

ARTICULOS DE INVESTIGACION

UN MODELO DE DISEÑO DE SISTEMAS DE RIEGO POR SURCOS*

A MODEL FOR THE DESIGN OF FURROW IRRIGATION SYSTEMS

LUIS GUROVICH y RODRIGO CAZANGA

Departamento de Ciencias Vegetales, Facultad de Agronomía
Pontificia Universidad Católica de Chile

SUMMARY

A mathematical model for the design of furrow irrigation systems is described. The model is based on the "volume balance" approach, and it is complemented with a simulation of the irrigation process. The model enables the evaluation of relevant components of the water application efficiency, corresponding to the design of furrow systems obtained by using the model, for different soil and water supply conditions.

The development of the advance and recession phases throughout the irrigation process is calculated. Thus, the opportunity time for infiltration to take place, and the distribution of water depths infiltration at several points along each furrow, can be assessed.

Optimal design and performance of irrigation furrows, adapted to several field situations, are compared with data corresponding to field experiments and designs obtained by applying Jensen model (Jensen, 1980). These comparisons indicate that the model presented here is a suitable tool, to be used in furrow irrigation design and evaluation.

The computer program that complements the model for its use is adapted for personal microcomputers; due to the wide availability of this kind of equipment, as well as to the program versatility and flexibility, this model may be applied in extension work associated with irrigation technology, on specialized teaching activities and on the design and operation parameters evaluation of furrow irrigation systems.

INTRODUCCION

El diseño de sistemas de riego superficiales tiene por objeto asegurar la aplicación homogénea de agua en un campo, para que cada una de las plantas de un cultivo reciba una dotación de este recurso que se adecue a sus necesidades evapotranspirativas, de tal manera que el culti-

vo completo pueda expresar su potencial productivo, sin que el factor agua constituya una limitante del rendimiento. Asimismo, la aplicación del agua debe ser eficiente, de tal forma que una alta proporción del agua aplicada a un campo, quede efectivamente a disposición de las plantas, minimizándose las pérdidas derivadas del escurrimiento superficial fuera de la

*Publicación aprobada por el Comité Editor de la Facultad de Agronomía de la Universidad Católica con el N° 398/85. Fecha de recepción: 23 de octubre de 1985.

unidad de riego y de la percolación profunda fuera de la zona radicular del cultivo (Gurovich, 1985).

La aplicación heterogénea e ineficiente del agua es el resultado de un diseño del sistema de riego que no guarda relación con las características del suelo y la dotación de agua con que el agricultor cuenta para efectuar esta práctica (Whiter y Vipond, 1980).

Una de las formas de aplicación de agua al suelo que más comúnmente se utiliza en la agricultura, es el método de riego por surcos (Finkel, 1974, Fukuda, 1976). Hasta 1974, el diseño de sistemas de riego para terrenos regados con este método, se basó principalmente en el concepto de "caudal unitario de escurrimiento", tal como fue descrito por Criddle *et al.* (1956).

El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos publicó un conjunto de Tablas de Diseño para el riego superficial con escurrimiento posterior libre (USDA, 1978); este procedimiento de diseño del sistema de riego por surcos fue posteriormente revisado por Ley y Clyma (1980) y por Collins y Kolvek (1981). Estas técnicas de diseño suponen un equilibrio entre las funciones de avance y recesión del agua durante la operación del riego superficial.

El gran número de variables relacionadas con el diseño del riego por surcos y la significativa variabilidad espacial de los parámetros que determinan este diseño, como por ejemplo la infiltrabilidad del suelo, y aquellos que definen la dinámica del flujo superficial del agua en el surco, han estimulado el desarrollo de modelos matemáticos adicionales, que intentan describir o simular los procesos de flujo superficial y subsuperficial del agua durante el riego.

El diseño de sistemas de riego superficiales en general, y muy especialmente el diseño de riego por surcos, se encuentra en estos momentos en un estado de transición. Desde 1977 los grandes avances alcanzados en las técnicas de modelación de sistemas físicos, han permitido incorporar en forma creciente un nivel teórico superior en el diseño y evaluación de métodos de riego. Así, se están desarrollando rápidamente los modelos hidrodinámicos, de "inercia cero" y de ondas cinemáticas (Walker y Skogerboe, 1984).

Los modelos basados en el concepto de balance de volúmenes consideran los principales parámetros de diseño y operación, como por ejemplo, el largo de la unidad de riego, el caudal inicial de entrada y la pendiente longitudinal promedio y la rugosidad superficial; estos últimos dos parámetros se usan como sinónimo de la resistencia al flujo por roce. Asimismo, se incluyen las funciones que describen la infiltrabilidad del suelo y el hidrograma del flujo de entrada. El uso de estos modelos permite alcanzar una comprensión adecuada de la metodología de diseño, sin entrar en los complejos detalles incluidos en la teoría más avanzada, que considera en forma simultánea los aspectos hidráulicos del flujo superficial del agua y del flujo subsuperficial de infiltración, que ocurren durante el proceso mismo del riego (Hart *et al.* 1968, 1980).

Los resultados que se obtienen con este tipo de modelos de diseño permiten incluir la distribución espacial del agua infiltrada dentro del suelo y la cantidad de escurrimiento desde el extremo final del campo, estableciéndose de esta manera la eficiencia de aplicación del agua al suelo (Bassett *et al.*, 1980). Asimismo, aspectos como la maximización de la eficiencia de aplicación, que se logra por medio de la selección adecuada de caudales de entrada y tiempos de riego, puede ser ilustrada con gran flexibilidad (Gurovich y Ramos, 1984).

Los procedimientos de diseño del sistema de riego por surcos basados en el modelo de balance de volumen, requieren parámetros de infiltración del agua en el suelo, sin incluir su variabilidad espacial y temporal, la geometría del flujo dentro del surco, la pendiente longitudinal y el largo total de la unidad de riego. A partir de estas relaciones, se definen las funciones de avance y recesión del agua y los parámetros de operación del riego, para diferentes combinaciones de caudal de entrada y tiempos de entrada de agua al surco durante el riego. Los valores que se seleccionan como "la combinación más adecuada", son aquellos que maximizan la eficiencia de aplicación; éstos pueden variar durante la estación de cultivo o temporada de riego, a medida que se modifican las láminas de reposición y los parámetros de infiltración (Gates y Clyma, 1984).

Adicionalmente a los modelos basados en el concepto de balance de volúmenes, es necesario mencionar aquellos que desarrollan completamente las ecuaciones hidrodinámicas de continuidad y movimiento, como los modelos de Bassett y Fitzsimmons (1976), Katopodes y Strelkoff (1977) y Fonken *et al.* (1980). La solución del sistema de ecuaciones diferenciales parciales no lineales, aplicada por estos

autores, se realiza a través de la técnica de diferencias finitas por el "método de las características". Las ecuaciones diferenciales unidimensionales para el flujo superficial en contorno abierto del tipo gradualmente variado, cuya forma es atribuida a Saint-Venant (Strelkoff, 1970), son las ecuaciones de continuidad y movimiento, que pueden ser expresadas respectivamente como:

$$\delta y / \delta t + V \delta y / \delta x + Y \delta V / \delta x + i = 0 \text{ (ecuación 1)}$$

$$1/g \delta V / \delta t + (V/g) \delta V / \delta x + \delta y / \delta x = (S_0 - S_f) * (V \delta z / \delta t) / 2gy \text{ (ecuación 2)}$$

Los resultados obtenidos con todas estas técnicas de diseño son, en la generalidad de los casos, razonablemente similares entre sí, a pesar de que en algunas situaciones los resultados obtenidos difieren significativamente de las mediciones realizadas en condiciones de campo aparentemente equivalentes. Esto parecería deberse a que los diferentes modelos no incluyen algunos aspectos relevantes para suelos de texturas extremas, o aquellos suelos que tienen como actividad biológica que influye en la infiltrabilidad superficial. Sin embargo, el uso de estos modelos ha demostrado ser una herramienta que permite una evaluación completa del riego, esto es, determina los volúmenes de agua almacenado, percolado, escurrido y el volumen total aplicado, en forma independiente unos de otros, y no en función de diferencias con respecto a un volumen total.

Otra categoría de modelos que permiten el diseño de sistemas de riego superficiales, es aquella que introduce simplificaciones a las ecuaciones hidrodinámicas de Saint-Venant. Entre estos modelos se encuentra el desarrollado por Strelkoff y Katopodes (1977), para el riego por bordes, que considera que en condiciones de velocidad de flujo superficial del agua bajas, situación habitual en el riego superficial, es posible dejar de considerar los términos relacionados con la aceleración en la ecuación de movimiento (ecuación 2), de tal manera que ésta se transforma en

$$\delta y / \delta x = S_0 - S_f \text{ (ecuación 3)}$$

Este modelo es conocido como de "inercia cero" y desarrolla todas las fases del proceso de

riego por bordes, a través de la solución de las ecuaciones 1 y 3. Los resultados obtenidos con modelos de "cero inercia" son muy similares a aquellos correspondientes a la aplicación de los modelos del primer tipo, con la ventaja de una programación computacional más sencilla y, en consecuencia, un tiempo de proceso significativamente inferior (Clemens, 1979).

