

0877#

LA SOLUCION ADIMENCIONAL EN EL DISEÑO DE
PARCELAS CON RIEGO POR GRAVEDAD
(MELGAS Y SURCOS)

JOSE ELIAS CHEDID ABRAHAM

TRABAJO
PRESENTADO A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA
DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA
(APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS)

CIUDAD UNIVERSITARIA MARZO 1986



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

RESUMEN

Se presentan los métodos adimensionales como una alternativa de diseño del riego parcelario por gravedad. Las gráficas están basadas en la solución numérica de las ecuaciones de continuidad y conservación de cantidad de movimiento, para una serie de combinaciones y dentro de límites -- prácticos. Con los métodos adimensionales se puede determinar la curva -- de avance del flujo, la distribución de la lámina infiltrada, el tiempo de riego y la eficiencia de aplicación.

APROBADO POR EL JURADO

PRESIDENTE: _____

VOCAL: _____

SECRETARIO: _____

SUPLENTE: _____

SUPLENTE: _____

I N T R O D U C C I O N

El diseño de riego superficial por gravedad (o riego parcelario) consiste en encontrar la combinación entre el gasto, la longitud de riego y el tiempo de riego que nos dé la máxima eficiencia. Se entiende por eficiencia a la relación que existe entre el volúmen total de agua que entra en la parcela y el volúmen que está en una zona potencial de aprovechamiento para la planta (Figura I).

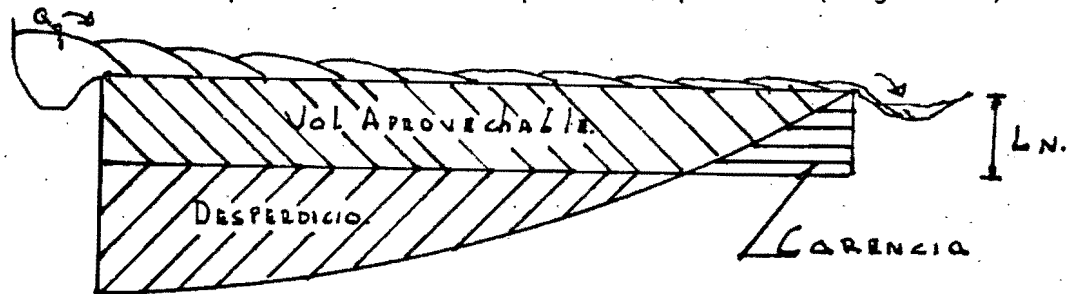


Figura I

Para poder identificar todas las variables que intervienen en el fenómeno, se definen los siguientes conceptos:

Curva de avances.- Es la relación que existe entre el tiempo y la distancia que avanza el agua (frente húmedo) para un gasto de entrada determinado. Los límites de esta curva están entre el tiempo inicial $t=0$ y el tiempo en que se corta el gasto $t=t_{co}$.

Curva de recesión.- Es la relación entre el tiempo y la distancia que avanza el agua, una vez que se ha cortado el gasto de entrada ($Q=0$).

Tiempo de aplicación (t_{co}).- Es el tiempo que pasa desde que se inicia el riego ($t=0$) hasta que el gasto de entrada es cero.

Tiempo de recesión.- Es el tiempo que tarda en infiltrarse el volúmen de agua que quedó sobre el terreno, una vez que el gasto de entrada es cero.

Avance máximo.- Es la longitud máxima en dirección del flujo hacia aguas abajo que avanzó el agua durante el proceso de riego (incluyendo la fase de recesión).

Perfil de infiltración.- Es una curva que representa las láminas infiltradas contra la distancia de avance del flujo.

Gasto Unitario (Q_{in}).- Es el volúmen por unidad de tiempo y por unidad de ancho que entra en la superficie de riego.

$$S_o = \frac{\text{Elevación punto inicial} - \text{Elevación punto final}}{\text{Distancia entre los dos puntos.}}$$

Función de infiltración.- Es una ecuación que relaciona el tiempo en que está un volúmen de agua sobre la superficie y la lámina que se infiltra. La función de infiltración usada en todos los métodos que se expondrán es la de Kostiaikov [$Z(t) = Kt^a$] en donde K y a son las constantes de regresión para cada suelo en particular y resultan de la medición en campo de la infiltración.

Es pertinente aclarar que la idea principal del diseño de riego por gravedad es definir cuál es la longitud óptima (la que nos da mayor eficiencia) para los diferen-

tes gastos de entrada posibles.

En el Capítulo I se presentan los métodos que existen para el diseño del riego parcelario. La utilización de cualquiera de ellos depende del nivel de exactitud que requieran los resultados, o sea, a nivel proyecto, anteproyecto, revisión, etc.

Posteriormente en el Capítulo II se presentan los métodos numéricos, esto es con el fin de poder conocer -- las bases de donde surgieron los métodos adimensionales, los cuales son nomogramas fabricados con la solución de -- varios casos por medio de los métodos numéricos.

El Capítulo III se refiere a los métodos adimensionales existentes. Este capítulo contiene la metodología de solución de cada método, así como, las gráficas necesarias para su utilización.

Anexo a este Capítulo III se encuentra el Capítulo IV en el cual se muestra cómo aplicar las metodologías de solución a casos específicos. Esto servirá para comparar a los diferentes métodos entre sí.

Por último, se señalan las conclusiones y recomendaciones más importantes, las cuales servirán para una mejor aplicación del presente trabajo.

CAPITULO I

ESTADO DEL ARTE DE LOS METODOS PARA EL DISEÑO DE RIEGO - POR GRAVEDAD.

Los métodos para el diseño de riego por gravedad, -
se pueden clasificar como sigue:

- Métodos empíricos
- Métodos Semi-empíricos
- Métodos Analíticos
- Métodos Numéricos
- Métodos Adimensionales.

Métodos Empíricos.- Estos métodos están basados principal-
mente en una serie de observaciones del funcionamiento de
superficies de riego con diferentes tipos de suelo y dife-
rentes pendientes. Los valores que se obtienen de estas
tablas son gasto unitario, dosis de riego, ancho y longi-
tud de melga o longitud de surco [15].

Métodos Semi-empíricos.- Estos métodos funcionan con da-
tos obtenidos en campo para un proyecto en particular, --
combinados con un desarrollo analítico con base en estos
datos. Los principales datos obtenidos en campo son la -
curva de avance y la función de infiltración, y con base
en la aplicación de algunas fórmulas se puede obtener el
gasto unitario, la longitud de riego, el tiempo de riego,

la lámina de infiltración, la eficiencia del riego y la curva de avance contra tiempo (ésta última se obtiene en campo). Dentro de estos métodos están los propuestos por el USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos). Los cuales son:

- Teoría de los dos gastos
- Teoría de un solo gasto
- Teoría para superficies con pendiente.

Métodos Analíticos.- Estos métodos se basan en el desarrollo algebraico de las ecuaciones de riego superficial. Mediante una serie de cálculos algebraicos se pueden obtener los puntos de la curva de avance contra tiempo. Dentro de estos métodos se cuenta con el de HAISE [1] que se basa en la solución de la siguiente ecuación.

$$\Delta x_i = \frac{Q \Delta t - A_0 (\overline{\Delta I_i} \Delta x_i + \Delta I_{i-1} \Delta x_i + \dots)}{(C_1 V_0 + C_2 A_0 \overline{I_i})} \quad \text{I.1}$$

en donde:

- Δx_i - Distancia recorrida en el tiempo t_i
- Q - Gasto en m^3/s
- V_0 - Sección de Almacenaje M^2
- $\overline{\Delta I_i} = \frac{I_i - I_{i2}}{2}$
- I_i - Lámina infiltrada en el tiempo t_i en m ---
(función de Kostiakov o de Philips).
- C_1 y C_2 - Coeficientes

Otro método analítico es el de Theodor Strelkoff -- [2]. También en este grupo está el método de los "Módulos de riego" de Shawb [3] mediante el cual se diseñan las longitudes de riego en base a 2 gastos, uno mínimo de avance y otro máximo no erosionable.

Métodos numéricos.- Son modelos matemáticos que solucionan mediante algoritmos numéricos, las ecuaciones diferenciales parciales de continuidad y conservación de cantidad de movimiento, las cuales para riego superficial se presentan de la siguiente forma:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (1.2)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial z} = S_0 - S_f + \frac{1}{2g^3} v \frac{\partial^3}{\partial t^3} \quad (1.3)$$

En donde:

x - Distancia hacia aguas abajo en dirección del flujo

$v(x,t)$, $y(x,t)$, $z(x,t)$ - velocidad, tirante y gasto unitario

$\frac{\partial z}{\partial t}$ - infiltración

S_0 - pendiente del terreno

S_f - pendiente de fricción.

$$S_f = \frac{q^2 n^2}{y^{4/3}} \quad (1.4)$$

Las expresiones I.2 y I.3 son las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento respectivamente y deben resolverse simultáneamente.

Métodos Adimensionales.- Consisten en proponer valores ca racterísitcos adimensionales, los cuales representan a to das las variables que intervienen en el fenómeno (So, L, Y, X, Tco, Z, etc.); con base en estos valores se han construído gráficas por medio de las cuales se puede calcular la curva de avance. Dentro de estos métodos están los que calculan la curva de avance para superficies hori zontales (sin pendiente) y los que calculan la misma cur va para superficies con pendiente.

CAPITULO II

METODOS NUMERICOS

Los métodos numéricos que existen para la simulación del riego por gravedad son:

- Método de J. Sakkas - T. Strelkoff
- Método de T. Strelkoff - N. Katopodes
- Método de D. Funken - T. Carmody

Método de Sakkas - Strelkoff.- Jhon G. Sakkas y Theodor Strelkoff, propusieron un modelo matemático [4,6] que resuelve las ecuaciones diferenciales parciales de continuidad y conservación de cantidad de movimiento por medio del método de las características.

Las ecuaciones de Saint-Venant de continuidad y cantidad de movimiento son:

$$A \frac{\partial v}{\partial x} + Bv \frac{\partial v}{\partial x} + B \frac{\partial v}{\partial t} + I = 0 \quad (\text{II.1})$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} = S_0 - S_r + \frac{vI}{2gA} \quad (\text{II.2})$$

En donde:

A.- Area de la sección transversal del flujo (m^2)

B.- Gasto pico del flujo M^3/seg

- G .- Aceleración de la gravedad m/seg²
I .- Infiltración por unidad de longitud de canal m
So.- Pendiente del canal
T .- Tiempo seg.
V .- Velocidad promedio del flujo m/seg
X .- Distancia a lo largo del canal m
Y .- Tirante del flujo m
Sf.- Pendiente de fricción

$$S_f = \left(\frac{V \cdot m}{Y^{3/2}} \right)^2 \quad (II.3)$$

Ecuaciones características.- Las ecuaciones de Saint-Venant se transforman en una característica mediante una combinación lineal de la siguiente forma: La ecuación II.1 se multiplica por $\sqrt{gA/B}$ y se suma a la ecuación II.2 y después multiplicando por g queda:

$$\left[\frac{\partial v}{\partial t} + (v \pm c) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \sqrt{\frac{gB}{A}} \left[\frac{\partial z}{\partial t} + (v \pm c) \frac{\partial z}{\partial x} \right] = g(S_o - S_c) + \frac{I}{ZA} \quad (II.4)$$

En donde:

C.- Celeridad del flujo

$$c = \sqrt{\frac{gA}{B}}$$

II.5

Introduciendo la variable de Escoffer

$$\omega(\psi) = \sqrt{\frac{gB(\psi)}{A(\psi)}} d\psi \quad (II.6)$$

y observando que:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{dw ds}{ds dt} = \sqrt{g \frac{B(s)}{A(s)} \frac{ds}{dt}} \quad (\text{II.7})$$

quedando la ecuación II.3 finalmente en la forma característica:

$$\frac{d}{dt} (V \pm w) = g (S_0 - S_e) + \frac{1}{2A} (V \mp 2C) \quad (\text{II.8})$$

Con el fin de facilitar la solución numérica de las ecuaciones diferenciales no lineales resultantes de las relaciones características son inducidas dos variables de pendientes.

$$F(x, t) = V + w \quad (\text{II.9.a.})$$

$$H(x, t) = V - w \quad (\text{II.9.b.})$$

$$V = \frac{F+H}{2} \quad (\text{II.10.a.})$$

$$w = \frac{F-H}{2} \quad (\text{II.10.b.})$$

El flujo en el canal puede relacionarse con el tirante mediante la siguiente expresión:

$$B = C Y^m \quad (\text{II.11})$$

en donde C y M son cm^2 , el área de la sección transversal es:

$$A = \frac{B Y}{M + 1} \quad (\text{II.12})$$

por lo tanto la celeridad es:

$$C = \sqrt{\frac{g A}{B}} = \sqrt{\frac{g Y}{M + 1}} \quad (\text{II.13})$$

y la variable de Escoffier será:

$$W = 2(M + 1)C \quad (\text{II.14})$$

en términos de F y H el tirante de flujo es:

$$Y = \frac{(F - H)^2}{16 g (M + 1)} \quad (\text{II.15})$$

$$F = g (S_0 - S_f) + \frac{I(V - 2C)}{2A} \quad (\text{II.16})$$

$$h = g (S_0 - S_f) + \frac{I(V + 2C)}{2A} \quad (\text{II.17})$$

$$\alpha = V + C \quad (\text{II.18.a})$$

$$\beta = V - C \quad (\text{II.18.b})$$

Sustituyendo las ecuaciones II.10.a y II.15 en las ecuaciones II.16 y II.17 queda:

$$F = g \left[S_0 - \frac{m^2 (F + H)^2}{4 Y^{3/2}} \right] + \frac{I}{4(M + 1)A} [MF + (M + 2)H] \quad (\text{II.19})$$

$$h = g \left[S_0 - \frac{m^2 (F+H)^2}{4V^{4/3}} \right] + \frac{I}{4CM^3A} [(M+2)F + MH] \quad (\text{II.20})$$

$$\alpha = \frac{(2M+3)F + (2M+1)H}{4M+4} \quad (\text{II.21})$$

$$\beta = \frac{(2M+1)F + (2M+3)H}{4M+4} \quad (\text{II.22})$$

$$\frac{dF}{dt} = f \quad (\text{II.23.a})$$

$$\frac{dx}{dt} = \alpha (C+) \quad (\text{II.23.b})$$

$$\frac{dx}{dt} = \beta (C-) \quad (\text{II.24.a})$$

$$\frac{dH}{dt} = h \quad (\text{II.24.b})$$

Solución numérica de las ecuaciones características.- Para la solución numérica de las ecuaciones II.23 y II.24 - se usa el método predictor corrector, siendo la fórmula de Euler el predictor y la fórmula del rule trapezoidal - el corrector.

Aplicación de la fórmula predictor (Método de Euler).

Los subíndices L, R, P indican los valores de las variables en los respectivos puntos (ver figura II).

$$F_p^{\circ} = F_L + (t_p^{\circ} - t_L) f_L \quad (II.25)$$

$$X_p^{\circ} = X_L + (t_p^{\circ} - t_L) \alpha_L \quad (II.26)$$

$$H_p^{\circ} = H_R + (t_p^{\circ} - t_R) h_R \quad (II.27)$$

$$X_p^{\circ} = X_R + (t_p^{\circ} - t_R) \beta_R \quad (II.28)$$

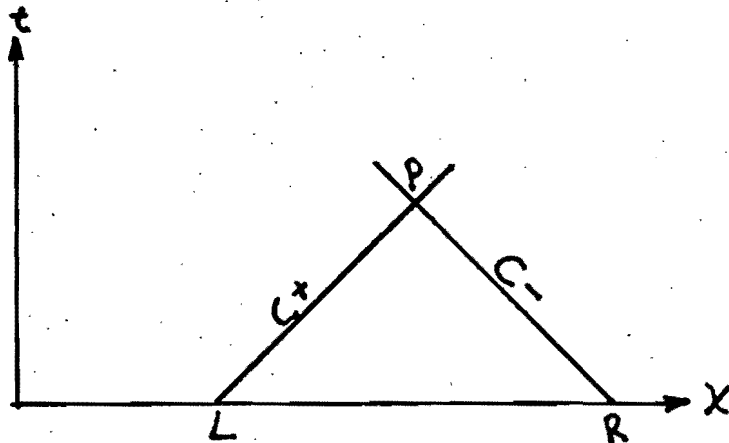


Figura II

La solución simultánea de las ecuaciones II.26 y II.28 es:

$$X_p^{\circ} = \frac{\alpha_L X_R - \beta_R X_L + \alpha_L \beta_R (t_L - t_R)}{\alpha_L - \beta_R} \quad (II.29)$$

$$t_p^{\circ} = \frac{X_R - X_L + \alpha_L t_L - \beta_R t_R}{\alpha_L - \beta_R} \quad (II.30)$$

Aplicación de la fórmula corrector (root trapezoidal)

$$F_p^{2n} = F_L + \frac{1}{2} (t_p^{2n} - t_L) (F_L + F_p^{2n}) \quad (\text{II.31})$$

$$H_p^{2n} = H_R + \frac{1}{2} (t_p^{2n} - t_R) (h_R + h_p^{2n}) \quad (\text{II.32})$$

$$X_p^{2n} = \frac{\alpha X_R - \beta X_L + \alpha \beta (t_L - t_R)}{\alpha - \beta} \quad (\text{II.33})$$

$$t_p^{2n} = \frac{X_R - X_L + \alpha t_L - \beta t_R}{\alpha - \beta} \quad (\text{II.34})$$

Condiciones iniciales

$$C = \frac{(w_1 - (X/t))}{2M+3} \quad (\text{II.35})$$

$$V = \frac{w_1 + (2M+2)(X/t)}{2M+3} \quad (\text{II.36})$$

$$Q_0 = \frac{(M+1)2M+1.5}{(M+1.5)^{2M+3}} c \sqrt{g} Y_1^{M+1.5} \quad (\text{II.37})$$

Condiciones de frontera izquierda

$$X = 0; Q = Q_0(t) \quad (\text{II.38.a})$$

Condiciones de frontera derecha

$$Y = 0; \frac{dX}{dt} = w(X) \quad (\text{II.38.b})$$

La velocidad es igual a la velocidad de propagación del -

frente de onda.

Según Whitam [5]:

$$\frac{d\gamma}{dx} = - \frac{m^2 V^2}{\gamma^{4/3}} \quad (\text{II.39})$$

$$\chi_w = \chi_r + \frac{1}{m^2 V^2} \int_0^{\gamma^6} \gamma^{1/3} d\gamma \quad (\text{II.40})$$

$$t_w = t_r \quad (\text{II.41.a})$$

$$V = V_w = V_r \quad (\text{II.41.b})$$

La integral de la ecuación II.40 es una función del límite superior y puede ser calculado para cada sección del canal. Estos valores se pueden tabular y los valores de la integral y se determinan por interpolación.

Tenemos que:

$$\frac{\partial F}{\partial F} = - \frac{\partial m^2 V}{\gamma^{4/3}} \left(1 - \frac{2}{3} \frac{cV}{gR} \frac{dR}{d\gamma} \right) + \frac{I}{4A} \left(\frac{3M+2}{M+1} - \frac{V}{c} \right) \quad (\text{II.42})$$

$$\frac{\partial P}{\partial H} = - \frac{\partial m^2 V}{\gamma^{4/3}} \quad (\text{II.43})$$

$$\frac{\partial F}{\partial c} = \frac{m \delta_w (V - 2c)}{2A} \left[t - t_w(x) \right]^{\delta-1} \quad (\text{II.44})$$

En donde:

$$\frac{dR}{d\gamma} = \frac{1}{P} \left(B - \frac{R dP}{d\gamma} \right) \quad (\text{II.45})$$

$$\frac{dP}{d\gamma} = 2 \sqrt{1 + \left(\frac{M\epsilon}{2} \gamma^{M-1} \right)^2} \quad (\text{II.46})$$

M=0 Sección rectangular

M=1/2 Sección parabólica

M=1 Sección triangular.

