

01183

2
Wj

FORMULACIÓN DE UN CRITERIO PARA INCREMENTAR
LA EFICIENCIA DEL RIEGO POR SURCOS, INCLUYENDO
EL MÉTODO DE CORTE POSTERIOR

ERNESTO VÁZQUEZ FERNÁNDEZ

Tesis Doctoral

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNAM

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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.

Este trabajo fue posible gracias al apoyo económico de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, del CONACYT y del Instituto de Ingeniería de la UNAM

*Las obras del Señor son grandes,
dignas de escudriñarse
por aquellos que las aman*

del salmo 110

A los investigadores del Instituto de Ingeniería

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1 Planteamiento del problema y su importancia | |
| 1.1.1 Riego por surcos y concepto de dosis | |
| 1.1.2 Eficiencias | |
| 1.1.3 Necesidad del uso eficiente del agua de riego | |
| 1.2 Antecedentes | |
| 1.2.1 Modelos matemáticos | |
| 1.2.2 Importancia de la humedad inicial | |
| 1.2.3 Propuesta de una estrategia económica | |
| 1.2.4 Propuesta de un modelo matemático | |
| 2. Modelo matemático | 23 |
| 2.1 Ecuaciones básicas y método numérico | |
| 2.2 Hipótesis y proceso de cálculo | |
| 2.3 Comparación con otros modelos y primera calibración | |
| 3. Método experimental | 37 |
| 3.1 Necesidad del modelo físico | |
| 3.2 Calibración con mediciones en el modelo físico | |
| 4. Riego continuo | 46 |
| 4.1 Diseño tradicional | |
| 4.2 Diseño óptimo con el modelo matemático | |
| 4.3 Análisis de sensibilidad de las variables | |
| 4.4 Confiabilidad en el diseño | |
| 5. Método de corte posterior | 59 |
| 5.1 Resultados del modelo matemático | |

| | |
|---|----|
| 5.2 Criterio de diseño y aplicaciones prácticas | |
| 5.3 Relaciones entre el corte posterior y el riego continuo óptimo | |
| 6. Conclusiones | 81 |
| Referencias | 87 |
| Apéndices | 91 |
| A. Ecuaciones de Saint-Venant | |
| B. Resultados del estudio experimental | |
| C. Resultados complementarios del modelo matemático | |
| D. Listado del programa | |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| 1. Volúmenes de agua en un surco | 3 |
| 2. Eficiencias parciales y total | 4 |
| 3. Curva de avance del agua | 6 |
| 4. Beneficios y costos para la lámina de riego aplicada | 16 |
| 5. Curva de rendimiento y recta de evapotranspiración | 17 |
| 6. Esquema en diferencias finitas | 24 |
| 7. Hidrograma de ingreso del ensayo N = 3 | 42 |
| 8. Hidrograma de ingreso del ensayo N = 5 | 42 |
| 9. Hidrograma de ingreso del ensayo N = 4 | 42 |
| 10. Hidrograma en riego continuo | 60 |
| 11. Hidrograma en corte posterior | 60 |
| 12. Hidrograma de salida | 61 |
| 13. Hidrograma de ingreso con corte posterior discontinuo | 63 |
| 14. Hidrograma de ingreso con corte posterior defasado | 64 |
| 15. Gráfica para revisión de surcos. Riego continuo | 79 |
| 16. Gráfica para revisión de surcos. Método de corte posterior | 80 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| 1. Parámetros de diseño | 30 |
| 2. Datos bibliográficos | 31 |
| 3. Calibración de los parámetros K, h y n | 33 |
| 4. Gastos y volúmenes medidos en el modelo físico | 41 |
| 5. Volúmenes calculados con el modelo matemático | 43 |
| 6. Longitudes recomendadas | 49 |
| 7. Diferencia de tensiones en el frente húmedo del suelo | 50 |
| 8. Diferencia de humedades y conductividades hidráulicas | 51 |
| 9. Eficiencias en el riego continuo óptimo | 52 |
| 10. Estadísticos de las variables | 54 |
| 11. Intervalos de confianza para longitudes de diseño | 56 |
| 12. Variables y cosenos directores | 57 |
| 13. Eficiencias con el método de corte posterior | 62 |
| 14. Riego con partición de la parcela (split-set) | 66 |
| 15. Diseño óptimo con riego continuo | 67 |
| 16. Gastos de diseño por surco. Parcela Schwankl | 68 |
| 17. Gastos de diseño por surco. Parcela Tarboton | 69 |
| 18. Gastos de diseño por surco. Parcela Fangmeier-Ramsey | 70 |
| 19. Gastos de diseño por surco. Surco II | 71 |
| 20. Volúmenes del riego continuo óptimo y corte posterior | 73 |

NOMENCLATURA

| | |
|-------|---|
| A | superficie de cultivo en un sistema de riego |
| A_g | ahorro de agua |
| A_m | área en la sección aguas arriba del tramo i |
| A_p | área en la sección aguas abajo del tramo i |
| B_i | ancho de la superficie libre del agua en la sección i |
| B_n | beneficio neto en un sistema de riego |
| C | costo en un sistema de riego |
| C_a | costo total por hectárea regada en un sistema de riego |
| CP | Corte Posterior |
| C_u | coeficiente de uniformidad |
| C_o | parámetro de la fórmula de infiltración de Kostiaikov |
| D_s | separación entre surcos |
| F_m | número de Froude en la sección aguas arriba del tramo i |
| F_p | número de Froude en la sección aguas abajo del tramo i |
| F-R | surco Fangmeier-Ramsey |
| g | aceleración de la gravedad |
| h | déficit de humedad del suelo en lámina de agua |
| II | Instituto de Ingeniería |
| j | superíndice para identificar el instante de tiempo |
| K | conductividad hidráulica |
| L_r | longitud real del surco |
| L_s | longitud óptima del surco |
| l | lámina de riego aplicada |
| l_p | lámina de riego acumulada óptima |
| n | coeficiente de rugosidad de Manning |

| | |
|-------|--|
| n_i | coeficiente de rugosidad inicial en la etapa de avance |
| P_i | perímetro mojado de la sección transversal i del surco |
| Q_i | gasto en la sección i |
| Q_m | gasto de ingreso al tramo i |
| Q_p | gasto de salida del tramo i |
| Q_r | gasto real en el surco |
| Q_0 | gasto de ingreso en la cabecera del surco |
| Q_1 | gasto de ingreso al surco después de la etapa de avance |
| q_i | gasto de infiltración por unidad de longitud en el tramo i |
| RCO | Riego Continuo Óptimo |
| R_m | radio hidráulico en la sección aguas arriba del tramo i |
| R_p | radio hidráulico en la sección aguas abajo del tramo i |
| SCS | Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos |
| S_f | pendiente hidráulica |
| S_0 | pendiente del surco |
| t_a | tiempo de avance del agua |
| t_c | tiempo de receso |
| T_c | tiempo de riego con CP según el plan de Humpherys |
| T_r | tiempo de riego (continuo o de corte posterior) |
| USDA | Departamento de Agricultura de los Estados Unidos |
| V_a | volumen aprovechable por la planta |
| V_e | volumen de ingreso al surco |
| V_s | volumen de salida del surco |
| V_t | volumen de agua limitante en un sistema de riego |
| V_z | volumen de infiltración a lo largo del surco |
| w | humedad inicial del suelo en lámina de agua |

| | |
|-------------|---|
| x | distancia desde la cabecera del surco |
| X_i | variable independiente i en el diseño del surco |
| \bar{X}_i | valor medio de la variable independiente i |
| Y | rendimiento del cultivo |
| y_i | tirante del flujo en la sección i |
| Z_i | lámina de infiltración acumulada en el tramo i |
| Z_m | dosis útil |
| α | parámetro de la fórmula de infiltración de Kostiaikov |
| α_i | coseno director de la variable independiente X_i |
| β | variable normal estándar |
| Δt | intervalo de tiempo |
| Δx | longitud del tramo i |
| η | eficiencia de aplicación en el riego continuo |
| η_c | eficiencia de aplicación en el corte posterior |
| η_v | eficiencia en volumen |
| η_z | eficiencia de infiltración |
| θ | factor de peso que promedia el tirante en el tiempo |
| σ_i | desviación estándar |
| ρ_1 | coeficiente para calcular el radio hidráulico en el surco |
| ρ_2 | exponente para calcular el radio hidráulico en el surco |
| σ_1 | coeficiente para calcular el área transversal del surco |
| σ_2 | exponente para calcular el área transversal del surco |
| ϕ | factor de peso que promedia el gasto en forma espacial |

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema y su importancia

1.1.1 Riego por surcos y concepto de dosis

El agua de riego tiene por objeto humedecer la zona radicular del suelo para el crecimiento de la planta. Se aplica cuando el porcentaje de humedad disminuye o es igual a un valor previamente determinado, generalmente por arriba del punto de marchitamiento, pero sin exceder la capacidad de campo del suelo porque entonces el agua se infiltraría por debajo de la zona radicular y no sería utilizada por la planta. Después, por el efecto de evapotranspiración el porcentaje de humedad vuelve a descender hasta que se aplica el siguiente riego. Así, la lámina de agua requerida por la planta desde un cierto porcentaje de humedad hasta la capacidad de campo se llama dosis útil, la cual debe quedar almacenada en la zona radicular del suelo para que las

raíces la aprovechen en el desarrollo de la planta. En el riego por surcos las pérdidas de agua se deben a las fugas en el extremo inferior (coleos) y a la aplicación de excedentes abajo de la zona radicular (percolación) debido a que la distribución del agua infiltrada no es uniforme, siendo mayor la pérdida por percolación en la cabecera por ser la zona que se humedece más tiempo. La lámina de agua sobre el área de la parcela, de la cual una parte se pierde por coleos y otra por percolación, se llama dosis real.

1.1.2 Eficiencias

Se define la eficiencia total o de aplicación (η) como el volumen que puede aprovechar la raíz de la planta entre el volumen de ingreso al surco. Esta misma eficiencia se obtiene también a través del producto de dos eficiencias parciales (Sánchez y Fuentes, 1992); la primera llamada eficiencia de infiltración (η_z) es la relación del volumen infiltrado aprovechable entre el volumen total infiltrado, en la figura 1 el volumen aprovechable es el prisma rectangular $L_s Z_m D_s$, donde L_s es la longitud del surco, Z_m es la lámina acumulada mínima o dosis útil y D_s es la separación entre surcos. La región sombreada es el volumen total infiltrado V_z . La segunda eficiencia parcial es la eficiencia en volumen (η_v), calculada como el volumen total infiltrado entre el volumen de ingreso V_e , en la figura 1 se representa este último sobre la longitud del surco y en la salida del mismo se muestra el volumen escurrido, o perdido, V_s . De esta manera, la eficiencia total o de aplicación es el producto de estas dos eficiencias

parciales. Para riego con un gasto Q_0 constante (riego continuo) se acostumbra expresar dicha eficiencia como

$$\eta = \frac{L_s Z_m D_s}{Q_0 T_r} \quad (1)$$

donde T_r es el tiempo de riego y $Q_0 T_r$ es el volumen de ingreso.

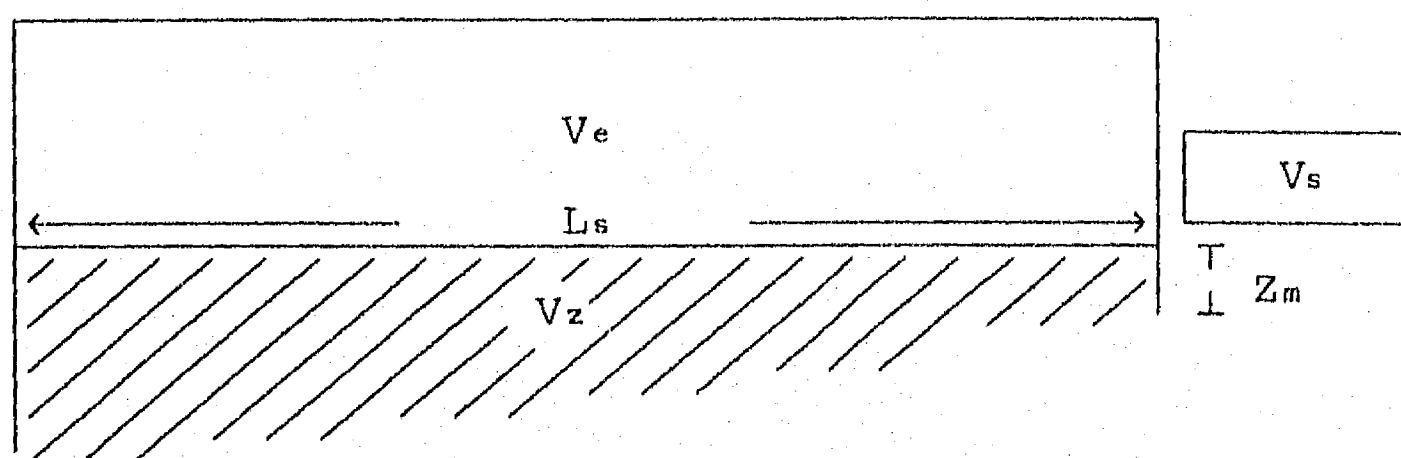


Figura 1. Volúmenes de agua en un surco

La relación que existe entre las dos eficiencias parciales hace que cuando una aumenta la otra disminuye al crecer el gasto Q_0 (figura 2). Para riego continuo, dependiendo de las características geométricas del surco, de la textura del suelo y del coeficiente de rugosidad, la eficiencia total máxima, para un cierto gasto de aplicación Q_0 , varía del 40 % al 55 %.

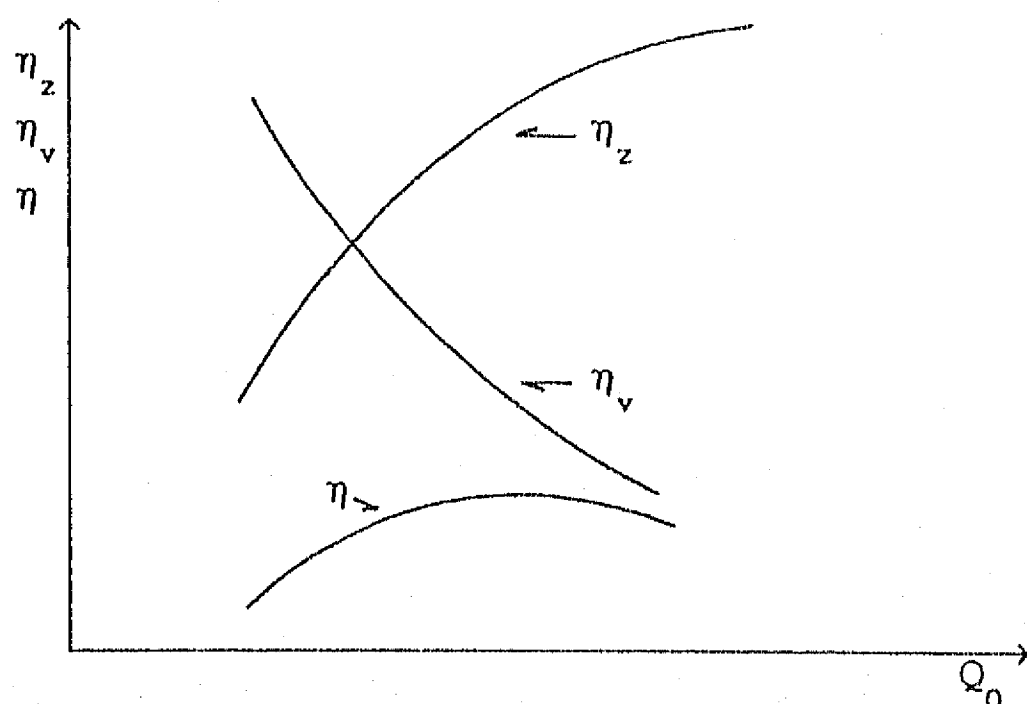


Figura 2. Eficiencias parciales y total

1.1.3 Necesidad del uso eficiente del agua de riego

Se sabe que el riego por surcos es el más empleado en México y que su desventaja es la baja eficiencia. Con el método de corte posterior, que consiste en reducir el gasto inicial por lo general a la mitad, se logran eficiencias mayores que se acercan a las obtenidas en el riego por aspersión (donde el agua se conduce por tuberías a presión), pero con la ventaja de ser más económico el riego por gravedad (donde el agua se conduce por canales abiertos). Sin embargo, deben reunirse las condiciones favorables de diseño para ser aplicado, como partir de una buena eficiencia para riego continuo, cuyo gasto es constante. Se ha visto en la práctica, en los países donde se usa este método como Francia y Estados Unidos, que se logran ahorros importantes de agua; sin embargo, en México todavía no se aplica, por ello, la aportación de este trabajo consiste en formular, con base en un modelo matemático, el criterio de diseño práctico para incrementar la

eficiencia y lograr también en nuestro país un uso eficiente del agua de riego.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Modelos matemáticos

Son dos los criterios de diseño para el riego parcelario; la escuela empírica que prefiere la experiencia de la práctica del riego en el campo y la escuela teórica que pretende aplicar el análisis hidráulico sofisticado (Cuenca, 1989). Este trabajo obviamente corresponde a la segunda escuela, pues se presenta un modelo matemático que, además de útil para el diseño parcelario tradicional, permite establecer un criterio para aplicar el método de corte posterior (cut-back) e incrementar la eficiencia del riego por surcos.