Los modelos de balance de volúmenes se basan en el principio de conservación de la masa, es decir sólo presentan soluciones para la ecuación de continuidad, expresada en términos de volumen. De esta forma, se considera que en todo momento, durante la fase de avance del proceso de riego, el volumen de agua total ingresado es equivalente a la suma de los volúmenes infiltrado y almacenado superficialmente (Hall, Agricultural Engineering, Vol. 37, 1956). Este modelo conceptual clásico, ha sido modificado, entre otros, por Hart *et al.* (1968), Fok y Bishop (1965), Ley y Clyma (1980), Collins y Koluvek (1981) y Ramos y Gurovich (1983), siendo común a estos modelos la solución de las siguientes ecuaciones:

$$V_y (T_a) = \int_0^x y(x, T_a) dx \text{ (ecuación 4)}$$

$$V_z (T_a) = \int_0^x z(x, T_a) dx \text{ (ecuación 5)}$$

La ecuación 4 corresponde al almacenamiento superficial —o escurrimiento— y la ecuación 5 representa el volumen de agua infiltrado para un período T_a transcurrido desde el inicio del proceso de riego y para un recorrido x

del frente de mojado, desde el límite superior del surco.

Las diferencias principales entre los modelos de este tipo, se refieren a las técnicas numéricas que se utilizan en la solución de las ecuaciones 4 y 5.

A través de estos modelos solamente es posible definir la fase de avance del proceso del riego, que es aquella que corresponde a situaciones de diseños de sistemas de riego superficiales sin escurrimiento libre. Existen algunas publicaciones en que se presentan modelos de diseño de surcos con escurrimiento posterior libre (Strelkoff *et al.* 1961); sin embargo, en esta publicación la fase de recesión del riego no es descrita como una etapa independiente, dentro del proceso de flujo de agua durante el riego. Cuando se diseñan surcos que en su límite inferior permiten el escurrimiento del agua fuera de la unidad de riego, la fase de recesión adquiere una relevancia que no puede dejar de ser considerada para el diseño y la evaluación del sistema de riego (Chen y Hansen, 1966), I-pai Wu (1972).

Los modelos de diseño de sistemas de riego superficiales, tanto para surcos como para bordes, basados en el concepto de balance volumétrico, permiten alcanzar resultados altamente correlacionados con observaciones de terreno (Ley, 1978, Elliot, 1980, Elliot y Walker, 1982). Souza (1981) desarrolla un modelo de diseño para surcos, basado en modelos hidrodinámicos simplificados.

Como resultado de la aplicación de los modelos hidrodinámicos y la acumulación de muchos años de experiencias en condiciones de campo, la Sociedad Americana de Ingeniería Agrícola (1978) ha establecido un procedimiento normalizado de diseño de sistemas de riego por surco, que se basa en la determinación del caudal óptimo requerido para el riego, a partir del tiempo de infiltración y de la lámina total de agua a aplicar al suelo para reponer la evapotranspiración del cultivo, tomando en consideración una eficiencia de aplicación definida en función de las características del terreno (Hart *et al.*, 1980). Este procedimiento de diseño no considera la fase de recesión del proceso de riego y tampoco permite calcular la distribución de láminas infiltradas en puntos a lo largo del surco.

Ramos y Gurovich (1984) desarrollaron un modelo de diseño de sistemas de riego por bordes en el que incluye un procedimiento de evaluación de la fase de recesión, basado en la aplicación del concepto de "rutina hidrológica" presentado por I-pai Wu en 1972. Con la inclusión de la fase de recesión en el análisis del riego superficial, estos autores han logrado una evaluación de la eficiencia de aplicación del agua para sistemas de riego con escurrimiento superficial final libre, situación que se presenta en condiciones de campo en forma mucho más habitual que aquella en que el flujo posterior es inexistente.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo de diseño y evaluación del riego por surcos, aplicable a variadas condiciones de suelos y dotaciones de agua, permitiendo definir la distribución de las láminas infiltradas a lo largo del campo regado y la eficiencia de aplicación del agua resultantes de este diseño.

MATERIALES Y METODOS

El riego por surcos es la aplicación superficial de agua a un suelo a través del avance e infiltración simultáneas del agua en pequeños canales paralelos, distanciados homogéneamente a través del campo, que dirigen el flujo superficial del agua en movimiento, a medida que ésta desciende por la pendiente del campo (Booher, 1974). El agua se mantiene fluyendo por los surcos hasta que se logra la aplicación de la lámina de reposición y una penetración lateral deseada, derivadas del proceso combinado de infiltración vertical y horizontal, determinadas tanto por las gradientes de succión como por el potencial gravitacional (Hillel, 1980).

La fase de avance de este proceso se inicia con la entrada del agua al surco en el momento del comienzo del riego, desplazándose el frente de flujo superficial, o frente de mojado, hacia los puntos de menor cota, al mismo tiempo que una proporción del agua va infiltrando en el perfil del suelo. Esta fase termina cuando el agua alcanza el límite inferior del surco; si la entrada de agua no ha sido interrumpida hasta este momento, se inicia la fase de almacenamiento superficial. Cuando el extremo inferior del surco es de tipo abierto, el agua escurre

fuera de éste, ya sea hacia una acequia receptora o hacia un campo de cota inferior, pero si el surco es de tipo cerrado, el agua represará, almacenándose en el interior del surco y, eventualmente, desbordándolo.

La altura de la lámina de agua en el interior del surco se mantiene constante durante toda la fase de avance, siendo función del caudal de entrada, la pendiente, la rugosidad de las paredes del surco y la forma del perímetro de mojado. Este flujo uniforme dentro del surco se describe como una lámina normal, derivándose su valor de la aplicación de la ecuación de Manning (Clemmens, 1980; Heermann *et al.*, 1969).

La infiltración de agua por unidad de largo

del surco está relacionada directamente con la superficie en contacto efectivo con el agua, esto es, con el perímetro mojado. Cuando el flujo de entrada es interrumpido, se inicia la fase de vaciamiento, la que se caracteriza por una disminución de la profundidad de la lámina de agua almacenada dentro del surco; esta disminución de altura comienza en el extremo superior del surco, y cuando en este punto la lámina se hace 0, se inicia la fase de recesión, con su correspondiente frente de secado; solamente cuando este frente alcanza el extremo inferior del surco, se considera que el riego ha concluido. Las fases que componen un riego por surco típico se presentan esquemáticamente en la Figura 1 (Jensen, 1980, pp. 451).

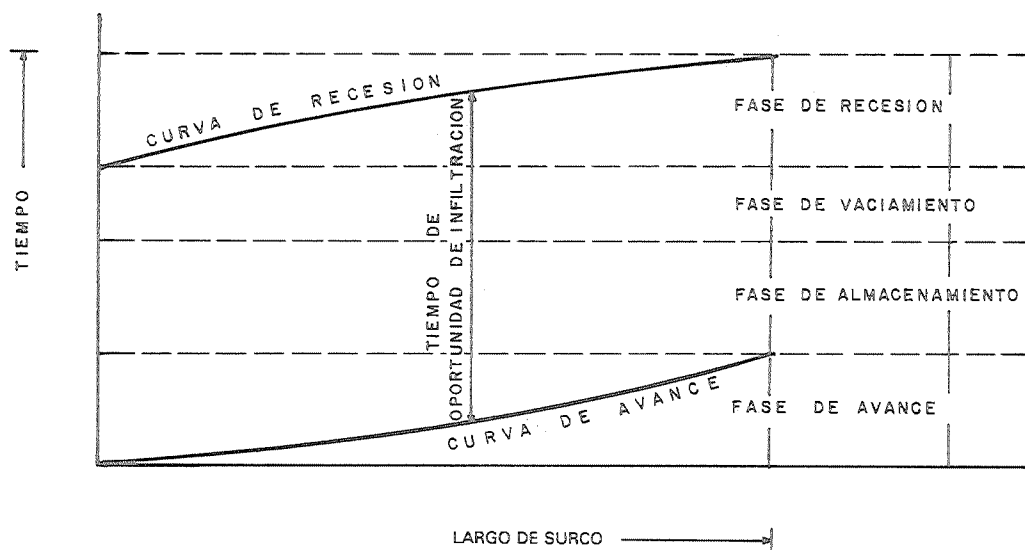


FIGURA 1
ESQUEMA DE DEFINICION DE LAS FASES DEL RIEGO POR SURCO TÍPICO.