Discusión del método.- Generalmente la solución de las -- ecuaciones diferenciales parciales utilizando el método -- predictor-corrector tiene un buen grado de exactitud y -- además este método converge rápidamente. Por lo tanto, -- se considera que los resultados obtenidos son aceptables. El costo por cada corrida (resuelve toda la curva de avance) es de 10 a 15 dólares.

Método de Strelkoff-Katopodes.

Theodor Strelkoff y Nikolaos Katopodes propusieron en 1977 un método para resolver las ecuaciones diferenciales parciales de continuidad y conservación de cantidad de movimiento [7]:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.47})$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial \gamma}{\partial x} = S_0 - S_f + \frac{1}{2gy} v \frac{\partial z}{\partial t} \quad (\text{II.48})$$

En donde:

X = Distancia hacia aguas abajo en dirección a la corriente.

$v(x,t), \gamma(x,t), Q(x,t)$ = velocidad, tirante y gasto por unidad de ancho.

$\frac{\partial z}{\partial t}$ = tasa de infiltración

S_0 .- pendiente del terreno

S_f .- pendiente de fricción.

La solución de las ecuaciones 1 y 2 será dentro del intervalo $0 \leq x \leq L$ y está dentro del plano x-t mostrado en la figura III, y para una secuencia constante de tiempos t_i ($i=1,2,3,\dots$)

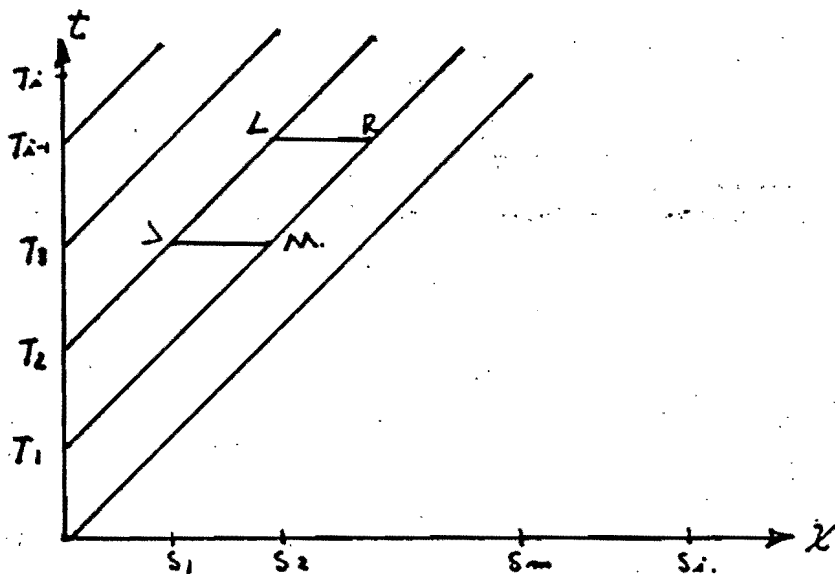


Figura III

Separados por un incremento constante de tiempo. Para cada línea de tiempos t_i , la solución es obtenida -- para una secuencia de puntos S_k ($k=0,1,2,3,\dots$). Las ecuaciones 1 y 2 son integradas numéricamente para una secuencia de pequeñas celdas de el plano $s-t$ como se ve en la figura III. Las integrales son expresadas aproximadamente en términos de valores conocidos del tirante y el gasto sobre la línea de tiempo t_{i-1} en términos de valores desconocidos de t_i .

El resultado es determinado por medio de ecuaciones algebraicas no lineales simultáneas en los volúmenes desconocidos. Estos son linealizados con respecto a los valores conocidos de t_{i-1} y la resultante es puesta en ecuaciones lineales simultáneas y resuelta por la técnica del doble recorrido [8].

Celdas Internas $| < K < N$, son las celdas $M \times R$ (figura III).

La ecuación de continuidad para este caso es:

$$\begin{aligned} & [(\gamma_L + z_L)\phi + (\gamma_R + z_R)(1-\phi)] \delta S_K - [(\gamma_S + z_S)\phi + \\ & (\gamma_M + z_M)(1-\phi)] \delta S_{K-1} = (\theta \{ [\gamma_L - (\gamma_L + z_L) \frac{\delta S_{K-1}}{\delta t}] - [\gamma_R - (\gamma_R + z_R) \frac{\delta S_K}{\delta t}] \} \\ & + (1-\theta) \{ [\gamma_S - (\gamma_S + z_S) \frac{\delta S_{K-1}}{\delta t}] - [\gamma_M - (\gamma_M + z_M) \frac{\delta S_K}{\delta t}] \}) dt \quad (II.49) \end{aligned}$$

y la de conservación de cantidad de movimiento

$$\gamma_R - \gamma_L = \delta S_K \left[S_0 - \frac{1}{2} \left(\frac{\gamma_R^2}{c_R^2 \gamma_R} + \frac{\gamma_L^2}{c_L^2 \gamma_L} \right) \right] \quad (II.50)$$

Para interpretar el significado de $Y_R, Y_L, Z_L, Z_R, Z_L,$ etc. Se presenta la figura IV, que representa un elemento de flujo en la curva de avance, los términos θ y ϕ son factores de ponderación y generalmente valen $1/2$.

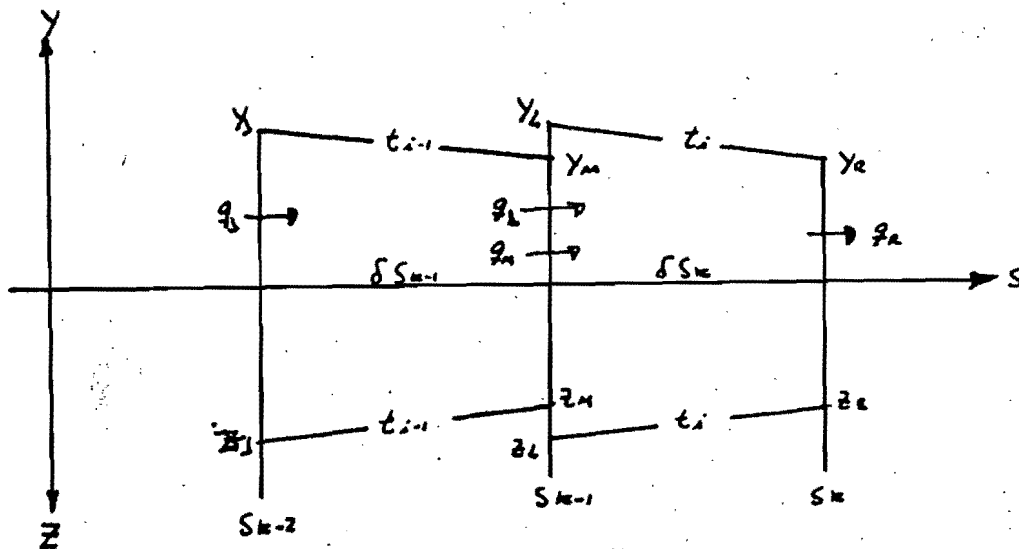


Figura IV

Celdas en el límite izquierdo $K=1$

Para este caso la ecuación 47 tiene la forma:

$$\begin{aligned} & [(\gamma_L + z_L)\phi + (\gamma_R + z_R)(1-\phi)]\delta S_i = \\ & (\theta \{ q_L - [q_R - (\gamma_R + z_R) \frac{\delta S_i}{\delta e}] \} + \\ & (1-\theta) \{ q_m - (\gamma_m + z_m) \frac{\delta S_i}{\delta e} \}) \delta t \end{aligned} \quad (II.51)$$

Celdas en el límite derecho $K=N$

Para este caso la ecuación 47 tiene la forma:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\gamma_L}{1+\beta} + \frac{z_L}{1+\alpha} \right) \delta S_{i-1} - \left(\frac{\gamma_L}{1+\beta} + \frac{z_L}{1+\alpha} \right) \delta S_{i+1} = \\ & \left\{ \theta [q_L - (\gamma_L + z_L) \frac{\delta S_{i-1}}{\delta e}] + \right. \\ & \left. (1-\theta) [q_L - (\gamma_L + z_L) \frac{\delta S_{i+1}}{\delta e}] \right\} \delta t \end{aligned} \quad (II.52)$$

En donde:

A= Constante de la fórmula de Koatikov

B= 3/7

Por otro lado la ecuación y_0 queda:

$$-\frac{B y_i}{\delta x_i} = S_0 - \frac{q_i^2}{C_i^2 y_i^3} \quad (II.53)$$

Linealización local de las ecuaciones. Con 2 ecuaciones por cada celda y 2 incógnitas "y" y "q" para puntos intermedios, desconocida "y" y conocida Q para $k=1$, $y=0$ y $q=0$ para $k=N$ pero desconocida δx_i , el número de ecuaciones algebraicas es igual al número de incógnitas. Sin embargo las ecuaciones son no lineales, lo que excluye una solución simultánea directa. La solución es obtenida una vez que linealizamos las ecuaciones con la inclusión de nuevas variables:

$$y_L = y_s + \delta y_L \quad (II.54)$$

$$y_R = y_M + \delta y_R \quad (II.55)$$

$$q_L = q_s + \delta q_L \quad (II.56)$$

$$q_R = q_M + \delta q_R \quad (II.57)$$

$$\delta x_i = \delta x_{i-1} + \delta \delta \quad (II.58)$$

$$y_L = y_M + \delta y_L \quad (II.59)$$

$$q_L = q_M + \delta q_L \quad (II.60)$$

Sustituyendo en las ecuaciones II.49, II.50, II.51 y II.53 nos quedan las siguientes ecuaciones lineales:

Para $1 < k < N$

$$[(1-\theta-\theta)\omega_k] \delta y_k + \theta \delta q_R = -[\theta \omega_k + \theta \omega_{k-1}] \delta y_i + \theta \delta q_i + [\theta \omega_k + (1-\theta)\omega_{k-1}] (y_M + z_M - y_s - z_s) + q_s - q_M \quad (II.61)$$

$$\left(1 - \frac{5}{3} \frac{\delta S_k S_{FM}}{\gamma_M}\right) \delta \gamma_R + \left(\frac{\delta S_k S_{FM}}{\gamma_M}\right) \delta \gamma_R = \left(1 + \frac{5}{3} \frac{\delta S_k S_{FM}}{\gamma_M}\right) \delta \gamma_L - \left(\frac{\delta S_k S_{FM}}{\gamma_M} \delta \gamma_L + \left[S_0 - \frac{1}{2} (S_{FM} + S_{FD})\right] (\delta S_k - \delta S_{k-1})\right) \quad (II.62)$$

Para K=1

$$\begin{aligned} & [(1 - \theta - \theta) W_k] \delta \gamma_R + \theta \delta \gamma_R = -\theta W_k \delta \gamma_L + \theta \delta \gamma_L + \theta W_k \delta \gamma_R \quad (II.63) \\ & \left(1 - \frac{5}{3} \frac{\delta S_k S_{FM}}{\gamma_M}\right) \delta \gamma_R + \left(\frac{\delta S_k S_{FM}}{\gamma_M}\right) \delta \gamma_R = \left(1 + \frac{5}{3} \frac{\delta S_k S_{FM}}{\gamma_M}\right) \delta \gamma_L - \left(\frac{\delta S_k S_{FM}}{\gamma_M} \delta \gamma_L + \delta S_k (S_0 - S_{FM})\right) \quad (II.64) \end{aligned}$$

Para K=N

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\gamma_2}{(1+\beta)\delta t} + \frac{z_2}{(1+\alpha)\delta t}\right] \delta \delta = -\left[\left(\frac{1}{1+\beta} + \theta\right) W_{k-1}\right] \delta \gamma_L + \theta \delta \gamma_L + \gamma_2 - W_{k-1} (\gamma_2 + z_2) \quad (II.65) \end{aligned}$$

$$\left[\frac{\beta \gamma_2}{(\delta S_{k-1})^2}\right] \delta \delta = \left(\frac{\beta}{\delta S_{k-1}} + \frac{10}{3} \frac{S_{FD}}{\gamma_2}\right) \delta \gamma_L - \left(\frac{2 S_{FD}}{\gamma_2}\right) \delta \gamma_L \quad (II.66)$$

En donde:

$$W_k = \frac{\delta S_k}{\delta t} \quad (II.67)$$

$$W_{k-1} = \frac{\delta S_{k-1}}{\delta t} \quad (II.68)$$

$$S_{FD} = \frac{\gamma_2^2 m^2}{\delta \gamma_2^2} \quad (II.69)$$

$$S_{FM} = \frac{\gamma_M^2 m^2}{\delta \gamma_M^2} \quad (II.70)$$

Proceso de solución.- La solución para cada incremento de tiempo se hace usando los valores conocidos de las variables para el tiempo anterior.

La naturaleza de la matriz de coeficientes permite el uso del procedimiento conocido como de doble recorrido. Una vez que los valores son obtenidos para δx y ordenados δy , las ecuaciones 54 a 60 son usadas para determinar δz y los valores de x y y para cada nudo. Después se avanza en el tiempo, los elementos de la nueva matriz de coeficientes son calculados y el algoritmo de doble recorrido aplicado. Este procedimiento se repite hasta que el agua llega al final de la melga (o surco).

Discusión del método.- La información que se tiene no permite conocer cómo funciona realmente el programa, por lo cual no podemos discutirlo. El único comentario que vale la pena es que en este caso la corrida cuesta 0.50 de dólares (250 pesos aproximadamente).

Método de Fonken-Carmody.- Davin Fonken, Thomas Carmody y otros dos autores (Laursen y Fangmeim) [9] presentaron un método numérico para la solución del fenómeno de flujo en riego superficial, el cual consiste en analizar el elemento como un cuerpo libre, con las diferentes fuerzas actuando sobre él (ver figura V).

En base a lo anterior la ecuación de continuidad se puede ver como:

entradas=salidas y cambio en el almacenamiento (II.71)

y la ecuación de conservación de cantidad de movimiento como:

$$DM - F5 + F6 + F7 = F3 + F1 - F2 - F4 \quad (II.72)$$

en donde:

F5 y F6.- Cantidad de movimiento para las fases aguas --- arriba y aguas abajo respectivamente.

DM.- Tasa interna de cambio de la cantidad de movimiento

F7.- Componente horizontal de la fuerza de peso del elemento y

F1 y F2.- Presiones hidrostáticas aguas arriba y aguas -- abajo respectivamente.

F4.- Fuerza tangencial por debajo del elemento.

Ecuación de continuidad.

$$Q(\Delta) + DT = \left(\frac{K(DT)^A}{A+1} * DX \right) + [Y(\Delta, 2) * C3 * DX] \quad (II.73)$$

Análisis de la ecuación de conservación de cantidad de movimiento.

$$DM = \frac{C * DY_{AVE} * DX * YENDTP}{DT} \quad (II.74)$$

En donde:

C = Densidad del agua

DY_{AVE} = Tirante promedio

$$V_{ENDTP} = \frac{0.6 Q(S)}{C_4 * Y(S,2)} \quad (II.75)$$

$$F_5 = C * \frac{Q(S)^2}{C_4 * Y(S,2)} \quad (II.76)$$

$$0.9 \leq C_4 \leq 0.99$$

$$F_6 = 0$$

$$F_7 = C * \frac{INFLTD * DX}{DT} * C_5 * \frac{Q(S)}{Y_{SAVG}} \quad (II.77)$$

$$INFLTD = \frac{1}{a+1} * K (DT)^a \quad (II.78)$$

$$C_5 = 0.4$$

$$F_3 = \gamma * DY_{AVG} * DX * SLOPE_B * \frac{C^3}{2} \quad (II.79)$$

γ = Peso específico

SLOPE B = Pendiente del terreno

$$F_1 = \frac{\gamma}{2} * [C_4 * Y(S,2)]^2 \quad (II.80)$$

$$F_2 = 0$$

$$F_4 = \tau_{AU} * DX \quad (II.81)$$

$$\tau_{AU} = \frac{\gamma * m^2 * Q(S)^2}{2 * Y_{SAVG}^{3/2}} \quad (II.82)$$

$$F_4 = \frac{\gamma * m^2 * Q(S)^2 * DX}{2 * Y_{SAVG}^{3/2}} \quad (II.83)$$

Sustituyendo los valores en la ecuación de conservación de cantidad de movimiento:

$$\frac{C * Y(\Delta) * C3 * Dx + 0.6 * Q(\Delta)}{Dt * Y(\Delta) * Cy} - \frac{C * Q(\Delta)^2}{Cy * Y(\Delta)} +$$

$$\frac{C * K * (Dt)^a * Dx + C5 * Q(\Delta)}{Dt * (a+1) * Cy * Y(\Delta)} = \frac{Y}{2} * Y(\Delta) * C3^2 * Dx * SLOPB + \frac{Y}{2} * (Cy * Y(\Delta))^2 -$$

$$\frac{Dx * Y * m^2 * Q(\Delta)^2}{2 [Cy * Y(\Delta)]^{2/3}} \quad (II.84)$$

para el cálculo del gasto en la estación I (anterior a la estación Δ) se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q(I) * Dt = Q(\Delta) * Dt + \frac{K}{a+1} * \{2 * [T(\Delta) - T(\Delta-2)]^a - (Dt)^a -$$

$$[T(I) - T(I-1)]^a * Dx + \left[\frac{Y(I,2) + Y(\Delta,2)}{2} - Y(\Delta,1) * C3 \right] * Dx \quad (II.85)$$

Procedimiento de solución.- La solución de las ecuaciones es cuantificando la primera sección en base a procesos iterativos. Con una primera solución aproximada se calcula la segunda solución y el promedio de estas dos es la solución definitiva inicial. El proceso de ajuste es iterativo y la solución converge con aceptable tolerancia. El proceso numérico de solución es una extensión de la técnica de Newton-Raphson.

En las ecuaciones II.73 y II.84 los valores de Dt y Y(J,2) son desconocidos (como se muestra en la figura VI) Si suponemos un valor inicial de Dt, la ecuación II.73 es resuelta para Y(J,2) y con este valor se obtiene un nuevo valor de Dt para la ecuación II.84, este se compara con el primer valor de Dt y hasta que se cumpla una tolerancia aceptable (1.2 seg) se puede aceptar que se tienen --

los valores correctos de Dt y $Y(J,2)$ para el primer tramo. Se repite este procedimiento para todos los demás tramos. Posteriormente se calcula el gasto para la siguiente sección con la ecuación II.85.

Discusión del método.- Dentro de los métodos numéricos -- presentados, éste último es el más aceptable, por lo siguiente:

- Analiza el fenómeno de una forma más completa.
- Presenta las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento claramente, lo cual permite visualizar cuál es el proceso de solución de la curva de avance, y permite programar fácilmente las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento.
- Su costo es de 1.71 dólares/corrida (aproximadamente 850 pesos/corrida).