El proceso de riego por surcos consta de tres etapas; en la primera, llamada etapa de avance, el agua viaja hacia el final del surco y humedece parte de la zona radicular del suelo; en la segunda, denominada de llenado, el gasto de ingreso se mantiene constante hasta un tiempo de corte o de riego durante el cual se acumula el agua infiltrada en la zona radicular; por último, la etapa de receso ocurre después de la suspensión o corte del gasto hasta que el agua se infiltra para humedecer totalmente la zona radicular o desaparecer por el extremo inferior del surco. En la figura 3 se muestra una curva de avance del agua a lo largo del surco (eje horizontal x) en el tiempo t (eje vertical), en ella se indican los tiempos de avance t_a , de riego T_r y de receso t_c .

Se ha supuesto que el requerimiento de agua o dosis útil en la zona radicular se alcanza al final del proceso. El método de corte posterior consiste en alimentar inicialmente el surco con un gasto Q_0 hasta la etapa de avance, para reducirlo después a un gasto $Q_1 < Q_0$ hasta el tiempo de corte.

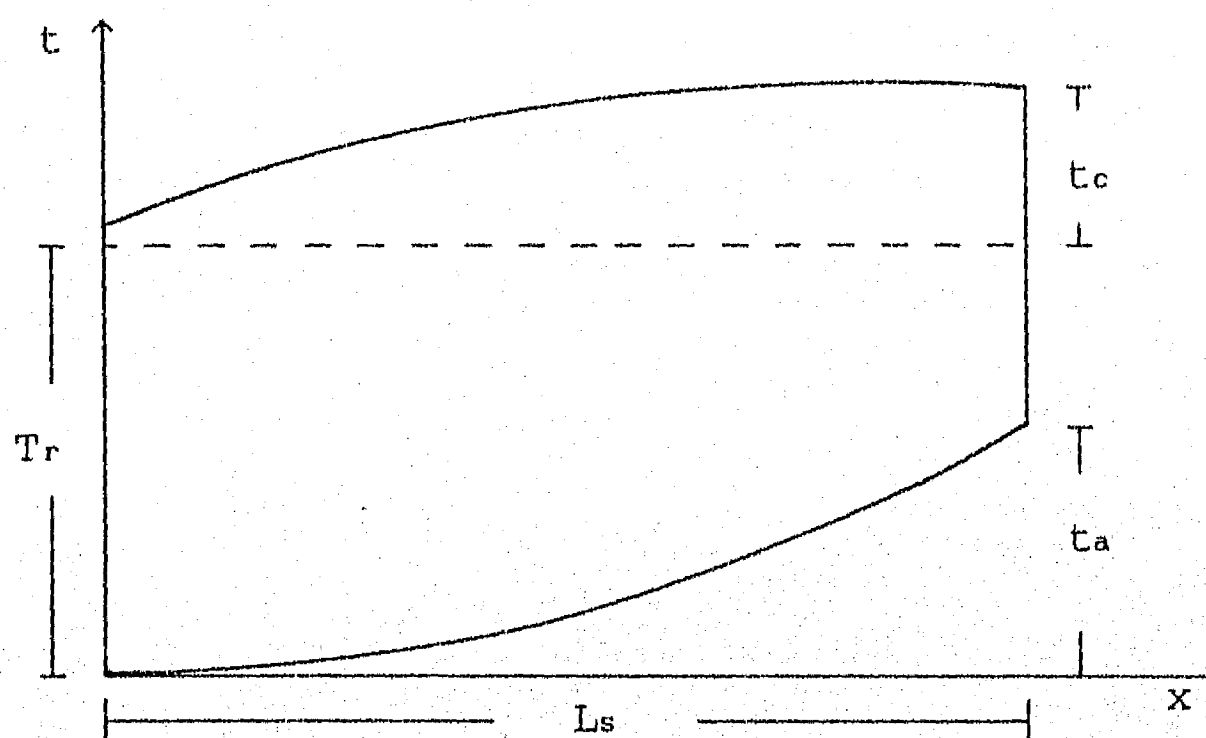


Figura 3. Curva de avance del agua

Existen muchos modelos matemáticos para riego por surcos calibrados con la reproducción de la etapa de avance (o curva de avance). Entre ellos, Elliot, Walker y Skogerboe (1982); Yu y Singh (1990); Wallender y Rayej (1990); García (1991); Schmitz y Seus (1992); Bautista y Wallender (1992); y Juana y Losada (1994). Además de los de Sánchez y Fuentes (1992); Vázquez y Sánchez (1993), aún no calibrados; y el de Vázquez (1994), calibrado con datos bibliográficos. Los tres últimos dan origen al modelo que se presenta en este trabajo. Por otra parte, Jensen (1980) presenta

un método gráfico para el diseño de riego por surcos que incluye el método de corte posterior.

Todos estos modelos se basan en las ecuaciones de Saint-Venant

$$\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + S_f - S_0 = 0 \quad (2)$$

y

$$-\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} + q = 0 \quad (3)$$

La primera es la ecuación dinámica y la segunda es la ecuación de continuidad. En ellas, x es la longitud del surco, y es el tirante del flujo, V es la velocidad media del flujo, S_f es la pendiente hidráulica calculada con la fórmula de Manning, S_0 es la pendiente del canal, Q es el gasto en una sección hidráulica, B es el ancho de la superficie libre del agua, g es la aceleración de la gravedad y q es el gasto de infiltración por unidad de longitud.

Elliot et al. presentan un modelo simplificado en diferencias finitas para calcular exclusivamente la etapa de avance sin considerar los términos de la aceleración local y convectiva (modelo de inercia nula), es decir, la ecuación dinámica de Saint-Venant se escribe

$$\frac{\partial y}{\partial x} + S_f - S_0 = 0$$

Por otra parte, la ecuación de continuidad la emplean en la forma

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial z}{\partial t} = 0$$

donde A es el área de la sección transversal y z es el volumen de

agua infiltrada por unidad de longitud del surco, el cual se calcula con la fórmula modificada de Kostiaikov

$$z = C_0 \tau^\alpha + K\tau \quad (4)$$

C_0 y α son parámetros que dependen de la textura del suelo, K es la infiltración básica o conductividad hidráulica, $\tau = t - t_x$ es el tiempo de oportunidad de infiltración o tiempo de contacto del agua con el suelo, t_x es el tiempo que tarda en llegar el agua a una distancia x de la cabecera y t es el tiempo desde el inicio del proceso. Debe señalarse que si z no se multiplica por un ancho representativo, por ejemplo el perímetro mojado, C_0 tiene dimensiones $[L^2T^{-\alpha}]$ y K $[L^2T^{-1}]$.

La forma de la sección transversal del surco es muy significativa para calcular el gasto de infiltración; es decir, el perímetro mojado, que es por donde se infiltra el agua, juega un papel preponderante en el riego por surcos (Cuenca, 1989). El hecho de que el modelo matemático sea de inercia nula es menos relevante que la observación anterior; sin embargo, dada la rapidez en los cálculos de las computadoras actuales es preferible usar un modelo completo que incluya los términos de la aceleración local y convectiva porque reproduce en una forma más realista el fenómeno físico del flujo transitorio.

El modelo de Yu y Singh es analítico y reproduce todas las fases del riego por surcos, usa también la fórmula modificada de Kostiaikov pero con dimensiones $[LT^{-\alpha}]$ en la constante C_0 , que da lugar a tomar en cuenta la variación del perímetro mojado de la sección transversal. No obstante, tampoco se usa la ecuación

dinámica completa sino que se reduce todavía más al escribirla en la forma $S_f - S_0 = 0$, lo cual equivale a un modelo simplificado de onda cinemática. Yu y Singh dicen que para aplicaciones prácticas, los modelos deben ser simples, sistemáticos, suficientemente seguros y fáciles de aplicar. De acuerdo con ellos, el modelo motivo de esta investigación espera cumplir con estos requisitos, pero a través de un modelo hidrodinámico completo.

Wallender y Rayej presentan un modelo completo en diferencias finitas donde usan una ecuación para calcular la variación del perímetro mojado y corregir el término $\partial z / \partial t$ de la ecuación de continuidad usada por Elliot et al., en la forma $\partial(Z) / \partial t$, donde $Z = zP$, siendo P el perímetro mojado expresado en función del área hidráulica, en una sección de forma parabólica, como

$$P = \left(\frac{1}{\rho_1} \right)^{3/4} A^{[5/2 - (3/4)\rho_2]}$$

donde ρ_1 y ρ_2 son constantes y A es el área de la sección transversal.

El cálculo de tirantes y gastos en la etapa de avance lo hacen de aguas abajo hacia aguas arriba en forma explícita mediante la modificación en forma iterativa del intervalo de tiempo, suponiendo que tirante y gasto en el tramo punta del frente de onda valen cero. En la etapa de llenado y receso se suponen condiciones de flujo uniforme aguas abajo para el gasto de salida y se realiza el cálculo igualmente hacia aguas arriba. Para determinar el gasto de infiltración emplean también la fórmula de Kostiaikov modificada.

García usa un modelo matemático completo con la ecuación de continuidad de la misma manera que Elliot et al., sin considerar la variación del perímetro mojado. Para calcular el gasto de infiltración emplea también la ecuación modificada de Kostiaikov.

Schmitz y Seus dan a conocer otro modelo analítico pero de inercia nula para surcos de sección triangular y parabólica; sin embargo, las dimensiones del coeficiente C_0 vuelven a ser $[L^2T^{-\alpha}]$ por lo que tampoco consideran la variación del perímetro mojado.

Bautista y Wallender muestran un modelo similar al de Wallender y Rayej, pero con la diferencia de que ahora modifican los incrementos de longitud de surco en lugar del intervalo de tiempo para el cálculo de la etapa de avance.

Sánchez y Fuentes exponen un modelo implícito completo en diferencias finitas sin calibrar todavía, en el cual suponen un gasto base pequeño para calcular las condiciones iniciales, además de un tramo ficticio en el extremo inferior del surco donde no ocurre infiltración. Emplean la fórmula original de Kostiaikov para calcular el gasto de infiltración como $q = By\alpha C_0 \tau^{\alpha-1}$, donde y es el tirante del flujo y B es el ancho de la superficie libre del agua en una sección triangular.

Sobre las mismas hipótesis Vázquez y Sánchez dan a conocer un modelo explícito con solución de gastos y tirantes hacia aguas abajo, con resultados similares al de Sánchez y Fuentes pero con la desventaja de emplear mayor tiempo de cálculo por necesitar de intervalos de tiempo más pequeños. Posteriormente se extiende el modelo matemático a uno de versión implícita con tiempos de

cálculo menores.

Juana y Losada obtienen, a partir de simulaciones con modelos simplificados de inercia nula y de la onda cinemática en los que usan la fórmula de Kostiaikov, parámetros adimensionales con las variables más significativas del proceso de riego por surcos como longitud, gasto, pendiente, textura del suelo, rugosidad, dosis y geometría del surco. Con dichos parámetros extrapolan los resultados del modelo numérico a un método de diseño gráfico para riego continuo.

Jensen, en un método gráfico, aplica el método de corte posterior al reducir a la mitad el gasto de riego continuo después de la etapa de avance; sin embargo, según Wallender (1994), ha dejado de usarse debido al avance en la solución numérica de las ecuaciones de Saint-Venant, que hace más rápido el cálculo. Además, en este trabajo se propone que el diseño con el método de corte posterior debe partir del diseño óptimo del riego continuo para obtener la mayor eficiencia de aplicación.

La fórmula empírica de Kostiaikov, en su versión original o modificada es la más popular, pues es usada por todos los investigadores; sin embargo, existen otras fórmulas para calcular la velocidad de infiltración. Singh y Yu (1990) derivan una ecuación general donde quedan incluidas las fórmulas de Horton, Kostiaikov, Overton, Green-Ampt y Philip. Demuestran la equivalencia de las fórmulas de Green-Ampt y Philip por ser las que tienen un fundamento teórico. Chu (1978) aplica la fórmula de Green y Ampt para medir la infiltración durante una lluvia no

uniforme, y la escribe en la forma

$$\frac{dZ}{dt} = K \left(1 + \frac{SM}{Z} \right) \quad (5)$$

donde dZ/dt es la velocidad de infiltración, en cm/min; K es la conductividad hidráulica, en cm/min; S es la diferencia en tensión capilar antes y después del humedecimiento del suelo, en m; M es la diferencia de humedad del suelo antes y después de humedecerse, en %; y Z es la lámina acumulada de infiltración, en cm. En adelante se expresa $SM = h$, en cm, y se interpreta en este trabajo como una deficiencia de humedad (sin ser la dosis, aunque puede tener el mismo valor numérico), ya que si $SM = 0$, $dZ/dt = K$ es la conductividad hidráulica del suelo saturado. Por tanto, K y h son los parámetros por medir o estimar en la fórmula de Green y Ampt para poder calcular la velocidad de infiltración.

Bautista y Wallender (1993a) usan la fórmula de Kostiaikov modificada y encuentran que la mejor calibración de los parámetros α y C_0 se obtiene cuando la conductividad hidráulica o velocidad de infiltración básica K medida en campo se conserva, por lo que en este trabajo se prefiere usar la fórmula de Green y Ampt para calibrar únicamente un parámetro, esto es, el producto de las diferencias de tensión capilar y de humedad, o déficit de humedad del suelo h .

1.2.2 Importancia de la humedad inicial

Taylor y Ashcroft (1972) muestran en la sección de un subcapítulo de su obra la influencia del contenido inicial de agua

hallada por otros autores. Así por ejemplo, Gardner y Mayhugh encontraron en 1958 que la forma y avance del frente húmedo de agua de riego o lluvia en suelos homogéneos depende fuertemente de la humedad inicial, de manera que el tiempo requerido para humedecer el suelo a una cierta distancia horizontal de la fuente de alimentación es mayor en un suelo seco. Taylor-Heuser y Free et al. en 1940, demostraron la influencia del contenido inicial de agua en un mismo tipo de suelo sobre la lámina acumulada de infiltración, con la conclusión de que para un mismo tiempo de infiltración, se acumula mayor cantidad de agua si los porcentajes de humedad inicial son menores; por tanto, la lámina acumulada es mayor en un suelo seco que en un suelo con cierta humedad inicial. Taylor y Ashcroft agregan que diferentes investigadores han encontrado que la humedad inicial afecta a los parámetros de la fórmula empírica de Kostiaikov. A veces los valores de los parámetros decrecen, a veces se incrementan y a veces pasan de un valor máximo a uno mínimo con un incremento de la humedad inicial, esto probablemente resulta de su fuerte dependencia de los cambios en la estructura del suelo.

Taylor y Ashcroft también mencionan la influencia de la humedad inicial en los parámetros de la fórmula de Philip, que tiene más significado teórico

$$Z = S_p' \tau^{1/2} + A_p' \tau$$

donde S_p' es un parámetro del suelo llamado "sorbicidad" que indica la capacidad de un suelo para absorber o liberar agua, A_p' es un parámetro que depende de la habilidad del suelo para

transmitir agua. Así, S_p' es el parámetro dominante al inicio de la infiltración y A_p' se vuelve más importante conforme τ es mayor. En 1957 Philip demostró que a mayor porcentaje de humedad inicial en un suelo S_p' disminuye y A_p' crece; además, la velocidad de infiltración, para un mismo tiempo, aumenta si la humedad inicial disminuye.

Philip señala dos desventajas de la fórmula empírica de Kostiaikov; la primera, que no puede ser ajustada para diferentes condiciones de campo, entre ellas la humedad inicial, sabiendo que tiene efectos sobre la infiltración y, la segunda, que predice velocidades de infiltración aproximadas a cero para tiempos largos, lo cual se sabe que es incorrecto (Philip, 1957b, en Walker y Skogerboe, 1987). Por ello, en la fórmula de Kostiaikov (ecuación 4), la velocidad de infiltración se modifica como

$$dZ/d\tau = \alpha C_0 \tau^{\alpha-1} + K$$

donde K es un valor representativo de la infiltración final para tiempos largos.

No obstante la popularidad de la fórmula de Kostiaikov debida a que el Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos (SCS) establece intervalos de los parámetros α y C_0 ; por la importancia de la humedad inicial se ratifica la decisión de usar en este trabajo la fórmula de Green y Ampt (ecuación 5).

Se aclara que hay otros parámetros igual o más importantes. En el capítulo 4 se efectúa el análisis de sensibilidad de las variables independientes que intervienen en el diseño de la longitud del surco.

1.2.3 Propuesta de una estrategia económica

La economía de los sistemas de riego debe tomar en cuenta a los cuatro factores principales que intervienen en el diseño de un sistema de riego: el trabajo del hombre, el agua, el capital y la tierra (en calidad y cantidad). En los países en vías de desarrollo el principal limitante es el capital. México ha optado por la estrategia de reducir los costos en los sistemas de riego mediante: a) la construcción de canales sin revestir, b) la reducción de la red de drenaje y la disminución de la sección hidráulica en los drenes, y c) la disminución de la red de caminos de enlace (SARH, 1983). Esta estrategia incrementa las pérdidas de agua por infiltración en la conducción, pero podría compensarse con el uso eficiente del agua en las parcelas -si el riego se hace por surcos- con el método de corte posterior. Del mismo modo, si el agua es la limitante también es conveniente emplear dicho método.