Las plantas de un cultivo recibirán la misma dotación de agua en cada riego, si el tiempo de oportunidad es igual en cada uno de los puntos a lo largo del surco; el tiempo de oportunidad corresponde a la diferencia entre el tiempo de avance y el tiempo de recesión en cada punto. Para alcanzar esta condición, la eficiencia de aplicación no puede ser muy alta, ya que es necesario un determinado flujo de escurrimiento hacia afuera del extremo inferior del surco, para lograr en ese punto una infiltración equivalente a la lámina de reposición.

DESCRIPCION DEL MODELO

El modelo matemático de diseño de sistemas de riego por surcos desarrollado en este trabajo, se basa en la definición de curvas de avance y recesión del agua durante el proceso del riego en un surco. Esta definición se obtiene a partir de la aplicación simultánea del enfoque de "balance volumétrico" descrito por Hart *et al.* (1980), para la fase de avance y el principio de "rutina hidrológica" desarrollado por Wu (1972), para la fase de recesión, modi-

ficados para permitir una simulación del proceso de riego, que permite evaluar las láminas de agua infiltradas en diferentes puntos a lo largo del surco, a medida que transcurre el proceso.

El modelo presentado en este trabajo establece que durante la fase de avance, en cualquier tiempo $T_A > T_a > T_0$, el agua que está entrando al surco avanzará hasta una distancia x , en dirección de la pendiente descendente. Si el caudal de entrada Q_0 es constante, el volumen total de agua ingresado al surco, que es el producto de Q_0 y T_a , debe ser igual al volumen almacenado en la superficie del suelo $V_y(T_a)$ más el volumen infiltrado $V_z(T_a)$, de acuerdo con la ecuación 6.

$$Q_0 * T_a = V_y(T_a) + V_z(T_a) \text{ (ecuación 6)}$$

El volumen de agua sobre la superficie del suelo se define al integrar el área de flujo sobre la distancia de avance o frente de avance, de acuerdo con la ecuación 7:

$$V_y(T_a) = \int (x, 0) A(s, T_a) \text{ (ecuación 7)}$$

En esta ecuación s es el integrador de x y A es el área de sección de flujo del agua dentro del surco. Este modelo no considera relaciones

$$P = 0.265 (Q * n / S (\exp(0.5)) \exp(.425) + 0.227 \text{ (ecuación 8a.)}$$

en que P es el perímetro mojado ajustado (m), Q es el caudal de entrada (l/s), S es la pendiente longitudinal (m/m) y n es el coeficiente de rugosidad de Manning. El valor de P no puede exceder el espaciamiento entre surcos.

El valor de A_0 es función de la lámina normal, asociada a través de la ecuación de Manning con el caudal de entrada, la pendiente, la rugosidad y el radio hidráulico.

La ecuación 7 queda reducida en este modelo a:

$$V_y(T_a) = \&y * A_0 * x = A * x \text{ (ecuación 9)}$$

El volumen de agua infiltrada durante la fase de avance se define al integrar el volumen infiltrado por unidad de largo del surco $Z(s, T_a)$, sobre la distancia de avance o frente de avance, de acuerdo con:

$$V_z(T_a) = \int (x, 0) Z(s, T_a) \text{ (ecuación 10)}$$

de momento o energía para describir la distribución temporal o espacial de A , ya que supone un área de sección promedio constante, definida por:

$$A = \&y * A_0 \text{ (ecuación 8)}$$

en que $\&y$ es un "factor de forma" del surco, correspondiente a la razón entre el área promedio y el área en el punto de entrada de agua al surco, A_0 . El "factor de forma" del surco ha sido establecido a través de diversas relaciones; en este modelo se ha incluido el concepto de perímetro mojado ajustado (Jensen, 1980); la infiltración del agua por unidad de largo del surco se relaciona directamente con la superficie del suelo en contacto con el agua, esto es, con el perímetro mojado. Sin embargo, la infiltración ocurre tanto en el sentido vertical como horizontal, a diferencia de otros métodos de riego superficiales, en que la infiltración es sólo en la dirección vertical. El perímetro mojado es incrementado con una constante empírica para incluir la infiltración horizontal, debida a gradientes de potencial en el suelo. La relación empírica que define el perímetro mojado ajustado, para un surco típico es:

El espaciamiento entre surcos, que es una variable del diseño en la mayoría de los modelos, es considerado en este modelo como una constante igual a la unidad de ancho, ya que en la generalidad de los cultivos, la distancia entre surcos adyacentes está definida por las características agronómicas del cultivo y no por consideraciones del suelo regado.

En el modelo se supone que $Z(s, T_a)$ es independiente de la altura de la lámina de agua fluyendo dentro del surco y depende sólo del tiempo de oportunidad de infiltración $T - T_a$, en que T_a es el tiempo que requiere el frente de avance desde el comienzo del riego hasta alcanzar la distancia x .

Combinando las ecuaciones 9 y 10, se obtiene:

$$Q_0 * T_a = A * x + \int (x, 0) Z(T - T_a) ds \text{ (ecuación 11)}$$

Esta ecuación se conoce con el nombre de ecuación de Lewis-Milne (Walker y Skogerboe, 1984); esta ecuación es muy similar a aquella desarrollada para bordes por Strelkoff (1977), aunque no incluye un "factor de forma", innecesario en el caso de bordes; esta publicación incorpora además una metodología para calcular la fase de recesión.

El desarrollo matemático de la ecuación 11 permite expresar la distancia de recorrido del frente de avance; el tiempo que demora el frente de avance para llegar a distancias determinadas a lo largo del surco, se establece por medio de una solución iterativa de la ecuación 11.

El principio de "rutina hidrológica" asume

que el almacenamiento superficial S en un tramo de canal de longitud constante, está relacionado directamente con la descarga Q , medida en el extremo final del tramo considerado; la expresión matemática que representa este principio corresponde a la ecuación 12:

$$S = K * Q \text{ (ecuación 12)}$$

Al aplicar el principio de rutina hidrológica al caso del riego por surcos, la distancia recorrida por el frente de recesión, en un tiempo T_r después de iniciada esta fase, puede ser calculada a través de la solución de la ecuación 13, presentada por Wu (1972).

$$e^{**} - (1.5 * T_r / 2.5k) - (fcK^{**2.5} * C^{**1.5})^{**1} / 1.5 \text{ (ecuación 13)}$$

El desarrollo del frente de secado es establecido a partir de la solución iterativa de la ecuación 13.

Con las curvas así definidas se determina para J puntos equidistantes a lo largo del surco, los siguientes parámetros de diseño:

1. El tiempo que demora en llegar el frente de avance, desde el comienzo del riego hasta el punto $J(i)$ (ecuación 11).
2. El tiempo que demora en retirarse el frente de secado desde el comienzo de la fase de recesión (ecuación 13).
3. El tiempo de oportunidad de infiltración (Figura 1).
4. La lámina infiltrada efectivamente en el punto considerado, a través de la aplicación del concepto de "familia de infiltración", cuya expresión matemática es representada por la ecuación de Kostiaikov - Lewis (USDA, 1978, Elliot y Walker, 1982.) (ecuación 14).

$$LI = b * T_0^{**c} + d \text{ (ecuación 14)}$$

El modelo desarrollado en este trabajo consiste en dos etapas: a) la primera corresponde a una sistematización de la combinación de las expresiones que definen las fases de avance y recesión del riego por surcos; b) la segunda es una simulación del proceso de riego, con los

parámetros de diseño establecidos en la primera parte.

El modelo requiere como parámetro de entrada, definir una cierta eficiencia de aplicación deseada para el diseño del sistema de riego por surco; esta eficiencia es posteriormente modificada, al evaluar el modelo el efecto que sobre ésta tiene la selección del conjunto más adecuado de parámetros de diseño. Una comparación de los valores correspondientes a los componentes de la eficiencia de aplicación predefinida en la primera etapa, con la eficiencia de aplicación obtenida para la operación simulada del riego en la segunda etapa, permite comprobar si la combinación de parámetros de diseño es adecuada a las características del campo regado, siendo posible, por medio de una parametrización interactiva, modificar los parámetros de diseño hasta encontrar la relación más adecuada entre éstos (Gurovich y Ramos, 1984).

El modelo incluye también la posibilidad de analizar el efecto de estrategias de reducción del caudal de entrada de agua al surco, una vez que se completa la fase de avance, simulando una práctica común de terreno, utilizada para incrementar la eficiencia de aplicación del agua al disminuir el flujo de escurrimiento superficial al final del surco.

Una reducción continua del caudal de entrada, en una magnitud equivalente a la reducción de la velocidad de infiltración que va experimentando el surco a medida que transcurre la fase de almacenamiento del agua, podría permitir alcanzar eficiencias de aplicación cercanas al 100%; sin embargo, no existe aún una tecnología eficiente y de bajo costo que permita la reducción continua del caudal de entrada, y en la práctica éste es reducido una o más veces en forma discreta durante la fase de almacenamiento (Smith, 1984, Reddell, 1981).