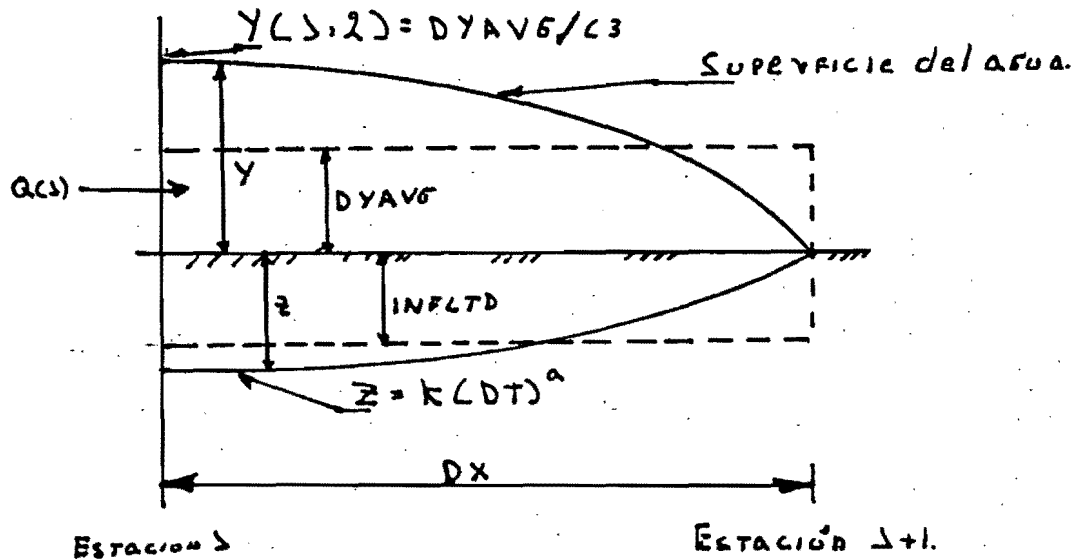


FIG. VI

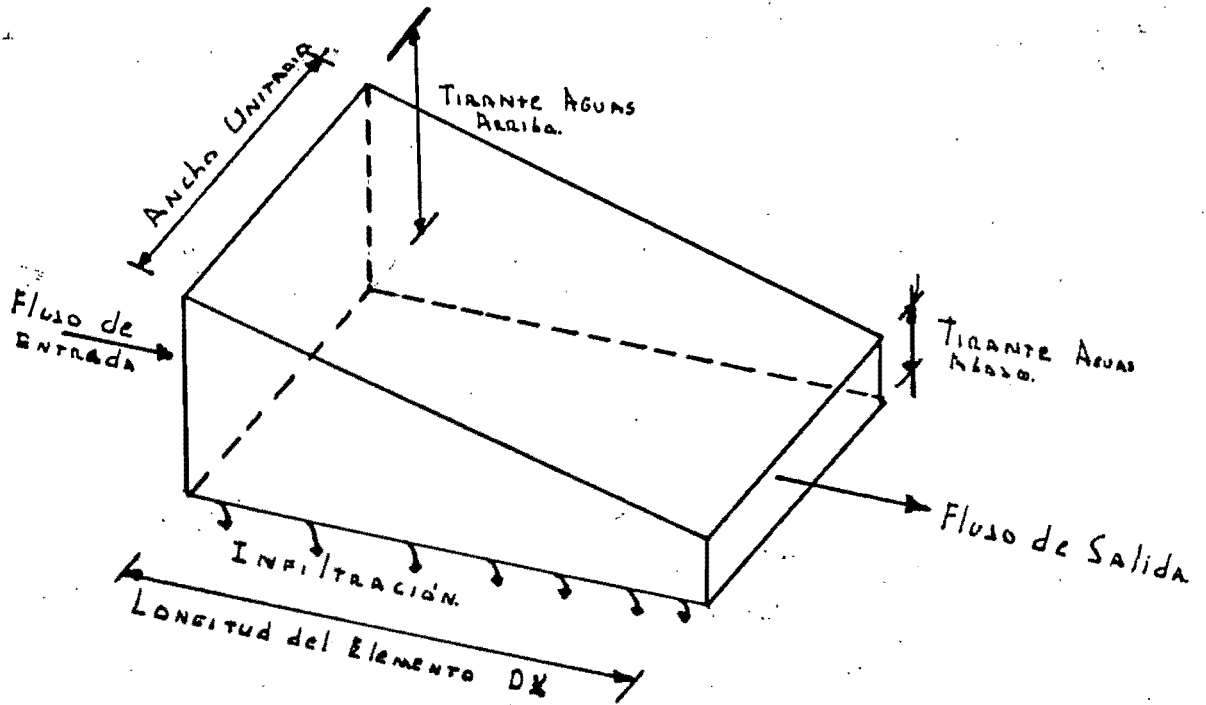


DIAGRAMA de CUERPO libre del ELEMENTO.

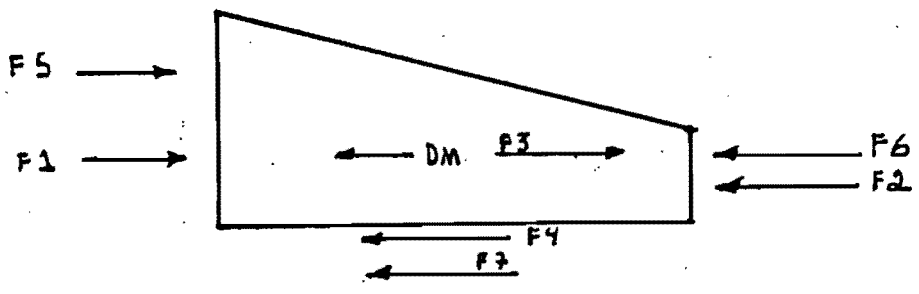


DIAGRAMA de FUERZAS ACTUANTES

FIG. V

CAPITULO III

METODOS ADIMENSIONALES

La simulación matemática aplicada al diseño del riego parcelario fue analizada en el capítulo anterior. Sin embargo, como se pudo constatar, se requiere de complicados programas y un considerable tiempo de máquina computadora para la solución numérica de las ecuaciones diferenciales parciales representativas del fenómeno. En la mayoría de los diseños prácticos el uso de una computadora no es posible. Por otro lado, los principales factores - (datos de entrada) que se utilizan en el diseño varían en función a los trabajos agrícolas que se llevan a cabo en el terreno, estos factores son principalmente: la rugosidad, la estructura granular del suelo, los efectos de la humedad antecedente y las características del perfil de infiltración.

En la vida real, el Ingeniero de Irrigación estima estos factores aproximadamente, lo cual acarrea que se tengan diferencias notorias entre lo que se diseñó y lo que ocurre en campo. Por lo antes expuesto; es claro que no obstante lo exacto de los métodos numéricos se puede incurrir en errores de diseño debido a la apreciación que tenga el Ingeniero de los datos de entrada. Esto quiere decir que se pueden utilizar métodos menos exactos que los numéricos (pero más accesibles) para el diseño, sin que el error por la falta de exactitud sea motivo de preo

cupación.

Una alternativa atractiva es la solución de las ecuaciones de continuidad y conservación de cantidad de movimiento en forma adimensional y la presentación de resultados en forma gráfica. La construcción de estas gráficas es en base a un método numérico, considerando todas las posibles combinaciones de los factores que intervienen (gasto, tirante, infiltración, longitud y tiempo), para reducir el número de combinaciones se limitan de una manera práctica cada uno de los factores antes mencionados. Para transformar las variables a la forma adimensional se utilizan los valores característicos, resultando que:

$$X^* = \frac{x}{X} ; t^* = \frac{t}{T} ; Y^* = \frac{y}{Y} ; z^* = \frac{z}{Z} \quad (\text{III.1})$$

donde:

x,t,y,z.- Distancia, tiempo, tirante y altura de infiltración.

x*,z*,y*,z* = Distancia, tiempo tirante y altura de infiltración adimensionales.

X,T,Y.- Valores característicos.

Los valores característicos, así como las gráficas, varían de acuerdo al método que se utilice.

Los métodos adimensionales conocidos se dividen en dos grupos, los que se aplican a superficies con pendien-

te y los que se aplican a superficies horizontales.

MÉTODOS ADIMENSIONALES PARA SUPERFICIES CON PENDIENTE.

Método de Katopodes-Strelkoff [10]

Los valores característicos del método son:

$$Y_m = \left(\frac{q_0 m}{S_0^{1/2}} \right)^{3/5} \quad (\text{III.2})$$

$$T = \left(\frac{Y_m}{K} \right)^{1/a} \quad (\text{III.3})$$

$$X = \frac{q_0 T}{Y_m} \quad (\text{III.4})$$

$$P = \frac{S_0 q_0 T}{Y_m^2} \quad (\text{III.5.a})$$

$$K = \frac{K T^a}{Y_m} \quad (\text{III.5.b})$$

Procedimiento de cálculo.

Datos: q_0 , n , S_0 , K , a , t_{co} .

Paso 1. Cálculo de los Valores Característicos.

Paso 2.- Cálculo del avance para t_{co} (X_{co}).

- Se escoge una figura (1 a la 9) en base al valor de "a"
- $t_{co} = \frac{t_{co}}{T}$
- Se entra con t_{co} y se corta la curva correspondiente de P.

Obteniéndose el valor de X_a^*

- $X_{co} = X_a$

Paso 3 Cálculo de la curva de avance y tirante.

Se utiliza la siguiente tabla:

t_i	$t^* = t/T$	X_a^* FIG 10 9	$X_i = X_a^* \cdot X$	δ_0 FIG 10	$\delta = \delta_0 \cdot X^a$
0			0		
t_{co}			X_{co}		

Nota: el valor del tirante y , sólo se puede obtener para $a=0.5$

Paso 4 Cálculo de la eficiencia.

- $X_{co}^* = \frac{X_{co}}{X}$

- De las figuras 11 y 12 se obtiene r_y y r_z respectivamente.

$$V_s = V_y \cdot \delta_{co}^* \cdot X_{co}^* \quad (III.6)$$

$$V_{ss} = V_z \cdot \delta_{co}^* \cdot X_{co}^* \quad (III.7)$$

$$\delta_{co}^* = k \cdot (t_{co}^*)^a \quad (III.8)$$

$$E = 1 - \frac{V_{ss}}{V_s} \quad \text{EFICIENCIA.} \quad (III.9)$$

Paso 5. Se propone otro q_0 u otro t_{co} y se repiten los pasos 1 al 4 hasta obtener la máxima eficiencia. El paso 3 se puede llevar a cabo sólo para la curva de avance de máxima eficiencia.

Método de Strelkoff-Clemmens [11]

Los valores característicos del método son:

$$Y = \left(\frac{q_{in} \cdot m}{\sqrt{S_0}} \right)^{3/5} \quad (III.10)$$

$$X = \frac{(q_{in} \cdot m)^{3/5}}{S_0^{1/3}} \quad (III.11)$$

$$T = \frac{q_{in}^{4/5} m^{6/5}}{S_0^{9/5}} \quad (III.12)$$

$$K^* = \frac{K T^a}{Y} \quad (III.13)$$

donde:

n .- de rugosidad de Manning, que se obtiene de la siguiente tabla:

q_{in} .- gasto unitario de entrada en $m^3/s-m$

	TIPO DE SUELO	VALOR DE m
Melgas	Suelos desnudos	0.04
	Granos pequeños	0.10
	Alfalfa	0.18
	Cultivos densos (pastos)	0.25
Surcos	Recién abiertos	0.042
	Después de dos riegos	0.033
	Vegetación de 10 a 12 cm.	0.040
	Vegetación de 40 a 50 cm.	0.076

So.- pendiente de la superficie.

Para utilizar este método se deben respetar los siguientes límites:

$$\begin{aligned} 2 &< q_{in} < 25 \text{ l/s-m.} \\ 0.5 &< t_{co} < 5 \text{ hrs.} \\ 0.0001 &< S_o < 0.01 \\ 0.02 &< m < 0.25 \\ 1 &< K < 12 \text{ cm/hr.} \\ 0 &< a < 1 \\ 100 &< L < 500 \text{ m.} \end{aligned}$$

Procedimiento de cálculo de la curva de avance.

Datos: q_{in} , L , m , S_o , a , K , t_{co} .

Paso 1 Checar que todos los datos están dentro de los límites establecidos.

Paso 2 Cálculo de los valores característicos empleando las ecuaciones III.10 a III.13

Paso 3

$$t_{co}^* = \frac{t_{co}}{T} \quad (III.14)$$

$$L^* = \frac{L}{X} \quad (III.15)$$

Paso 4 Cálculo del avance correspondiente a t_{co}^* .

- Se escoge una curva en base al valor de "a". Figuras 13 a la 23.
- Se busca la curva correspondiente a K^*
- Se entra con t_{co}^* y se obtiene X_{aco}^*
- El avance correspondiente a t_{co} es $X_{aco} = X^*_{aco} * X$

Paso 5 Cálculo del máximo avance posible después del -- corte del abastecimiento.

- Se escoge una curva en base al valor de "a" de la figura 24 a la 38.
- Se entra con el valor de t^*_{co} y se obtiene

$$\frac{t^*_{vf}}{t^*_{co}} \quad \text{y} \quad \frac{X^*_{Avf}}{X^*_{Aco}}$$

- El máximo avance es

$$X_{Avf} = X_{aco} * \frac{X^*_{Avf}}{X^*_{Aco}} \quad (III.16)$$

- El tiempo correspondiente a este avance es:

$$t_{rf} = t_{co} \frac{t_{vf}^*}{t_{co}^*} \quad (\text{III.17})$$

Paso 6 Construcción de la curva de avance.

- Con la curva escogida para el paso 4 se obtienen - varios X^* a proponiendo diferentes t^* desde 0 hasta el correspondiente a t_{co}^* . La siguiente tabla es útil para el cálculo de la curva de avance.

t_i	$t^* = \frac{t_i}{r}$	X_a^* fig/3a23	$X_a = X_a^* = X$
0			0
t_{co}			X_{aco}

- Para dibujar la curva de avance completa (ver figura VII), primero se traza la curva de avance en base a la tabla anterior t vs X_a a continuación se ubica el punto de máximo avance (X_{avf}, t_{vf}).
- El tramo que une al punto (X_{aco}, t_{co}) con (X_{avf}, t_{vf}) debe ser tangencial a la curva de avance y vertical al punto de máximo avance.

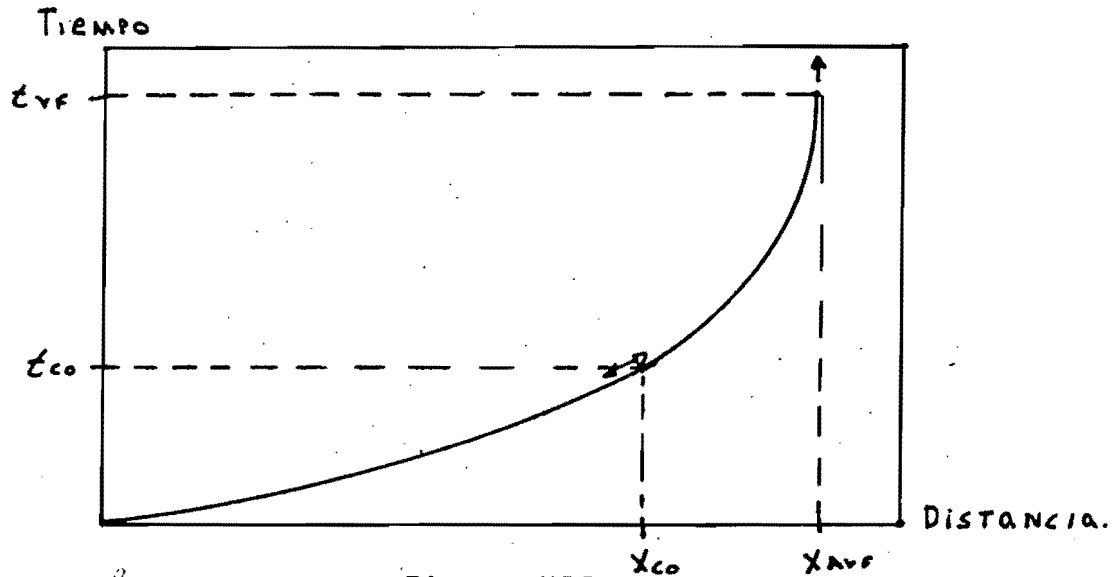


Figura VII

Posteriormente Strelkoff-Rashid [12] ampliaron este método para que pudiera obtener el perfil de infiltración y la eficiencia del riego, esto se muestra en los pasos 7 y 8 .

Paso 7 Cálculo del perfil de infiltración.

$$Z_u^* = \frac{t^*_{co}}{X_{AVF}} \quad (III.18)$$

De las figuras 29, 30 ó 31 en base a los valores de a , t^*_{co} y k^* se obtiene el valor de α (factor de forma).

$$\beta = 2 \left[1 - \frac{\alpha}{1 + \frac{\alpha}{2}} \right] \quad (III.19)$$

$$Z_u(x) = Z_u^* \gamma_0 \left[\alpha \left(1 - \frac{x}{x_0 X_{AVF}} \right)^{2/\alpha} + \beta \left(1 - \frac{x}{x_0 X_{AVF}} \right) \right] \quad (III.20)$$

Con Z_u en centímetros y X en metros.

Con la ecuación III.20 se construye la curva χ vs z_u .

Paso 8 Cálculo de la eficiencia.

$$L_2 = 1 - (L^*/X_A^*) \quad (\text{III.21})$$

$$\frac{V_{z_0}}{q_{in} t_{co}} = \frac{\alpha}{1 + \alpha/2} L_2^{1 + (\alpha/2)} + \frac{\beta}{2} L_2^2 \quad (\text{III.22})$$

$$C_v = \frac{z_v}{y_0 z_u^2} \quad z_v: \text{lámina de riego en cm.} \quad (\text{III.23})$$

$$\frac{V_{dp}}{q_{in} t_{co}} = \left(\frac{\alpha}{1 + \alpha/2} L_2^{1 + (\alpha/2)} - \frac{\beta}{2} L_2^2 - C_v L_2 \right) \quad (\text{III.24})$$

El valor de L se despeja de:

$$C_v = \alpha L^{1/2} + \beta L \quad (\text{III.25})$$

$$\Leftrightarrow 1 \geq L \geq L_2.$$

Por último la eficiencia es:

$$EA = 1 - \frac{V_{z_0}}{q_{in} t_{co}} - \frac{V_{dp}}{q_{in} t_{co}} \quad (\text{III.26})$$

Paso 9 Se proponen otros valores de q_{in} , ó t_{co} y se calcula la eficiencia.

Paso 10: Se repiten los pasos del 1 al 9 hasta obtener la máxima eficiencia.

MÉTODOS ADIMENSIONALES PARA SUPERFICIES HORIZONTALES --
(So=0)

Método de Clemmens-Strelkoff [13]

Los valores característicos son:

$$T = \frac{L_N * L}{g_0} \quad (\text{EN SES.}) \quad (\text{III.27})$$

$$X = \frac{g_0^{7/16} t_{co}^{13/16}}{m^{3/8}} = 0.3048 \quad (\text{EN m}) \quad (\text{III.28})$$

$$L^* = \frac{L}{X} \quad (\text{III.29})$$

$$K^* = \frac{k t_{co}^{\alpha - (3/16)}}{g_0^{9/16} * \left(\frac{m}{3600}\right)^{3/8}} \quad (\text{III.30})$$

donde:

$t_{co}=T$ En hrs. para el cálculo de K^* y en segundos para el cálculo de X

g_0 En $m^3/hr-m$ para el cálculo de K^* y en $m^3/seg-m$ para el cálculo de X .

Procedimiento de cálculo de la curva de avance.

Datos: $k, a, n, q_0, L, Ln.$

Paso 1 Checar que los valores estén dentro de los límites prácticos.

Paso 2 Cálculo del avance máximo

Se calculan T, X, L^*, K^* con las ecuaciones III.27 a III.30

Paso 3 Con el valor de "a" se escoge una curva adimensional.

De las figuras 32 a 42 con $t=tco^*$ se obtiene Xa^*_{max} .

Paso 4

$$X_{avance} = X_{avance}^* + X \text{ (error)}$$

Paso 5 Cálculo de la curva de avance. Se hace con la ayuda de la siguiente tabla.

1	2	3	4
X en mts.	X^*	t^*	T en min.

Columna 1.- Se divide la longitud L en tramos iguales.

