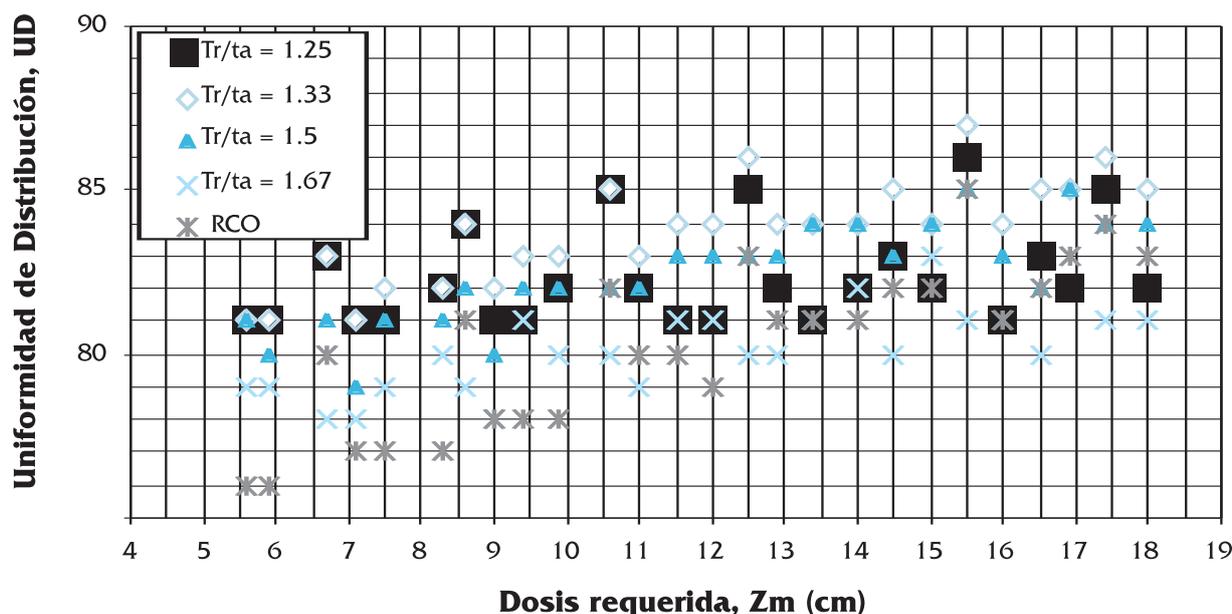


Figura 3. UD para diferentes relaciones de Tr/t_a y el RCO

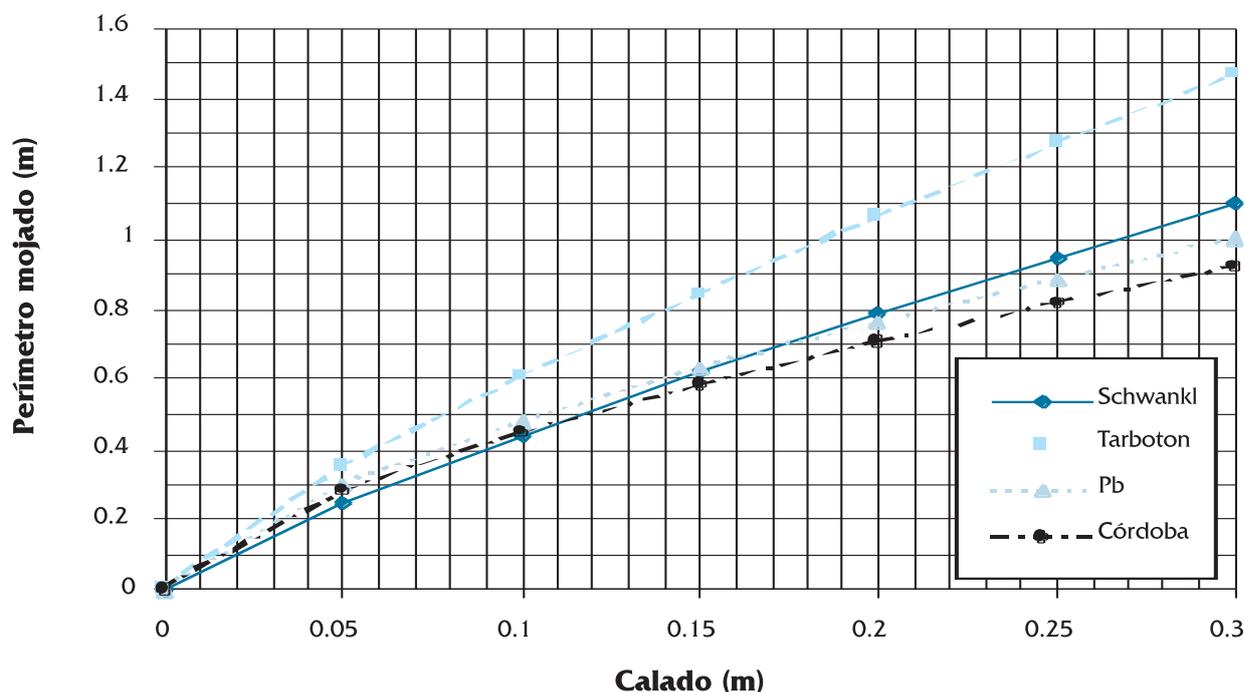


Figura 4. Perímetros mojados de los surcos

por el gasto de alimentación, los calados y los perímetros mojados en la cola del surco aumentan, así como el gasto de infiltración vertical; finalmente, en la fase de receso, el gasto de infiltración vertical es mayor en la cola del surco compensando la distribución de las láminas. En las simulaciones numéricas se ha comprobado que el calado máximo al final del surco sea menor que la profundidad del mismo, lo cual hace suponer que en el campo no habrá desbordamientos.

En las figuras 5 y 6 se presentan las distribuciones de las láminas de infiltración al final de las fases de avance, almacenamiento y receso a lo largo del surco para el último ejemplo del RCO (tabla A.2 del apéndice) y del RIG (tabla A.3), donde los gastos óptimos son de 2 l/s para el RCO y de 1.5 l/s para el RIG, con duraciones de la etapa de avance de 65 y 129 min, respectivamente, y tiempos de riego de 165 min para el RCO y 172 min para el RIG normal. La dosis es de 25 cm en un surco de sección transversal parabólica con ancho de 65 cm en los bordes, pendiente de 0.18% y longitud de 110 m sobre un suelo con una conductividad hidráulica (para el modelo numérico) de 0.04 cm/min (ver tabla A.1). En la figura 7 se muestran