La metodología de análisis de los componentes de la eficiencia de utilización del agua, se realiza a través del estudio de los volúmenes totales de agua aplicados y escurridos fuera del surco por su extremo inferior, así como los volúmenes infiltrados, distinguiendo aquellos almacenados dentro de la zona radicular del cultivo y los percolados fuera de ésta, en una forma similar a la presentada por Gurovich (1978).

El modelo presentado en este trabajo asume que:

1. El campo regado es homogéneo, es decir la pendiente longitudinal, la rugosidad —o coeficiente de resistencia al flujo de Manning— y la infiltrabilidad del suelo, representada a través de la ecuación de Kostiaikov-Lewis (Elliot y Walker, 1982), no cambian en el espacio ni en el tiempo.
2. El caudal de entrada es constante y el flujo dentro del surco es uniforme; por este motivo, es posible utilizar la ecuación de Manning para determinar el caudal de descarga durante la fase de recesión.
3. El radio hidráulico en una sección cualquiera del surco es igual a la altura de la lámina de escurrimiento en esa sección; esta lámina es prácticamente constante a lo largo de todo el surco; esto implica que la forma del surco es una semicircunferencia.
4. El tiempo de retraso de la recesión (lag de recesión) TL, es pequeño en relación al tiempo de avance y al tiempo total de recesión y, por ello, no es incluido en este modelo.
5. El tiempo de entrada TE es comparativamente extenso, de tal manera que cuando finaliza, se ha alcanzado el caudal de descarga de equilibrio, o sea, el almacenamiento superficial es máximo.

El modelo desarrollado en este trabajo está implementado con un programa computacional de cálculo, en idioma BASIC, adaptado a un minicomputador Apple II Plus; la secuencia de ecuaciones que resuelve el programa está disponible al interés de los lectores.

La Tabla 1 resume tres conjuntos de parámetros de terreno, que describen situaciones en las que se diseñan sistemas de riego por surcos con el modelo presentado en este trabajo. El

T A B L A 1
PARAMETROS DESCRIPTIVOS DE LOS SUELOS EN QUE
SE DISEÑAN SISTEMAS DE RIEGO POR SURCOS
Descriptive soil parameters for furrow irrigation design

	Suelo A Soil A	Suelo B Soil B	Suelo C Soil C
Textura	Arcilloso	Franco	Arenoso
Capacidad de Campo (%)	35,6	26,8	12,3
Punto de Marchitez (%)	17,1	12,4	5,8
Profundidad (cm)	62,4	74,4	144,2
Criterio de riego (%)	50	50	50
Densidad aparente (g/cm ³)	1,0	1,4	1,6
A (mm/min)	0,6198	0,9246	1,786
B (adimensional)	0,661	0,720	0,786
N (adimensional) coef. Manning	0,04	0,04	0,04
W (m) Coeficiente de forma	0,75	0,75	0,75

diseño se realiza a partir de los valores de lámina de reposición y velocidad de infiltración correspondientes a las características físico-hídricas de los suelos de cada caso.

Los resultados obtenidos fueron comparados con aquellos obtenidos con el modelo de Jensen (Jensen, 1980), así como con resultados de ensayos experimentales de escurrimiento de agua en surcos, realizados en terreno por Hart *et al.* (1978).

El diseño de surcos de riego en los suelos descritos en la Tabla 1 se obtiene con la aplicación del modelo desarrollado en este trabajo, evaluándose el efecto de la variación de los parámetros presentados en la Tabla 2, sobre los componentes de la eficiencia del riego.

En estos diseños, se mantuvo constante los valores de los siguientes parámetros adicionales:

1. Coeficiente de rugosidad de Manning (N) = 0.04
2. Coeficiente de forma del surco (w) = 0.75 m.

En la parametrización realizada de acuerdo con los rangos de la Tabla 2, según la técnica explicada por Gurovich y Ramos (1984), se mantuvo constante el valor de todos los parámetros, salvo el estudiado específicamente, manteniéndose los siguientes valores:

1. Caudal de entrada (l/seg) = 0.6.
2. Largo del surco (m) = 275.
3. Pendiente (%) = 0.04.
4. Reducción de caudal (%) = 0.

RESULTADOS Y DISCUSION

El modelo de diseño de sistemas de riego por surcos, desarrollado en este trabajo, que denominaremos modelo de Gurovich y Cazanga (modelo G y C), permite determinar los principales parámetros relevantes en la evaluación del riego que resulta con la operación del surco diseñado. La Tabla 3 compara el conjunto de estos parámetros con aquellos que pueden obtenerse con la aplicación del modelo de Jensen (1980), que también está basado en el concepto

T A B L A 2
PARAMETROS DE EVALUACION OBTENIDOS CON LOS MODELOS
DE DISEÑO DE RIEGO POR SURCOS

	Modelo de Jensen	Modelo de Gurovich y Cazanga
Lámina infiltrada (cm), LI	SI	SI
Lámina aplicada (cm), LA	SI	SI
Caudal de entrada (l/s), CE	SI	SI
Tiempo oportunidad prom. (min), TOP	SI	SI
Tiempo de entrada (min), TRI	SI	SI
Tiempo de recesión (min)? TRE	NO	SI
Tiempo de avance (min), TA	SI	SI
Tiempo de infiltración (min), TI	SI	SI
Constante de recesión (s)? KR	NO	SI
Perímetro mojado (m), PM	SI	SI
Escurrecimiento superficial (cm), ES	SI	SI
Percolación profunda (cm), PP	SI	SI
Largo del surco (m), L	SI	SI
Espacio entre surcos (m)? W	SI	SI
Pendiente (m/m), S	SI	SI
Eficiencia de aplicación (%), EfA	SI	SI
Eficiencia de almacenamiento (%), EfAl	NO	SI
Eficiencia de distribución N (%), ED4	NO	SI
Eficiencia de distribución $\bar{X}$ (%), ED	NO	SI
Eficiencia agronómica N (%), EAG4	NO	SI
Eficiencia agronómica $\bar{X}$ (%), EAG	NO	SI

de balance de volúmenes y que es de amplia utilización actual en el diseño de sistemas de riego por surco.

La introducción de la fase de recesión, a través de la integración del concepto de rutina hidrológica al modelo G y C, permite evaluar el comportamiento del riego en un surco con escurrimiento posterior libre, así como la inclusión de un hidrograma variable de caudal de entrada. Ambas situaciones representan un surco en condiciones de operación representativas de la realidad que se observa en el riego de superficies agrícolas.

Los modelos de cero-inercia y los modelos hidrodinámicos permiten la inclusión de ambas situaciones, pero con una complejidad computacional significativa; la mayoría de los modelos de balance de volumen publicados adolecen de restricciones respecto al escurrimiento posterior y al hidrograma de entrada variable. Interesantes excepciones a lo anterior son los trabajos de Souza, 1981, Walker y Humpries (1983) y Elliot, *et al.* (1982). De esta forma, puede afirmarse que el modelo G y C constituye una contribución significativa adicional en este sentido.

Cada uno de los parámetros de evaluación del riego presentados en la Tabla 3, son evaluados en el modelo de Jensen en forma integral para el surco completo; en el modelo G y C es posible valorar estos parámetros en cualquier punto a lo largo del surco. Esta característica del modelo G y C permite el eventual desarrollo futuro de aplicaciones como la evaluación del comportamiento del riego en suelos con velocidades de infiltración espacialmente variada, o suelos con pendiente longitudinal variable.

El largo del surco de riego es uno de los parámetros de diseño que más fácilmente pueden variarse en condiciones de campo. Habitualmente, el largo utilizado por el agricultor guarda relación con las dimensiones del área de cultivo y su forma; las características de velocidad de infiltración de suelo regado, la rugosidad de la superficie y la geometría del surco no son consideradas en la selección e implementación de un largo adecuado (Clyma, 1980). En la Figura 2 se presenta un análisis del comportamiento del riego en surcos de diferente largo,

diseñado con el modelo G y C, para un suelo de textura franca (suelo B, Tabla 1).

En la operación simulada del riego en los surcos diseñados, que se presentan en la Figura 2, no se utilizó ningún porcentaje de reducción de caudal de entrada, después de completada la fase de avance; por este motivo, el escurrimiento superficial es apreciable y la eficiencia de aplicación del agua resultante es comparativamente baja. En la mayoría de las situaciones que habitualmente pueden encontrarse en el campo, no se practica una reducción del caudal de entrada, alcanzándose eficiencias de aplicación similares a las evaluadas en este caso (Bos y Nutgeren, 1974).