Cuando la limitante es la tierra el sistema de riego se diseña para producir el máximo beneficio anual neto con base en los beneficios anuales por la venta del producto cultivado y de los costos totales (de inversión y de mantenimiento) anualizados. Los beneficios y los costos pueden expresarse en función de la lámina de riego aplicada como se muestra en la figura 4. La lámina de riego aplicada debe entenderse que es sobre el terreno, esto es, la dosis real multiplicada por el número de riegos.

La lámina de riego aplicada óptima, cuando la limitante es la tierra, es l_t y se puede obtener con la expresión

$$\frac{dB_n}{dI} = \frac{d}{dI} (B - C) = 0$$

esto es

$$\frac{dB}{dI} = \frac{dC}{dI}$$

donde, B_n es el beneficio neto, B es el beneficio por la venta de la cosecha y C es el costo total.

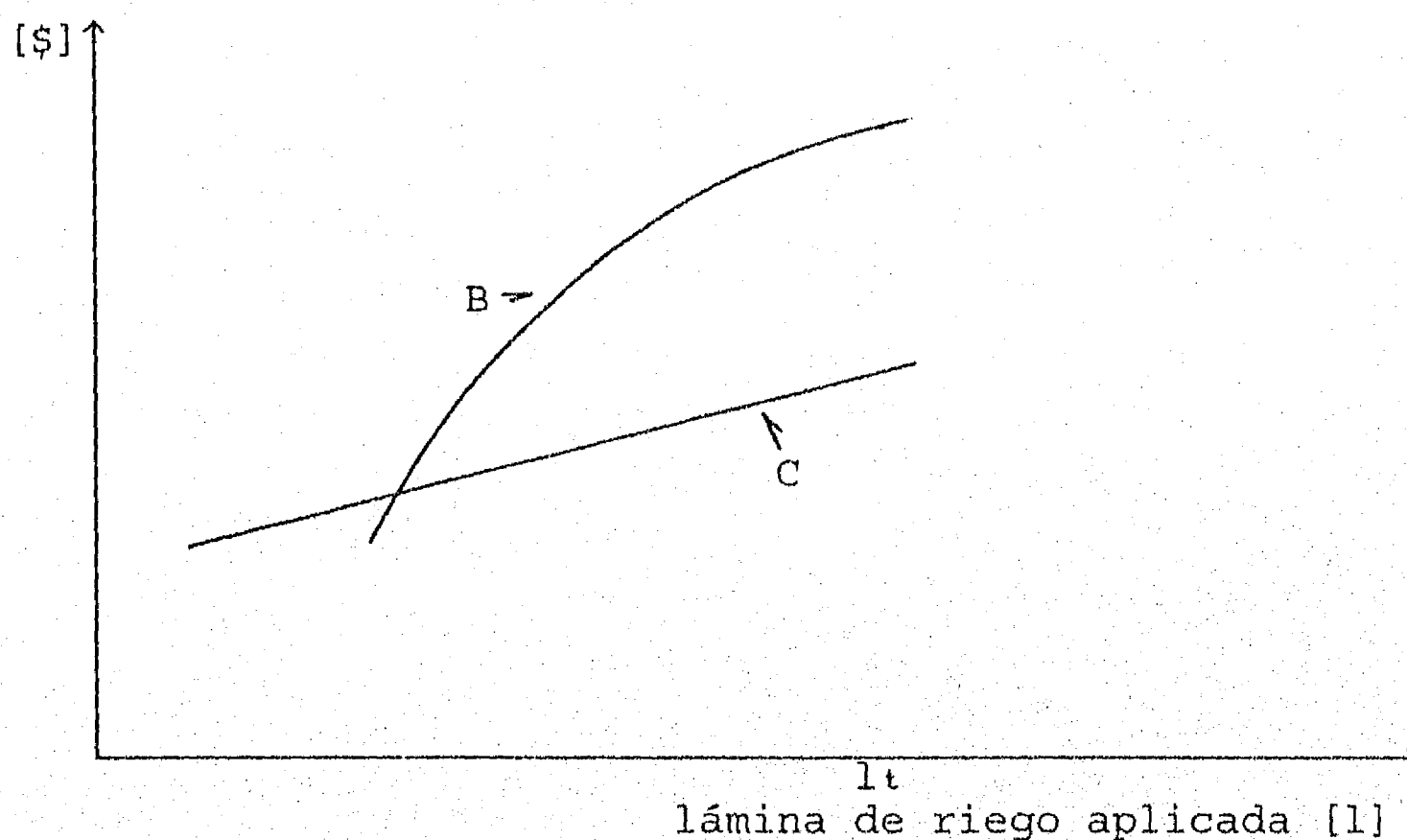


Figura 4. Beneficios y costos para la lámina de riego aplicada

Se supone que para tomar una decisión económica como la anterior es necesario disponer de curvas de rendimiento de los productos por cultivar como la de la figura 5, donde el rendimiento Y se encuentra en dimensiones Kg/ha. Si el producto de A ha de tierra se vende a un precio P en \$/Kg, entonces $B = PYA$ se expresa en \$.

En la figura 5 se muestra una curva de rendimiento y una

recta que, según varios investigadores (Stewart y Hagan, 1973), representa el rendimiento en función de la evapotranspiración, es decir, la cantidad de agua acumulada que requiere la planta para su crecimiento durante el ciclo vegetativo. Entonces la evapotranspiración ET se obtiene como $ET = \eta l$, donde η es la eficiencia por la forma de regar y l es la lámina de riego aplicada en la cabecera del surco.

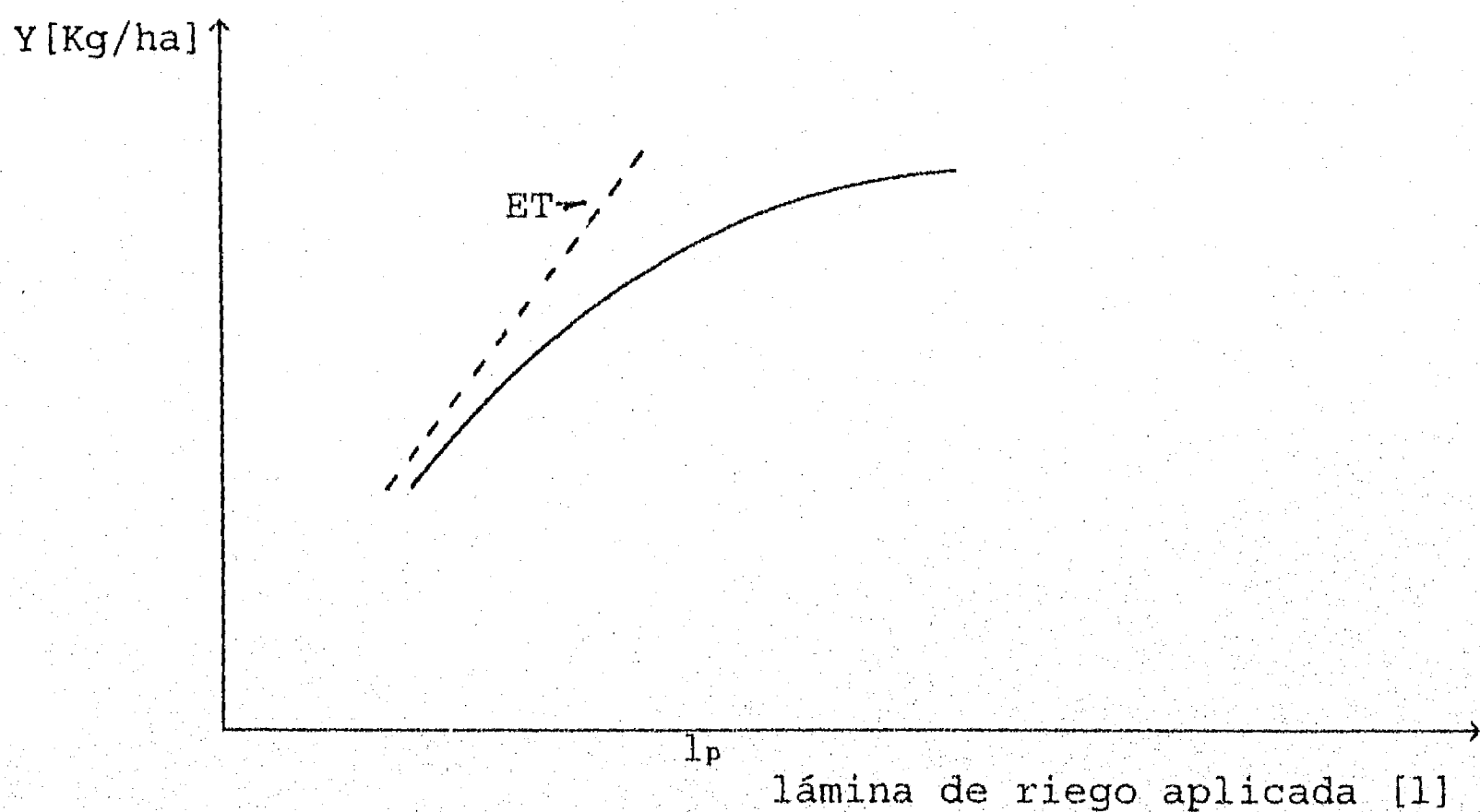


Figura 5. Curva de rendimiento y recta de evapotranspiración

Ya se ha dicho que en un sistema de riego por surcos η alcanza un valor máximo del orden de 0.55 cuando el gasto de riego es continuo. Si se emplea el método de corte posterior aumenta la eficiencia de aplicación del agua de riego y la curva de rendimiento se acerca a la recta de evapotranspiración, no obstante que el ahorro de agua con este método representa un

incremento en el costo de labor y un costo de oportunidad del agua porque, si la tierra no es limitante, es posible aumentar el área cultivada.

Independientemente de que se use el método de corte posterior o no, English (1990) presenta un criterio analítico para determinar la lámina de aplicación acumulada óptima (l_p) en un sistema de riego cuando la limitante es el agua.

En este caso, supóngase que el volumen real sobre la tierra por irrigar (descontadas las pérdidas por infiltración y evaporación en la conducción, y en la operación del sistema) es V_t , entonces el área por cultivar está en función de la lámina de aplicación acumulada

$$A = V_t/l \quad (6)$$

El beneficio neto total por cosechar en dicha área A un producto agrícola es

$$B_n = PYA - AC_a \quad (7)$$

donde C_a es el costo total por hectárea regada.

Según English algunos investigadores han comprobado experimentalmente que el rendimiento Y puede expresarse como una parábola

$$Y = a_1 + b_1 l + c_1 l^2 \quad (8)$$

y el costo total C_a como una recta

$$C_a = a_2 + b_2 l \quad (9)$$

De manera que A , Y y C_a están expresadas en función de l . Entonces para hallar la lámina de aplicación óptima se encuentra el máximo beneficio total neto con el criterio de la primera

derivada, así

$$\frac{dB_n}{dl} = PY(dA/dl) + PA(dY/dl) - A(dC_a/dl) - C_a(dA/dl) = 0$$

esto es

$$A[P(dY/dl) - dC_a/dl] + [PY - C_a](dA/dl) = 0$$

Al sustituir $A = V_t/l$, $dA/dl = -V_t/l^2$, $dY/dl = b_1 + 2c_1l$ y $dC_a/dl = b_2$, queda

$$(V_t/l)[P(b_1+2c_1l) - b_2] + [P(a_1+b_1l+c_1l^2) - (a_2+b_2l)](-V_t/l^2) = 0$$

Al desarrollar se tiene

$$l[P(b_1+2c_1l) - b_2] = P(a_1+b_1l+c_1l^2) - (a_2+b_2l)$$
$$Pb_1l + 2Pc_1l^2 - b_2l = Pa_1 + Pb_1l + Pc_1l^2 - a_2 - b_2l,$$

y al simplificar

$$Pc_1l^2 = Pa_1 - a_2$$

Por último

$$l_p = \sqrt{(Pa_1 - a_2)/Pc_1} \quad (10)$$

donde l_p es la lámina de riego acumulada óptima por aplicar, si el volumen limitante de agua en las parcelas es V_t , sobre la superficie de área

$$A = \frac{V_t}{\sqrt{(Pa_1 - a_2)/Pc_1}}$$

Bautista y Wallender (1993b) presentan una estrategia económica que minimiza el costo de agua y de labor en la parcela por emplear el método de corte posterior. La expresión matemática es

$$C_r = V_e P_w + H_l P_l$$

donde C_r es el costo de riego por minimizar, V_e el volumen de agua aplicado al surco, P_w el costo por m^3 de agua, H_l el tiempo de labor en horas/hombre empleado en el riego y P_l el costo de labor en \$/horas/hombre.

La ecuación de restricción es

$$\frac{V_r}{V_a} = \eta_r \leq f$$

donde V_r es el volumen de agua aplicado en la zona radicular, $V_a = L_s Z_m D_s$ es el volumen de agua requerido o aprovechable, η_r es la eficiencia de requerimiento y f es la eficiencia de requerimiento mínima. Dado que $V_r \leq V_a$, el riego puede ocurrir con déficit en la parte final del surco, con el consiguiente castigo en el rendimiento de la cosecha. Los autores mencionan que los agricultores deben considerar este efecto.

El análisis se realiza con resultados de simulaciones numéricas obtenidas en diez surcos con un modelo de onda cinemática que usa la fórmula de Kostiaikov, donde las variables de control son el tiempo de reducción del gasto (menor, igual y mayor al tiempo de avance del agua), el gasto reducido (igual o diferente a 0.5 del gasto inicial igualado al máximo no erosivo) y el tiempo de riego. Los autores obtienen eficiencias máximas del 68 % al 74 % con riego sin restricción en el volumen requerido y concluyen que conviene aplicar el método de corte posterior en surcos largos, con bajas velocidades de infiltración y con la aplicación de dosis altas.

Sin considerar costos, con la suposición de que el volumen de agua requerido o aprovechable siempre es satisfecho ($\eta_r = 1$) y que la reducción del gasto inicial es a la mitad cuando termina la etapa de avance en 189 surcos, en este trabajo se concluye que, respecto al riego continuo óptimo, el método de corte posterior produce mayores ahorros de agua cuando la separación entre surcos, el coeficiente de rugosidad y la humedad inicial del suelo presentan valores bajos, sin influencia preponderante de la dosis y la conductividad hidráulica del suelo (ver ecuación 29 en el capítulo 5).

1.2.4 Propuesta de un modelo matemático

Un modelo matemático que reproduzca todas las fases del riego por surcos necesita estimar el tiempo de avance para la longitud total del surco de acuerdo a un cierto gasto de diseño, ancho entre surcos, pendiente, coeficiente de rugosidad, textura del suelo y humedad inicial (a partir de la cual se acumula la lámina de agua hasta satisfacer la dosis); además, con la dosis útil por infiltrar se calcula el tiempo de riego y la eficiencia. Así, mediante prueba y error se puede maximizar la eficiencia total o de aplicación.

Para obtener el modelo matemático se requiere desarrollar una metodología que resuelva las ecuaciones de Saint-Venant, recabar mediciones de campo en la bibliografía y realizar mediciones experimentales propias para calibrar el modelo, aplicarlo en una serie de ejemplos donde se muestre la bondad del método de corte

posterior, y definir las condiciones de tipo práctico que hagan factible su empleo en el campo cuando se disponga de mediciones o estimaciones de los parámetros de la fórmula de Green-Ampt, del coeficiente de rugosidad y la diferencia de humedades del suelo.

Se espera que terminado el trabajo anterior se puedan comprobar los resultados del modelo matemático en parcelas reales, para que el método de corte posterior se acepte como una posibilidad del uso eficiente del agua de riego en México.

2. MODELO MATEMÁTICO

2.1 Ecuaciones básicas y método numérico

En este capítulo se desarrolla un modelo implícito en diferencias finitas parecido al de Sánchez y Fuentes (1992) que incluye las mismas hipótesis, pero modificado en cuanto al cálculo del gasto de infiltración en el perímetro mojado con la fórmula de Green-Ampt (ecuación 5). Además, con el fin de introducir el gasto sobre el surco de una manera directa, la ecuación dinámica de Saint-Venant se escribe como la ecuación A.3 del Apéndice A, también en Wylie y Streeter (1978).

$$(1-F^2) \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + S_f - S_0 = 0 \quad (11)$$

siendo $F = Q(B/gA^3)^{1/2}$ el número de Froude.

La aplicación del modelo matemático con el método de corte posterior permitirá, como ya se ha dicho, conocer el método y

formular el criterio para incrementar la eficiencia del riego por surcos en problemas prácticos.

Si la ecuación (11) se aplica de tirante a tirante en un esquema centrado como el de la figura 6, se puede discretizar en diferencias finitas como

$$\left(1 - F_m^2\right) \frac{\tilde{Y}_i^{j+1} - \tilde{Y}_{i-1}^{j+1}}{\Delta x} + \frac{2Q_m^{j+1}}{gA_m^2} \frac{Q_i^j - Q_{i-1}^j}{\Delta x} + \frac{1}{gA_m^j} \frac{Q_m^{j+1} - Q_m^j}{\Delta t} + \frac{n^2 |Q_m^j|}{gA_m^2 R_m^{4/3}} Q_m^{j+1} = S_0 \quad (12)$$

$$\left(1 - F_p^2\right) \frac{\tilde{Y}_{i+1}^{j+1} - \tilde{Y}_i^{j+1}}{\Delta x} + \frac{2Q_p^{j+1}}{gA_p^2} \frac{Q_{i+1}^j - Q_i^j}{\Delta x} + \frac{1}{gA_p^j} \frac{Q_p^{j+1} - Q_p^j}{\Delta t} + \frac{n^2 |Q_p^j|}{gA_p^2 R_p^{4/3}} Q_p^{j+1} = S_0 \quad (13)$$

donde $\tilde{y}_i^{j+1} = \theta y_i^{j+1} + (1-\theta)y_i^j$ (θ es un factor de peso que promedia la magnitud local del tirante en el tiempo, un valor conveniente es $\theta = 0.70$). Los superíndices j identifican el instante de tiempo y los subíndices i la posición.