Columna 2.- $X^* = \frac{x}{X}$

Columna 3.- Con la curva escogida en el paso 3 se obtienen los valores de t^*i en base a los valores de x^*

Columna 4.- $t = t^* \cdot T$

Paso 6 Cálculo del tirante infiltrado y el tiempo de recesión.

Se calcula el posible tiempo de recesión con la fórmula - de Kostiakov $T=(Z/k)^{1/a}$ $Z=$ en cm. y $k=$ en cm/min.

$Tr=1.10 T$ (tiempo de recesión supuesto).

Para calcular el tiempo de recesión se utiliza la siguiente tabla:

1	2	3	4	5
tramo	tiempo de avance	Tr	To	Z

Columna 1.- Son los tramos correspondientes a la columna 1 de la tabla anterior.

Columna 2.- Es un promedio de los tiempos t_i y t_{i+1} de la columna 4 de la tabla anterior.

Columna 4.- $To =$ columna 3 - columna 2

Columna 5.- $Z_i = K (To)^a$

Si $\sum_{i=1}^N \frac{Z_i}{N} = L_N \Rightarrow$ Tr supuesto es el buscado

Si $\sum_{i=1}^N \frac{Z_i}{N} \neq L_N \Rightarrow$ Se propone otro Tr y se repite la tabla.

Paso 7 Cálculo del tirante máximo.

De la figura 43 con K^* y \bar{a} se obtiene Yo^* (1)

$$Y = \frac{QoT}{X} \quad (III.31)$$

$$Yo(T) = Y_o Yo^* \quad (1) \quad (\text{máximo tirante}).$$

Método de A. Clemmens y A. Dedrick.- Este método se basa en el cálculo de un coeficiente de uniformidad DU, el cual es la relación entre el mínimo tirante infiltrado (Zn) y el promedio de los tirantes infiltrados (Zg).

$$DU = \frac{Z_n * L}{q_{in} * t_{co}} \quad (III.32)$$

en donde:

L= longitud de la superficie de riego

q_{in}= gasto unitario

t_{co}= tiempo de aplicación

Procedimiento de cálculo.

Paso 1 Determinación de las condiciones de diseño

Datos: Du (se elige el % de uniformidad que se desee)
Zn (lámina neta), Tm (tiempo de infiltración), a, k, m,
Q (Lts/seg.)

Paso 2 Cálculo de los valores característicos.

$$X = C_1 T_m^{2/3} Z_m^{7/9} n^{-2/3} \quad (\text{en mts.}) \quad (III.33)$$

$$Q = C_2 X Z_m T_m^{-1} \quad \text{en L/Sm} \quad (III.34)$$

Zn en cm. y T en min.

$$C_1 = 0.426 \quad \text{y} \quad C_2 = 0.167$$

Paso 3 Determinación de los límites aproximados, se elige una curva (figuras 44-51) en base al valor de a^* .

Se calcula L*lim en base a la curva correspondiente de Du y su intersección con la línea limit.

$$L_{lim} = L_{lim}^* * X \quad (III.35)$$

Paso 4 Cálculo de los valores de superficie.

$$q_{in} = Q * q_{in}^* \quad (III.36)$$

$$B = \frac{Q_{in}}{q_{in}} \quad \text{en (m)} \quad (III.37)$$

$$A = B * L_{lim} \quad \text{en has,} \quad (III.38)$$

B.- ancho

A.- área

Paso 5 Determinación del tiempo de aplicación.

$$t_{co} = \frac{Zn \cdot L_{lim}}{q_{in} \cdot DU} \quad \text{para superficies regulares} \quad (III.39)$$

$$t_{co} = \frac{Zn \cdot A}{Q_{in} \cdot DU} \quad \text{para superficies irregulares} \quad (III.40)$$

Paso 6 Se propone otro DU y se repiten los pasos 1 al 5.