Desde el punto de vista de la eficiencia de aplicación del agua de riego (E_a), el mejor largo resulta ser de 500 m en el suelo de textura franca, con E_a de 43.5%, correspondiente al efecto combinado del escurrimiento superficial y la percolación profunda, equivalentes a láminas de 6.6 y 3.2 cm, respectivamente. En el suelo arcilloso (suelo A, Tabla 1), la E_a máxima se obtiene con un largo de 800 m y es de 25.5%, con láminas equivalentes de 20.3 y 1.6 cm para el escurrimiento superficial y la percolación profunda, respectivamente. Estos valores son similares a aquellos que se obtienen con la aplicación del modelo de Jensen (Jensen, 1980) y las diferencias se deben a que este último no incluye la fase de recesión, que en este caso no es significativa, en atención a la pendiente del terreno considerado.

En la Figura 2 puede apreciarse un incremento paulatino de la percolación profunda, cuando se comparan largos de surco crecientes, desde láminas equivalentes de 0.5 hasta 18.4 cm, para largos de 100 a 800 m, respectivamente; la percolación profunda se produce fundamentalmente en los tramos iniciales del surco. Sin embargo, al final del surco no se logra infiltrar en el suelo la totalidad de la lámina de reposición para largos superiores a los 275 y 500 m en los suelos franco y arcilloso, respectivamente.

Desde el punto de vista agronómico, la máxima E_a no representa necesariamente un riego óptimo, ya que la uniformidad en el almacenamiento del agua es inferior a la lámina de reposición requerida en el último tramo del surco. Evidentemente, las plantas de un cultivo

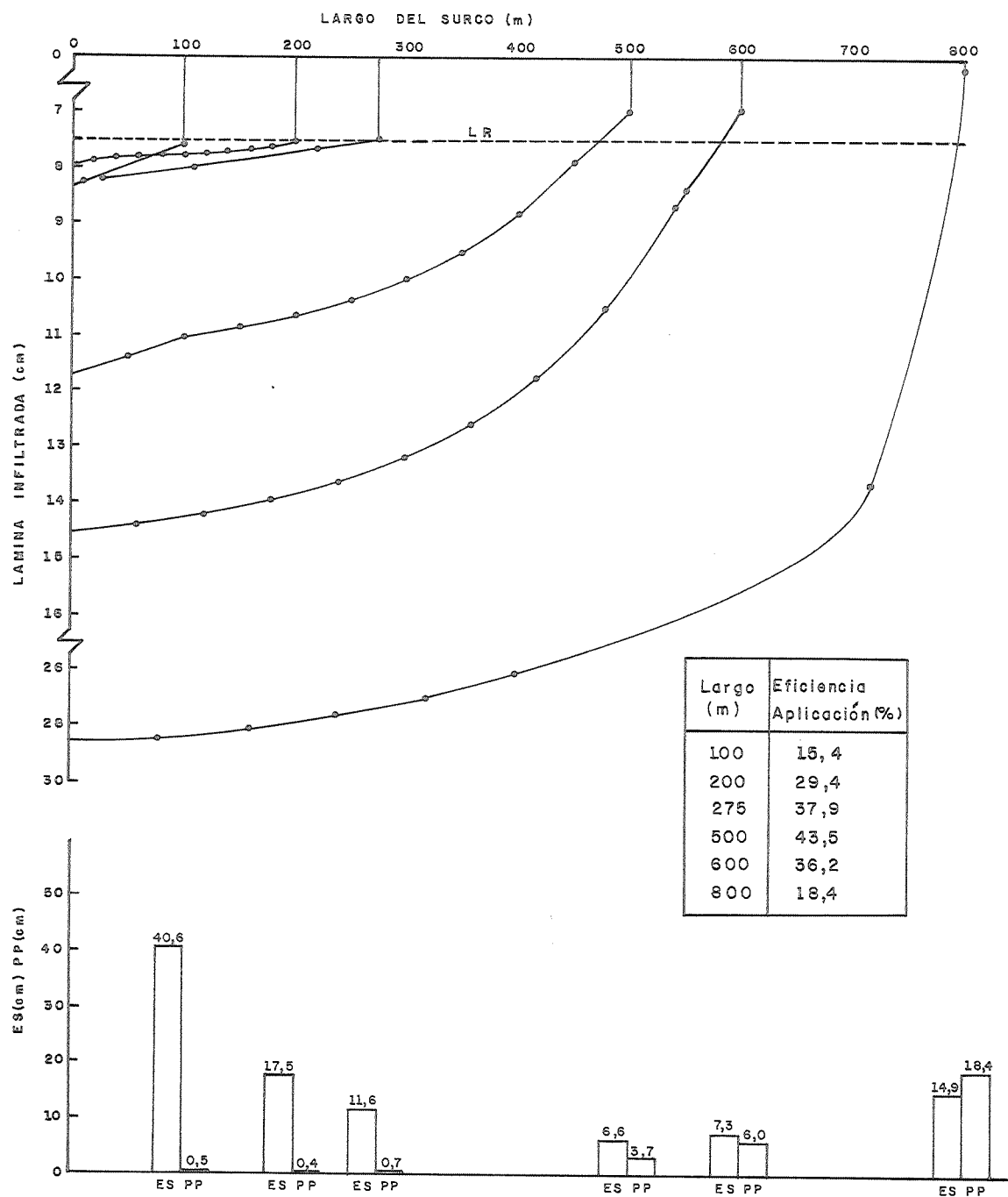


FIGURA 2
 LAMINA INFILTRADA A TRAVES DEL SURCO; ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL (ES), PERCOLACION PROFUNDA (PP) Y EFICIENCIA DE APLICACION PROMEDIOS PARA 6 LARGOS DE SURCO EN UN SUELO FRANCO ($C_e = 0.6$ l/s; $S = 0,004$; $W = 0,75$ m; $N = 0,04$).

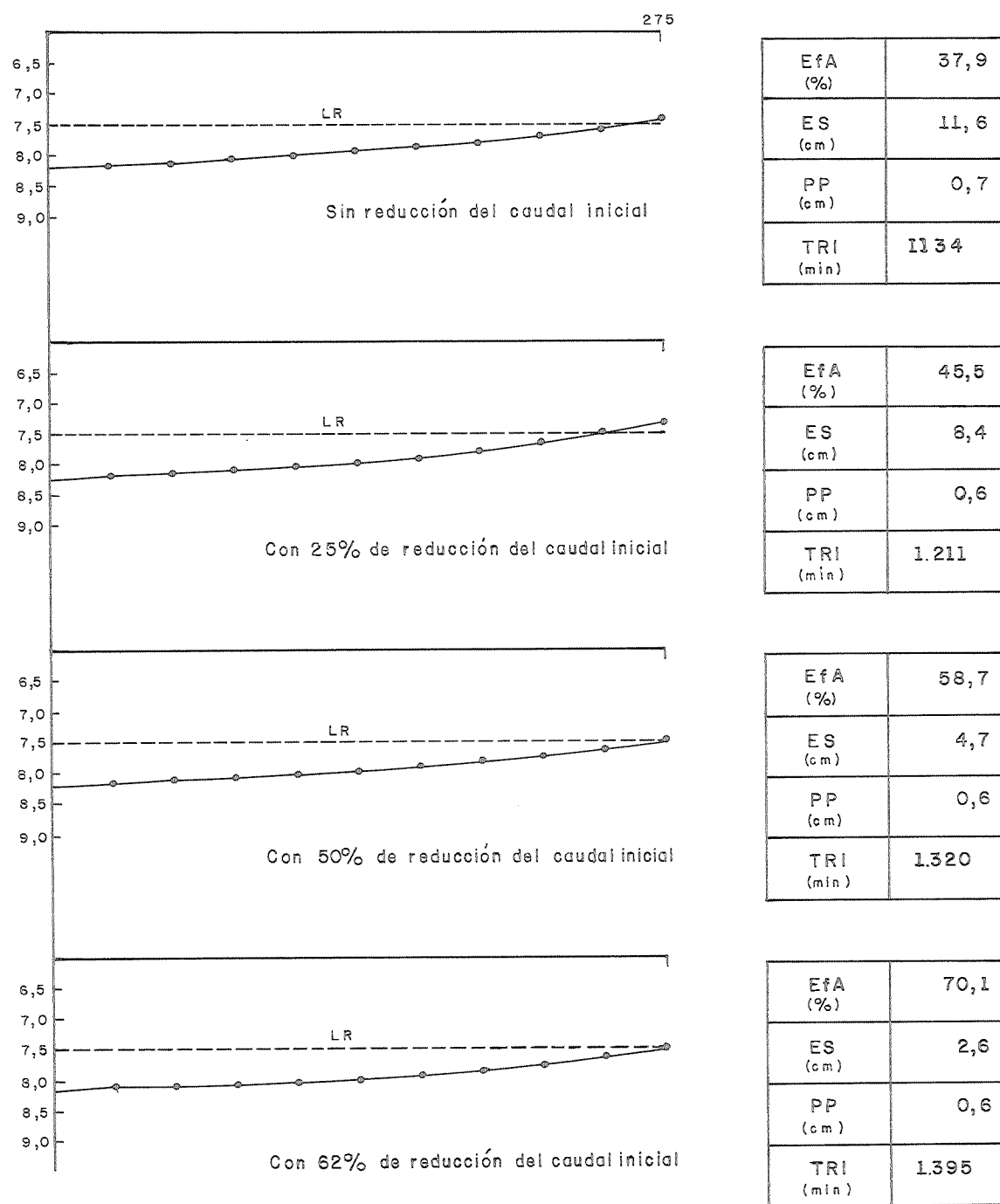


FIGURA 3
 LAMINA INFILTRADA A TRAVES DEL SURCO; EFICIENCIA DE APLICACION (EfA),
 ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL (ES), PERCOLACION PROFUNDA (PP) Y TIEMPO DE RIEGO
 (TRI) PROMEDIOS PARA 4 CASOS DE REDUCCION DEL CAUDAL EN UN SUELO FRANCO
 (Ce INICIAL = 0,6 l/s; S = 0,004; W = 0,75 m; N = 0,04).