los perfiles del flujo para tiempos iguales, tanto para el RC como el RIG. De manera clara se observa que al final del proceso de riego la distribución de las láminas infiltradas en el RIG (figura 6) es mejor que la del RCO (figura 5). Además, en la figura 6 se observa

que la lámina de infiltración mínima se presenta aproximadamente a 2/3 de la longitud del surco, y en la figura 7 que los calados más altos corresponden al RIG normal al final de la fase de almacenamiento (t=172 min).

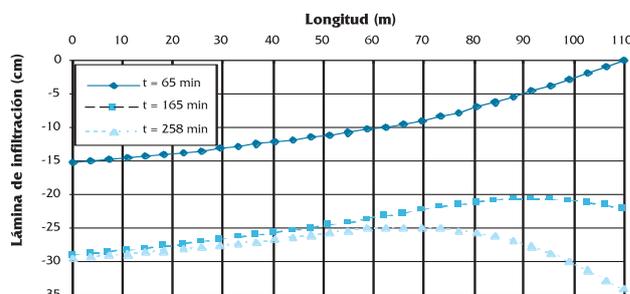


Figura 5. Láminas de infiltración para el RCO

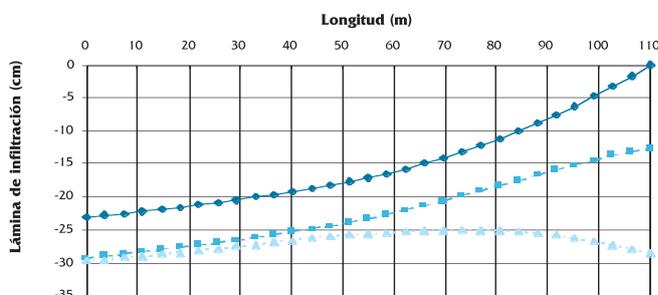


Figura 6. Láminas de infiltración para el RIG

La simulación numérica del último ejemplo de la tabla A.3, con duración de la etapa de avance de 129 min, corresponde al diseño efectuado para

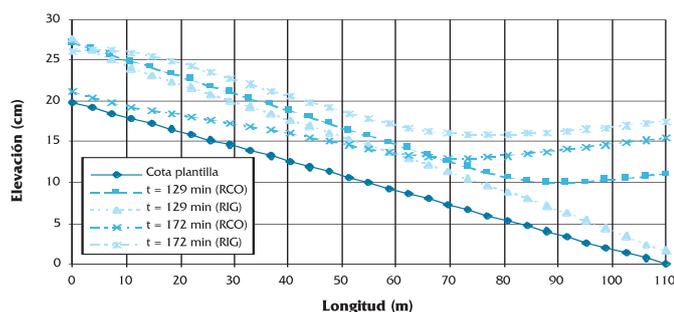


Figura 7. Perfiles del flujo

aplicar el RIG en una parcela con cultivo de trigo donde se realizaron seis tendidos de ocho surcos cada uno. La mejor aproximación de la duración de la fase de avance se presentó en el segundo tendido, donde la duración real promedio fue de 135 min; la peor, en el primero, donde la duración fue de 155 min, esto es, 17% de error; sin embargo, con un tiempo de riego de 213 min no hubo desbordamientos en el primer tendido (tampoco en los otros cinco). No se midieron las profundidades del agua infiltrada.