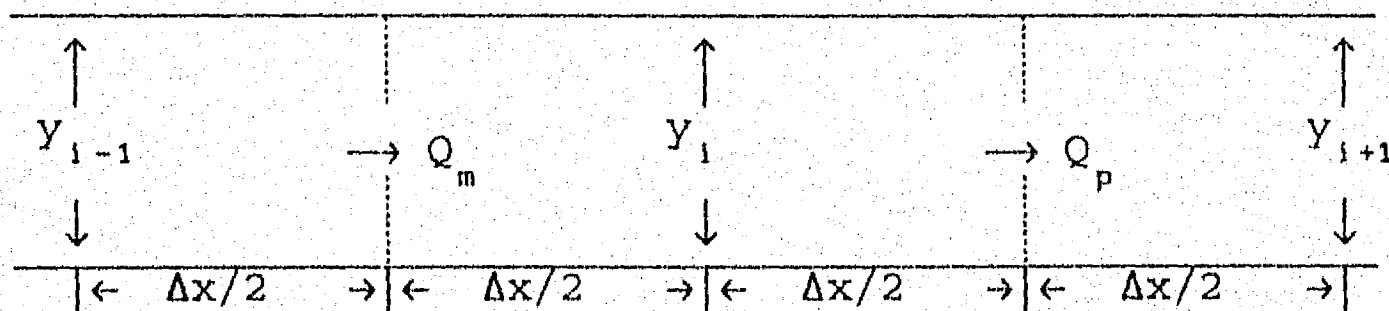


Figura 6. Esquema en diferencias finitas

La ecuación de continuidad de Saint-Venant aplicada al riego por surcos es

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} + q = 0 \quad (14)$$

donde q es el gasto de infiltración a través del perímetro mojado por unidad de longitud, y se puede calcular con la fórmula de Green y Ampt (ecuación 5)

$$q = PK(1 + h/Z)$$

siendo P el perímetro mojado de la sección transversal.

La discretización en diferencias finitas de la ecuación 14 en el tramo i es

$$\frac{Q_p^{j+1} - Q_m^{j+1}}{\Delta x} + B_i^j \frac{y_i^{j+1} - y_i^j}{\Delta t} + P_i^j K \left(1 + \frac{h}{Z_i^j} \right) = 0 \quad (15)$$

Al despejar los gastos Q_m^{j+1} y Q_p^{j+1} de las ecuaciones 12 y 13 se obtiene

$$Q_m^{j+1} = \frac{1}{C_m^j} \left[S_o \Delta x + \frac{\Delta x Q_m^j}{g A_m^j \Delta t} + \left(1 - F_m^2 \right) \left(\tilde{y}_{i-1}^{j+1} - \tilde{y}_i^{j+1} \right) \right] \quad (16)$$

$$Q_p^{j+1} = \frac{1}{C_p^j} \left[S_o \Delta x + \frac{\Delta x Q_p^j}{g A_p^j \Delta t} + \left(1 - F_p^2 \right) \left(\tilde{y}_i^{j+1} - \tilde{y}_{i+1}^{j+1} \right) \right] \quad (17)$$

donde

$$C_m^j = \frac{\Delta x}{g A_m^j \Delta t} + \frac{n^2 \Delta x |Q_m^j|}{g A_m^2 R_m^{4/3}} + \frac{2}{g A_m^2} \left(Q_i^j - Q_{i-1}^j \right) \quad (18)$$

$$y \quad C_p^j = \frac{\Delta x}{gA_p^j \Delta t} + \frac{n^2 \Delta x |Q_p^j|}{gA_p^2 R_p^{4/3}} + \frac{2}{gA_p^2} (Q_{i+1}^j - Q_i^j) \quad (19)$$

Por otra parte, para cualquier sección i

$$Q_i^{j+1} = \frac{Q_m^{j+1} - (1-\phi)Q_{i-1}^{j+1}}{\phi}$$

siendo ϕ un factor de peso que promedia espacialmente el gasto entre tirantes en un cierto instante, su valor conveniente para satisfacer con buena aproximación la ecuación de continuidad, obtenido a través de las simulaciones, es del orden de 0.75.

La sustitución de las ecuaciones 16 y 17 en la 15 conduce a la ecuación fundamental para cada tramo i

$$\begin{aligned} & - \frac{(1 - F_m^2)}{C_m^j} \tilde{Y}_{i-1}^{j+1} + \left[\frac{(1 - F_m^2)}{C_m^j} + \frac{(1 - F_p^2)}{C_p^j} + \frac{P_i^j \Delta x K}{Y_i^j} \left(1 + \frac{h}{Z_i^j} \right) \right] \tilde{Y}_i^{j+1} + \\ & + \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta t} Y_i^{j+1} - \frac{(1 - F_p^2)}{C_p^j} \tilde{Y}_{i+1}^{j+1} = \\ & = \frac{S_0 \Delta x}{C_m^j} + \frac{\Delta x Q_m^j}{C_m^j g A_m^j \Delta t} - \frac{S_0 \Delta x}{C_p^j} - \frac{\Delta x Q_p^j}{C_p^j g A_p^j \Delta t} + \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta t} Y_i^j \quad (20) \end{aligned}$$

donde se ha efectuado el artificio de multiplicar el perímetro mojado P_i^j por \tilde{Y}_i^{j+1}/Y_i^j con el fin de expresar \tilde{Y}_i^{j+1} como factor en el segundo término.

Si en el extremo aguas abajo se considera que el tirante es

el crítico, la ecuación en el último tramo i se convierte en

$$\begin{aligned}
 - \frac{(1 - F_m^2)}{C_m^j} \tilde{Y}_{i-1}^{j+1} + \left[\frac{(1 - F_m^2)}{C_m^j} + \frac{(1 - F_p^2)}{C_p^j} + \frac{P_i^j \Delta x K}{Y_i^j} \left(1 + \frac{h}{Z_i^j} \right) \right] \tilde{Y}_i^{j+1} + \\
 + \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta t} Y_i^{j+1} = \frac{(1 - F_p^2)}{C_p^j} Y_c^j + \frac{S_0 \Delta x}{C_m^j} + \frac{\Delta x Q_m^j}{C_m^j g A^j \Delta t} - \\
 - \frac{S_0 \Delta x}{C_p^j} - \frac{\Delta x Q_p^j}{C_p^j g A^j \Delta t} + \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta t} Y_i^j \quad (21)
 \end{aligned}$$

donde y_c^j es el tirante crítico aguas abajo en el instante j.

La ecuación equivalente a la 20 en el extremo aguas arriba, donde ingresa el gasto de alimentación, se obtiene al sustituir $Q_m^{j+1} = Q_0$ en la ecuación 15, esto es

$$\begin{aligned}
 \left[\frac{(1 - F_p^2)}{C_p^j} + \frac{P_i^j \Delta x K}{Y_i^j} \left(1 + \frac{h}{Z_i^j} \right) \right] \tilde{Y}_i^{j+1} + \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta t} Y_i^{j+1} - \frac{(1 - F_p^2)}{C_p^j} \tilde{Y}_{i+1}^{j+1} = \\
 = Q_0 - \frac{S_0 \Delta x}{C_p^j} - \frac{\Delta x Q_p^j}{C_p^j g A^j \Delta t} + \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta t} Y_i^j \quad (22)
 \end{aligned}$$

2.2 Hipótesis y proceso de cálculo

Con el fin de facilitar el cálculo en la etapa de avance del frente de la onda de superficie y evitar problemas de

inestabilidad en el último tramo, es necesario tomar en cuenta las hipótesis de Sánchez y Fuentes.

a) Se considera un gasto base pequeño que permite calcular las condiciones iniciales de los tirantes y gastos (se usa 0.1 l/s pero puede ser menor).

b) Se supone un tramo ficticio aguas abajo, antes de la descarga con el tirante crítico, donde no se calcula el gasto de infiltración, entonces la ecuación 21 se reduce a

$$\begin{aligned}
 & - \frac{(1 - F_m^2)}{C_m^J} \tilde{Y}_{i-1}^{J+1} + \left[\frac{(1 - F_m^2)}{C_m^J} + \frac{(1 - F_p^2)}{C_p^J} \right] \tilde{Y}_i^{J+1} + \frac{B_1^J \Delta x}{\Delta t} Y_i^{J+1} = \frac{S_0 \Delta x}{C_m^J} + \\
 & + \frac{\Delta x Q_m^J}{C_m^J g A_m^J \Delta t} - \frac{S_0 \Delta x}{C_p^J} - \frac{\Delta x Q_p^J}{C_p^J g A_p^J \Delta t} + \frac{B_1^J \Delta x}{\Delta t} Y_i^J + \frac{(1 - F_p^2)}{C_p^J} Y_c^J \quad (23)
 \end{aligned}$$

La aplicación de la ecuación 20 en los tramos intermedios del surco, junto con las ecuaciones 22 y 23, establece un sistema de ecuaciones tridiagonal con incógnitas $Y_1^{J+1}, Y_2^{J+1}, \dots, Y_{n-1}^{J+1}$ que se resuelve muy rápido por eliminación gaussiana. Debe recordarse que en la última sección $Y_n = Y_c$. Enseguida, dentro del mismo intervalo de tiempo, se usan las ecuaciones 16 y 17 para determinar los gastos Q_m^{J+1} y Q_p^{J+1} , y se prosigue el cálculo hasta que logre infiltrarse la dosis requerida por la planta en el penúltimo tramo por ser el de menor infiltración.

Durante la fase de avance el gasto de infiltración se calcula sólo en aquellos tramos donde el gasto Q_m^{J+1} sea mayor que Q_p^{J+1} .

Terminada dicha fase, durante las etapas de llenado y receso, se calcula el gasto de infiltración en todos los tramos excepto el último según la hipótesis b. La relación conveniente para la convergencia y estabilidad en la solución es $\Delta t \leq 1.2\Delta x$, donde Δx está en metros y Δt en segundos, obtenida en forma empírica durante las simulaciones del flujo transitorio, esto es, en la relación de Courant (Wylie y Streeter, 1978)

$$\Delta t \leq \Delta x / |Q_0/A_1 \pm (gA_1/B_1)^{1/2}|$$

el denominador tiene un valor aproximado a 0.8. De otra manera, los tirantes llegan a ser negativos y el cálculo se interrumpe.

Previo al cálculo del flujo transitorio descrito deben obtenerse las condiciones iniciales de un perfil en caída libre para el gasto base. La solución a través de perfiles adimensionales con ecuaciones de regresión lineal múltiple (Vázquez, 1988) es rápida, y es la que se usa en el programa del apéndice D.

2.3 Comparación con otros modelos y primera calibración

Bautista y Wallender (1993) usan los datos de surcos de la tabla 1 proporcionados por Schwankl, Tarboton, Fonteh, y Fangmeier y Ramsey. Respecto a la geometría de la sección transversal, el área se calcula como $A = \sigma_1 y^{\sigma_2}$, y el radio hidráulico como $R = \rho_1 A^{\rho_2}$, donde y es el tirante del flujo.

En la tabla 2 se muestran las mediciones de volúmenes infiltrados y escurridos al final de los surcos mencionados. En este trabajo se usan los mismos datos para estimar por prueba y

error, mediante simulaciones, los valores de K y h de la fórmula de Green-Ampt, y el coeficiente de rugosidad de Manning. La eficiencia en volumen η_v se calcula como el volumen infiltrado dividido entre la suma de los volúmenes infiltrado y escurrido.

Tabla 1. Parámetros de diseño

| parámetros de diseño | Schwankl | Tarboton | Fonteh | Fangmeier y Ramsey |
|-------------------------------------|----------|----------|--------|--------------------|
| long. del surco (m) | 250 | 270 | 204.4 | 100 |
| pendiente (%) | 0.232 | 0.2 | 0.567 | 0.103 |
| cond. hidráulica (mm/min) | 0.405 | 0.3 | 0.325 | 0.32 |
| coefte. de rugosidad | 0.020 | 0.055 | 0.040 | 0.020 |
| gasto (l/s) | 1 | 1 | 1.4 | 1.331 |
| tpo. de avance (min) | 155 | 400 | 40 | 18 |
| tpo. de riego (min) | 390 | 630 | 275 | 208 |
| σ_1 (m^2/m^{σ_2}) | 1 | 1.5 | 0.4 | 0.7531 |
| σ_2 | 1.6960 | 1.7150 | 1.3 | 1.4539 |
| ρ_1 ($m^{16/3}/m^{2\rho_2}$) | 0.3333 | 0.3145 | 1.3554 | 0.7359 |
| ρ_2 | 0.5080 | 0.5335 | 0.75 | 0.6590 |
| sep. entre surcos (m) | 0.75 | 1.00 | 0.36 | 0.68 |

En la tabla 3 se anotan los volúmenes que calcula el modelo matemático motivo de este trabajo; además, los valores del coeficiente de rugosidad de Manning (n); de la conductividad hidráulica (K) y de la deficiencia de humedad (h); los porcentajes de error con los volúmenes observados y las eficiencias de aplicación. La eficiencia de infiltración η_z se calcula con la relación, lámina infiltrada mínima entre lámina infiltrada

promedio. La eficiencia total o de aplicación se obtiene como $\eta = \eta_z \eta_v$ y una comprobación es calcularla también con la ecuación 1. El coeficiente de uniformidad de Christiansen se obtiene como

$$C_u = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m |z_i - \bar{z}|}{m \bar{z}}$$

donde m es el número de tramos en que se ha dividido el surco, z_i es la lámina de infiltración acumulada en el tramo i y \bar{z} es la lámina de infiltración promedio a lo largo del surco.

Tabla 2. Datos bibliográficos

| volúmenes observados | Schwankl | Tarboton | Fonteh | Fangmeier y Ramsey |
|-------------------------------------|----------|----------|--------|--------------------|
| infiltrado (m^3) | 16.82 | 35.23 | 13.57 | 4.59 |
| escurrido (m^3) | 5.93 | 3.33 | 9.945 | 12.30 |
| aplicado (m^3) | 22.75 | 38.56 | 23.515 | 16.89 |
| eficiencia en volumen, η_v (%) | 73.93 | 91.36 | 57.71 | 27.18 |
| coeficiente de uniformidad (%) | 74.70 | 67.0 | 83.7 | - |

Es importante señalar que la eficiencia de aplicación no se puede calcular con las mediciones de volúmenes anotados en la tabla 2 porque no se tiene la medición del volumen útil en la profundidad radicular, sino el volumen total infiltrado que incluye las pérdidas por percolación.

Por otra parte, debido a la hipótesis del gasto base pequeño,

el flujo tiene una velocidad inicial que es necesario retardar al aumentar la infiltración en la etapa de avance, esto se logra al incrementar el coeficiente de rugosidad durante la etapa de avance.

De los resultados de la tabla 3 se concluye que los errores de los volúmenes escurridos y de infiltración (calculados respecto al volumen total aplicado) son aceptables por ser menores al 3 %; sin embargo, el coeficiente de uniformidad es mayor en el modelo, con errores superiores al 10 % respecto a las mediciones de campo. No obstante lo anterior, mientras haga falta el dato de la lámina acumulada mínima en el extremo del surco no es posible calcular la eficiencia de infiltración, por lo que al aceptar el resultado del modelo es posible hacer la comparación de las eficiencias de infiltración y en volumen para decidir los gastos de alimentación con el método de corte posterior.

Tabla 3. Calibración de los parámetros K, h y n

| parámetros K, h, n, volúmenes calculados, láminas y eficiencias | Schwankl | Tarboton | Fonteh | F. y Ramsey |
|---|----------|----------|--------|----------------|
| cond. hidráulica, K (mm/min) | 0.405 | 0.3 | 0.325 | 0.32 |
| déf. de humedad, h (cm) | 5.0 | 6.0 | 15.0 | 6.5 |
| humedad inicial (cm) | 0.5 | 0.005 | 2.5 | 0.65 |
| coeficiente de rugosidad inicial, n_1 ($s/m^{1/3}$) | 0.093 | 0.105 | 0.04 | 0.038 |
| coeficiente de rugosidad posterior, n ($s/m^{1/3}$) | 0.020 | 0.055 | 0.04 | 0.020 |
| ancho entre surcos, D_s (m) | 0.75 | 1.00 | 0.36 | 0.68 |
| vol. infiltrado (m^3) | 17.48 | 36.24 | 13.21 | 4.95 |
| % de error | 2.90 | -2.67 | 1.53 | 2.13 |
| vol. escurrido (m^3) | 6.69 | 4.07 | 10.11 | 11.83 |
| % de error | 3.34 | 1.91 | 0.70 | 2.78 |
| vol. total aplicado (m^3) | 23.40 | 37.80 | 23.10 | 16.61 |
| % de error | 2.86 | -1.97 | 1.76 | 1.66 |
| lámina infiltrada mínima, dosis (cm) | 5.0 | 6.2 | 15.5 | 6.5 |
| lámina infiltrada promedio (cm) | 8.9 | 12.2 | 17.7 | 7.0 |
| eficiencia de infiltración, η_z (%) | 56.41 | 51.10 | 87.65 | 93.00 |
| eficiencia en volumen, η_v (%) | 71.40 | 89.25 | 56.25 | 28.80 |
| eficiencia de aplicación, η (%) | 40.28 | 37.80 | 49.31 | 26.78 |
| coefte. de uniformidad (%) | 80.93 | 79.77 | 95.7 | 97.30 |
| % de error | 9.34 | 10.64 | 14.34 | - |

A continuación se hace otra comparación del modelo matemático con la solución de un ejemplo presentado por Jensen (1980) para infiltrar una dosis $Z_m = 7.5$ cm en un surco con $L_s = 275$ m, $S_0 = 0.4$ %, $n = 0.04$, $Q_0 = 0.6$ l/s y $D_s = 75$ cm (Jensen no indica la forma del surco, pero aquí se supone triangular con taludes 1:1.5 y 25 cm de profundidad, de manera que también $D_s = 75$ cm).