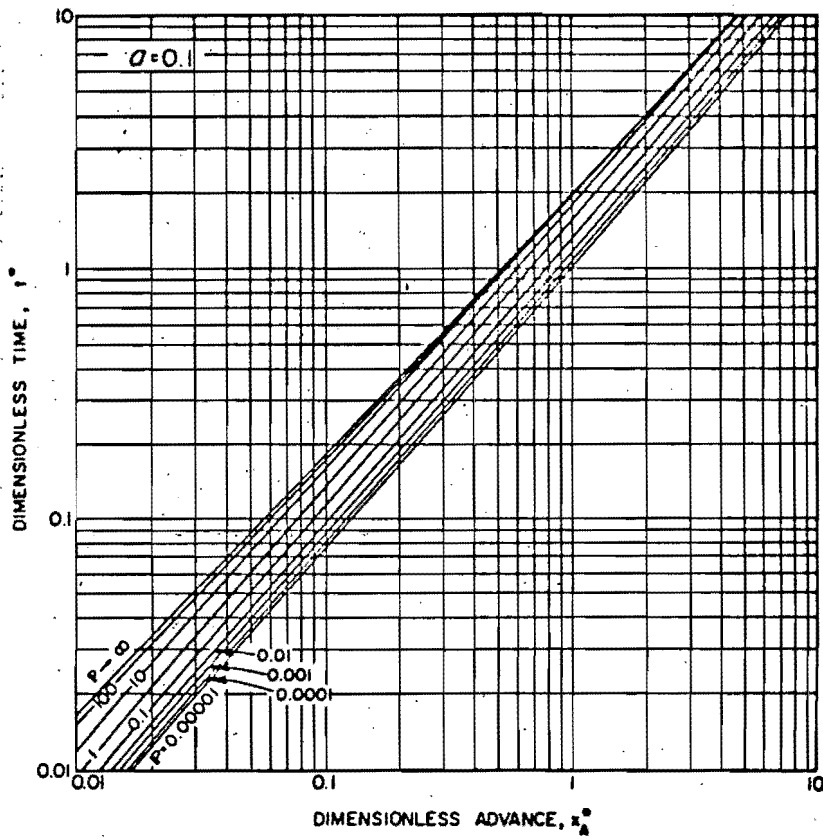


FIG. 1

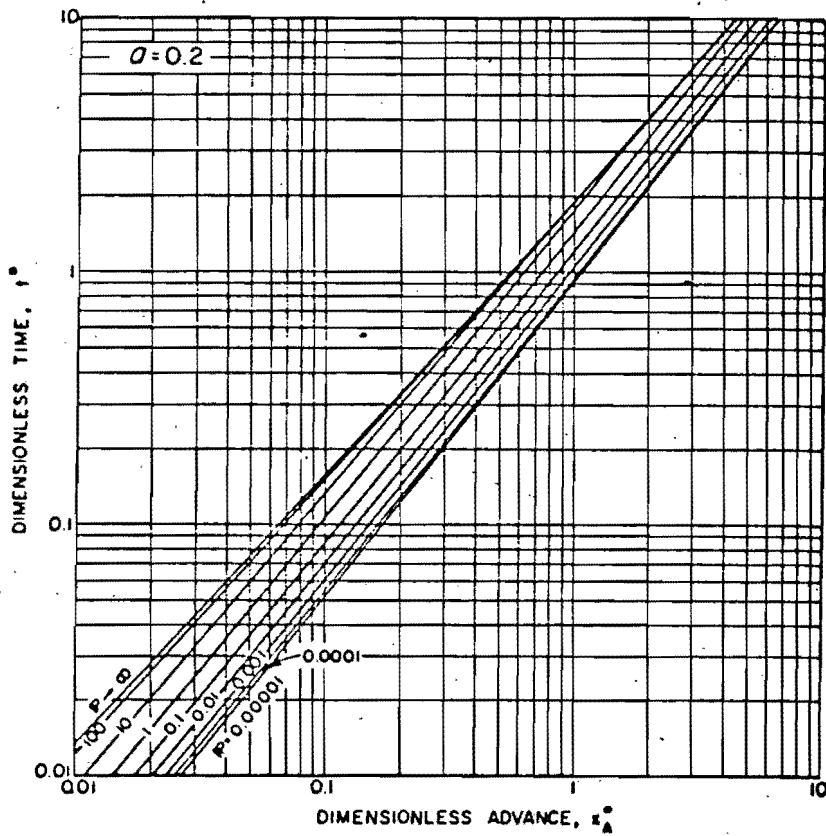


FIG. 2

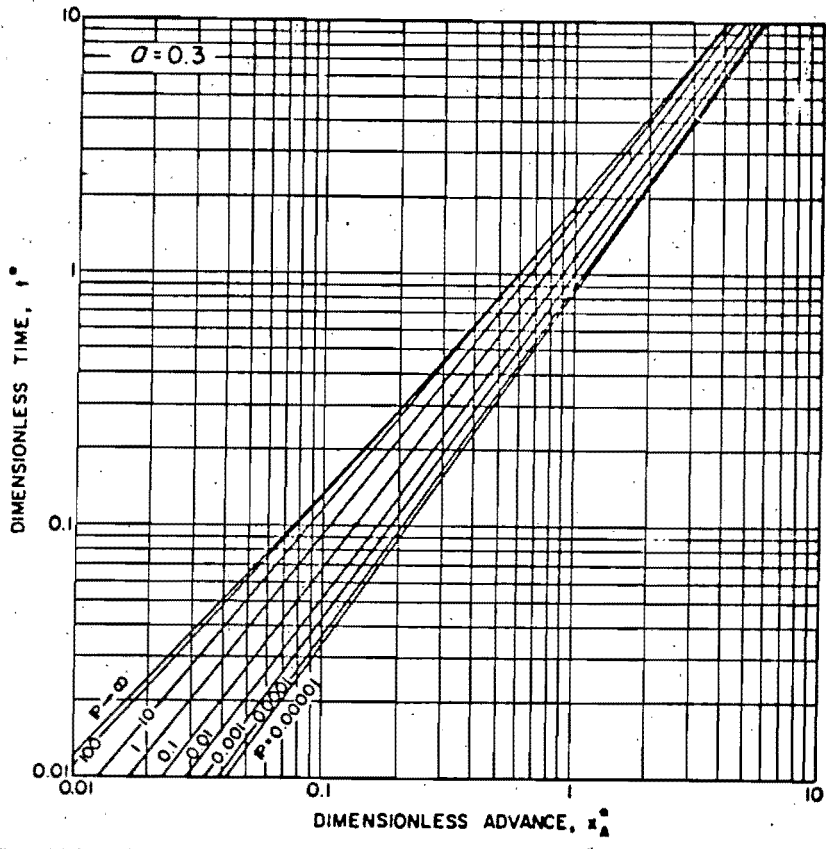


FIG. 3

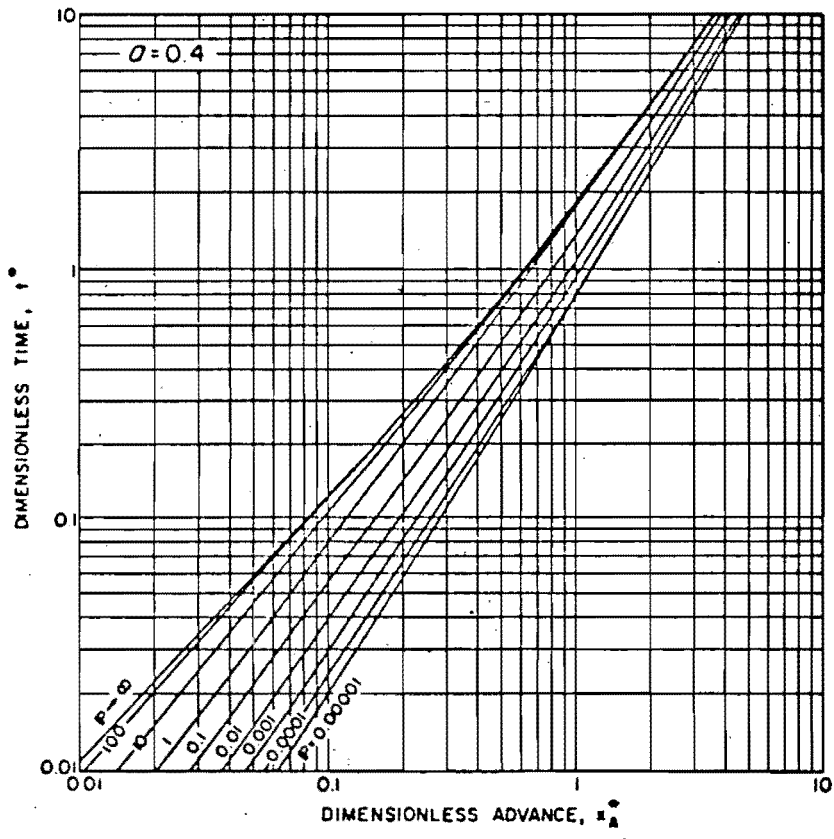


FIG. 4

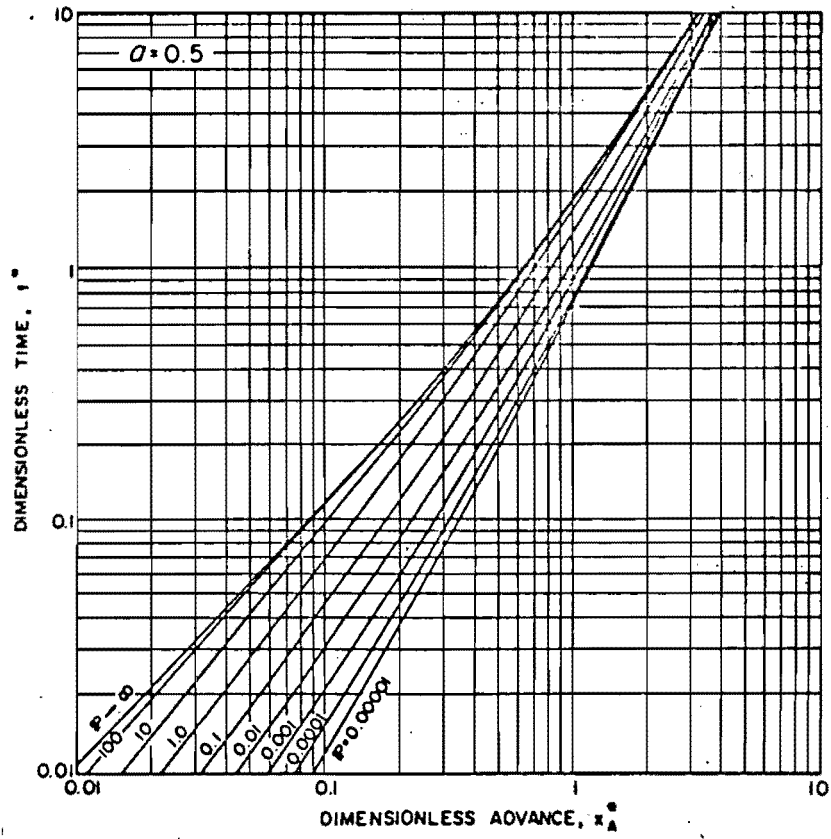


FIG. 5

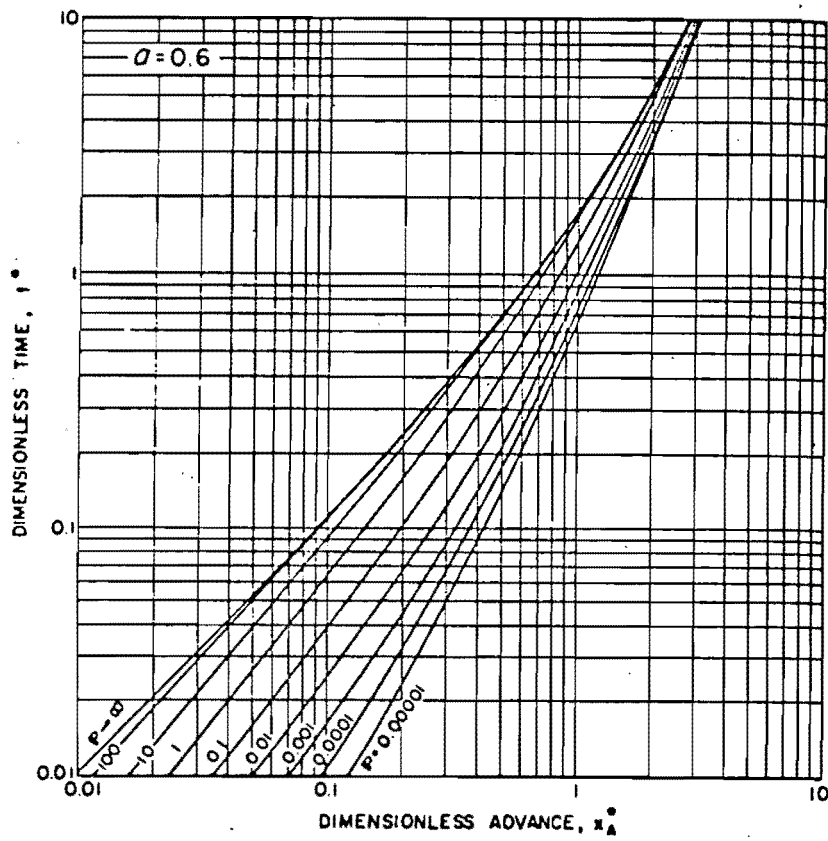


FIG. 6

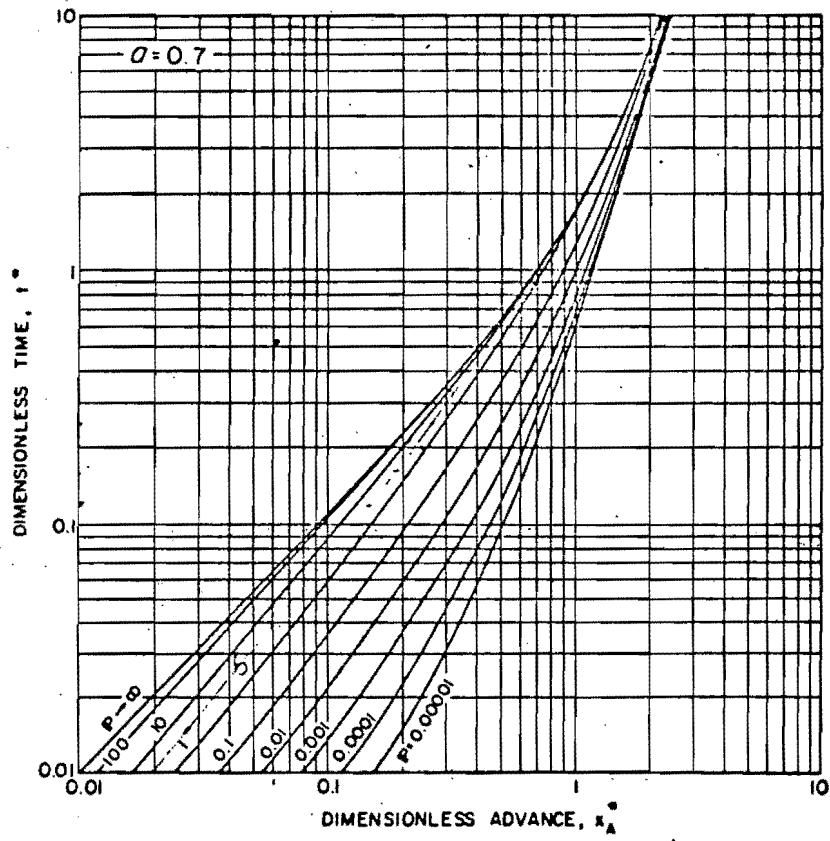


FIG. 7

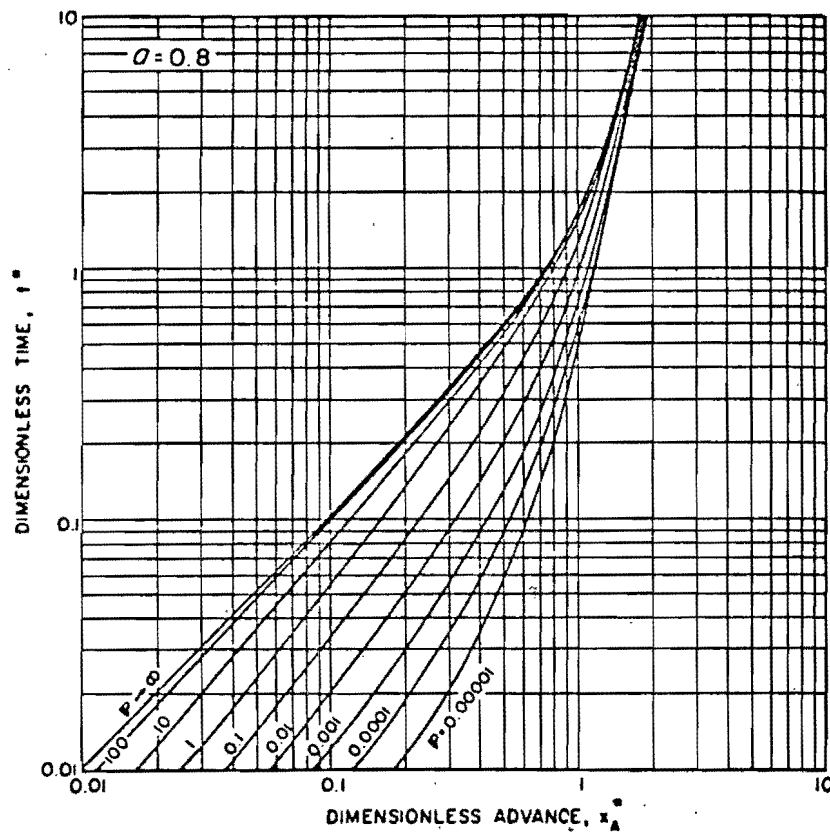


FIG. 8

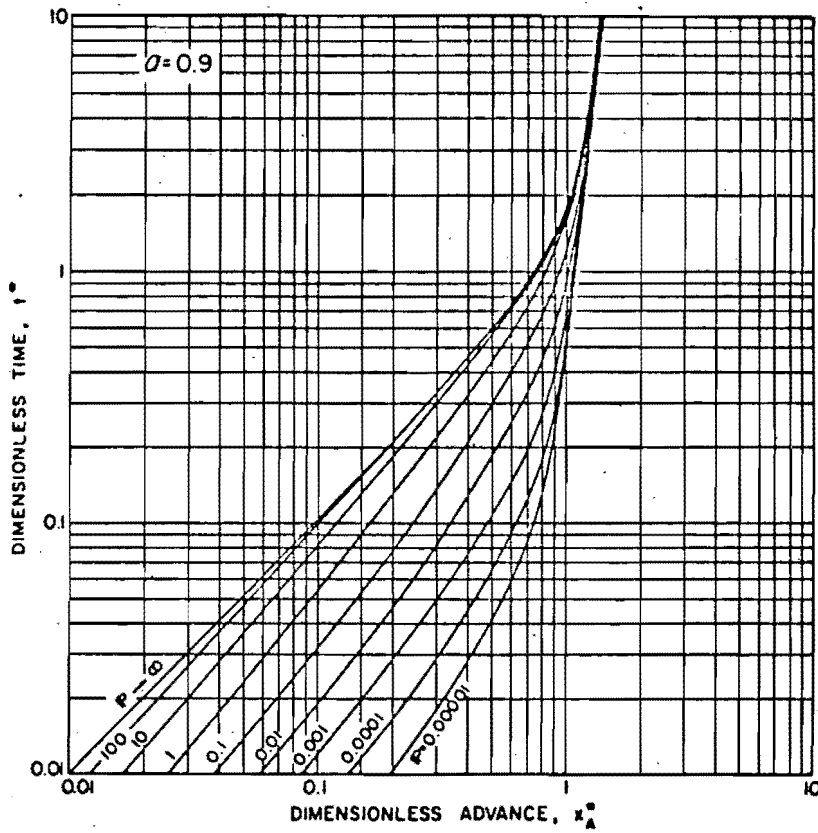


FIG. 9

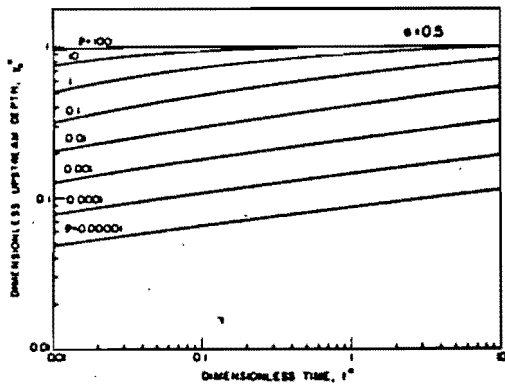


FIG. 10—Dimensionless Upstream Depth ($a = 0.5$)

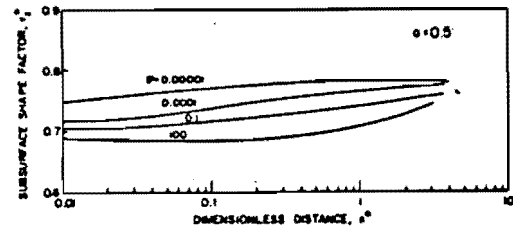


FIG. 12—Dimensionless Subsurface Shape Factor ($a = 0.5$)

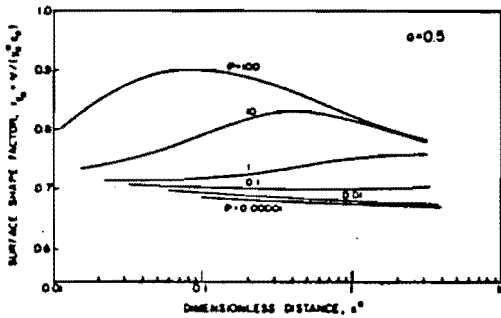


FIG. 11—Dimensionless Surface Shape Factor ($a = 0.5$)