Los incrementos en las UD entre el RIG y el RCO, según los valores de las tablas A.3 y A.2 del apéndice, son del 2 al 5%. Si bien no es una diferencia notable, los ahorros de agua podrían ser del orden del 6%.

Las pendientes en los ejemplos del apéndice varían de 0.15 a 0.3%; sin embargo, este último valor no es un límite superior, pudiendo aplicarse el RIG con pendientes mayores. El valor de 0.15% sí representa un límite inferior porque conforme disminuye la pendiente las eficiencias del RCO son mayores y puede no ser conveniente aplicar el RIG.

Con el fin de evitar la erosión del surco, todas las simulaciones numéricas del apéndice cumplen con la recomendación de Booher (1974) de evitar gastos, en l/s, mayores que la relación práctica $0.3/S$, donde S es la pendiente del surco en %.

CONCLUSIONES

La práctica propuesta ha presentado mejores resultados cuando las pendientes son mayores o iguales de 0.15% y las texturas de los suelos de franca a arenosa.

Por los resultados de las simulaciones numéricas, se recomienda una relación entre el tiempo de riego con incremento de gasto normal y la duración de la etapa de avance (T_r/t_a) igual a 1.33, por haber

sido la que ha producido las máximas uniformidades de distribución y los mínimos riesgos de desbordamientos.

Los resultados presentados son teóricos, por lo que es necesario efectuar una evaluación del riego con incremento de gasto en el campo. El método se aplicó en una parcela con cultivo de trigo y no se presentaron desbordamientos, lo que no significa que en otros casos se eviten; por tanto, es conveniente determinar con la mayor aproximación los parámetros de infiltración del suelo, sobre todo la conductividad hidráulica.

APÉNDICE. TABLAS DE RESULTADOS

El modelo numérico requiere de los siguientes datos: longitud del surco (L), gasto inicial (Q_i), pendiente longitudinal (S), geometría de la sección transversal (que se identifica con el nombre del surco de la tabla 1 del texto), profundidad del surco (P_s), separación entre surcos (D), el coeficiente de aspereza de Manning y, como características del suelo, la conductividad hidráulica (K), la humedad inicial en lámina de agua, la diferencia de tensiones antes y después del riego y la diferencia de humedades. El producto de la diferencia de tensiones por la diferencia de humedades es el parámetro λ de la fórmula teórica de Green y Ampt (Chu, 1978)

$$V_z = K \left(1 + \frac{\lambda}{Z} \right) \quad (A.1)$$

En esta ecuación, además de los parámetros K y λ mencionados arriba, V_z es la velocidad de infiltración vertical y Z es la lámina de infiltración acumulada.

Al inicio del cálculo, cuando comienza la acumulación de la lámina de infiltración, el valor que toma Z es la humedad inicial del suelo en lámina de agua; no es igual a cero porque el suelo siempre retiene alguna humedad. Una manera de obtenerla es a través del producto de la profundidad radicular del cultivo por la relación volumétrica inicial de la humedad del suelo; posteriormente la lámina de infiltración se acumula sobre esta humedad inicial hasta llegar a ser, al menos, igual a dicha humedad inicial más la dosis requerida (Z_m) en algún tramo de la longitud total del surco. La teoría de la ecuación A.1 supone que cuando se alcanza esta suma de láminas la relación volumétrica del suelo, hasta la profundidad radicular, se encuentra a capacidad de campo. El gasto de infiltración vertical por unidad de longitud se calcula como el producto de la

velocidad de infiltración con el perímetro mojado del surco.

Los datos principales para 28 surcos se indican en la tabla A.1. En todos ellos se consideró un coeficiente de aspereza de Manning igual a 0.05 $s/m^{1/3}$ y una humedad inicial de 10 cm que no se anotan en la tabla. Esta última pudiera ser alta en algunos casos, pero no afecta a los resultados de las diferencias en las UD. El autor demostró que el parámetro de la humedad inicial es el de menor influencia en la determinación de la eficiencia de aplicación (Vázquez, 1996).