Jensen calcula el tiempo de avance con la fórmula

$$t_a = \frac{L_s}{f} \exp\left(\frac{gL_s}{Q_0 \sqrt{S_0}}\right)$$

donde t_a es el tiempo de avance en min, L_s es la longitud del surco en m, S_0 es la pendiente, Q_0 es el gasto en l/s y f y g son coeficientes para el tiempo de avance en función de la familia de infiltración según los parámetros de la fórmula de Kostiaikov. Para $f = 7.61$ y $g = 1.904 \cdot 10^{-4}$ (familia de infiltración 0.3, $\alpha = 0.72$ y $C_0 = 0.0925$ cm/min $^\alpha$), $t_a = 144$ min. Con otra fórmula similar a la anterior se obtiene un tiempo de riego $T_r = 1143$ min y se calcula finalmente una eficiencia de aplicación $\eta = 0.375$.

En la simulación numérica se le asignó al parámetro $h = SM$ de la fórmula de Green y Ampt un valor igual a la dosis, la conductividad hidráulica se ajustó a $K = 0.0109$ cm/min, el coeficiente de rugosidad inicial $n_1 = 0.10$ y la humedad inicial $w = 0.45$ cm. Con los mismos tiempos de avance y de riego el resultado de la eficiencia de aplicación en la simulación es $\eta = 0.38$, por lo que se considera que la forma triangular supuesta en el modelo matemático es aceptable.

Cabe observar que en la fórmula empleada por Jensen para

calcular el tiempo de avance no se incluye el coeficiente de rugosidad, esto contradice la importancia que se le ha dado en este trabajo al coeficiente de rugosidad inicial en dicha fase, pero de ningún modo lo invalida.

Con esta primera calibración se considera que es posible emplear el modelo matemático para predecir el tiempo de riego y la eficiencia de aplicación en un surco con riego continuo o con corte posterior, sin olvidar que es necesario medir la humedad inicial, la humedad a capacidad de campo, la conductividad hidráulica y la diferencia de tensiones del suelo, así como estimar el coeficiente de rugosidad. En caso de no medirse la conductividad hidráulica y la diferencia de tensiones del suelo, pueden calibrarse con pruebas en un surco corto, tal como se describe en el capítulo 3, o estimarse con los valores que reportan Clapp y Hornberger (1978), para la diferencia de tensiones, y Cuenca (1989) para la diferencia de humedades. En el capítulo 4 se anotan los datos de estos autores.

Existen otros métodos de riego por gravedad como el "surge flow", que incrementa la eficiencia de aplicación al evitar la fuga por coleos y lograr una mejor uniformidad de la lámina infiltrada. El promedio de dicho incremento, respecto al método de corte posterior, es del 2 %, pero el ciclo de los pulsos debe ser muy preciso (cercano al tiempo de avance del agua a 0.35 de la longitud del surco con un gasto semejante al inicial del corte posterior). Su desventaja principal es que para lograr la

intermitencia del flujo se requiere de una estructura hidráulica adicional (con los respectivos costos de inversión y mantenimiento), la cual se evita si el corte posterior se aplica de una manera más simple, como se indica en el capítulo 5.

3. MÉTODO EXPERIMENTAL

3.1 Necesidad del modelo físico

La calibración del modelo matemático con mediciones halladas en la bibliografía no es suficiente para una aceptación plena de su validez. Una calibración con mediciones propias es lo mejor para sensibilizarse con los parámetros de ajuste y su relación con el fenómeno físico, siendo una ayuda invaluable en la comprensión del proceso de riego por surcos. La experimentación en un modelo físico, en condiciones ideales de geometría del surco y textura del suelo, es el inicio para comprobar los resultados del modelo matemático sin excluir la experimentación en el campo en una etapa posterior a este trabajo. Así, se construyó un surco de 52.5 m de longitud en terrenos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. El suelo utilizado fue una arena fina de origen volcánico cribado por una malla de 5 mm de abertura, compactado y conformado en un surco

de sección triangular con un ángulo de 120 grados en el vértice.

3.2 Calibración con mediciones en el modelo físico

En el apéndice B se muestran las mediciones realizadas en el surco construido en el Instituto de Ingeniería. Con ellas se efectuó la calibración del modelo numérico cuyo listado se presenta en el apéndice D. La primera prueba consistió en la aplicación de un gasto continuo de 1 l/s durante 100 min, que representa un volumen de ingreso $V_e = 6 \text{ m}^3$. La humedad inicial del suelo fue del 9 % y la final del 18 % (promedio de muestras tomadas a las 24 horas de realizado el ensayo). La profundidad mínima de la infiltración se midió a 50 m de longitud, también a 24 horas después de efectuada la prueba, y fue de 65 cm (no se midieron profundidades a los 52.5 m, extremo del surco, por el efecto de frontera de la pared vertical que produce mayor infiltración). La profundidad media a lo largo del surco fue de 75 cm, por lo que una manera de calcular la eficiencia de infiltración es $\eta_z = 65/75 = 0.87$. El volumen escurrido medido en el tanque colocado al final del surco fue $V_s = 2.3 \text{ m}^3$, entonces el volumen infiltrado se obtiene con la diferencia $V_z = V_e - V_s = 3.7 \text{ m}^3$. Con estos volúmenes es posible calcular la eficiencia en volumen como $\eta_v = 3.7/6 = 0.62$. La eficiencia de aplicación resulta ser el producto $\eta = \eta_z \eta_v = 0.87 * 0.62 = 0.54$. El volumen aprovechable V_a se obtiene a través de la eficiencia de infiltración como $V_a = \eta_z V_z = 0.87 * 3.7 = 3.22 \text{ m}^3$. De aquí, la dosis es $Z_m = V_a / (L_s D_s) = 3.22 / (52.5 * 0.90) = 0.068 \text{ m}$. Otra manera

de calcular la dosis es con la fórmula $Z_m = h_r (\gamma_s / \gamma) (W_r - W_i)$, donde h_r es la profundidad radicular, γ_s es el peso específico del suelo, γ es el peso específico del agua, W_r es el % de la humedad final y W_i es el % de la humedad inicial; sin embargo, no ha sido conveniente en este caso porque el bulbo de humedad se distribuye en forma de círculo con centro en el vértice del triángulo (ver figura B.2 del apéndice B) y debe estimarse un ancho representativo para la forma rectangular, aunque puede sustituirse el área de la región húmeda en lugar de h_r para obtener Z_m como área de agua que, multiplicada por la longitud del surco, da el volumen de agua aprovechable; no obstante, se requiere medir el bulbo húmedo al poco tiempo de realizada la prueba (1.5 horas aproximadamente), por lo que se prefirió calcular la dosis a través de las mediciones de las profundidades de humedad, observadas en diferentes tiempos, los cuales se redujeron de 24 horas en la primera prueba a 1.5 horas después de efectuada la prueba.

En la figura B.3 del apéndice B se muestra la curva de avance del agua, con un tiempo de llegada al extremo del surco $t_a = 11$ min. El tiempo final en que cesó el escurrimiento fue $T_r = 114$ min. Otros datos necesarios son la pendiente del surco $S_0 = 0.001$, la humedad final a capacidad de campo $W_r = 24$ % (el % de humedad es respecto al peso del suelo seco). La relación entre la humedad inicial $W_i = 9$ %, la de capacidad de campo $W_r = 24$ % y la dosis $Z_m = 6.8$ cm, que es proporcional a $(W_r - W_i)$, da lugar a encontrar la humedad inicial (en lámina de agua) a partir de la cual se

acumula la lámina infiltrada en la fórmula de Green y Ampt, como $w = W_i Z_m / (W_r - W_i) = (0.09 * 6.8) / (0.24 - 0.09) = 4.1 \text{ cm}$.

Para calibrar el modelo numérico se efectuaron ensayos hasta reproducir aproximadamente, con los tiempos de avance y de riego medidos, el volumen infiltrado con los siguientes parámetros: lámina de infiltración inicial $w = 4.1 \text{ cm}$; déficit de humedad en lámina de agua $h = 15 \text{ cm}$; conductividad hidráulica $K = 0.123 \text{ cm/min}$; coeficiente de rugosidad inicial $n_1 = 0.075$; y coeficiente de rugosidad posterior $n = 0.036$.

El volumen infiltrado calculado por el modelo matemático es $V_z = 3.77 \text{ m}^3$, volumen escurrido $V_g = 2.3 \text{ m}^3$, volumen de ingreso $V_e = 6 \text{ m}^3$, volumen aprovechable $V_a = 3.31 \text{ m}^3$ y dosis $Z_m = 7 \text{ cm}$, repartida en el ancho entre surcos D_s y muy aproximada a la antes calculada. La eficiencia de infiltración es $\eta_z = V_a / V_z = 3.31 / 3.77 = 0.88$, mayor en 1 % a la obtenida con las mediciones de las profundidades de humedad. La eficiencia en volumen es $\eta_v = 3.77 / 6 = 0.63$, menor en 1 % a la calculada con los volúmenes medidos. Estas diferencias en las eficiencias parciales se deben a que el modelo matemático calcula un volumen de infiltración mayor en un 1.9 %, que es aceptable. La eficiencia total es $\eta = \eta_z \eta_v = 0.88 * 0.63 = 0.55$, mayor en 1 % a la calculada con las mediciones. El tiempo final que reporta el modelo es de 112 min, es decir, un tiempo de receso de 12 min, menor en 2 min respecto al tiempo de receso medido.

La calibración en los siguientes ensayos se llevó al cabo con el procedimiento descrito anteriormente. Sólo debe añadirse que a

partir de la primera calibración se utilizan volúmenes y no láminas de agua para calcular la infiltración en la fórmula de Green y Ampt, es decir, las láminas de agua de la humedad inicial y el déficit de humedad se transforman a volúmenes multiplicando por el ancho entre surcos D_s y la longitud del tramo Δx . Al final del cálculo, los volúmenes acumulados se transforman a lámina de agua.

Los volúmenes medidos en el modelo físico y las eficiencias calculadas con los mismos volúmenes y mediciones de las profundidades se presentan en la tabla 4, donde N es el número de ensayo. Los ensayos 2, 3 y 5 corresponden a riegos con el método de corte posterior. Los hidrogramas de las figuras 7 y 8 corresponden a los ensayos 3 y 5, respectivamente. El ensayo 4 es un riego con corte posterior discontinuo como se indica en la figura 9. En el ensayo 5 se simulaban los tallos de las plantas con pedazos de madera con un diámetro de 1.9 cm.

Tabla 4. Gastos y volúmenes medidos en el modelo físico

| N | Q_0 | Q_1 | V_z | V_s | V_e | w | Z_m | t_a | T_r | η_z | η_v | η |
|---|-------|-------|---------|-------|-------|------|-------|-------|-------|----------|----------|--------|
| | (l/s) | | (m^3) | | | (cm) | | (min) | | (%) | | |
| 1 | 1.00 | — | 3.70 | 2.30 | 6.00 | 2.6 | 6.8 | 11 | 100 | 87 | 62 | 54 |
| 2 | 1.00 | 0.42 | 3.00 | 1.00 | 4.00 | 2.1 | 5.5 | 11 | 142 | 73 | 75 | 55 |
| 3 | 0.75 | 0.30 | 3.50 | 0.69 | 4.19 | 2.1 | 5.5 | 12 | 215 | 74 | 84 | 62 |
| 4 | 0.60 | 0.30 | 3.95 | 0.51 | 4.46 | 2.2 | 5.9 | 32 | 248 | 70 | 89 | 62 |
| 5 | 0.60 | 0.30 | 4.25 | 0.25 | 4.50 | 2.2 | 5.9 | 17 | 233 | — | 94 | — |

Se usa un coeficiente de rugosidad inicial en la fase de avance del orden de 2 a 3 veces el coeficiente de rugosidad tradicional para suelo mojado.