sometidas sistemáticamente en el último tramo del surco a un régimen de riego deficitario, a lo largo de la temporada, presentarán un desarrollo y rendimiento inferiores a su potencial productivo. Esta situación indica que la búsqueda de la mayor eficiencia de aplicación del agua de riego, a través de una extensión del largo del surco, no es el camino más adecuado para lograr el objetivo de una reposición homogénea de la lámina evapotranspirada a lo largo del surco.

La percolación profunda es un componente de la Ea, que en el caso de la evaluación del riego resultante con largos diferentes de surcos (Figura 2), es significativamente inferior al componente escurrimiento superficial. Este último varía en el suelo franco en un rango de láminas equivalentes de 40.6 hasta 14.9 cm para largos 100 a 800 m, respectivamente. En el suelo arcilloso, esta variación ocurre en un rango de 154.3 a 22.3 cm para largos de surco de 100 a 1000 m. Evidentemente, estas láminas equivalentes de escurrimiento pueden disminuirse significativamente con la introducción de la práctica de reducir el caudal de entrada de agua al surco, una vez que se ha completado la fase de avance.

El modelo G y C desarrollado en este trabajo, permite la inclusión de hidrogramas de caudal de entrada variables, con posterioridad a la finalización de la fase de avance. En la Figura 3 se presenta un ejemplo de varias situaciones de reducción de caudal de entrada en el suelo B (Tabla 1), para un largo de 275 m, en el cual la eficiencia agronómica es óptima, porque la infiltración de la lámina de reposición al final del surco es completa. En los casos analizados, la Ea se incrementa desde 37.9 hasta 70.1%, con reducciones del caudal de entrada de hasta 62.5% con respecto al caudal inicial de entrada (de 0.6 a 0.225 l/seg). En todas las situaciones de reducción del caudal presentadas en la Figura 3, la percolación profunda permanece constante (0.6) y el escurrimiento se reduce de 11.6 a 2.6 cm, siendo necesario incrementar el tiempo total de riego de 1134 a 1395 minutos.

En condiciones de campo, un riego por surcos que logre una reposición completa de la lámina evapotranspirada en los tramos finales de su largo, con una Ea de 70.1%, puede consi-

derarse un logro tecnológico significativo. Para lograr estas condiciones de riego, la técnica es comparativamente simple, tanto en sus requerimientos de infraestructura como en su operación:

1. un diseño óptimo, definido por la máxima eficiencia agronómica; este diseño implica un largo y caudal inicial de entrada óptimos, resultantes del efecto combinado de las características de infiltración, la pendiente y la rugosidad del suelo.
2. un tiempo de riego incrementado en un 20% por sobre el tiempo óptimo establecido para el caudal de entrada sin reducción.
3. una reducción de 62.5% del caudal de entrada inicial, una vez que se completa la fase de avance del agua sobre el surco.

La modificación del largo del surco, con el fin de mejorar la eficiencia agronómica del riego, puede ir acompañada de una adaptación del caudal inicial de entrada de agua al surco, que se mantiene constante durante la fase de avance (Qa). Esta variable de operación puede ser modificada, en el riego por surcos, con un mínimo requerimiento de infraestructura y capacitación laboral. En la Figura 4 se describen los perfiles de infiltración del agua en un surco de largo óptimo (275 m), diseñado para el suelo de textura franca (suelo B, Tabla 1), para Qa en el rango de 0.15 a 2.40 l/seg, sin reducción de caudal una vez completada la fase de avance.

La Ea máxima se obtiene con un Qa de 0.3 l/seg y es de 49.2%. Sin embargo, la distribución de láminas infiltradas a lo largo del surco es significativamente desuniforme. En el tramo final del surco, la infiltración de la lámina de reposición es completa, pero la percolación profunda es equivalente a una lámina de 2.0 cm, que se concentra en los tramos iniciales del surco, alcanzando en la entrada un 70% de exceso por sobre la lámina de reposición.

La mayor eficiencia agronómica se obtiene con un Qa de 0.6 l/seg, si bien la Ea es solamente 37.9%. La distribución de láminas infiltradas es 97%; se alcanza una infiltración completa de la lámina de reposición en el extremo inferior del surco y la percolación profunda es una lámina equivalente a 0.7 cm. El escurrimiento superficial para Qa = 0.6 l/seg es de 11.6 cm, pero si se reduce Qa en 62.5% una

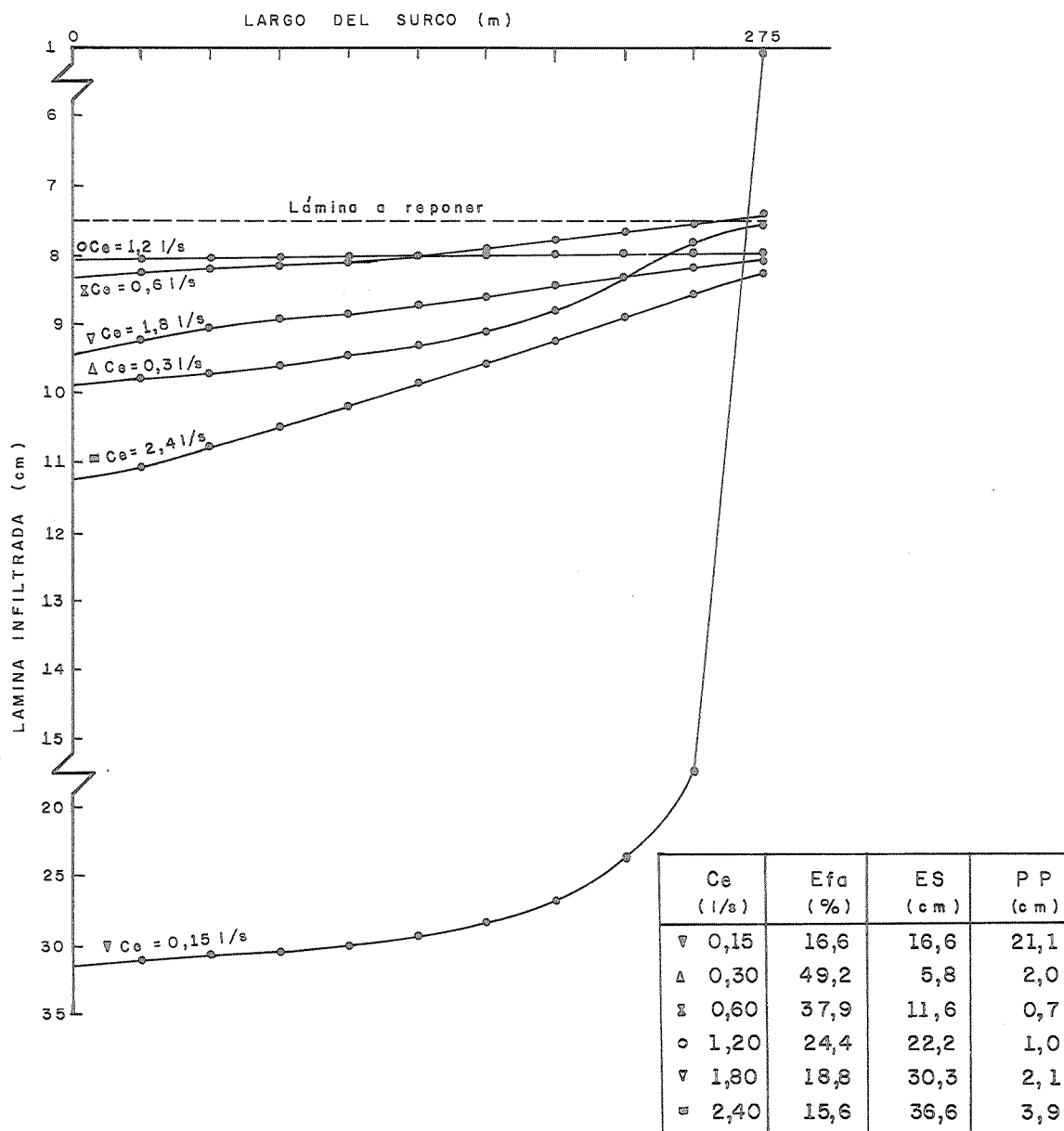


FIGURA 4
LAMINA INFILTRADA A TRAVES DEL SURCO; EFICIENCIA DE APLICACION (E_{fa}),
ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL (ES) Y PERCOLACION PROFUNDA (PP) PARA 6 CAUDALES
DE ENTRADA (C_e) EN UN SUELO FRANCO ($L = 275$ m; $S = 0,004$; $W = 0,75$ m; $N = 0,04$).

vez completada la fase de avance, el escurrimiento superficial disminuye a 2.6 cm y la E_a se incrementa hasta 70.1% (Figura 3).