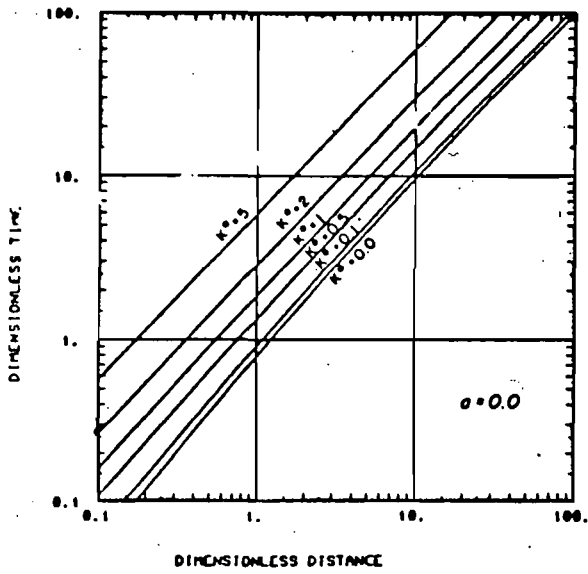


FIG. 13

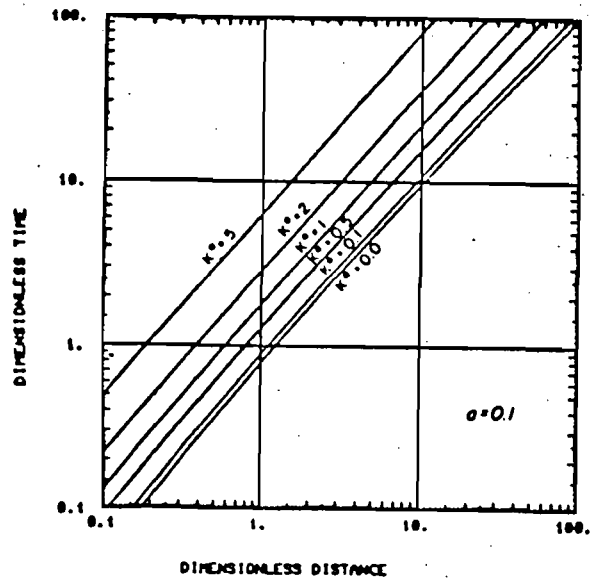


FIG. 14

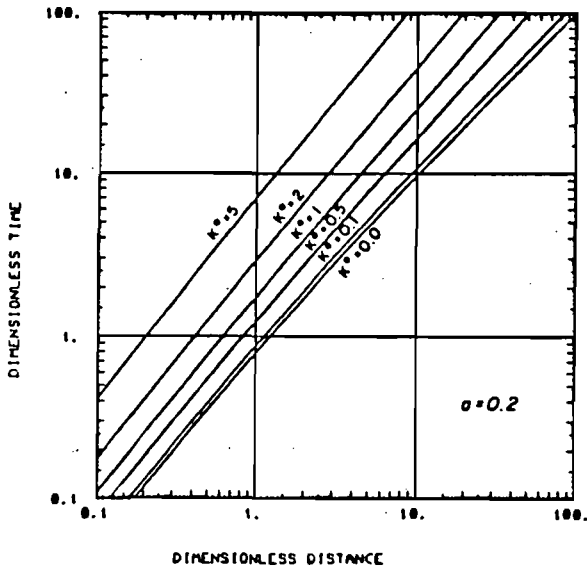


FIG. 15

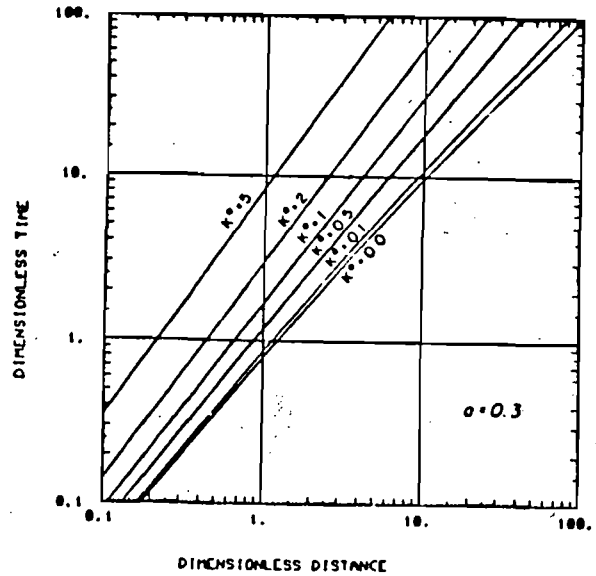


FIG. 16

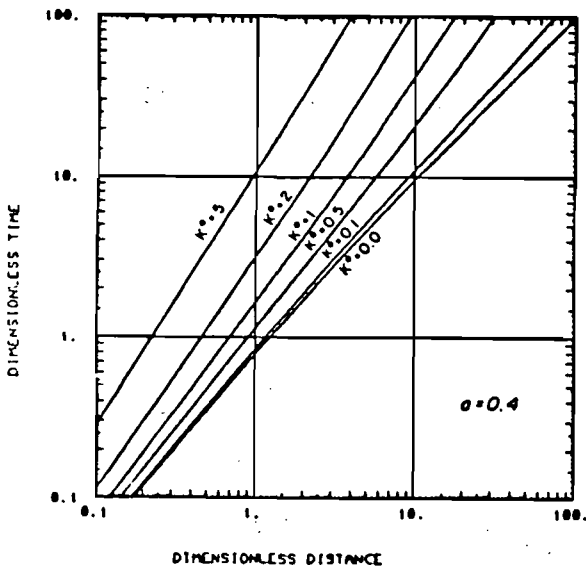


FIG. 17

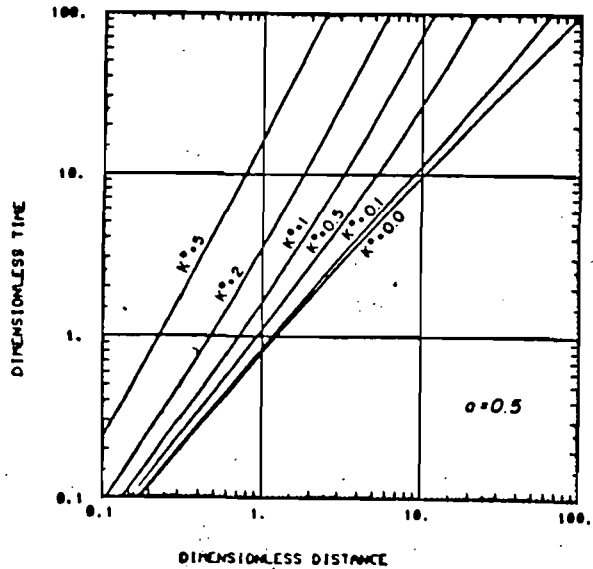


FIG. 18

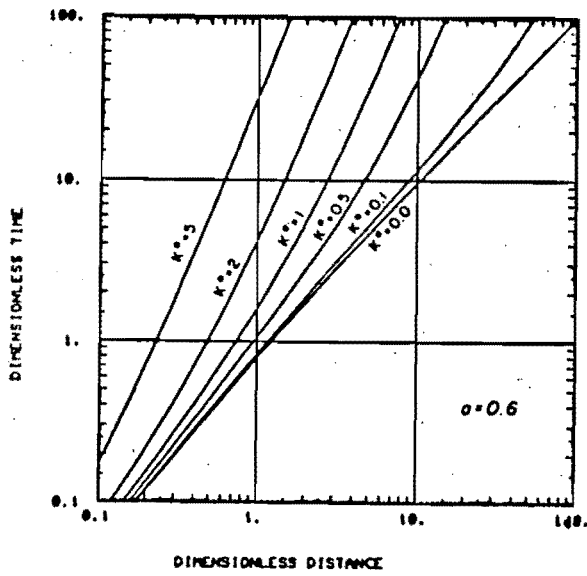


FIG. 19

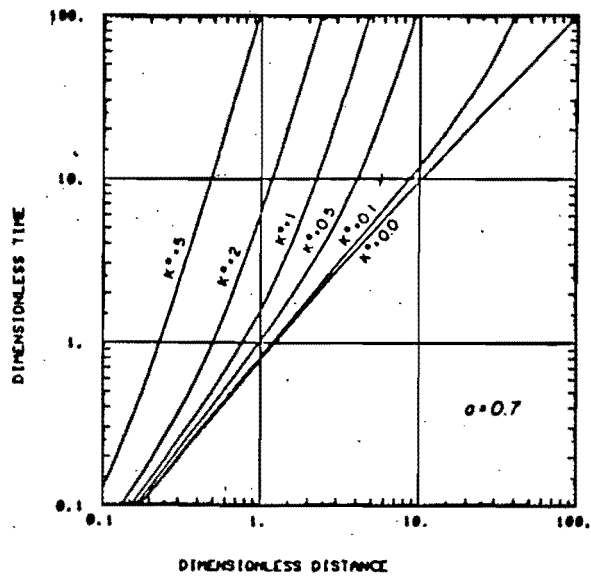


FIG. 20

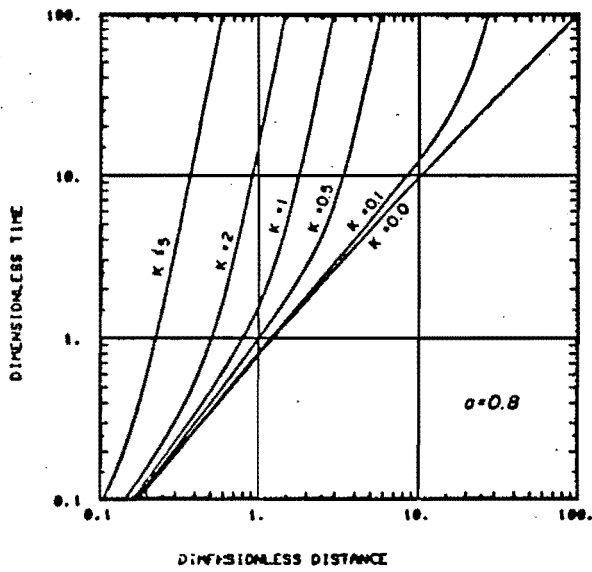


FIG. 21

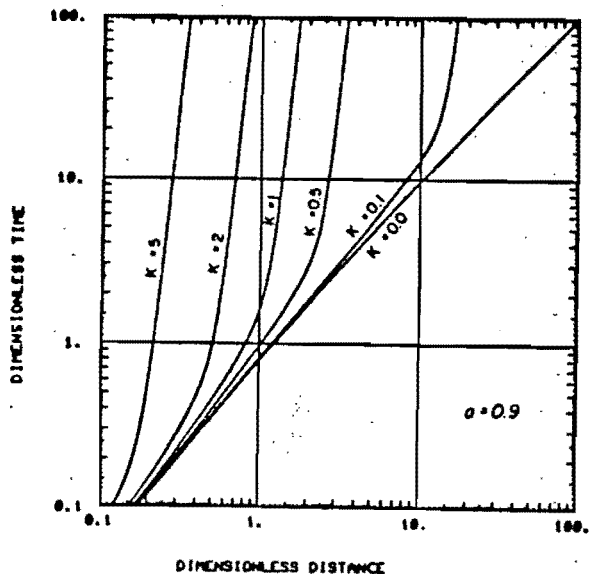


FIG. 22

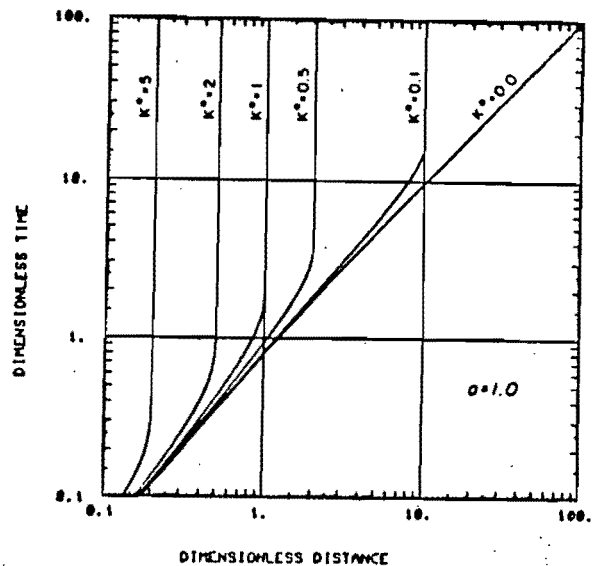


FIG. 23

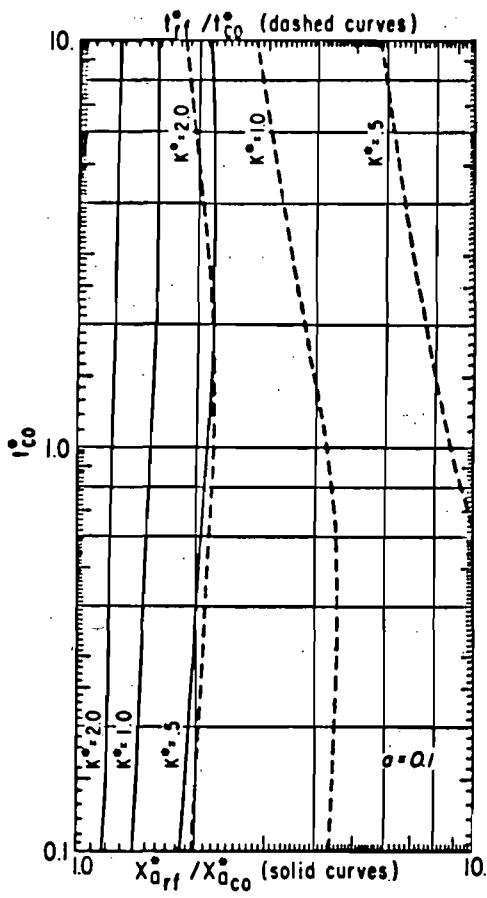


FIG. 24

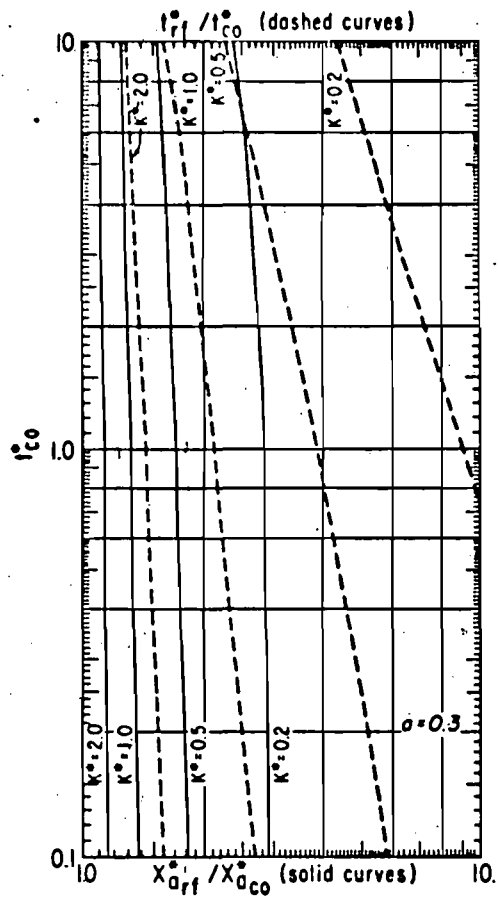


FIG. 25

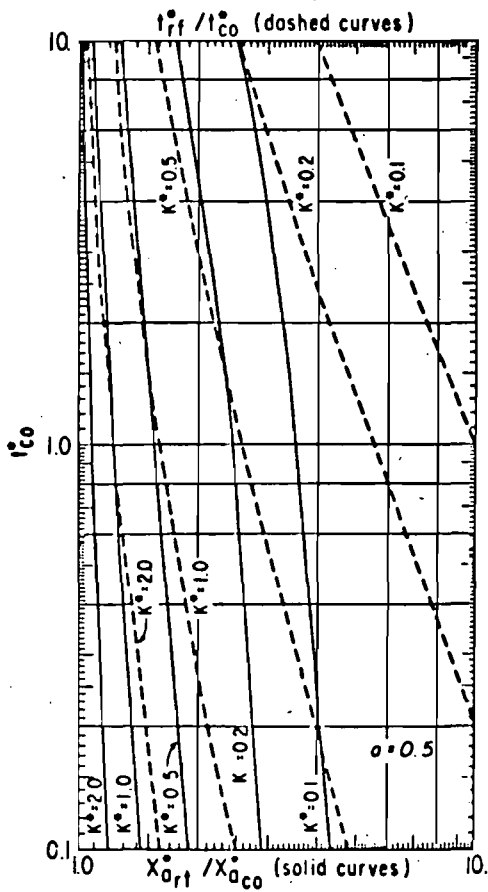


FIG. 26

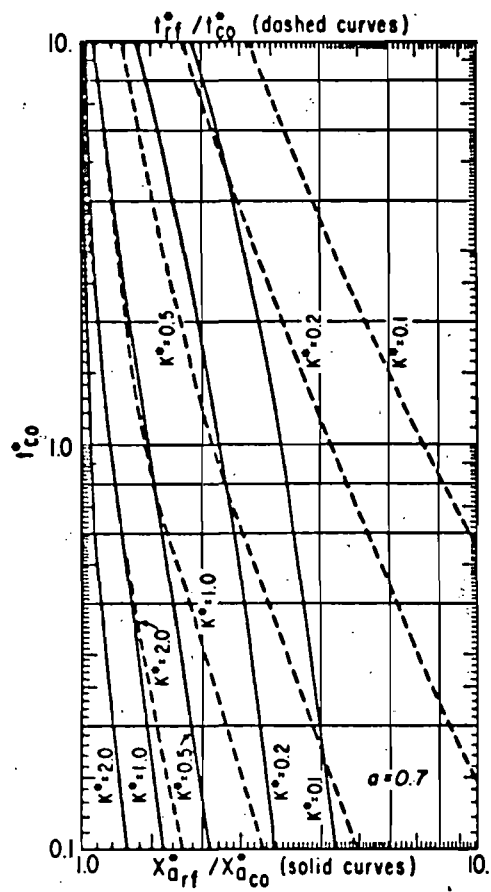


FIG. 27

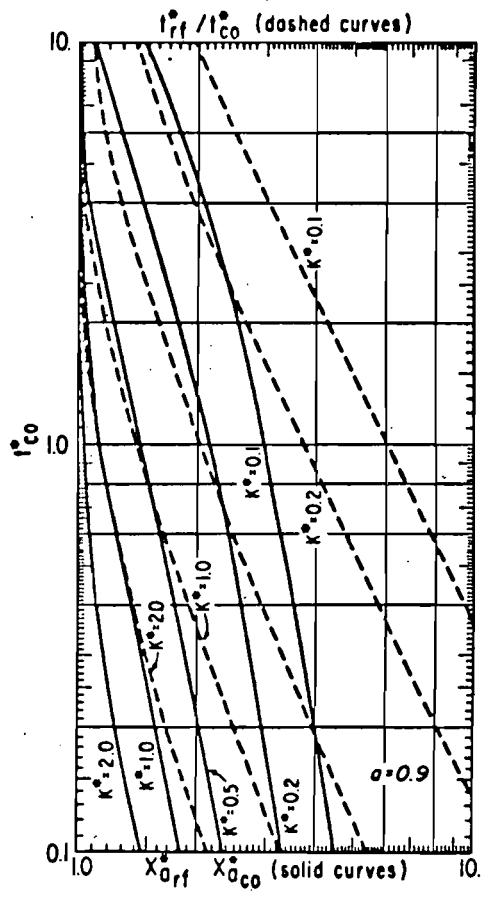


FIG. 2B

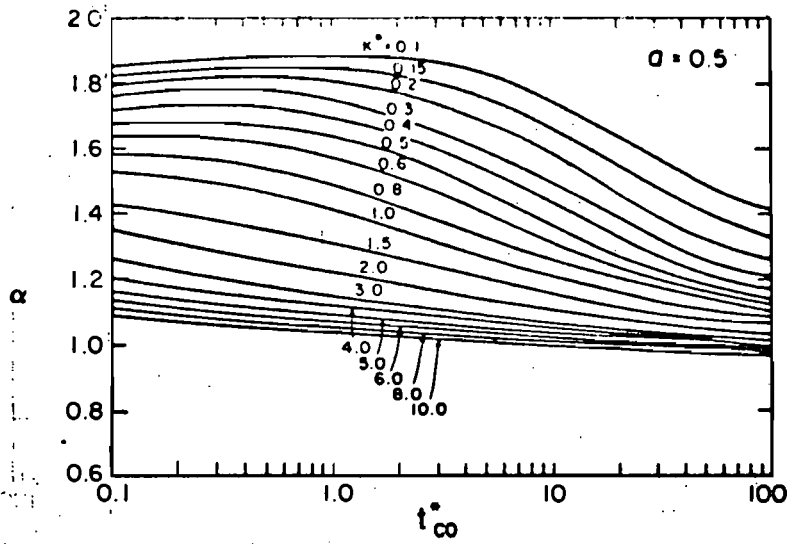


FIG. 29—Shape Factor Variation ($a = 0.3$)

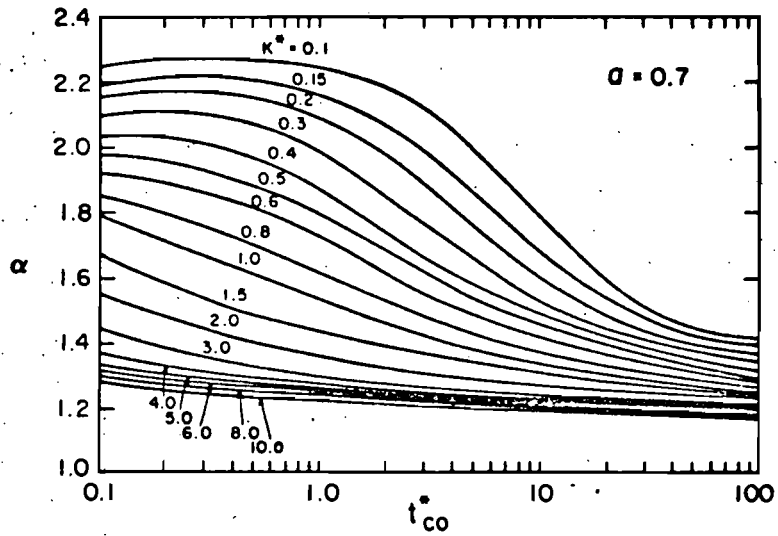


FIG. 30—Shape Factor Variation ($a = 0.5$)

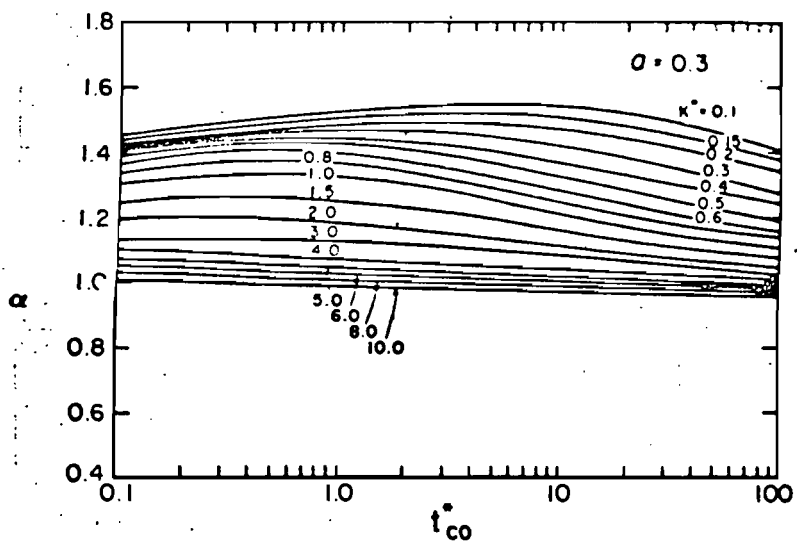


FIG. 31—Shape Factor Variation ($a = 0.7$)

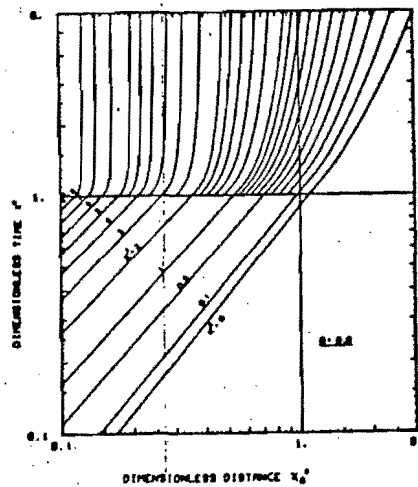


FIG. 32—Dimensionless Advance Curves for $a = 0.0$

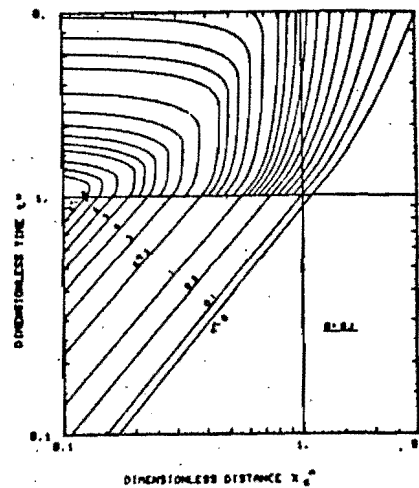


FIG. 33—Dimensionless Advance Curves for $a = 0.1$

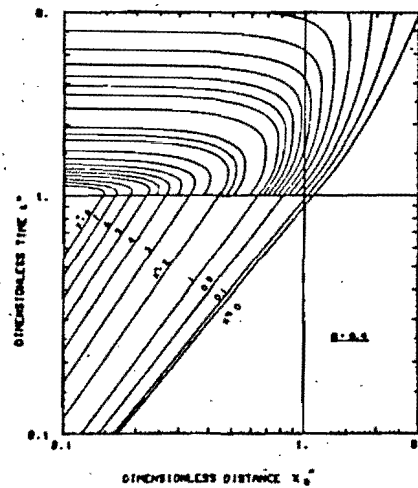


FIG. 36—Dimensionless Advance Curves for $a = 0.4$

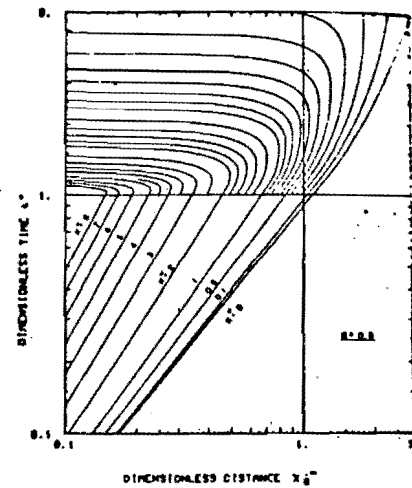


FIG. 37—Dimensionless Advance Curves for $a = 0.5$

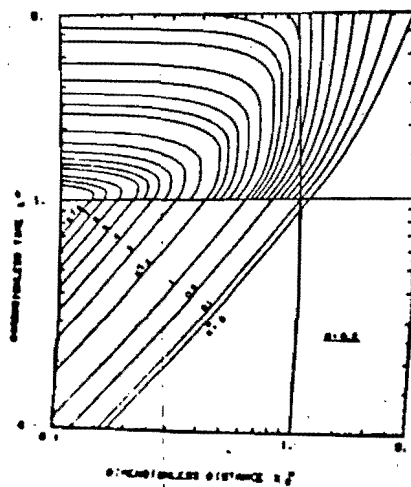


FIG. 34

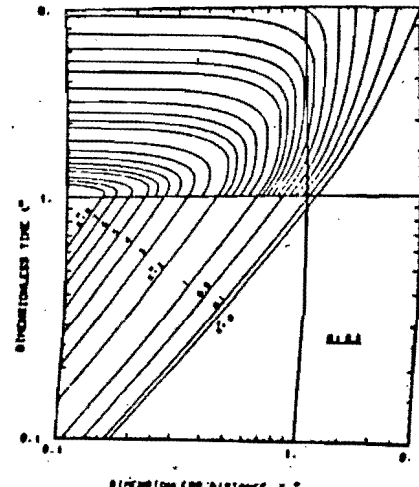


FIG. 35

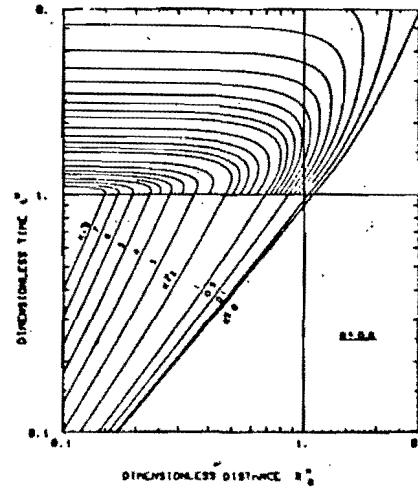


FIG. 38

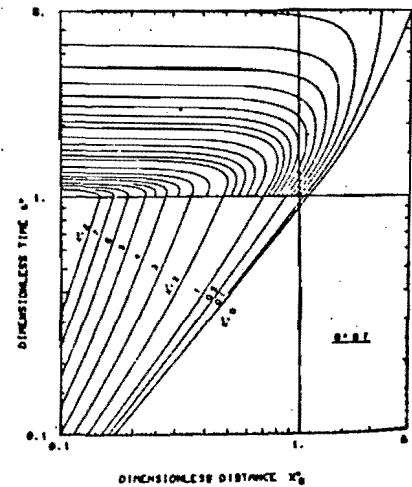


FIG. 39

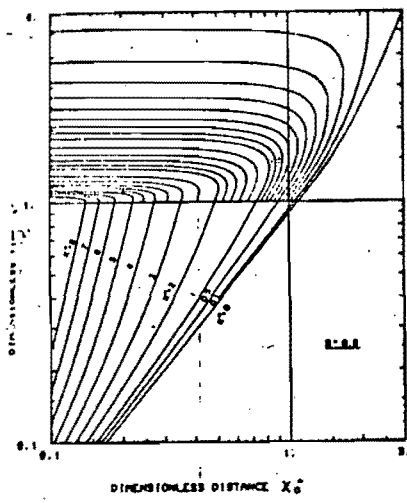


FIG. 40—Dimensionless Advance Curves for $a = 0.8$.

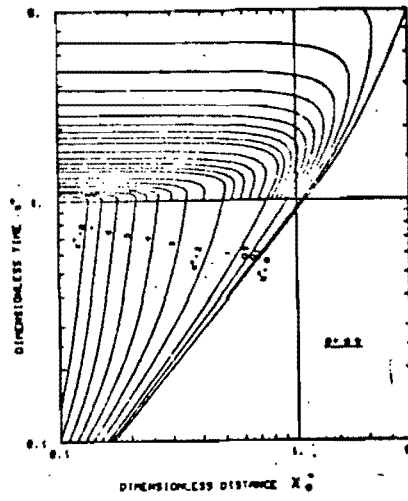


FIG. 41—Dimensionless Advance Curves for $a = 0.9$.

Advance

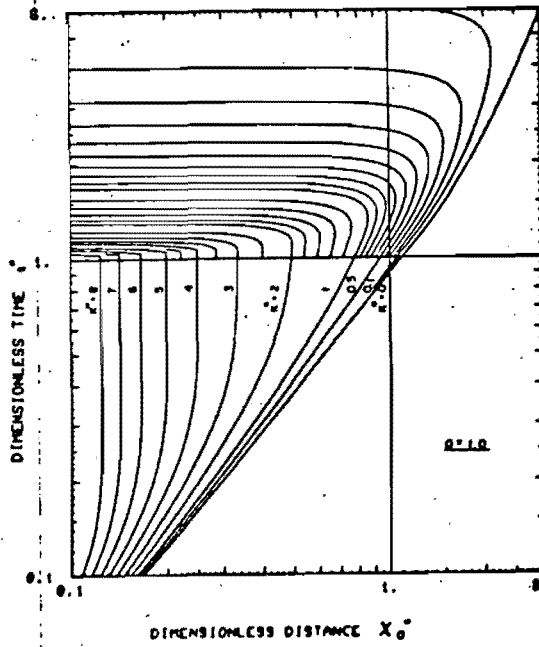


FIG. 42—Dimensionless Advance Curves for $a = 1.0$.