En la tabla A.2 se presentan los resultados de las UD para el RCO. El gasto óptimo se anota como Q_{ic} , el tiempo de riego como Tr_c y el calado máximo al final del surco como Y_{mx} . Se incluyen también los volúmenes de entrada (Ve) y de infiltración (Vi), los cuales son muy aproximados y satisfacen la ecuación de continuidad con errores menores al 2%, no sólo en esta tabla sino en las restantes.

La tabla A.3 muestra los resultados para el RIG con la relación entre el tiempo de riego (Tr) y la duración de la etapa de avance (ta) igual a 1.33. Se anota también el tirante máximo al final del surco, que debe ser menor a la profundidad Ps anotada

en la tabla A.1 para que no haya desbordamientos, es decir, debe existir un bordo libre (BL) que se indica en la tabla. En la última columna se presenta el incremento de la UD con respecto a la del RCO de la tabla A.2.

En las tablas A.4, A.5 y A.6 se presentan los resultados del RIG para tres relaciones diferentes de Tr/ta , donde las UD son iguales o menores a las de la tabla A.3, lo cual se visualiza en la figura 3 del texto.

Finalmente, en la tabla A.7 se presentan los resultados de las simulaciones numéricas cuando el gasto del riego continuo (RC) es el mismo del RIG(1.33), es decir, para la relación $Tr/ta=1.33$ (tabla A.3); asimismo, en la figura A.1 se muestra la comparación de las UD para el RIG(1.33), las del RCO y las del RC cuando el gasto es el mismo del RIG(1.33). Obsérvese que las UD para el RC disminuyen de manera notable con respecto a las del RCO, por lo que el empleo del RIG(1.33), y sólo para esta relación, sería aún más recomendable, ya que si la relación aumenta, como puede verse en la figura 3 del texto para el RIG(1.67) y el RCO (ambos con el mismo gasto) que para dosis mayores de 12 cm la UD del RCO es, en general, mayor que la del RIG(1.67).

Nº Surco	Nombre	S (%)	L (m)	D (cm)	Ps (cm)	K (cm/m)	λ (cm)	Zm (cm)
1	Schwankl	0.15	275	75.1	31.0	0.013	231	18.0
2	Córdoba	0.1575	265	74.8	27.5	0.017	163	17.4
3	Tarboton	0.1631	250	100.3	26.8	0.019	122	16.9
4	Pb	0.1688	240	75.0	30.0	0.022	139	16.5
5	Schwankl	0.1744	230	75.1	31.0	0.024	121	16.0
6	Córdoba	0.18	220	74.8	27.5	0.027	100	15.5
7	Tarboton	0.1856	210	100.3	26.8	0.030	72	15.0
8	Pb	0.1913	200	75.0	30.0	0.032	92	14.5
9	Tarboton	0.1962	195	100.3	26.8	0.035	60	14.0
10	Schwankl	0.2025	190	75.1	31.0	0.038	72	13.4
11	Pb	0.2081	185	75.0	30.0	0.040	69	12.9
12	Córdoba	0.2188	180	74.8	27.5	0.043	54	12.5
13	Tarboton	0.2194	175	100.3	26.8	0.045	40	12.0
14	Schwankl	0.225	170	75.1	31.0	0.048	53	11.5
15	Pb	0.2306	165	75.0	30.0	0.051	48	11.0
16	Córdoba	0.2363	160	74.8	27.5	0.053	40	10.6
17	Tarboton	0.2419	155	100.3	26.8	0.056	30	9.9
18	Schwankl	0.2475	150	75.1	31.0	0.059	39	9.4
19	Pb	0.2531	145	75.0	30.0	0.061	38	9.0
20	Córdoba	0.2588	140	74.8	27.5	0.064	31	8.6
21	Tarboton	0.2644	135	100.3	26.8	0.066	24	8.3
22	Schwankl	0.27	130	75.1	31.0	0.069	32	7.5
23	Pb	0.2756	125	75.0	30.0	0.072	31	7.1
24	Córdoba	0.2813	120	74.8	27.5	0.074	26	6.7
25	Tarboton	0.2869	115	100.3	26.8	0.077	20	5.9
26	Schwankl	0.2925	105	75.1	31.0	0.080	29	5.6
27	Córdoba	0.3	100	74.8	27.5	0.083	24	4.7
28	Pb	0.18	110	65.0	22.55	0.040	155	25.0