Es necesario señalar el efecto de los valores extremos de Q_a estudiados, 0.15 y 2.4 l/seg, respectivamente. En el primer caso, ambos

componentes de la E_a (escurrimiento superficial y percolación profunda) son significativos; esto se debe a que el tiempo de avance del agua durante la primera fase de la operación del riego es muy largo, permitiéndose que el tiempo de oportunidad de infiltración induzca una

significativa percolación en los primeros tramos del surco. Asimismo, con el fin de lograr la infiltración completa de la lámina de reposición en el extremo final del surco, es necesario mantener un tiempo adicional de riego, durante el cual el agua fluye constantemente fuera del surco por su extremo inferior, sin que en este caso sea técnicamente posible reducir el caudal de entrada bajo el valor de Q_a . Así, el tiempo total de riego resulta en este caso 2021 minutos, comparado con 1134 minutos, para el riego con $Q_a = 0.6$ l/seg.

En el segundo caso ($Q_a = 2.4$ l/seg), la percolación profunda se reduce a 3.9 cm, comparado con el caso anterior en que esta percolación es 21.1 cm. Sin embargo, el escurrimiento superficial alcanza una lámina equivalente de 36.6 cm, que es 5 veces mayor que la lámina de reposición. Con grandes caudales es posible reducir significativamente el tiempo de riego, de 1134 minutos para $Q_a = 0.6$ a sólo 687 minutos para $Q_a = 2.4$ l/seg; esto se debe a que el tiempo de avance se hace pequeño en relación al tiempo total; sin embargo, esta re-

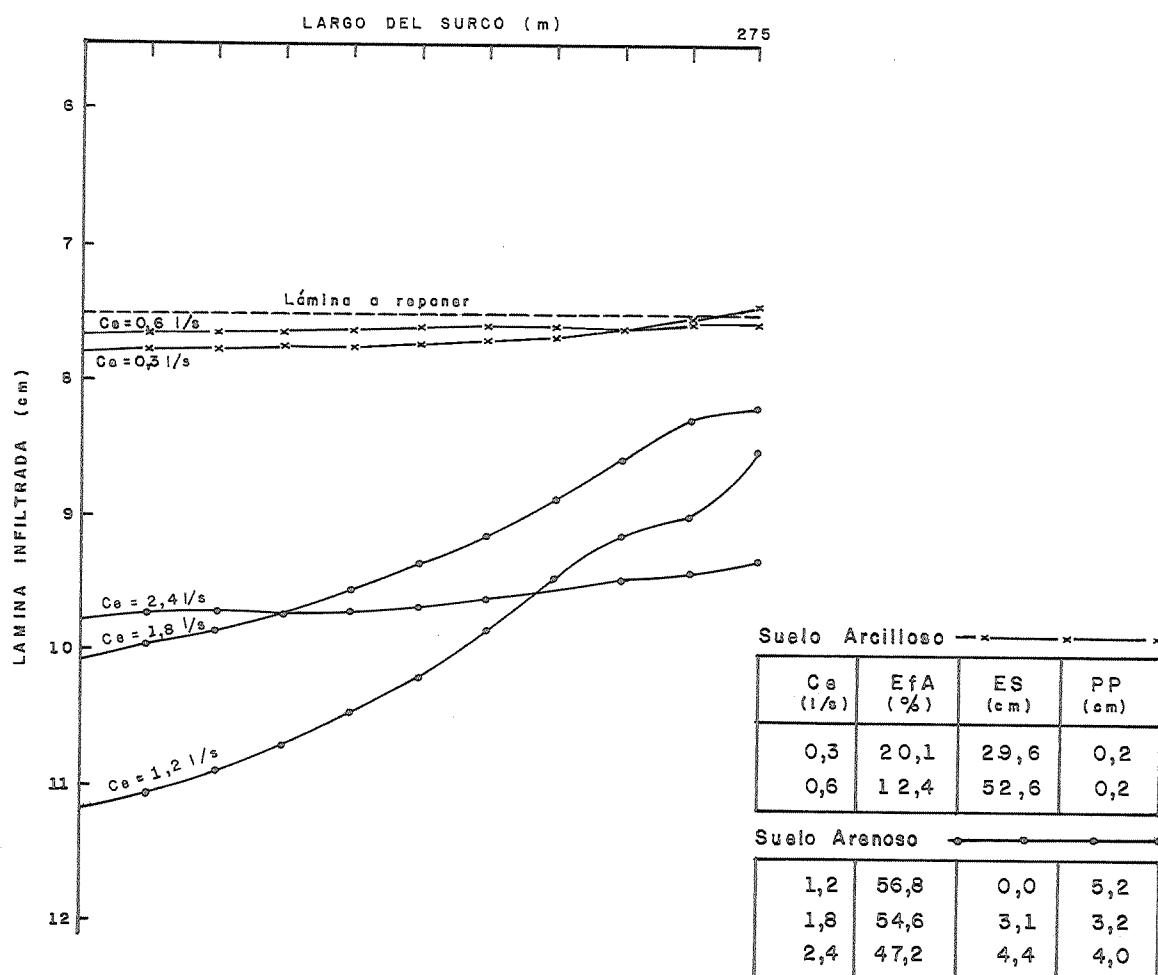


FIGURA 5
LAMINA INFILTRADA A TRAVÉS DEL SURCO; EFICIENCIA DE APLICACION (E_{fA}),
ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL (ES), PERCOLACION PROFUNDA (PP) PARA 3 CAUDALES
DE ENTRADA (C_e) EN UN SUELO ARENOSO Y 2 EN UN SUELO ARCILLOSO
($L = 275$ m; $S = 0.004$; $N = 0.04$; $W = 0.75$ m).

ducción del tiempo de riego tiene como consecuencia una Ea de sólo 15.6%.

Resultados comparables se obtienen en los suelos arcilloso y arenoso estudiados (suelos A y C, Tabla 1). Los perfiles de infiltración y otros valores relevantes se presentan en la Figura 5. En el suelo arcilloso hay una relación directa entre Q_a y el escurrimiento superficial, ya que la velocidad de infiltración de este suelo reduce la posibilidad de percolación a un valor prácticamente constante de 0.2 cm. En un surco de 275 m de largo diseñado para este suelo arcilloso, un $Q_a = 0.3$ l/seg resulta ser el caudal inicial de entrada más eficiente, obteniéndose una Ea de 20.1%; sin embargo, esta Ea se incrementa hasta 72.3% con un largo óptimo de 800 m y con una reducción del valor de Q_a de 50% al finalizar la fase de recesión.

En el suelo arenoso, los caudales necesarios para regar eficientemente el surco de 275 m de largo (1.2 – 1.8 l/seg), resultan ser significativamente superiores a la erodabilidad de un suelo de este tipo; la aplicación del modelo G y C a este suelo indica que el largo óptimo es inferior a 100 m. Sin embargo, se incluyen estos resultados para ejemplificar la versatilidad del modelo desarrollado en este trabajo y su utilidad en el diseño y la evaluación del riego por surcos en una amplia gama de situaciones de suelos y caudales de operación.

Con el modelo desarrollado en este trabajo, el diseño y las normas de operación óptimas pueden ser definidas para un conjunto muy amplio de situaciones de suelo y disponibilidad del recurso agua, pudiendo seleccionarse así la combinación más adecuada de pendiente, forma y longitud del surco, caudal inicial de entrada y reducciones posteriores de éste, al término de la fase de avance, que aseguren una alta eficiencia agronómica para esta situación específica.

La prueba posterior en terreno de las combinaciones que aparezcan como las más promisorias y los ajustes menores que resulten necesarios, hacen de este enfoque para definir un riego por surco específico una herramienta versátil y de gran utilidad.

RESUMEN

Se describe un modelo matemático desarrollado para el diseño de sistemas de riego por surcos, basado en el enfoque de "balance de volúmenes", para la descripción de la fase de avance; el modelo integra también el concepto de "rutina hidrológica", en la descripción de la fase de recesión del riego en el surco. El modelo está complementado con una rutina de simulación del proceso de riego, que permite evaluar los componentes de la eficiencia de utilización del agua en surcos diferentes, diseñados con el modelo.