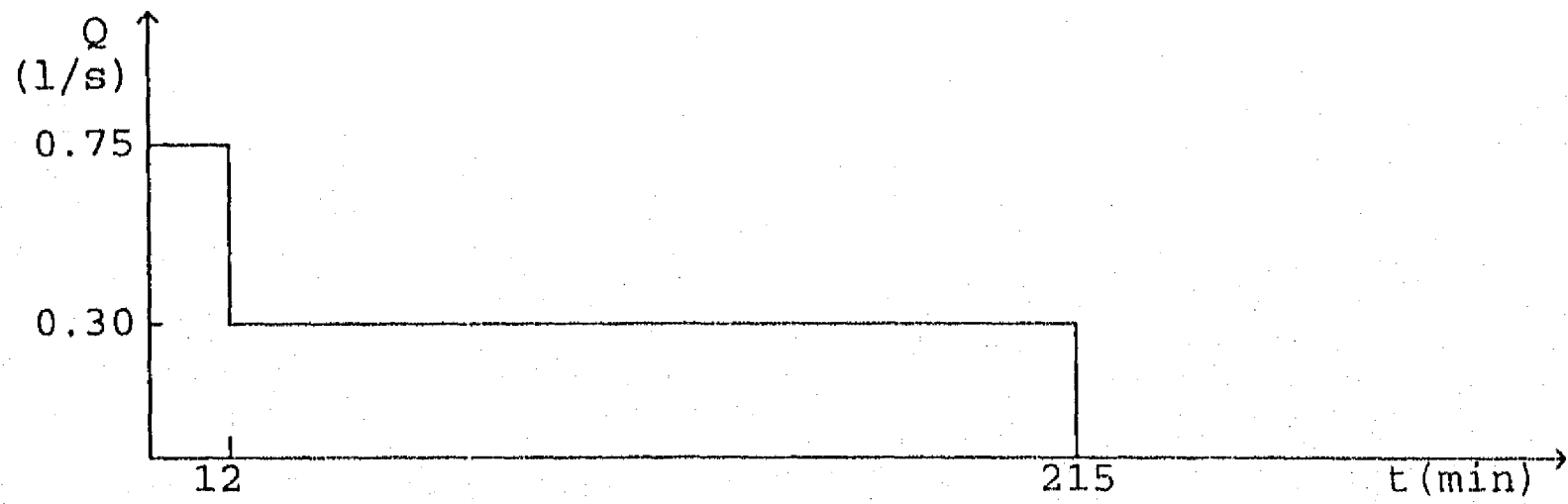


Figura 7. Hidrograma de ingreso del ensayo N = 3

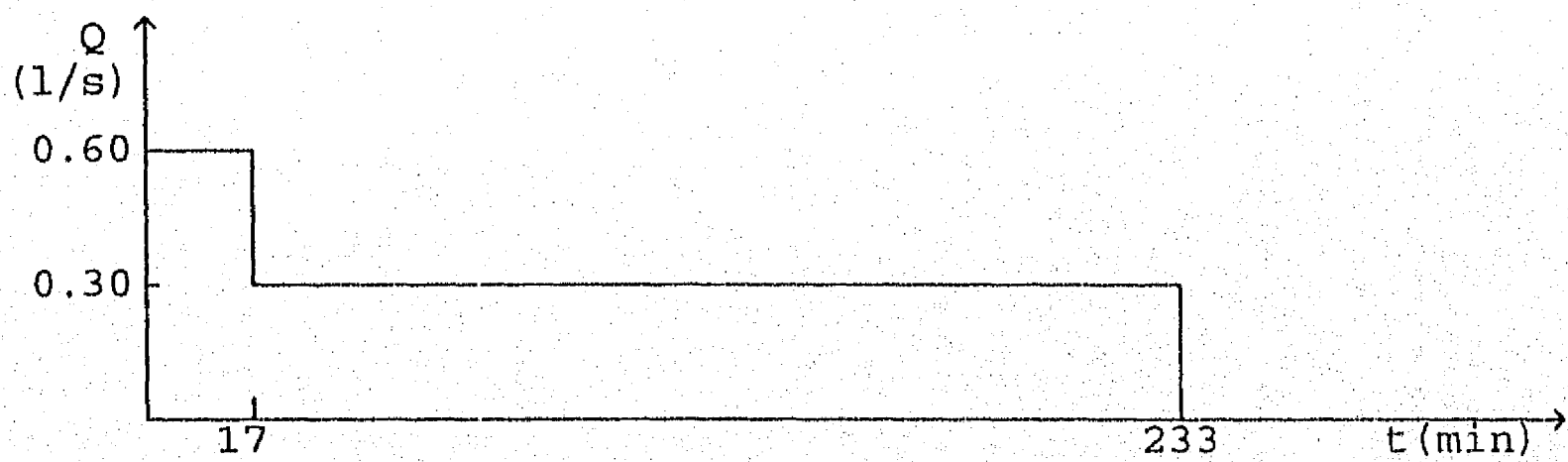


Figura 8. Hidrograma de ingreso del ensayo N = 5

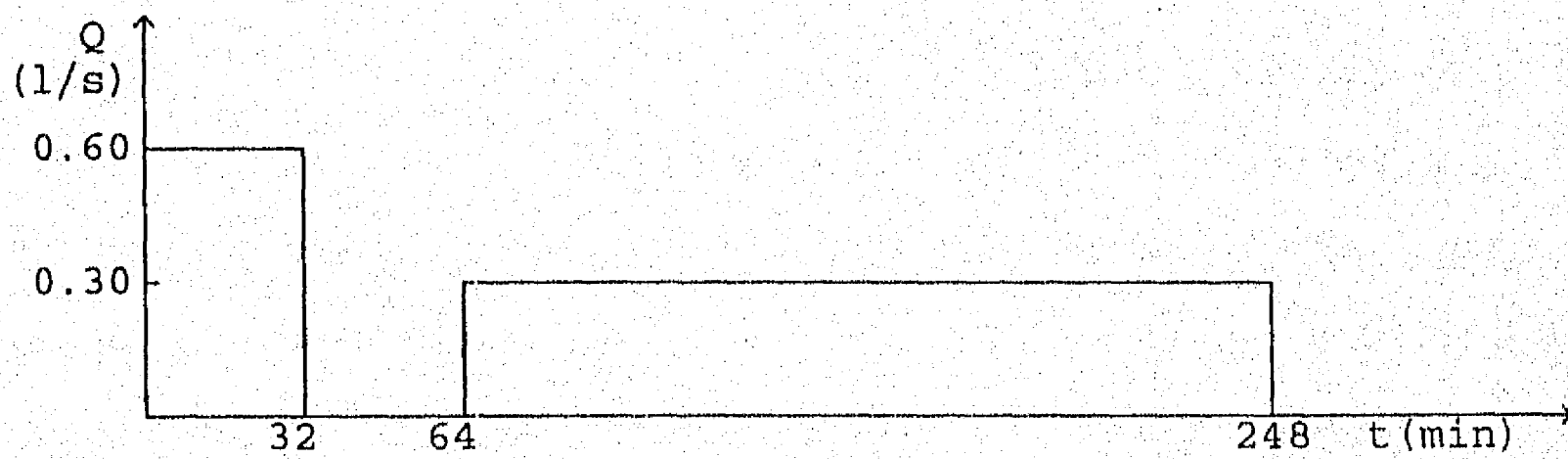


Figura 9. Hidrograma de ingreso del ensayo N = 4

Los parámetros calibrados n_1 , n , K y h , así como los resultados de volúmenes y eficiencias calculadas con el modelo matemático se presentan en la tabla 5, en ella el volumen aprovechable por la planta se calcula como $V_a = Z_m L_s D_s$, y en la última columna se escribe el % de error del volumen de infiltración calculado respecto al medido de la tabla 4. Se omiten los volúmenes de ingreso V_e y de salida V_s debido a que, para fines prácticos, son idénticos a los de la tabla anterior. Asimismo, se conserva constante el valor del parámetro h porque las diferencias de humedades fueron muy parecidas en cada prueba.

Tabla 5. Volúmenes calculados con el modelo matemático

| N | n_1 | n | K | V_z | V_a | h | Z_m | t_a | T_r | T_f | η_z | η_v | η | error en V_z (%) |
|---|---------------|-------|--------------------|---------|-------|--------|---------|-------|-------|--------|----------|----------|--------|--------------------|
| | $(s/m^{1/3})$ | | $(\frac{cm}{min})$ | (m^3) | | (cm) | (min) | | | $(\%)$ | | | | |
| 1 | 0.075 | 0.036 | 0.123 | 3.77 | 3.31 | 15 | 7.0 | 12 | 100 | 112 | 88 | 63 | 55 | 1.9 |
| 2 | 0.10 | 0.036 | 0.081 | 3.09 | 2.62 | 15 | 5.5 | 12 | 142 | 152 | 85 | 77 | 66 | 2.9 |
| 3 | 0.08 | 0.036 | 0.075 | 3.60 | 2.94 | 15 | 6.2 | 13 | 215 | 224 | 82 | 86 | 70 | 2.9 |
| 4 | 0.10 | 0.036 | 0.088 | 4.06 | 2.96 | 15 | 6.3 | 34 | 248 | 257 | 73 | 91 | 66 | 2.8 |
| 5 | 0.067 | 0.050 | 0.087 | 4.34 | 2.75 | 15 | 5.8 | 19 | 233 | 244 | 63 | 96 | 61 | 2.1 |

Es preciso señalar que la compactación del suelo en el primer ensayo se efectuó con pisón de madera y los subsecuentes con pisón metálico. La diferencia en los grados de compactación tiene una influencia innegable en el volumen de infiltración, por lo que se relaciona con la conductividad hidráulica; además, debe tomarse en cuenta que la compactación no se efectuó tan homogénea como se

hubiera deseado, y esto se pudo comprobar al observar en los cortes transversales después de los ensayos que en algunos sitios la infiltración era menor que en puntos adyacentes. A esta discrepancia en la compactación se atribuye también la diferencia en los tiempos de avance en las pruebas 4 y 5, ya que para el mismo gasto inicial el tiempo de avance en el ensayo 4 es del orden del doble del ensayo 5, no obstante que en este último la rugosidad es mayor por los obstáculos de madera que simulaban los tallos de las plantas. Respecto a los coeficientes de rugosidad debe señalarse que el inicial es muy útil para ajustar el tiempo de avance; en cambio, el coeficiente de rugosidad posterior para el suelo mojado se estima de acuerdo al tipo de suelo en la forma tradicional y su influencia repercute en el volumen de infiltración.

En vista de que el error en los volúmenes de infiltración es menor del 3 % se considera que el modelo matemático reproduce en forma aceptable el proceso de riego por surcos, por lo que puede ser empleado para diseño y revisión.

Con el fin de validar el modelo matemático se llevó al cabo una predicción del tiempo de avance del ensayo 4 con los datos del ensayo 3, siendo el resultado $t_a = 19$ min, menor en 13 min al observado (40 % de error); en cambio, con los datos calibrados del ensayo 2 la aproximación hubiera sido mejor, ya que $t_a = 30$ min. Esto demuestra la sensibilidad de los parámetros a pequeñas variaciones y la dificultad de predecir en forma determinista los resultados. Por ello, en caso de usarse el modelo

matemático en la práctica, es recomendable diseñar los surcos con un criterio conservador para la condición más desfavorable que pueda presentarse por la variación de los parámetros de la fórmula de Green-Ampt y del coeficiente de rugosidad.

Una observación importante durante el riego discontinuo (ensayo 4), es que el tiempo de avance con suelo mojado para el gasto reducido (0.3 l/s), fue menor en 13 minutos al tiempo de avance inicial, con gasto igual a 0.6 l/s. En las simulaciones con el modelo matemático, capítulos 4 y 5 siguientes, resulta que a mayor humedad inicial menor tiempo de avance. Esta es una de las razones por las que se dice que el modelo numérico reproduce la realidad; aunque no deja de tener defectos, uno de ellos es que durante la fase de avance absorbe agua del gasto base, por ello en todos los casos los volúmenes de infiltración calculados (tabla 5) son mayores a los medidos (tabla 4). Esto hace que en ocasiones se presenten tirantes negativos y se interrumpa el cálculo. No obstante, una vez superada esta dificultad con la reducción del intervalo de tiempo, en todos los casos presentados, los errores en los volúmenes de infiltración son menores al 5 %, ya que durante la etapa de llenado se alcanza la mayor parte del volumen de infiltración y en ella no hay anomalías.

4. RIEGO CONTINUO

4.1 Diseño tradicional

Walker y Skogerboe (1987) mencionan los pasos que deben seguirse para un diseño eficiente en el riego por surcos según el método tradicional (sin corte posterior y sin reuso del agua).

1. Determinar el número de surcos según el ancho de la parcela: $N_s = W_p/D_s$; donde N_s es el número de surcos y W_p es el ancho de la parcela.

2. De acuerdo a las velocidades máximas erosivas (8 m/min en suelos fácilmente erosionables y 13 m/min en suelos arcillosos), determinar el gasto máximo Q_0 con la fórmula

$$Q_0 = \left[V_{\max} C_1 \left(\frac{n}{60 S_0^{1/2}} \right)^{C_2} \right]^{1/(1-C_2)}$$

donde C_1 y C_2 dependen de la geometría del surco, n es el

coeficiente de rugosidad de Manning y S_0 es la pendiente.

3. Calcular el tiempo correspondiente a la etapa de avance, t_a .
4. Calcular el tiempo requerido de oportunidad de infiltración para la longitud total del surco, τ .
5. Obtener el tiempo de riego como $T_r = t_a + \tau$.
6. Calcular la eficiencia de aplicación con la ecuación 1 del capítulo 1.
7. Maximizar la eficiencia de aplicación tomando en cuenta las restricciones de erosión del suelo, gasto de abastecimiento y consideraciones de tipo práctico; por ejemplo, según el Cemagref et Groupe France Agricole (1990) el gasto mínimo es del orden de 0.5 l/s y los óptimos varían de 0.2 a 0.5 l/s por cada 100 m de longitud de surco.

Cabe observar que en este procedimiento se desprecia el tiempo de receso, durante el cual todavía hay infiltración del agua almacenada a lo largo del surco, sobre todo si la pendiente es menor de 0.003.

Cuenca (1989) incluye fórmulas parecidas a la del gasto Q_0 recomendadas por el SCS para obtener los tiempos de avance y de oportunidad de infiltración, en las cuales interviene el perímetro mojado en lugar del ancho de la superficie libre del agua (como es el caso de riego por melgas).

4.2 Diseño óptimo con el modelo matemático

La búsqueda del gasto óptimo con el modelo matemático, para una cierta geometría de surco que incluya la forma, la longitud y

la pendiente, es similar al procedimiento propuesto anteriormente, esto es, por aproximaciones sucesivas se encuentra la eficiencia máxima para un cierto gasto. La aproximación se hace más rápida si se observan los resultados de las eficiencias parciales de infiltración y volumen: si la eficiencia en volumen es mayor que la eficiencia de infiltración conviene aumentar el gasto para reducir el tiempo de avance del agua, disminuir las pérdidas por percolación e incrementar la eficiencia de infiltración; si la eficiencia en volumen es menor que la eficiencia de infiltración debe disminuirse el gasto para reducir las pérdidas por coleos y aumentar la eficiencia en volumen. Esto lleva generalmente a encontrar la eficiencia de aplicación máxima cuando la eficiencia en volumen es ligeramente mayor a la eficiencia de infiltración.

Cuando se pretende diseñar la longitud del surco se puede partir de las longitudes que recomiendan los agricultores de los Estados Unidos (Cuenca, 1989), reproducidas en la tabla 6, y usar el gasto máximo de acuerdo con la pendiente. Según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) el gasto en l/s tiene un valor máximo

$$Q_0 = 0.6/S_0 \quad (24)$$

donde S_0 entra en porcentaje.

Una tabla similar a la 6 (tabla 9) se obtiene con el modelo matemático al tomar en cuenta el método de corte posterior, ya que el gasto óptimo del riego continuo es menor que el gasto inicial del corte posterior. Esto es, para llegar a la tabla 9 se usa un gasto igual a 0.7 veces el gasto inicial del corte posterior y se

determina la longitud óptima en riego continuo; después, se conserva la longitud en corte posterior y se aplica como gasto inicial el máximo correspondiente a la pendiente. Aún sin ser el diseño óptimo en corte posterior, existe un incremento de la eficiencia del 2 al 14 %, como puede verse en el capítulo 5. El factor 0.7 es un promedio, para un intervalo de 0.6 a 0.78, de la relación entre los gastos óptimos del riego continuo y el máximo en el corte posterior para la misma longitud, y se obtuvo con simulaciones donde las eficiencias de infiltración son iguales.

Tabla 6. Longitudes recomendadas

| Longitudes de surco, L_s , en m | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|---|-----|------|-----|-------|-----|-----|-----|--------|-----|-----|------|
| S_o (%) | dosis útil por infiltrar, Z_m , en cm | | | | | | | | | | | |
| | 7.5 | 15 | 22.5 | 30 | 5 | 10 | 15 | 20 | 5 | 7.5 | 10 | 12.5 |
| | arcillas | | | | limos | | | | arenas | | | |
| .05 | 300 | 400 | 400 | 400 | 120 | 270 | 400 | 400 | 60 | 90 | 150 | 190 |
| 0.1 | 340 | 440 | 470 | 500 | 180 | 340 | 440 | 470 | 90 | 120 | 190 | 220 |
| 0.2 | 370 | 470 | 530 | 620 | 220 | 370 | 470 | 530 | 120 | 190 | 250 | 300 |
| 0.3 | 400 | 500 | 620 | 800 | 280 | 400 | 500 | 600 | 150 | 220 | 280 | 400 |
| 0.5 | 400 | 500 | 560 | 750 | 280 | 370 | 470 | 530 | 120 | 190 | 250 | 320 |
| 1.0 | 280 | 400 | 500 | 600 | 250 | 300 | 370 | 470 | 90 | 150 | 220 | 250 |
| 1.5 | 250 | 340 | 430 | 500 | 220 | 280 | 340 | 400 | 80 | 120 | 190 | 220 |
| 2.0 | 220 | 270 | 340 | 400 | 180 | 250 | 300 | 340 | 60 | 90 | 150 | 190 |

Por cuestiones de tipo práctico se ha procurado que los tiempos de riego sean menores a 24 horas, aunque no se cumple en todos los casos. La variación de los coeficientes de rugosidad después de la etapa de avance se estima de 0.03 a 0.06 y de los coeficientes de rugosidad inicial de 0.05 a 0.1. Se usan formas de

surco triangular (taludes 1:1.5 y $1:3^{1/2}$) y parabólica (surcos Schwankl, Tarboton y Fangmeier-Ramsey empleados en la calibración). El intervalo de la pendiente es de 0.2 a 0.6 % con el fin de limitar el gasto inicial de 3 a 1 l/s. El intervalo de 3 a 15 cm en el parámetro $h = SM$ de la fórmula de Green y Ampt se obtuvo al considerar los datos de la tabla 7 (Clapp y Hornberger, 1978) para la diferencia de tensión capilar S según la textura del suelo, de la diferencia de humedades M de la tabla 8 (Cuenca, 1989), así como de la calibración efectuada en el capítulo 3, donde $SM = 15$ cm. Chu (1978) sugiere que SM sea de 2.7 cm o menor para un suelo arenoso, hasta 6.1 cm o mayor para arcillas.

En la tabla 8 se anota también la conductividad hidráulica, donde los valores entre paréntesis son los intervalos y a la izquierda los promedios. Por tanto, en la tabla 9, la textura del suelo varía de un suelo arenoso a uno franco-arcilloso.

Tabla 7. Diferencia de tensiones en el frente húmedo del suelo

| Textura del suelo | Dif. de tensiones en el frente húmedo, S | |
|-------------------|--|---------------------|
| | valores medios (cm) | desv. estándar (cm) |
| arena | 12.1 | 14.3 |
| franco-arenoso | 21.8 | 31.0 |
| franco | 47.8 | 51.2 |
| franco-arcilloso | 63.0 | 51.0 |
| limo-arcilloso | 49.0 | 62.1 |
| arcilla | 40.5 | 39.7 |

Tabla 8. Diferencia de humedades y conductividades hidráulicas

| Textura del suelo | Dif. de hum. M (% en volumen) | Cond. hidráulica, K (cm/min) |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| arena | 8 (6 - 10) | 0.0833 (0.0417-0.4167) |
| franco-arenoso | 12 (9 - 15) | 0.0417 (0.0217-0.1267) |
| franco | 17 (14 - 20) | 0.0217 (0.0133-0.0333) |
| franco-arcilloso | 19 (16 - 22) | 0.0133 (0.0042-0.0250) |
| limo-arcilloso | 20 (18 - 23) | 0.0042 (0.0005-0.0083) |
| arcilla | 23 (20 - 25) | 0.0008 (0.0002-0.0017) |

Los límites en la humedad inicial son de 1 a 3 cm y en la dosis de 5 a 15 cm; por ello, la dosis puede ser igual al parámetro h en algunos casos.

4.3 Análisis de sensibilidad de las variables

Una observación de la tabla 6 permite ver que, en apariencia, la dosis juega un papel preponderante en la selección de la longitud del surco; por lo pronto se puede afirmar que la dosis tiene una influencia notable en el tiempo de riego. Además, en las líneas de $S_0 = 0.5 \%$ y mayores se aprecia que las longitudes disminuyen, esto se debe a que por ser menor el gasto no llega a infiltrarse el agua al final del surco.