Tabla A.1. Datos principales

DISEÑO DEL RIEGO CON INCREMENTO DE GASTO EN SURCOS CERRADOS

Nº Surco	Q _{ic} (l/s)	t _a (min)	Tr _c (min)	Y _{mx} (cm)	Ve (m ³)	Vi (m ³)	UD (%)
1	3.40	96	220	21.2	44.88	44.82	83
2	2.81	109	240	18.6	40.46	40.46	84
3	2.80	132	305	16.7	51.24	51.27	83
4	2.74	96	220	16.9	36.12	36.17	82
5	2.65	92	214	18.4	33.95	34.03	81
6	2.33	96	215	16.2	30.06	30.08	85
7	2.25	121	285	14.5	38.47	38.43	82
8	2.19	88	200	14.0	26.28	26.28	82
9	2.07	115	270	13.6	33.53	33.48	81
10	2.10	80	190	15.4	23.94	23.88	81
11	1.95	83	190	12.7	22.23	22.26	81
12	1.75	85	193	13.5	20.27	20.23	83
13	1.68	111	265	12.0	26.71	26.62	79
14	1.80	72	172	13.5	18.58	18.56	80
15	1.63	75	175	11.2	17.12	17.11	80
16	1.52	74	170	11.9	15.50	15.47	82
17	1.52	90	215	10.6	19.61	19.54	78
18	1.51	62	150	11.6	13.59	13.59	78
19	1.45	60	140	9.7	12.18	12.18	78
20	1.35	59	137	10.6	11.06	11.10	81
21	1.31	79	190	9.5	14.93	14.85	77
22	1.32	49	120	10.3	9.50	9.50	77
23	1.28	46	110	8.5	8.45	8.44	77
24	1.20	44	105	9.3	7.56	7.54	80
25	1.19	52	130	8.2	9.28	9.24	76
26	1.15	34	85	9.0	5.80	5.77	76
27	1.07	30	75	7.8	4.49	4.48	79
28	2.00	65	165	15.4	19.80	19.73	90

Tabla A.2. Resultados y Uniformidad de Distribución para el RCO

Nº Surco	Q _i (l/s)	t _a (min)	Tr (min)	Y _{mx} (cm)	BL (cm)	Ve (m ³)	Vi (m ³)	UD (%)	Δ(UD) (%)
1	2.55	172	229	23.6	7.4	43.86	43.78	85	2
2	2.30	175	233	23.6	3.9	40.11	40.03	86	2
3	2.25	224	299	21.5	5.3	50.42	50.30	85	2
4	2.20	160	214	20.6	9.4	35.24	35.20	85	3
5	2.10	156	208	21.7	9.3	32.81	32.72	84	3
6	1.95	152	202	21.4	6.10	29.51	29.45	87	2
7	1.87	201	267	19.8	7.00	37.50	37.34	84	2
8	1.83	141	188	18.8	11.20	25.75	25.67	85	3
9	1.75	186	248	19.0	7.80	32.50	32.33	84	3
10	1.74	131	175	19.5	11.50	22.81	22.73	84	3
11	1.67	129	172	17.8	12.20	21.52	21.53	84	3
12	1.52	131	174	19.2	8.30	19.81	19.72	86	3
13	1.47	172	230	17.8	9.00	25.31	25.13	84	5
14	1.54	115	153	18.1	12.90	17.63	17.54	84	4
15	1.42	117	156	16.4	13.60	16.59	16.48	83	3
16	1.35	112	149	17.7	9.80	15.07	14.97	85	3
17	1.35	139	186	16.4	10.40	18.79	18.64	83	5
18	1.33	97	129	16.6	14.40	12.83	12.74	83	5
19	1.28	94	125	14.9	15.10	12.04	11.95	82	4
20	1.22	89	118	16.1	11.40	10.80	10.72	84	3
21	1.20	115	153	15.2	11.60	13.78	13.63	82	5
22	1.18	76	102	15.0	16.00	8.99	8.93	82	5
23	1.15	72	96	13.3	16.70	8.27	8.19	81	4
24	1.10	66	88	14.3	13.20	7.29	7.23	83	3
25	1.10	78	104	13.2	13.60	8.57	8.48	81	5
26	1.05	52	69	13.0	18.00	5.44	5.40	81	5
27	1.00	44	58	12.1	15.40	4.34	4.31	81	2
28	1.50	129	172	18.3	3.95	19.31	19.14	94	4

Tabla A.3. Resultados y Uniformidad de Distribución para el RIG (Tr/t_a = 1.33)