La rutina de simulación del riego permite calcular el desarrollo de las fases de avance y recesión del riego en el tiempo, determinándose explícitamente el tiempo de oportunidad y la distribución de las láminas infiltradas en cada punto a lo largo del surco.

Con fines de evaluación del diseño y la operación del sistema de riego por surcos, se presenta un análisis cuantitativo del efecto relativo de los principales parámetros de diseño, sobre los componentes de la eficiencia de aplicación del agua y sobre las dimensiones óptimas de la unidad de riego diseñada.

Entre los parámetros considerados en el estudio se incluyen características de infiltrabilidad de tres suelos diferentes, que están relacionadas con los procesos de flujo de agua sobre y dentro del perfil del suelo; asimismo, son evaluados los efectos de parámetros relacionados con las condiciones de operación del sistema de riego en el campo, tales como el largo del surco, el caudal inicial de entrada y el tiempo de duración del riego.

Una de las proyecciones futuras del modelo presentado, que no es posible incluir directamente en otros modelos alternativos publicados en la literatura científica especializada, es que puede permitir incluir con gran flexibilidad, el análisis del riego en suelos con pendiente longitudinal variable, con infiltrabilidad espacialmente variada y con hidrogramas de caudal de entrada variables, constituyéndose así en una herramienta versátil, con un espectro de aplicaciones bastante amplio. El autor principal está desarrollando una línea de trabajo en estos aspectos, sobre la base del modelo presentado aquí.

El programa computacional que complementa el modelo, está adaptado para su utilización en minicomputadores de tipo personal; la disponibilidad de este tipo de equipamiento computacional, así como la versatilidad y flexibilidad de construcción del programa, per-

miten la utilización del modelo desarrollado en aplicaciones como la extensión de tecnologías de riego, en la docencia especializada y en la evaluación de las variables de diseño y operación del riego por surcos con fines de tecnificación del riego en condiciones de campo.

BIBLIOGRAFIA

- BASSETT, D.L., FANGMEIER, D.D. y STRELKOFF, T. 1980. *Hydraulics of surface irrigation*. En: Design and Operation of Farm Irrigation Systems. ASAE, Monograph N° 3, Cap. 12. Editor: M.E. Jensen, St. Joseph, Michigan.
- BASSETT, D.L. y FITZSIMMONS, D.W. 1976. *Simulation overland flow in border irrigation*. Trans. of the ASAE 19(4): 674-680.
- BOOHER, L. 1974. *El riego superficial*. FAO, Cuadernos de Fomento Agropecuario. Roma, Italia. 162 pp.
- BOS, M.G. y NUTGEREN, J. 1974. *On Irrigation Efficiencies*. ILRI Public. N° 19. 89 pp.
- CHEN, C.L. y HANSEN, V.E. 1966. *Theory and characteristics of overland flow*. Trans. ASAE 9(1): 324-332.
- CLEMMENS, A.J. 1979. *Verification of the Zero-Inertia model for border irrigation*. Trans. of the ASAE 22(5): 1306-1309.
- CLEMMENS, A.J. 1980. *Depths of flow in level basins*. Trans. of the ASAE 23(4): 910-913.
- COLLINS, H.G. y KOLUVEK, P.K. 1981. *Design of furrow or corrugation systems using SCS techniques*. Paper N° 81-2551, ASAE, St. Joseph, Michigan.
- CRIDDLE, W.S., DAVIS, S., PAIR, C.H. y SHOCKLEY, D. 1956. *Methods for evaluating irrigation systems*. USDA, SCS Agric. Handbook N° 82. 24 pp. Washington, D.C.
- ELLIOT, R.L. 1980. *Furrow irrigation field evaluation data*. Colorado State University, Fort Collins.
- ELLIOT, R.L. y WALKER, W.R. 1982. *Field evaluation of furrow infiltration and advance functions*. Trans. of the ASAE 15(2): 396-400.
- FINKEL, H. 1982. *Handbook of Irrigation Technology*. CRC ed. 653 pp. Boca Raton, Florida.
- FOK, YU-SI y BISHOP, A.A. 1965. *Analysis of water advance in surface irrigation*. Proc. Am. Soc. Civ. Engr., Irrig. and Drain. Div. J. 91(IR-1): 101-115.
- FONKEN, D.W., CARMODY, T.L., LAURSEN, E.M. y FANGMEIER, D.D. 1980. *Mathematical model of border irrigation*. Proc. Am. Soc. Civ. Engr., Irrig. and Drain. Div. J. 106 (IR-3): 203-220.
- FUKUDA, H. 1976. *Irrigation in the world*. Comparative developments. University of Tokio Press. 328 pp. Tokio, Japón.
- GATES, T.W., y CYLMA, W. 1984. *Designing Furrow Irrigation systems for improved seasonal performance*. Trans. ASAE 27: 1817-1824.
- GUROVICH, L.A. 1978. *Conceptualización de la eficiencia de riego a nivel predial*. Análisis de algunas situaciones en Chile. Ciencia e Inv. Agr. 5(4): 213-224.
- GUROVICH, L.A. 1985. *Fundamentos y Diseño de Sistemas de Riego*. IICA ed. 433 pp. San José, Costa Rica.
- GUROVICH, L. y RAMOS, R. 1984. *Parametrización del diseño de riego por bordes*. Ciencia e Inv. Agr. 11(1): 35-47.
- HART, W.E., BASSETT, D.L. y STRELKOFF, T. 1968. *Surface irrigation hydraulics-kinematics*. J. of Irrig. and Drain. Div. ASCE 94 (IR-4): 419-440.
- HART, W.E., COLLINS, H.G., WOODWARD, G. y HUMPHERYS, A.S. 1980. *Design and operation of gravity or surface systems*. En: Design and Operation of Farm Irrigation Systems. ASAE Monograph N° 3, Cap. 13. Editor: M.E. Jensen, St. Joseph, Michigan.
- HILLEL, D. 1980. *Applications of Soil Physics*. Academic Press. New York. 385 pp.
- JENSEN, M.E. 1980. *Design and operation of farm irrigation systems*. Am. Soc. Agric. Engineers. 823 pp.
- KATOPODES, N.D. y STRELKOFF, T. 1977. *Hydrodynamics of border irrigation-complete model*.

- Proc. Am. Civ. Engr. Irrig. and Drain. Div. J. 103 (IR-3): 309-324.
- KATYAL, A.K. y KUNE, J.W. 1980. *Prediction of the advancing wetting front in border strip irrigation*. Irrig. Science 1: 177-184.
- LEY, T.W. 1978. *Sensitivity of furrow irrigation performance to field and operation variables*. M. Sc. Thesis, Colorado State University, Fort Collins. 174 pp.
- LEY, T.W. y CLYMA, W. 1980. *Furrow irrigation design*. Department of Agric. & Chem. Engineering. Colorado State University, Ft. Collins, CO.
- RAMOS, R. y GUROVICH, L. 1984. *Un modelo computarizado para diseñar sistemas de riego por bordes*. Ciencia e Inv. Agr. 11(1): 49-59.
- REDELL, D.L. 1981. *Modified rate of advance method for an automatic furrow irrigation systems*. ASAE paper Nº 81-2552, St. Joseph, Michigan.
- SINGH, V.P. 1979. *Derivation of shape factors for border irrigation advance*. Agric. Water Manag. 2: 271-288.
- SMITH, D.L. 1984. *Prediction of furrow irrigation advance rates using real time measurements*. M. Sc. Thesis, Colorado State University, Fort Collins 121.
- SOUZA, F. 1981. *Non-linear hydrodynamic model of furrow irrigation*. Ph. D. dissertation, Univ. of California, Davis. 172 pp.
- STRELKOFF, T. 1970. *Numerical solution of the Saint-Venant equations*. Proc. Am. Soc. Civ. Engr., Hydr. Div. J. 96 (HY-1): 223-252.
- STRELKOFF, T. y KATOPODES, N.D. 1977. *Border irrigation hydraulics with zero-inertia*. Proc. Am. Soc. Civ. Engr., Irrig. and Drain. Div. J. 103(IR-3): 325-342.
- U.S.D.A. 1978. *Furrow Irrigation*. National Engineering Handbook. Ch. 4 Sec. 16, SCS, Agric. Washington, D.C.
- WALKER, W.R. y SKOGERBOE, G.V. 1984. *The theory and practice of surface irrigation*. 742 pp. Logan, Utah.
- WHITERS, B. y VIPOND, S. 1980. *Irrigation design and practice*. Cornell University Press. 306 pp. Ithaca, N. York.
- WU, I-PAI. 1972. *Recession flow in surface irrigation*. Proc. Am. Soc. Civ. Engr., Irrig. and Drain. Div. J. 98 (IR-1) 77-90.