Tabla 9. Eficiencias en el riego continuo óptimo

| L_s (m) | Q_0 $\left(\frac{l}{s}\right)$ | S_0 (%) | K $\left(\frac{cm}{min}\right)$ | n_1 $\left(s/m^{1/3}\right)$ | n $\left(s/m^{1/3}\right)$ | w | h | Z_m | D_s | t_a | T_r | η_z | η_v | η |
|--------------|-------------------------------------|--------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|--------|
| | | | | | | (cm) | | | (min) | | (%) | | | |
| 190 | 2.10 | 0.20 | 0.083 | 0.100 | 0.060 | 1.0 | 3.0 | 15.0 | 99 | 95 | 381 | 76 | 79 | 60 |
| 305 | 1.91 | 0.22 | 0.080 | 0.086 | 0.059 | 1.1 | 3.6 | 14.5 | 88 | 116 | 588 | 76 | 76 | 58 |
| 230 | 1.79 | 0.24 | 0.077 | 0.098 | 0.057 | 1.2 | 4.1 | 14.1 | 81 | 108 | 417 | 76 | 78 | 59 |
| 170 | 1.68 | 0.25 | 0.074 | 0.096 | 0.056 | 1.3 | 4.5 | 13.8 | 97 | 98 | 379 | 76 | 78 | 59 |
| 235 | 1.58 | 0.27 | 0.072 | 0.084 | 0.055 | 1.3 | 5.0 | 13.4 | 67 | 102 | 361 | 77 | 79 | 61 |
| 290 | 1.50 | 0.28 | 0.069 | 0.083 | 0.054 | 1.4 | 5.4 | 13.0 | 90 | 142 | 671 | 73 | 77 | 56 |
| 220 | 1.42 | 0.30 | 0.066 | 0.094 | 0.053 | 1.5 | 5.9 | 12.6 | 65 | 108 | 356 | 76 | 78 | 59 |
| 275 | 1.36 | 0.31 | 0.064 | 0.081 | 0.052 | 1.6 | 6.3 | 12.3 | 89 | 139 | 668 | 73 | 75 | 55 |
| 190 | 1.29 | 0.33 | 0.061 | 0.092 | 0.051 | 1.6 | 6.8 | 11.9 | 80 | 109 | 409 | 75 | 76 | 57 |
| 210 | 1.24 | 0.34 | 0.059 | 0.079 | 0.050 | 1.7 | 7.2 | 11.5 | 73 | 99 | 408 | 76 | 77 | 58 |
| 260 | 1.18 | 0.36 | 0.056 | 0.090 | 0.048 | 1.8 | 7.7 | 11.1 | 84 | 148 | 655 | 72 | 73 | 52 |
| 190 | 1.13 | 0.37 | 0.053 | 0.077 | 0.047 | 1.9 | 8.1 | 10.8 | 79 | 104 | 419 | 74 | 76 | 56 |
| 155 | 1.09 | 0.39 | 0.051 | 0.088 | 0.046 | 1.9 | 8.6 | 10.4 | 93 | 115 | 410 | 73 | 76 | 56 |
| 195 | 1.05 | 0.40 | 0.048 | 0.075 | 0.045 | 2.0 | 9.0 | 10.0 | 82 | 112 | 458 | 74 | 76 | 56 |
| 155 | 1.01 | 0.42 | 0.045 | 0.053 | 0.044 | 2.1 | 9.5 | 9.6 | 98 | 78 | 421 | 75 | 76 | 58 |
| 200 | 0.98 | 0.43 | 0.043 | 0.073 | 0.043 | 2.2 | 9.9 | 9.3 | 75 | 112 | 435 | 72 | 75 | 54 |
| 315 | 0.94 | 0.45 | 0.040 | 0.060 | 0.042 | 2.2 | 10.4 | 8.9 | 86 | 180 | 737 | 76 | 77 | 58 |
| 210 | 0.91 | 0.46 | 0.038 | 0.071 | 0.041 | 2.3 | 10.8 | 8.5 | 69 | 109 | 404 | 74 | 76 | 56 |
| 325 | 0.88 | 0.48 | 0.035 | 0.062 | 0.039 | 2.4 | 11.3 | 8.1 | 85 | 184 | 764 | 74 | 75 | 56 |
| 235 | 0.86 | 0.49 | 0.032 | 0.069 | 0.038 | 2.5 | 11.7 | 7.8 | 76 | 124 | 522 | 71 | 73 | 51 |
| 185 | 0.83 | 0.51 | 0.030 | 0.058 | 0.037 | 2.5 | 12.2 | 7.4 | 96 | 107 | 495 | 71 | 75 | 53 |
| 240 | 0.81 | 0.52 | 0.027 | 0.068 | 0.036 | 2.6 | 12.6 | 7.0 | 71 | 119 | 486 | 70 | 72 | 50 |
| 365 | 0.79 | 0.54 | 0.024 | 0.056 | 0.035 | 2.7 | 13.1 | 6.6 | 94 | 166 | 996 | 69 | 70 | 48 |
| 290 | 0.76 | 0.55 | 0.022 | 0.066 | 0.034 | 2.8 | 13.5 | 6.3 | 77 | 142 | 632 | 69 | 70 | 48 |
| 425 | 0.74 | 0.57 | 0.019 | 0.054 | 0.033 | 2.8 | 14.0 | 5.9 | 92 | 178 | 1088 | 68 | 69 | 47 |
| 345 | 0.72 | 0.58 | 0.017 | 0.064 | 0.032 | 2.9 | 14.4 | 5.5 | 72 | 145 | 678 | 68 | 68 | 47 |
| 405 | 0.70 | 0.60 | 0.013 | 0.050 | 0.030 | 3.0 | 15.0 | 5.0 | 68 | 63 | 637 | 71 | 72 | 51 |

Dada la complejidad del proceso de riego por surcos, es necesario ajustar a los datos de la tabla 9 un modelo de regresión lineal múltiple para calcular la longitud del surco L_s en función de las variables independientes S_0 , K , n_1 , n , w , h , Z_m y D_s , las cuales siguen una distribución de probabilidad normal generada con la muestra normal estándar ± 2 , ± 1.8 , ± 1.65 , ± 1.5 , ± 1.35 , ± 1.2 , ± 1.05 , ± 0.9 , ± 0.75 , ± 0.6 , ± 0.45 , ± 0.3 , ± 0.15 , 0 . A partir de los datos de la separación entre surcos de la tabla 9 se hicieron arreglos con el cambio en el orden de cada una de las variables restantes, excepto n_1 , por lo que se diseñaron $27 \times 7 = 189$ surcos (las tablas C.1 a C.6 del apéndice C son continuación de la tabla 9, en ellas se presentan los resultados de los cambios a las variables (S_0 , K , n , w , h y Z_m). No se incluye el coeficiente de rugosidad inicial porque no modifica la longitud del diseño, aunque sí el tiempo de avance, el de riego y en menor medida la eficiencia de aplicación (1 a 2 %), por lo que el número de variables independientes se reduce de ocho a siete. Por tanto, el modelo de regresión propuesto es

$$L_s = a S_0^{b_1} K^{b_2} n^{b_3} w^{b_4} h^{b_5} Z_m^{b_6} D_s^{b_7} \quad (25)$$

donde L_s está en m, S_0 en %, K en cm/min, n en $s/m^{1/3}$, w , h , Z_m y D_s en cm. Los valores del coeficiente a y exponentes b_i son

$$a = 4.85; b_1 = -0.52; b_2 = -0.91; b_3 = -0.29;$$

$$b_4 = 0.12; b_5 = -0.36; b_6 = 0.28; b_7 = -0.08$$

El coeficiente de correlación obtenido con el método de mínimos cuadrados, a través de una regresión lineal simple, al

comparar los valores calculados con el modelo de regresión lineal múltiple y los de L_s en la tabla 9 (y tablas C.1 a C.6 del apéndice C) es 0.84.

La media y la desviación estándar de los 189 datos de la longitud y las variables independientes son las de la tabla 10.

Tabla 10. Estadísticos de las variables

| variable | media | desv. est. |
|----------|-------------|------------|
| X_i | \bar{X}_i | σ_i |
| L_s | 255 | 100 |
| S_o | 0.4 | 0.118 |
| K | 0.048 | 0.0206 |
| n | 0.045 | 0.0088 |
| w | 2 | 0.59 |
| h | 9 | 3.53 |
| Z_m | 10 | 2.94 |
| D_s | 82.5 | 10.4 |

Los valores de los exponentes (de mayor a menor) en la ecuación de regresión definen la influencia de las variables; así, el orden es

$$K, S_o, h, n, Z_m, w, D_s$$

Un criterio para determinar la influencia de las variables con mayor incertidumbre (K, n, h y w), es el del segundo momento estadístico, para ello es necesario establecer una ecuación de operación como lo indican Sánchez et al. (1989).

$$G(X_1) = S_0^{b_1} K^{b_2} n^{b_3} w^{b_4} h^{b_5} Z_m^{b_6} D_s^{b_7} - \frac{L_s}{a}$$

En este caso si $G(X_1) < 0$ significa que un diseño con las variables $X_1(S_0, K, n, w, h, Z_m, D_s)$ es insuficiente para satisfacer el riego con la longitud de surco L_s .

Según la teoría del método del segundo momento, los cosenos directores que determinan la probabilidad de falla en el diseño se obtienen con la ecuación

$$\alpha_1 = \frac{\frac{\partial G(X_1)}{\partial X_1} \sigma_1}{\sqrt{\sum \left(\frac{\partial G(X_1)}{\partial X_1} \sigma_1 \right)^2}}$$

Entonces, la variable estandarizada β que permite asociar la probabilidad de falla, así como los cosenos directores α_1 , se encuentran en forma simultánea por aproximaciones sucesivas a partir de un valor inicial $\beta = 0$, con la expresión

$$\prod_{i=1}^7 (X_i)^{b_i} = \prod_{i=1}^7 (\bar{X}_i + \beta \sigma_i \alpha_i)^{b_i} = \frac{L_s}{a}$$

ya que la función de operación es $G(X_1) = 0$ y $X_i = \bar{X}_i + \beta \sigma_i \alpha_i$ para la distribución normal. Los valores de a y b_i son los de la ecuación 25, \bar{X}_i son los valores medios y σ_i son las desviaciones estándar de las variables en la tabla 9.

En la tabla 11 se anotan dos resultados de β que definen el intervalo de confianza $P(L_{s_1} \leq L_s \leq L_{s_2})$ entre dos longitudes de diseño extremas, L_{s_1} y L_{s_2} , para los valores medios de S_0 , Z_m y D_s con desviaciones estándar nulas y los mismos valores medios y

desviaciones estándar de la tabla 9 para K, h, n y w. Se aclara que el método del segundo momento no proporciona intervalos de confianza mayores. Empero, el modelo matemático con las ecuaciones de Saint-Venant sí puede cubrir un intervalo de confianza mayor; por ejemplo para el 95 %, donde $\beta = 1.65$, los valores extremos son $X_1 = \bar{X} \pm 1.65\sigma_1$.

Tabla 11. Intervalos de confianza para longitudes de diseño

| β | $P(Ls_1 \leq Ls \leq Ls_2)$ | Ls_1 (m) | Ls_2 (m) |
|------------|-----------------------------|---------------|---------------|
| ± 1.20 | 0.76 | 135 | 405 |
| ± 0.65 | 0.50 | 160 | 280 |

Los cosenos directores α_1 y los valores de las X_1 se muestran en la tabla 12.

Ahora bien, los cosenos directores α_1 permiten realizar el análisis de sensibilidad de las variables. A mayor valor absoluto del coseno director mayor importancia de la variable, ya que afecta de manera definitiva a la desviación estándar.

Se confirma que el orden de significancia de las cuatro variables independientes con mayor incertidumbre son

K, h, n, w

Tabla 12. Variables y cosenos directores

| var. | $\beta = - 1.20$ | | $\beta = + 1.20$ | | $\beta = - 0.65$ | | $\beta = + 0.65$ | |
|----------------|------------------|------------|------------------|------------|------------------|------------|------------------|------------|
| | X_1 | α_1 | X_1 | α_1 | X_1 | α_1 | X_1 | α_1 |
| Ls | 135 | - | 405 | - | 160 | - | 280 | - |
| S ₀ | 0.4 | 0.0 | 0.4 | 0.0 | 0.4 | 0.0 | 0.4 | 0.0 |
| K | 0.070 | -0.892 | 0.024 | -0.978 | 0.060 | -0.906 | 0.035 | -0.954 |
| n | 0.047 | -0.182 | 0.044 | -0.072 | 0.046 | -0.163 | 0.044 | -0.105 |
| w | 1.9 | 0.120 | 2.0 | 0.043 | 2.0 | 0.103 | 2.0 | 0.062 |
| h | 10.7 | -0.396 | 8.2 | -0.193 | 9.9 | -0.376 | 8.4 | -0.274 |
| Z _m | 10.0 | 0.0 | 10.0 | 0.0 | 10.0 | 0.0 | 10.0 | 0.0 |
| D _s | 82.5 | 0.0 | 82.5 | 0.0 | 82.5 | 0.0 | 82.5 | 0.0 |

De acuerdo con el análisis, las variables más significativas en el diseño de la longitud del surco son la conductividad hidráulica, la pendiente, la diferencia de tensiones y humedades del suelo, el coeficiente de rugosidad, la dosis, la humedad inicial y la separación entre surcos. El coeficiente de rugosidad inicial no influye porque sólo afecta al tiempo de avance de una manera directa, así como al tiempo de riego.

4.4 Confiabilidad en el diseño

En el diseño de surcos es necesario disponer de mediciones realizadas en el campo, o de estimaciones confiables de los parámetros dominantes, con el fin de realizar el diseño para las condiciones más desfavorables, es decir, para tener confiabilidad en que sólo en pocos casos la longitud o el gasto propiciarán eficiencias de aplicación bajas. Por ejemplo, si se quiere diseñar

un surco de mayor longitud al empleado en el método experimental (capítulo 3), con el mismo tipo de suelo y sección transversal, debe considerarse que las únicas variables con cambios importantes en el proceso de calibración fueron la conductividad hidráulica y el coeficiente de rugosidad inicial. Con datos de dicha calibración, la media y la desviación estándar de estos parámetros son $\bar{K} = 0.091$ cm/min, $\sigma_K = 0.019$ cm/min, $\bar{n}_1 = 0.084$ y $\sigma_{n_1} = 0.015$. Así, para un intervalo de confianza del 95 % ($\beta = \pm 1.65$), los valores más desfavorables para el diseño son $K = 0.091 + 1.65 \cdot 0.019 = 0.122$ cm/min y $n_1 = 0.084 + 1.65 \cdot 0.015 = 0.109$, debido a que ocasionan el mayor tiempo de avance con la menor eficiencia total.

Además del par de datos anteriores, si se desea infiltrar una dosis de 7.5 cm en un surco de 0.3 % de pendiente, con $n = 0.036$, $w = 4$ cm y $h = 15$ cm (los tres últimos valores son similares a los empleados en la calibración), el gasto óptimo en riego continuo es $Q_0 = 1.5$ l/s, con longitud óptima en corte posterior $L_s = 100$ m. La eficiencia de aplicación máxima en riego continuo es $\eta = 54$ %, tiempo de avance $t_a = 42$ min y tiempo de riego $T_r = 139$ min.

5. MÉTODO DE CORTE POSTERIOR

5.1 Resultados del modelo matemático

Si el riego continuo se identifica por el hidrograma de la figura 10, el hidrograma de la figura 11 representa la aplicación del gasto de ingreso por el método de corte posterior, es decir, el método consiste en regar primero con un gasto Q_0 durante un tiempo igual al tiempo de avance, y después reducir el gasto a uno de valor Q_1 (generalmente la mitad de Q_0) hasta un tiempo de riego suficiente para infiltrar la dosis requerida por la planta. Se ha visto en la práctica que este método incrementa la eficiencia de aplicación porque disminuyen las pérdidas por coleos.

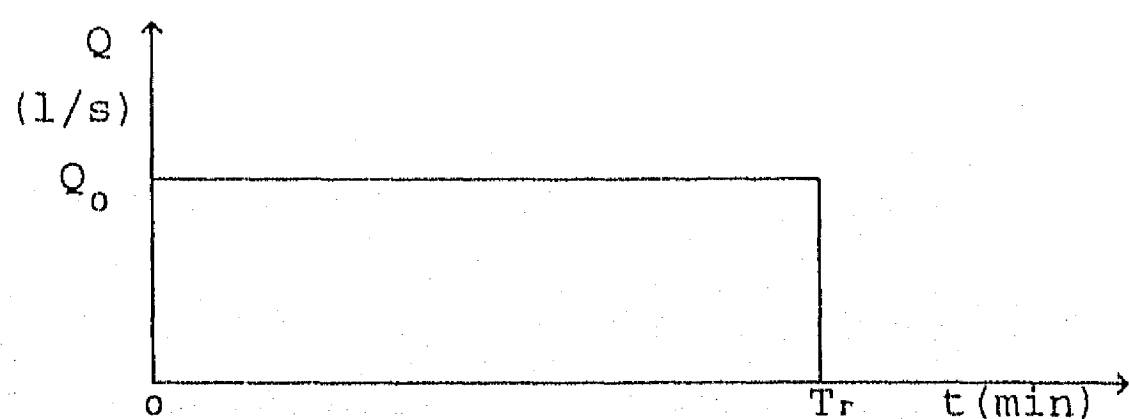


Figura 10. Hidrograma en riego continuo

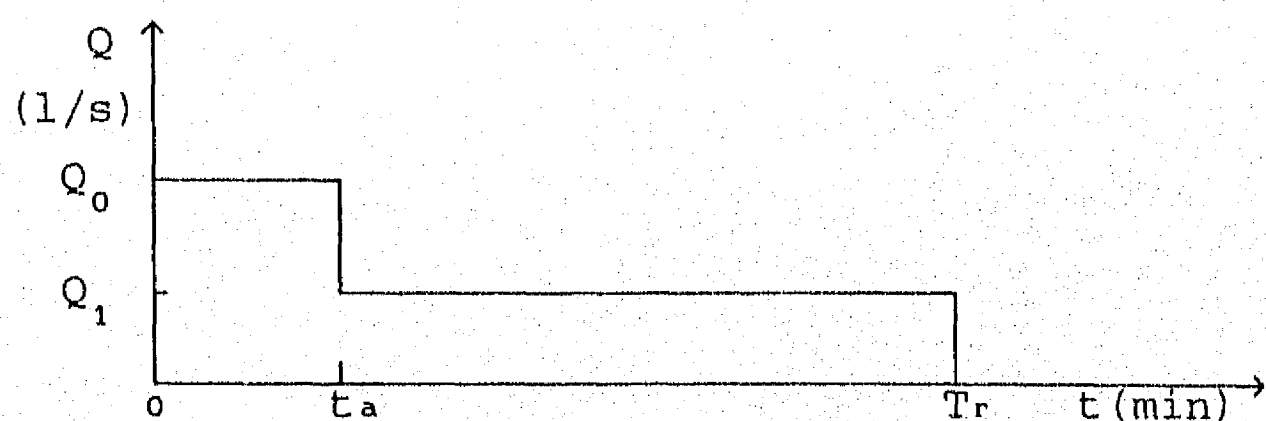


Figura 11. Hidrograma en corte posterior

En la figura 12 se muestra un hidrograma de salida típico por el extremo inferior del surco, donde Tr es el tiempo final de escurrimiento; como se sabe, el área bajo un hidrograma representa el volumen escurrido, de manera que el área bajo el hidrograma de la figura 10 es el volumen aplicado al surco para riego continuo, y el de la figura 11 para el corte posterior. La diferencia del volumen aplicado, por ejemplo el de la figura 11, menos el volumen escurrido de la figura 12 es igual al volumen total infiltrado, del cual la planta puede aprovechar el llamado volumen útil.