Nº Surco	Qi (l/s)	ta (min)	Tr (min)	Ymx (cm)	Ve (m³)	Vi (m³)	UD (%)
1	2.25	226	282	21.7	45.72	45.55	82
2	2.10	216	270	21.6	40.89	40.75	85
3	2.05	281	352	19.8	51.91	51.69	82
4	2.00	201	252	18.8	36.24	36.11	83
5	1.90	198	248	20.0	33.95	33.77	81
6	1.81	184	230	19.6	29.92	29.80	86
7	1.72	251	314	18.4	38.91	38.65	82
8	1.68	176	220	17.3	26.64	26.48	83
9	1.62	231	289	17.7	33.70	33.45	82
10	1.60	165	206	18.1	23.69	23.52	81
11	1.55	159	199	16.4	22.20	22.05	82
12	1.44	154	192	17.6	19.92	19.77	85
13	1.38	211	264	16.6	26.25	25.98	81
14	1.43	143	178	16.9	18.34	18.18	81
15	1.35	137	171	15.1	16.67	16.51	82
16	1.30	127	159	16.2	14.88	14.75	85
17	1.29	164	205	15.2	19.06	18.85	82
18	1.25	119	148	15.5	13.35	13.21	81
19	1.23	108	135	13.6	11.97	11.86	81
20	1.18	101	126	14.8	10.68	10.56	84
21	1.15	137	171	14.2	14.13	13.93	82
22	1.13	90	112	13.9	9.12	9.02	81
23	1.10	86	107	12.4	8.50	8.39	81
24	1.07	75	94	13.1	7.20	7.12	84
25	1.07	89	112	12.2	8.59	5.48	81
26	1.02	59	74	12.0	5.40	5.34	81
27	0.98	50	62	11.2	4.36	4.31	82
28	1.32	175	219	17.1	20.78	20.54	90

Tabla A.4. Resultados y Uniformidad de Distribución para el RIG ($Tr/ta = 1.25$)

Nº Surco	Qi (l/s)	ta (min)	Tr (min)	Ymx (cm)	Ve (m³)	Vi (m³)	UD (%)
1	2.98	124	186	27.6	44.43	44.38	84
2	2.60	131	197	26.7	40.90	40.88	84
3	2.58	161	241	24.2	49.77	49.75	85
4	2.46	124	185	24.6	36.46	36.38	82
5	2.40	115	172	25.2	33.02	32.95	83
6	2.15	118	177	24.4	30.38	30.37	85
7	2.07	152	228	22.2	37.79	37.71	84
8	2.02	109	163	21.8	26.36	26.32	83
9	1.93	140	210	21.3	32.48	32.41	84
10	1.93	100	149	22.2	23.04	23.01	84
11	1.84	98	147	20.2	21.58	21.61	83
12	1.65	102	152	21.7	20.12	20.08	83
13	1.59	133	200	19.8	25.42	25.32	83
14	1.68	88	132	20.4	17.79	17.79	88
15	1.54	90	135	18.5	16.68	16.64	82
16	1.45	88	132	20.1	15.27	15.19	82
17	1.45	107	161	18.1	18.64	18.56	82
18	1.42	77	116	18.6	13.16	13.13	82
19	1.37	74	111	17.0	12.14	12.08	80
20	1.29	71	107	18.1	11.04	10.99	82
21	1.26	94	140	16.9	14.17	14.07	81
22	1.25	61	92	16.9	9.17	9.13	81
23	1.22	56	85	14.9	8.27	8.24	79
24	1.16	52	78	15.9	7.27	7.24	81
25	1.15	62	94	14.5	8.62	8.57	80
26	1.11	40	60	14.3	5.35	5.35	81
27	1.04	35	53	13.5	4.38	4.39	80
28	1.71	95	142	21.0	19.45	19.34	95

Tabla A.5. Resultados y Uniformidad de Distribución para el RIG ($Tr/ta = 1.5$)

DISEÑO DEL RIEGO CON INCREMENTO DE GASTO EN SURCOS CERRADOS

Nº Surco	Qi (l/s)	ta (min)	Tr (min)	Ymx (cm)	Ve (m³)	Vi (m³)	UD (%)
1	3.40	96	159	30.9	45.49	45.44	81
2	2.81	109	182	29.7	43.02	43.04	81
3	2.80	132	220	26.5	51.66	51.74	83
4	2.74	96	160	27.0	36.86	36.82	80
5	2.65	92	153	28.2	34.09	34.02	81
6	2.33	96	160	26.6	31.25	31.30	81
7	2.25	121	202	24.0	38.10	38.10	83
8	2.19	88	147	24.4	27.11	27.05	80
9	2.07	115	191	23.0	33.19	33.17	82
10	2.10	80	133	24.6	23.52	23.47	81
11	1.95	84	140	23.1	22.87	22.81	80
12	1.75	85	141	23.9	20.79	20.75	80
13	1.68	111	185	21.3	26.13	26.08	81
14	1.80	72	120	22.3	18.16	18.16	81
15	1.63	75	126	20.5	17.20	17.16	79
16	1.52	75	124	21.8	15.87	15.82	80
17	1.52	90	149	19.4	19.04	19.00	80
18	1.51	62	104	19.9	13.18	13.21	81
19	1.45	60	100	18.3	12.19	12.17	60
20	1.35	59	99	19.5	11.24	11.22	79
21	1.31	79	132	18.1	14.49	14.43	80
22	1.32	49	82	18.0	9.08	9.07	79
23	1.28	46	76	15.9	8.20	8.21	78
24	1.20	45	74	17.5	7.50	7.46	78
25	1.19	52	87	15.4	8.67	8.64	79
26	1.15	34	56	15.4	5.45	5.46	79
27	1.07	30	50	14.5	4.47	4.47	78
28	1.86	77	129	23.0	20.17	20.09	89