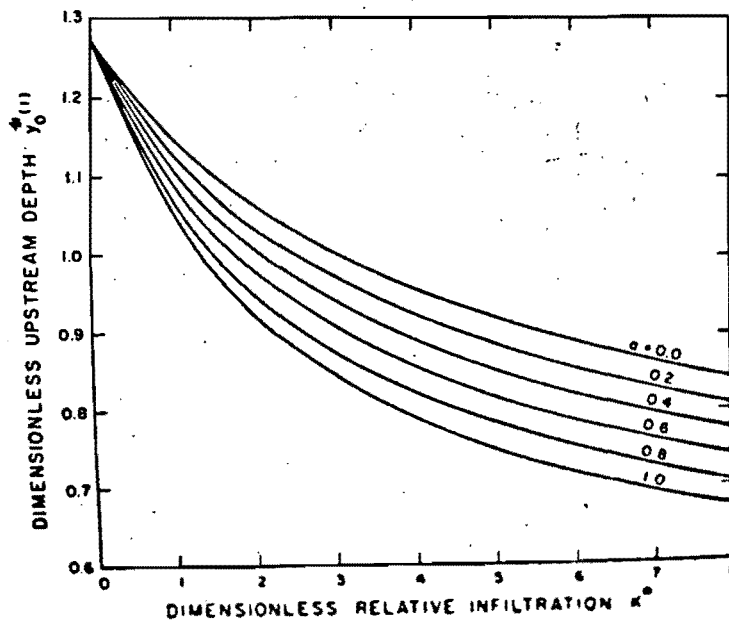


FIG. 43.—Dimensionless Upstream Depth

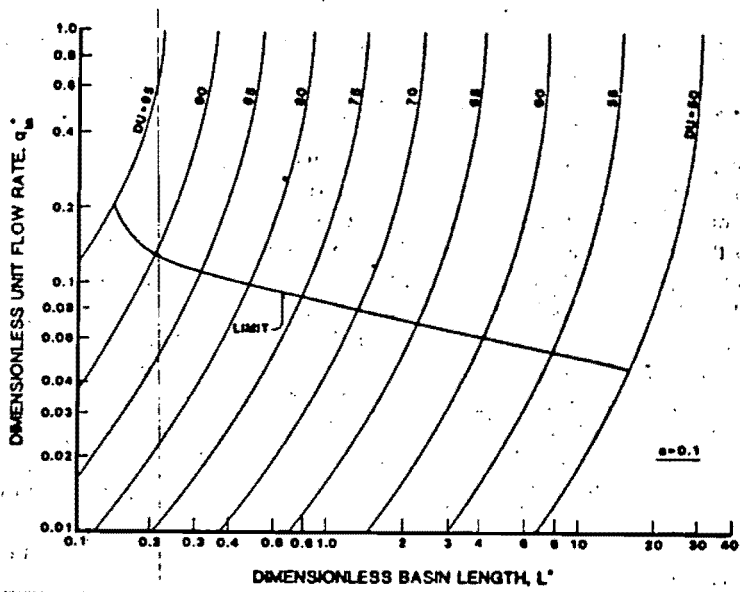


FIG. 44

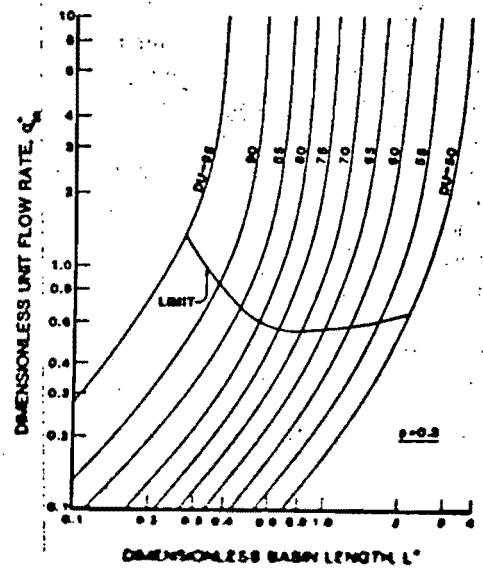


FIG. 45

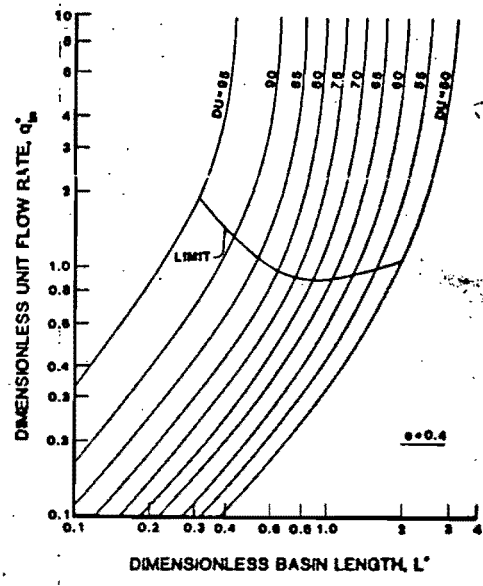


FIG. 46

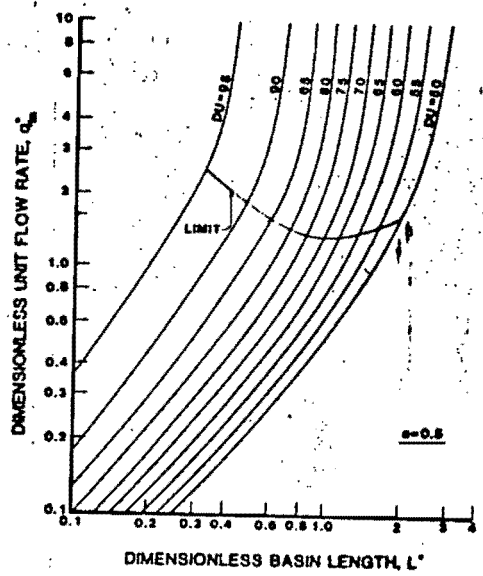


FIG. 47

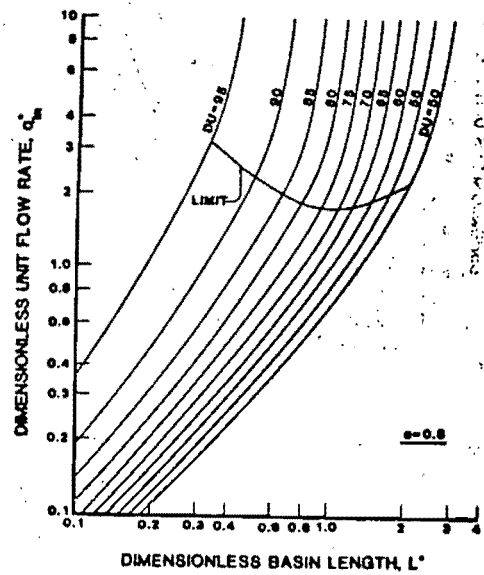


FIG. 48

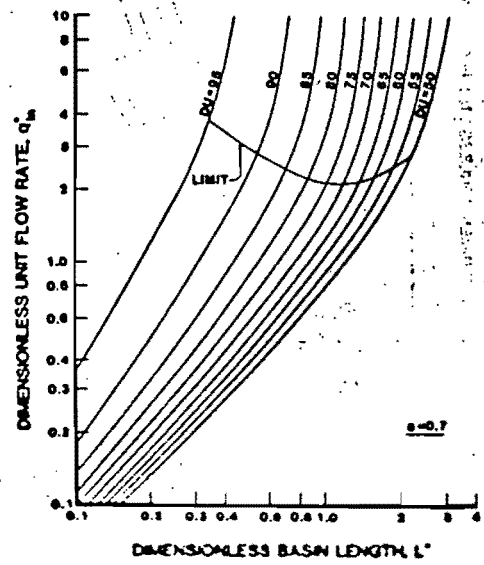


FIG. 49

FIG. 52

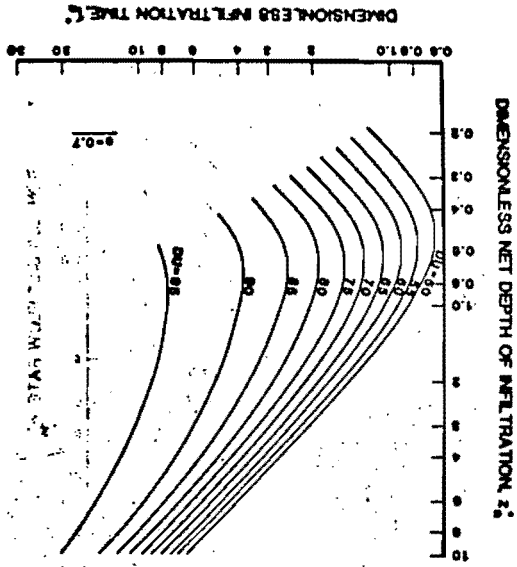


FIG. 51

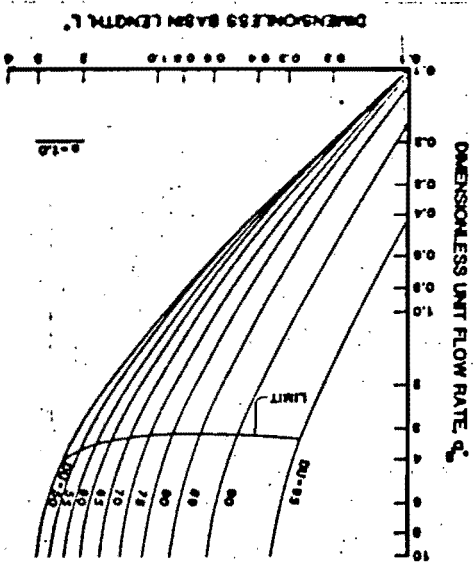
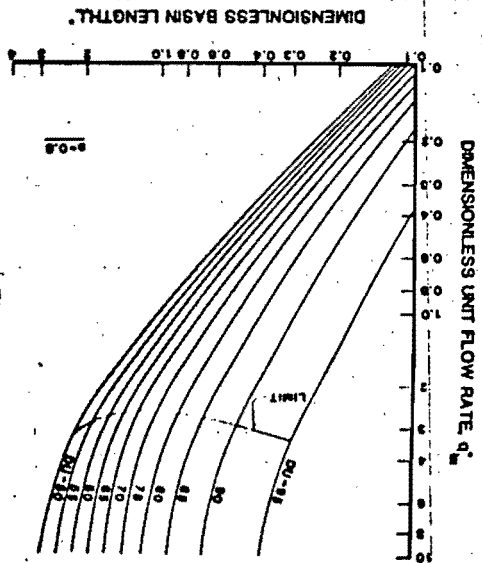


FIG. 50



CAPITULO IV

EJEMPLOS NUMERICOS DE LOS METODOS ADIMENSIONALES.

Ejemplo 1.- Se pretende diseñar una superficie de riego - para cultivar alfalfa, el método de cultivo será con el uso de melgas ($n=0.15$), el gasto unitario de entrada a la melga es de $7.43 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s-m}$ y la pendiente de la misma de 0.001. Con el fin de conocer la velocidad de infiltración del terreno se llevaron a cabo pruebas con el infiltómetro dando como resultado la ecuación $Z=0.0508 t^{0.7}$ - (cón Z en metros y t en horas), se estima un tiempo de riego de 80 minutos con una lámina neta de 8cm. Obtener la curva de avance con el método de Katopodes-Strelkoff y con el Método de Strelkoff-Clemmens y comparar resultados. Considerar una longitud total de la melga de 366 m

Solución por el Método de Katopodes-Strelkoff.

Paso 1 Cálculo de los valores característicos

$$Y_m = \left(\frac{q_o m}{S_o^{1/2}} \right)^{3/5} = \left(\frac{0.00743 * 0.15}{0.001^{1/2}} \right)^{3/5} = 0.1344 \text{ m.}$$

$$T = \left(\frac{Y_m}{K} \right)^{1/a} = \frac{0.1344}{0.0508}^{1/0.7} = 4.01 \text{ hrs.} = 14452 \text{ seg.}$$

$$X = \frac{q_o T}{Y_m} = \frac{0.00743 * 14452}{0.1344} = 799 \text{ m}$$

$$p = \frac{S_o q_o T}{Y_m^2} = \frac{0.001 * 0.00743 * 14452}{0.1344^2} = 5.95 \approx 6$$

$$K = \frac{KT^a}{Y_m} = \frac{0.0508 * 4^{0.7}}{0.1344} = 0.9975$$

Paso 2 Cálculo del avance para tco. (tiempo de riego)

- Con a=0.7 se utilizará la figura 7

$$- tco^* = \frac{tco}{T} = \frac{4800 \text{ seg.}}{14452 \text{ seg.}} = 0.3321$$

Entrando a la figura 7 $X^*a = 0.32$

- $Xco = 0.32 * 799 = 256 \text{ m.}$ (avance al tiempo tco)

Paso 3 Cálculo de la curva de avance.

ti(seg)	t [*] _i	X [*] _i	Ki (m)
0	0	0	0
600	0.042	0.061	48.7
1,200	0.083	0.11	87.9
1,800	0.125	0.15	119.8
2,400	0.166	0.19	152.0
3,000	0.207	0.24	191.8
3,600	0.250	0.26	207.8
4,200	0.290	0.30	239.7
4,800	0.332	0.32	256.0

Paso 4 Cálculo de la eficiencia

De las figuras 11 y 12 para P=6

$$X^*co = \frac{Xco}{X} = 0.32$$

$$Y_1 = 0.75 ; Y_2 = 0.70$$

De la figura 10 para $tco^* = 0.33$ y P=6 $Ycu^* = 0.98$

$$V_s = 0.75 * 0.98 * 0.32 = 0.2352$$

$$Zo^* = R (tco^*)^a = 0.02348$$

$$V_{ss} = 0.70 * 0.02348 * 0.32 = 0.0053$$

$$E = 1 - \frac{V_{ss}}{V_s} = 1 - \frac{0.0053}{0.2352} = 0.9776$$

$$E = 98\%$$



Solución por el Método de Strelkoff-Clemmens

Paso 1 Todos los valores están dentro de los límites

Paso 2 Cálculo de los valores característicos

$$Y = \left(\frac{q_{in.m}}{So^{1/2}} \right)^{3/5} = 0.1344 \text{ m}$$

$$X = \frac{Y}{So} = \frac{0.1344}{0.001} = 134.4 \text{ m}$$

$$T = \frac{XY}{q_{in}} = \frac{134.4 \times 0.01344}{0.007482} = 2430 \text{ seg} = 0.675 \text{ hr.}$$

$$K^* = \frac{KT^a}{Y} = \frac{(0.0508)(0.675)^{0.7}}{0.1344} = 0.287$$

Paso 3 Cálculo de t_{co}^* y L^*

$$t_{co}^* = \frac{t_{co}}{T} = \frac{4800}{2430} = 1.98$$

$$L^* = \frac{L}{X} = \frac{366}{134.4} = 2.72$$

Paso 4 Cálculo del avance correspondiente a t_{co} .

Con $a=0.7$ se utiliza la figura 20 con $K^*=0.3$
para $t_{co}^*=1.98 \Rightarrow X_{co}^* = 1.86 * 134.4 = 250$ m

Paso 5 Cálculo del máximo avance posible después del --
corte del abastecimiento.

Con $a=0.7$ se utiliza la figura 27 para $t_{co}^*=1.98$

$$\frac{t^*}{t_{co}^*} = 2.5 \quad ; \quad \frac{X^*}{X_{co}^*} = 1.65$$

$$X_{max} = X_{co} * 1.65 = 250 * 1.65 = 412 \text{ m.}$$

$$t_{max} = t_{co} * 2.5 = 4800 * 2.5 = 12,000 \text{ seg} = 200 \text{ min.}$$

Paso 6 Construcción de la curva de avance con la figu--
ra 20 y $k^* = 0.3$

t_i	t_i^*	X_{a^*}	X_A	Z_u
0	0	0	0	0
600	0.247	0.39	52.40	10.80
1,200	0.494	0.60	80.60	10.60
1,800	0.740	0.90	121.0	10.20
2,400	0.988	1.10	147.8	9.90
3,000	1.235	1.20	161.3	9.76
3,600	1.481	1.50	201.6	9.30
4,200	1.728	1.60	215.0	9.10
4,800	1.980	1.86	250.0	8.60

En la figura VIII se pueden apreciar las curvas de -- avance resultantes para los dos métodos.

Paso 7 Cálculo de perfil de infiltración.

$$Z_u = \frac{t_c^*}{X_{a^*}^2} = \frac{1.98}{3.07} = 0.6452$$

con $\alpha = 0.7$ de la fig. 31 con $t_c^* = 1.98$ y $k = 0.3$
 $\Rightarrow \alpha = 1.47$ y $\beta = 2 \left[1 - \frac{1.47}{1.35} \right] = -0.178$

$$Z_u(z) = 0.867 (1.47 (1 - z/411))^{0.35} - 0.178 (1 - z/411)$$

Paso 8 Cálculo de la eficiencia:

$$f_1 = 1 - (z^2/X_a^2) = 1 - (2.72/3.07) = 0.114$$

$$\frac{\Delta y_0}{f_{intco}} = \frac{\alpha}{1 + \frac{\alpha}{2}} f_1^{1 + \frac{\alpha}{2}} + \frac{\beta}{2} f_1^2 = \frac{1.47}{1.35} \times 0.114^{1.35} - \frac{0.178}{2} \times 0.114^2 = 0.057$$

$$f_2 = \frac{z}{X_{a^*}^2} = \frac{1.98}{3.07} = 0.6452$$

$$f_2 = \alpha f_1^{1/2} + \beta f_1 = 0.9226 = 1.47 f_1^{0.5} - 0.178 f_1$$

El valor de f_1 que cumple es $f_1 = 0.312 > 0.114$

$$\frac{\Delta dp}{f_{intco}} = \left(\frac{\alpha}{1 + \frac{\alpha}{2}} f_1^{1 + \frac{\alpha}{2}} - \frac{\beta}{2} f_1^2 - f_2 \right) = -0.0526$$

$$EA = 1 - 0.057 - (-0.0526) = 0.9956$$

$$EA = 99.56\%$$

CUADRO COMPARATIVO DE LOS DOS METODOS

Valor obtenido	Katopodes-Strelkoff	Strelkoff-Clemmens
tco (min)	80	80
Xco (m)	256	250
E%	98	99.5

EJEMPLO: Se requiere conocer las dimensiones de una parcela que será regada por gravedad, el cultivo que se im-- plantará es el maíz con el sistema de surcos ($n=0.025$), - la longitud de la parcela es de 125 m con una pendiente - de 0.0002. De las pruebas de infiltración se obtuvo que $a=0.3$ y $k=7.5$ cm/hr., el tiempo estimado de riego es de - 50 minutos con un gasto unitario de 0.004 m³/s-m y una lámina neta de 8cm. Diseñar con los métodos del ejemplo 1.

Solución por el Método de Katopodes-Strelkoff

Paso 1

$$Y_n = \left(\frac{0.004 * 0.025}{0.0002^{1/2}} \right)^{3/5} = 0.0512 \text{ m.}$$

$$T = \left(\frac{0.0512}{0.075} \right)^{1/0.3} = 0.2801 \text{ hr.} = 16.8 \text{ min.}$$

$$X = \frac{0.004 * 1008}{0.0512} = 78.80 \text{ m.}$$

$$P = \frac{0.0002 * 0.0004 * 1008}{0.0512} = 0.30$$

$$K = \frac{KT^a}{Y_n} = \frac{0.075 * 0.28^{0.3}}{0.0512} = 1.00$$

Paso 2

Para $a=0.3$ se utiliza la figura 3

$$t_{co}^* = \frac{50}{16.8} = 2.98$$

Paso 3

t_i (min)	t_i^*	X^*	X_i (m)
0	0	0	0
10	0.59	0.56	44.10
20	1.19	0.85	67.00
30	1.78	1.20	95.00
40	2.38	1.55	122.10
50	2.98	1.70	134.00

Paso 4

$$X_{co}^* = 1.70$$

de las figuras 11 y 12 con $P=0.3$

$$Y_a = 0.72 ; Y_b = 0.075 \text{ y } Y_{co}^* = 0.80$$

$$V_s = 0.72 * 0.80 * 1.70 = 0.98$$

$$V_{ss} = 0.75 * 0.014 * 1.70 = 0.133$$

$$Z_o = 0.104$$

$$E = 1 - \frac{0.183}{0.980} = 0.864$$

$$E = 86.4\%$$

Solución por el Método de Strelkoff-Clemmens.