Tabla A.6. Resultados y Uniformidad de Distribución para el RIG ($Tr/ta = 1.67$)

Nº Surco	Qic (l/s)	ta (min)	Trc (min)	Ymx (cm)	Ve (m³)	Vi (m³)	UD (%)
1	2.55	172	311	16.0	47.58	47.47	78
2	2.30	175	311	15.2	42.92	42.81	81
3	2.25	224	412	13.6	55.62	55.46	77
4	2.20	160	289	12.8	38.15	38.07	78
5	2.10	156	287	14.2	36.16	36.04	77
6	1.95	152	273	13.3	31.94	31.84	80
7	1.87	201	377	12.2	42.30	42.10	75
8	1.83	141	258	11.4	28.33	28.22	77
9	1.75	186	352	11.5	36.96	36.76	75
10	1.74	131	245	12.3	25.58	25.47	75
11	1.67	129	238	10.5	23.85	23.73	75
12	1.52	131	239	11.4	21.80	21.67	78
13	1.47	172	330	10.3	29.11	28.89	73
14	1.54	115	216	15.6	19.96	19.85	74
15	1.42	117	217	9.4	18.49	18.36	74
16	1.35	112	205	10.1	16.61	16.49	77
17	1.35	139	268	9.2	21.71	21.53	71
18	1.33	97	184	10.0	14.68	14.58	73
19	1.28	94	175	8.3	13.44	13.33	73
20	1.22	89	163	9.1	11.93	11.83	76
21	1.20	115	222	8.4	15.98	15.82	71
22	1.18	76	144	8.8	10.20	10.11	72
23	1.15	72	134	7.3	9.25	9.16	73
24	1.10	66	120	7.8	7.92	7.85	77
25	1.10	78	147	7.1	9.70	9.60	71
26	1.05	52	96	7.6	6.05	5.99	73
27	1.00	44	78	6.7	4.68	4.63	76
28	2.00	65	165	15.4	19.80	19.73	90

Tabla A.7. Resultados y Uniformidad de Distribución para el RC

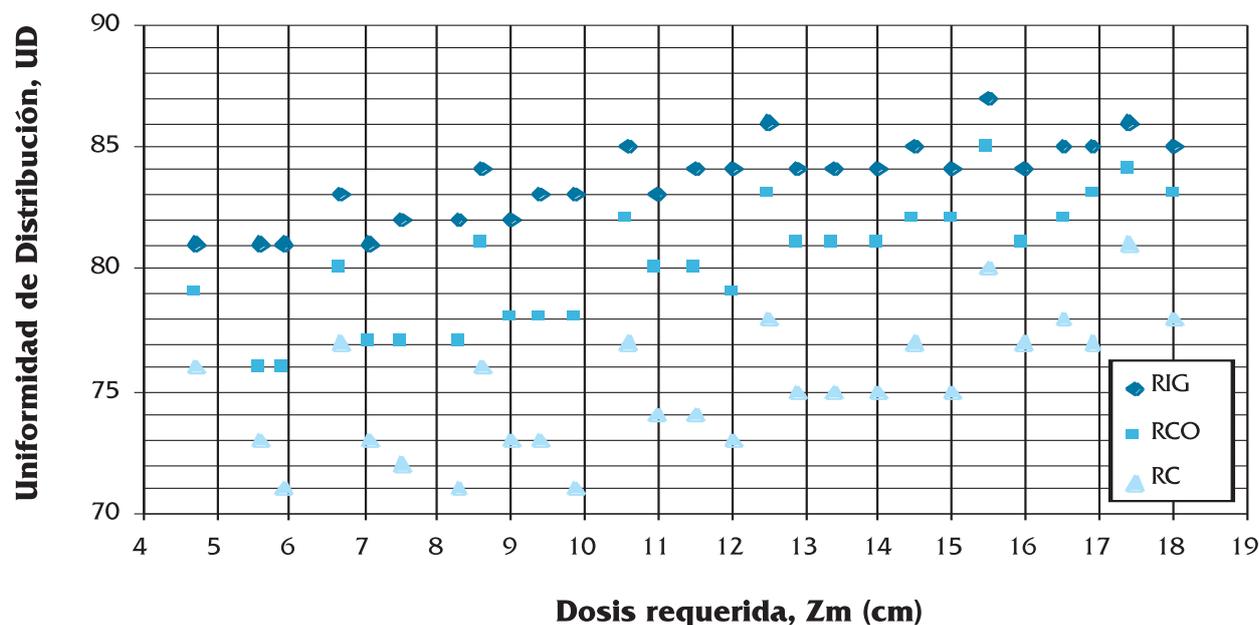


Figura A.1. Valores de UD para el RIG(1.33), RCO y RC con el mismo gasto del RIG(1.33)

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Jesús Gracia Sánchez por sus opiniones y sugerencias.

LISTA DE SÍMBOLOS

- A** área hidráulica del surco (m²)
- BL** bordo libre en el surco (cm)
- D** separación entre surcos (m)
- K** conductividad hidráulica (cm/min)
- L** longitud del surco (m)
- P** perímetro mojado del surco (m)
- Ps** profundidad del surco (cm)
- Qi** gasto de inicio del riego con incremento de gasto (l/s)
- Qic** gasto de inicio del riego continuo (l/s)
- R** radio hidráulico del surco (m)
- RC** riego continuo
- RCO** riego continuo óptimo
- RIG** riego con incremento de gasto
- RIG (1.33)** riego con incremento de gasto para una relación de Tr/ta = 1.33
- S** pendiente longitudinal del surco (%)
- ta** duración de la etapa de avance del agua (min)
- Tr** tiempo del riego con incremento de gasto normal (min)
- Trc** tiempo de riego para el riego continuo óptimo (min)
- UD** uniformidad de distribución (%)

- Ve** volumen de entrada al surco (m³)
- Vi** volumen de infiltración en el surco (m³)
- Vz** velocidad de infiltración vertical en la fórmula de Green y Ampt (cm/min)
- y** calado del flujo (m)
- Ymx** calado máximo del flujo en el último tramo del surco (cm)
- Z** lámina de infiltración acumulada en la fórmula de Green y Ampt (cm)
- Zm** dosis requerida por aplicar (cm)
- Δ(UD)** incremento de uniformidad de distribución (%)
- λ** parámetro de la fórmula de Green y Ampt (cm)
- ρ₁** coeficiente para determinar el radio hidráulico
- ρ₂** exponente para determinar el radio hidráulico
- σ₁** coeficiente para determinar el área hidráulica
- σ₂** exponente para determinar el área hidráulica

REFERENCIAS

Bautista, E. y W. W. Wallender (1993a). Reliability of Optimized Furrow-Infiltration Parameters. Journal of Irrigation and Drainage Engineeringg, Vol. 119, No. 5.

Bautista, E. y W. W. Wallender (1993b). Optimal Management Strategies for Cutback Furrow Irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineeringg, Vol. 119, No.

- 6.
- Booher, L. J. (1974). Surface Irrigation. Land and Water Development Series. Food and Agriculture Organization of the United Nations, p. 125.
- Burt, C. M., A. J. Clemens, T. S. Strelkoff, K. H. Solomon, R. D. Bliesner, L. A. Hardy, T. A. Howell y D. E. Eisenhauer (1997). Irrigation Performance Measures: Efficiency and Uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 123, No. 6, p. 431.
- Camacho, E., C. Pérez, J. Roldán y M. Alcaide (1997). Modelo de Manejo y Control en Tiempo Real del Riego por Surcos. *Ingeniería del Agua, Universidad Politécnica de Valencia*, Vol. 4, No. 4, p. 16.
- Cuenca, R. H. (1989). *Irrigation System Design*. Prentice Hall. New Jersey, USA, p. 60.
- Chu, S. T. (1978). Infiltration During an Unsteady Rain. *Water Resources Research*, Vol. 14, No. 3.
- Jensen, M. E. ed. (1980). *Design and Operation of Farm Irrigation Systems*. American Society of Agricultural Engineers, p. 569.
- Rendón, P. L., R. C. Fuentes y S. G. Magaña (1995). Diseño Simplificado del Riego por Gravedad. *Memorias del VI Congreso Nacional de Irrigación, Chapingo, México*, pp 3.85-3.91.
- Sakkas, J. G. y W. E. Hart (1968). Irrigating with Cut-back Furrows Streams. *Journal of Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 94, No. IR1, pp 11-18.
- Vázquez, E. (1996). Formulación de un criterio para incrementar la eficiencia del riego por surcos, incluyendo el método de corte posterior. Tesis de Doctorado, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Vázquez, E. y R. de la Cruz (1998). Criterio de diseño para el riego por gravedad con surcos cerrados. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, Vol. I, No. 1, UNAM, p. 38.
- Vázquez, E. y J. Gracia (1998). Calibración de parámetros de infiltración y rugosidad con un modelo numérico para riego con surcos cerrados. *Ingeniería del Agua*, Vol. 5, No. 3.