Paso 1 Todos los valores están dentro de los límites.

Paso 2

$$Y = 0.0512 \text{ m}$$

$$X = \frac{0.0512}{0.0002} = 256 \text{ m}$$

$$T = \frac{256 \times 0.0512}{0.004} = 3276.8 \text{ seg} = 0.91 \text{ hrs.}$$

$$k^* = \frac{0.075 * 0.91^{0.3}}{0.0512} = 1.424$$

Paso 3

$$t_{co}^* = \frac{50}{54.61} = 0.9156 \quad ; \quad L^* = \frac{125}{256} = 0.488$$

Paso 4

Para $a=0.3$ y la figura 16 con $t_{co}^* = 0.9$

$$X_{a^*} = 0.51$$

$$X_{co} = 0.51 * 256 = 130 \text{ m.}$$

Paso 5

$a = 0.3$ - figura 25, $t_{co}^* = 0.9$, $k^* = 1.40$

$$\frac{X_{avf}^*}{X_{aco}^*} = 1.25 \quad ; \quad \frac{t_{vf}^*}{t_{co}^*} = 2.60$$

$$X_{avf} = 163 \text{ m}$$

$$t_{vf} = 130 \text{ min.}$$

Paso 6 Con la figura 16 y $K^* = 1.40$

t_i	t_i^*	X^*	X
0	0	0	0
10	0.18	0.13	33.3
20	0.37	0.25	64.0
30	0.55	0.35	89.6
40	0.73	0.44	112.6
50	0.92	0.51	130.0

En la figura VIII se pueden apreciar las curvas de -- avance resultantes para los dos métodos.

Paso 7

$$Z_o^* = \frac{0.9156}{0.6375} = 1.4362$$

Con $a=0.3$ figura 29

$$\alpha = 1.30$$

$$B = 2 \left[1 - \frac{1.3}{1.15} \right] = - 0.2609$$

$$Z_u(X) = 7.8 \left[1.3 \left(1 - \frac{X}{163} \right)^{0.15} - 0.2609 \left(1 - \frac{X}{163} \right) \right]$$

X	Z _u
10	8.1340
30	8.177
50	8.187
70	8.160
90	8.08
110	7.90
130	7.57

Paso 8

$$Z_L = 1 - \frac{0.489}{0.6376} = 0.2345$$

$$\frac{V_{vo}}{S_{ntco}} = \frac{1.3}{1.15} \cdot 0.2345^{1.15} + \left(- \frac{0.2609}{2} \cdot 0.2345^2 \right) = 0.2061$$

$$Z_v = \frac{8}{5.13 \cdot 1.4} = 1.08$$

$$Z_v = 1.3 Z^{0.15} - 0.2609 Z = 1.08$$

el valor que cumple es: $Z = 0.7 > 0.2345$

$$\frac{V_{dp}}{S_{ntco}} = \left(\frac{1.13}{1.15} \cdot 0.7^{1.15} + \frac{0.2609}{2} \cdot 0.7^2 \cdot 1.08 \cdot 0.7 \right) = 0.058$$

$$EA = 1 - 0.2061 - 0.058 = 0.736$$

$$EA = 73.6\%$$

CUADRO COMPARATIVO DE LOS DOS METODOS

EJEMPLO 2

Valor obtenido	Katopodes-Strelkoff	Strelkoff-Clemmens
Xco	134 m	130 m
Eficiencia	86%	74%
tco	50 min.	50 min.

Ejemplo 3.- Se cuenta con una superficie plana (sin pendiente) la cual se pretende regar por gravedad, con el fin de cultivar alfalfa con el sistema de melgas (0.15), la longitud de la superficie es de 250 m. De la prueba del infiltrómetro se obtuvo que $a=0.5$ y $k=0.58$ cm/hr., el tiempo de riego estimado es de 60 minutos con un gasto unitario de entrada de 9.27×10^{-3} m³/s-m y una lámina neta de 12.7 cm. Obtener las dimensiones y la eficiencia que se tendrían utilizando el método de Clemmens-Strelkoff.

Solución:

Paso 1 Todos los valores están dentro de los límites

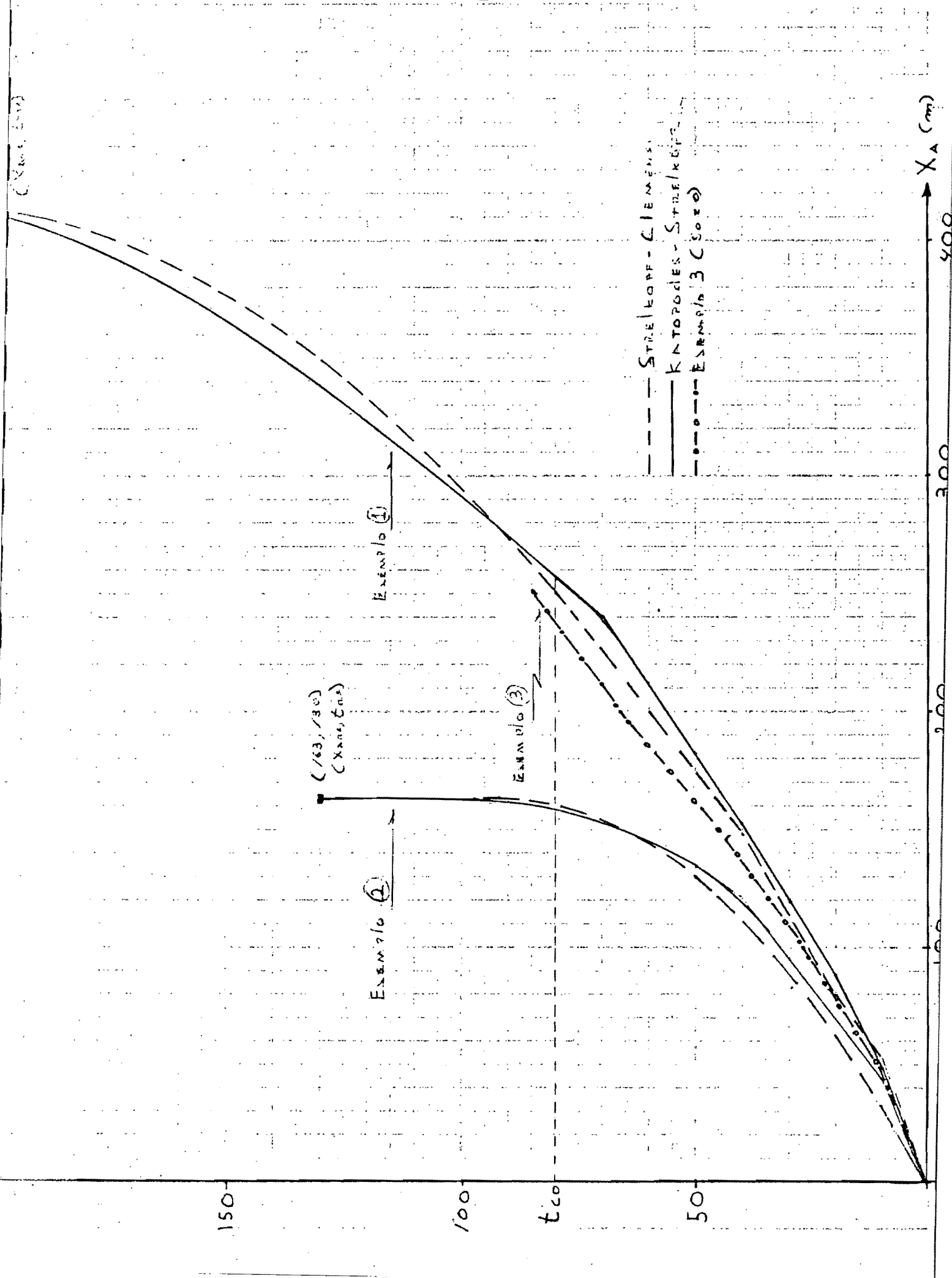
Paso 2 Cálculo del avance máximo.

$$T = t_{co} = 60 \text{ min.}$$

$$X_2 = \frac{q^{2/16} t_{co}^{13/16}}{m^{3/8}} \times 0.3098 = \frac{(9.27 \times 10^{-3})^{2/16} \cdot 3600^{13/16}}{0.15^{3/8}} = 203.8 \text{ m}$$

$$L^* = \frac{L}{X} = \frac{250}{203.8} = 1.227$$

$$K^* = \frac{k \cdot t_{co}^{a-3/16}}{q^{2/16} \cdot \left(\frac{m}{3600}\right)^{3/8}} = \frac{0.0508 \cdot 1}{33.37^{2/16} \cdot \left(\frac{0.15}{3600}\right)^{3/8}} = 0.31$$



Paso 3 Con $a=0.5$ se utiliza la figura 37
con $t_{co}^* = t_{co} = 1$ y $K^* = .031$, $X^*a = 0.85$

Paso 4 $X_{dama} = X_{dama}^* \cdot X = 0.85 \cdot 203.8 = 173.20$ m.

Paso 5 Cálculo de la curva de avance. Se calcula con la siguiente tabla y está dibujada en la figura VIII.

X	X^*	t^*	t
0	0	0	0
50	0.245	0.18	10.8
100	0.990	0.45	27.0
150	0.736	0.75	45.00
200	0.981	1.10	66.00
250	1.226	1.40	84.00

Paso 6 Cálculo del tiempo de recesión.

TRAMO	TIEMPO DE AVANCE	TIEMPO DE RECESION	TIEMPO DE OPORTUNIDAD	TIRANTE INFILTRADO
50-100	18.9	412	393.1	13.22
100-150	36.0	412	376.0	12.71
150-200	55.5	412	356.5	12.38
200-250	75.0	412	337	12.03

$$\Sigma = 63.35$$

$\frac{\Sigma Z_i}{N} = \frac{63.35}{5} = 12.67 \approx 12.70$ por lo tanto el tiempo de recesión supuesto es el correcto, o sea:

$$Tr = 412 \text{ min.}$$

Paso 7 Cálculo del tirante máximo

De la figura 43 con $K=0.31$ y $a=.05$

$$Y_o^*(1)=1.21$$

$$Y = \frac{q_o T}{X} = \frac{1.27 \cdot 10^{-3} \cdot 3600}{203.8} = 0.16 \text{ m}$$

$$Y_o(T)=1.21 \cdot 0.16=0.1981$$

$$Y_o(T)=20\text{cm (máximo tirante durante el riego)}$$

Ejemplo 4.- Utilizando el método de Clemmens-Dedrick, obtener las dimensiones de una parcela de riego a nivel --- (sin pendiente) si se quieren obtener eficiencias del 85 y 95%. Se estima que el coeficiente de rugosidad de Manning es de 0.15, el gasto de entrada es de 130 Lls con una lámina neta de 10 cm. De las pruebas de infiltración se obtuvo que $a=0.5$ y $K=5.34$ cm/hr.

Paso 1 Cálculo de T (tiempo de infiltración)

$$T = \frac{Z_m^{1/a}}{K} = \frac{10}{5.34}^2 = 210 \text{ min.}$$

Paso 2 Cálculo de los valores de referencia.

$$X = C_1 T^{2/3} Z_m^{7/9} m^{-2/3} = 0.426 \cdot 210^{1/3} \cdot 10^{7/9} (0.15)^{-2/3} = 320 \text{ m.}$$

$$Q = C_2 X Z_m T^{-1} = 0.167 \cdot 320 \cdot 10 \cdot 210^{-1} = 2.54 \text{ L/sm.}$$

Paso 3 Determinación de los límites aproximados
Se harán los cálculos para DU=85% y DU=95%

Para $a=0.5$ figura 47

$$\text{Con DU}=85\% \quad L_{\text{lim } 85} = 0.6$$

$$\text{Con DU}=95\% \quad L_{\text{lim } 95} = 0.3$$

$$L_{\text{lim } 85} = 0.6 * 320 = 192 \text{ m}$$

$$L_{\text{lim } 95} = 0.3 * 320 = 96 \text{ m}$$

Paso 4 De la misma figura 47

$$q_{\text{in } 85}^* = 1.50$$

$$q_{\text{in } 95}^* = 2.50$$

$$q_{\text{in } 85} = Q * q_{\text{in } 85}^* = 2.54 * 1.50 = 3.81 \text{ L/sm}$$

$$q_{\text{in } 95} = Q * q_{\text{in } 95}^* = 2.54 * 2.50 = 6.35 \text{ L/sm}$$

$$B_{85} = \frac{Q_{\text{in}}}{q_{\text{in } 85}} = \frac{130}{3.81} = 34 \text{ m (ancho)} \quad B_{95} = \frac{130}{6.35} = 20 \text{ m.}$$

$$A_{85} = B * L_{\text{lim}} = 34 * 192 = 652.8 \text{ m}^2$$

$$A_{95} = 20 * 96 = 1920 \text{ m}^2$$

Paso 5 Determinación del tiempo de aplicación.

$$t_{\text{co } 85} = \frac{Zn A}{Q_{\text{in}}^{DU} 85} = \frac{0.10 * 0.6528}{0.13 * 0.85} = 5907.569 = 98 \text{ min.}$$

$$t_{\text{co } 95} = \frac{0.10 * 1920}{0.13 * 0.95} = 1554 \text{ seg.} = 26 \text{ min.}$$

Cuadro comparativo

Valores	DU=85%	DU=95%
Longitud de riego	192 m	96m.
Ancho de superficie	34 m	20 m
Area	6,582 m ²	1,920 m ²
Tiempo de aplicación	98 min.	26 min.
Gasto unitario de aplicación	3.81 L/s/m	635 L/s/m

O sea, que para incrementar en un 10% la uniformidad de riego, hay que reducir los módulos de riego a prácticamente la mitad.

CONCLUSIONES.

En base a lo expuesto en los capítulos anteriores, se concluye lo siguiente:

- 1.- Que hay una gran cantidad de métodos para el diseño del riego parcelario y cualquiera de ellos podrá ser usado dependiendo de los datos con -- que se cuente y de la exactitud que se requiera en los resultados. Entiéndase por exactitud, el nivel al que se desarrolle el diseño, o sea, a nivel proyecto, anteproyecto, revisión, etc.
- 2.- De los métodos numéricos presentados, el de Fon ken-Carmody es el más aceptable ya que analiza el fenómeno de una forma más completa, nos permite visualizar claramente cuál es el proceso - de solución de la curva de avance y además la - información proporcionada es suficiente para -- poder codificar el programa de solución.
- 3.- Es claro que los métodos numéricos son más exactos que los métodos adimensionales, pero el grado de exactitud del método no debe preocuparnos tanto como el grado de exactitud de los datos - de campo (rugosidad, humedad antecedente, es tructura del terreno, etc.) los cuales son la - mayoría de las veces, difíciles de estimar y -- además varían con las etapas de cultivo. Con - esto quiero decir que se pueden utilizar los métodos adimensionales para el diseño con la mis- ma confianza con que se utilizarían los métodos

numéricos, lo importante es que una vez hecho - el diseño en gabinete, trate de checar se con mediciones en el campo y con esto se pueda construir un modelo de simulación más real. En --- cuanto al costo de ejecución es importante señalar que el uso de los métodos numéricos resulta más económico.

- 4.- De los métodos adimensionales, el más completo es el de Strelkoff-Clemmens, el cual calcula la curva de avabce, el perfil de infiltración y la eficiencia del riego. Es conveniente aclarar - que este método fue tomado y perfeccionado por Strelkoff-Rashid.
- 5.- Como se puede constatar en los ejemplos 1 y 2 - los métodos de Katopodes-Strelkoff y de Strelkoff-Clemmens, dan valores prácticamente iguales.

RECOMENDACIONES

- 1.- Utilizar el método numérico de Fonken-Carmody - siempre y cuando se cuente con una computadora. ya que esto nos ahorraría tiempo y nos permitiría encontrar la combinación gasto-longitud-tiempo que diera la máxima eficiencia de aplicación. Después medir en campo y ajustar el modelo de simulación en base a estas mediciones.
- 2.- Para el caso de diseñar superficies con pendiente por métodos adimensionales, hacerlo por el método de Strelkoff-Clemmens y checar los valores con el método de Katopodes-Strelkoff.
- 3.- Dado que los métodos adimensionales para el diseño de superficies a nivel ($S_o=0$), arrancan de datos iniciales diferentes, lo que se puede hacer en este caso es lo siguiente:
 - Diseñar por el método de Clemmens-Dedrick para diferentes valores de D.U. (eficiencias)
 - Elegir el diseño más conveniente.
 - Calcular los parámetros faltantes con el método de Clemmens-Strelkoff.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1.- Hagan and Haise "Irrigation of Agricultural Lands", Number 11, Series Agronomy, ASA, Wiscosin., 1974.
- 2.- Strelkoff Theodor "Algebraic Computation of flow in Burder Irrigation" J. of the Irrigation and Drainage Division; ASCE 1977, pp. 357-377
- 3.- Shawb J. "Soil and Water Conservation Engineering" - The Ferguson Foundation Agricultural Series: Wileyand Sons pp. 568-572.
- 4.- Sakkas Jhon Strelkoff Theodor "Hydrodynamics of Surface Irrigation-Advance Phace" J. of the Irrigation and Drainage Division; ASCE 1974, pp. 31-47.
- 5.- Whitoan J.B. "The effects of Hydraulics Resistance - in the Dam Break Problem" Royal Society of London, - Series A, Vol. 227 London England, 1965 pp. 399-407
- 6.- Strelkoff Theodor and Katopodes Nikolaos "Border --- Irrigation Hydraulics with Zero Invertia" J. of --- Irrigation and Drainage Division ASCE 1977, pp. 325-342.
- 7.- Strelkoff Theodor and Katopodes Nikolaos "Hydrodynamics of Border Irrigation J. of the Irrigation.
- 8.- Fangmeier D. and Strelkoff T. "Mathematical Models - and Border Irrigation Desing" American Society of - Agricultural Engineers, vol. 22 #1, feb. 1979 pp. 43 49.
- 9.- Fonken David, Carmody Thomas, Laursen Emmett and Fan meier Delmar "Mathematical Model of Burder Irrigation" J. of Irrigation and Drainage division, ASCE, 1980, pp. 202-221

- 10.- Katopodes Nikolaos and Strelkoff Theodor "Dimensionless Solution of Border-Irrigation Advance" J of -- Irrigation and Drainage, ASCE 1977, pp. 401-408.
- 11.- Strelkoff Theodor and Clemmens Albert "Dimensionless Stream Advance in Sloping Burders" J. of Irrigation and Drainage, ASCE 1981, pp. 361-382
- 12.- Strelkoff Theodor and Rashid Muhammad "Normalized - G-aphs of Border Irrigation perfumance" J. of Irrigation and Drainage ASCE 1984, pp. 359-374.
- 13.- Clemmens Albert and Strelkoff Theodor "Diomensionless Advance for Level-Basin Irrigation" J. of the Irrigation and Drainage, ASCE 1979, pp. 259-273.
- 14.- Clemmens Albert and Dedrick Allen" Limits for practical Level-Basin Desing" J. of the Irrigation and Drainage Divsion, ASCE, 1982, pp.127-141.
- 15.- Buomer L. J "Surface Irrigation" FAO, Agricultural Development paper No. 95. pp.80-132.

I N D I C E

	Página
INTRODUCCION	1
CAPITULO I	4
Estado del arte de los métodos para el diseño de riego por gravedad	
CAPITULO II METODOS NUMERICOS	8
Método de Sakkas-Strelkoff	8
Método de Strelkoff-Katopodes	16
Método de Funken-Carmody	22
CAPITULO III METODOS ADIMENSIONALES	28
Para superficies con pendiente	30
Para superficies horizontales	38
CAPITULO IV EJEMPLOS NUMERICOS	57
CONCLUSIONES	73
RECOMENDACIONES	75
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	76