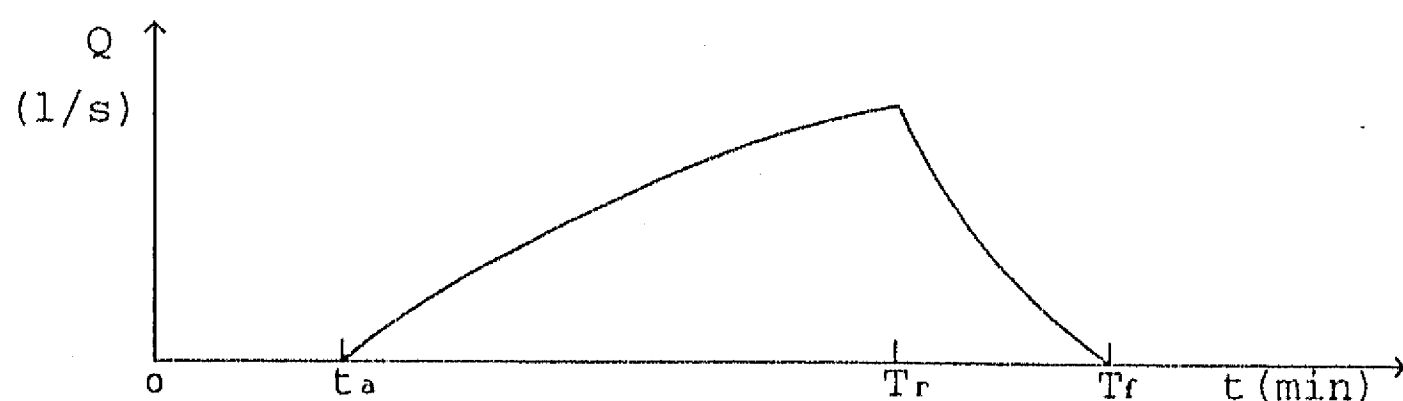


Figura 12. Hidrograma de salida

Con los mismos datos de la tabla 9, en la tabla 13 se presentan las eficiencias de aplicación calculadas en corte posterior con reducción del gasto inicial a la mitad (las tablas C.7 a C.12 del apéndice C son continuación de la tabla 13 con los datos de las tablas C.1 a C.6, respectivamente). En el capítulo 4 se menciona que el gasto inicial del corte posterior es el máximo que permite la pendiente, según la ecuación 24, el cual aumenta 1.43 (1/0.7) veces el gasto de diseño óptimo en riego continuo, ya que la eficiencia de aplicación se incrementa (en el siguiente inciso se explica el criterio de diseño).

La comparación de las eficiencias del corte posterior (tabla 13) con las de riego continuo óptimo (tabla 9) hace ver que las eficiencias de infiltración son muy parecidas, por lo que el incremento de la eficiencia total o de aplicación η_c se debe al incremento de la eficiencia en volumen (Vázquez y Gracia, 1995). En la misma tabla 9 se observa también que la eficiencia en volumen es mayor que la eficiencia de infiltración; así, en el corte posterior, la diferencia se hace aún mayor.

Tabla 13. Eficiencias con el método de corte posterior

| L_s (m) | Q_o $\left(\frac{l}{s}\right)$ | S_o (%) | K $\left(\frac{cm}{min}\right)$ | n_1 $\left(s/m^{1/3}\right)$ | n $\left(s/m^{1/3}\right)$ | w | h | Z_m | D_s | t_a | T_r | η_z | η_v | η_c |
|--------------|-------------------------------------|--------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| | | | | | | (cm) | | | | (min) | (%) | | | |
| 190 | 3.00 | 0.20 | 0.083 | 0.100 | 0.060 | 1.0 | 3.0 | 15.0 | 99 | 51 | 427 | 77 | 87 | 66 |
| 305 | 2.73 | 0.22 | 0.080 | 0.086 | 0.059 | 1.1 | 3.6 | 14.5 | 88 | 61 | 685 | 76 | 84 | 63 |
| 230 | 2.55 | 0.235 | 0.077 | 0.098 | 0.057 | 1.2 | 4.1 | 14.1 | 81 | 62 | 472 | 75 | 85 | 64 |
| 170 | 2.48 | 0.25 | 0.074 | 0.096 | 0.056 | 1.3 | 4.5 | 13.8 | 97 | 53 | 415 | 76 | 85 | 65 |
| 235 | 2.26 | 0.265 | 0.072 | 0.084 | 0.055 | 1.3 | 5.0 | 13.4 | 67 | 57 | 399 | 76 | 89 | 68 |
| 290 | 2.14 | 0.28 | 0.069 | 0.083 | 0.054 | 1.4 | 5.4 | 13.0 | 90 | 79 | 797 | 70 | 86 | 61 |
| 220 | 2.03 | 0.295 | 0.066 | 0.094 | 0.053 | 1.5 | 5.9 | 12.6 | 65 | 58 | 380 | 77 | 87 | 68 |
| 275 | 1.94 | 0.31 | 0.064 | 0.081 | 0.052 | 1.6 | 6.3 | 12.3 | 89 | 74 | 784 | 71 | 84 | 60 |
| 190 | 1.85 | 0.325 | 0.061 | 0.092 | 0.051 | 1.6 | 6.8 | 11.9 | 80 | 61 | 459 | 74 | 84 | 62 |
| 210 | 1.76 | 0.34 | 0.059 | 0.079 | 0.050 | 1.7 | 7.2 | 12.6 | 73 | 51 | 468 | 75 | 86 | 65 |
| 260 | 1.69 | 0.355 | 0.056 | 0.090 | 0.048 | 1.8 | 7.7 | 11.1 | 84 | 78 | 743 | 71 | 82 | 58 |
| 190 | 1.62 | 0.37 | 0.053 | 0.077 | 0.047 | 1.9 | 8.1 | 10.8 | 79 | 49 | 470 | 75 | 85 | 64 |
| 155 | 1.56 | 0.385 | 0.051 | 0.088 | 0.046 | 1.9 | 8.6 | 10.4 | 93 | 59 | 455 | 73 | 86 | 62 |
| 195 | 1.50 | 0.4 | 0.048 | 0.075 | 0.045 | 2.0 | 9.0 | 10.0 | 82 | 23 | 547 | 74 | 85 | 63 |
| 155 | 1.45 | 0.415 | 0.045 | 0.053 | 0.044 | 2.1 | 9.5 | 9.6 | 98 | 35 | 521 | 70 | 86 | 61 |
| 200 | 1.40 | 0.43 | 0.043 | 0.073 | 0.043 | 2.2 | 9.9 | 9.3 | 75 | 56 | 493 | 71 | 84 | 60 |
| 315 | 1.35 | 0.445 | 0.040 | 0.060 | 0.042 | 2.2 | 10.4 | 8.9 | 86 | 79 | 846 | 74 | 87 | 64 |
| 210 | 1.30 | 0.46 | 0.038 | 0.071 | 0.041 | 2.3 | 10.8 | 8.5 | 69 | 17 | 486 | 72 | 87 | 63 |
| 325 | 1.26 | 0.475 | 0.035 | 0.062 | 0.039 | 2.4 | 11.3 | 8.1 | 85 | 80 | 868 | 73 | 86 | 63 |
| 235 | 1.22 | 0.49 | 0.032 | 0.069 | 0.038 | 2.5 | 11.7 | 7.8 | 76 | 57 | 594 | 70 | 83 | 58 |
| 185 | 1.19 | 0.505 | 0.030 | 0.058 | 0.037 | 2.5 | 12.2 | 7.4 | 96 | 45 | 594 | 68 | 85 | 57 |
| 240 | 1.15 | 0.52 | 0.027 | 0.068 | 0.036 | 2.6 | 12.6 | 7.0 | 71 | 55 | 552 | 69 | 83 | 57 |
| 365 | 1.12 | 0.535 | 0.024 | 0.056 | 0.035 | 2.7 | 13.1 | 6.6 | 94 | 62 | 1204 | 66 | 81 | 53 |
| 290 | 1.09 | 0.55 | 0.022 | 0.066 | 0.034 | 2.8 | 13.5 | 6.3 | 77 | 59 | 716 | 69 | 81 | 55 |
| 425 | 1.06 | 0.565 | 0.019 | 0.054 | 0.033 | 2.8 | 14.4 | 5.9 | 92 | 57 | 1290 | 66 | 80 | 53 |
| 345 | 1.03 | 0.58 | 0.017 | 0.064 | 0.032 | 2.9 | 14.4 | 5.5 | 72 | 60 | 754 | 69 | 79 | 54 |
| 405 | 1.00 | 0.6 | 0.013 | 0.050 | 0.030 | 3.0 | 15.0 | 5.0 | 68 | 55 | 800 | 66 | 82 | 54 |

5.2 Criterio de diseño y aplicaciones prácticas

El método de corte posterior presenta la dificultad práctica de conservar constante el gasto de ingreso a la parcela (módulo de riego parcelario) por la reducción del gasto inicial. Humpherys (en Jensen, 1980) propone un plan de riego sencillo en el manejo del agua para alimentar con un gasto fijo la parcela; este plan consiste en dividir la parcela en dos partes con igual número de surcos, la primera mitad se riega con el gasto inicial hasta que llega al final del surco (tiempo de avance del agua), enseguida se abastece con el mismo gasto e igual tiempo la otra mitad de la parcela, después se riega toda la parcela con ese gasto inicial, esto es, a cada parte le corresponde la mitad del gasto, de manera que en la primera mitad el riego se puede llamar corte posterior discontinuo con tiempo de riego T_c (ver figura 13) y en la segunda mitad el riego es con corte posterior defasado un tiempo igual al tiempo de avance t_a (figura 14).

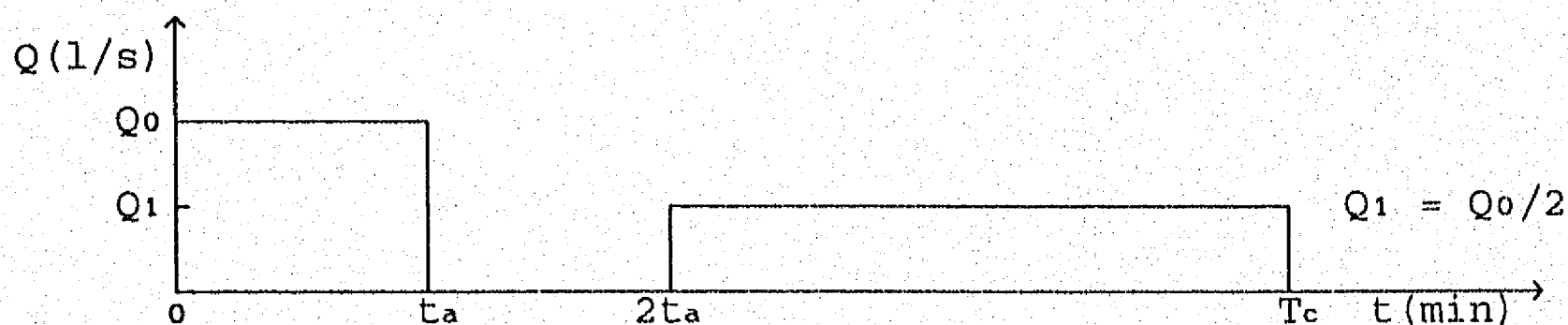


Figura 13. Hidrograma de ingreso con corte posterior discontinuo

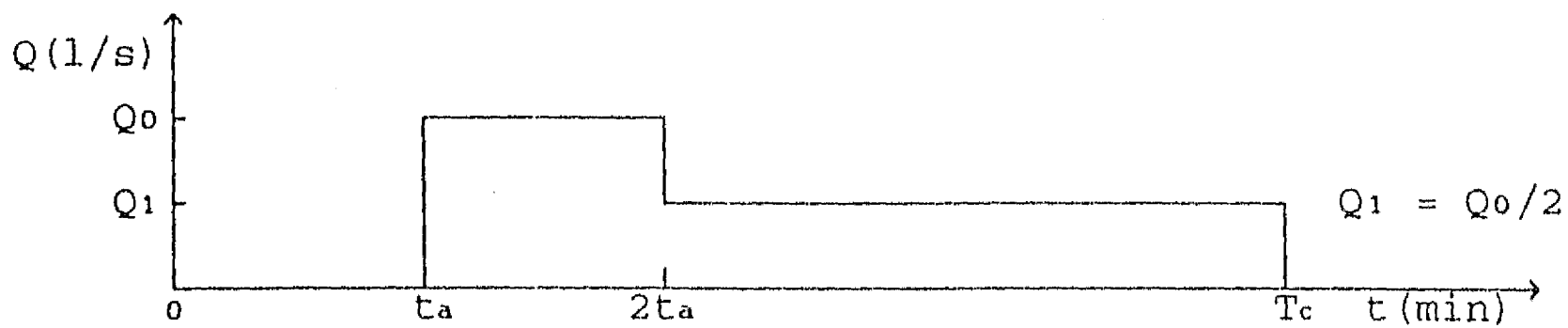


Figura 14. Hidrograma de ingreso con corte posterior defasado

Establecido el manejo del agua en la parcela con la reducción del gasto inicial a la mitad, se formula el criterio para determinar el gasto de diseño en surcos donde se pretenda infiltrar una cierta dosis, se disponga de datos geométricos de longitud, pendiente, sección transversal, y se tengan estimaciones confiables del coeficiente de rugosidad (inicial y posterior), conductividad hidráulica, humedad inicial, diferencias de tensiones de capilaridad en el frente húmedo y diferencias de humedades del suelo.

- a) Determinar el gasto máximo que no produce erosión en el surco con la ecuación 24.
- b) Encontrar el gasto de diseño óptimo en riego continuo con el modelo matemático. El gasto óptimo en riego continuo es del orden de 0.7 veces el gasto inicial del corte posterior.
- c) Fijar el gasto mínimo que puede aplicarse en corte posterior. El agua debe llegar al final del surco una vez que se disminuya el gasto inicial Q_0 a uno menor $Q_1 = Q_0/2$, es decir, debe definirse Q_1 mínimo, sobre todo en el corte posterior discontinuo.
- d) Para diferentes gastos iniciales $Q_0 = 2Q_1$, donde $Q_1 \geq (Q_1)_{\min}$

y $Q_{rc} < Q_0 \leq (Q_0)_{max}$ (Q_{rc} es el gasto óptimo de riego continuo), obtener con simulaciones numéricas un tiempo de riego T_c para el riego discontinuo de manera que se cumpla con la dosis Z_m .

e) Seleccionar la opción donde el volumen aplicado al surco sea mínimo y menor que el aplicado en el riego continuo óptimo.

f) Determinar el tiempo de riego para corte posterior como

$$T_r = T_c - t_a$$

donde t_a es el tiempo de avance obtenido con el modelo matemático para el gasto inicial Q_0 .

g) Con el tiempo de riego T_r y el modelo matemático calcular el volumen de ingreso para un surco con riego en corte posterior. Comprobar que sea menor que el correspondiente al óptimo en riego continuo y que se satisfaga la dosis.

h) Calcular el ahorro de agua en comparación con el diseño óptimo en riego continuo para toda la parcela.

En la tabla 14 se muestra el plan de riego de Humpherys, donde N_s es el número total de surcos en la parcela y M_r es el módulo de riego parcelario $M_r = Q_1 N_s$.

En un problema de revisión donde el módulo de riego M_r sea un dato fijo, el número de surcos para obtener una buena eficiencia con el método de corte posterior es $N_s = M_r / Q_1$.

Tabla 14. Riego con partición de la parcela (split-set)

| tiempo | $N_s/2$ | $N_s/2$ | Módulo de riego M_r |
|---------------------|------------------------|---------|-----------------------|
| | Gastos por surco (l/s) | | |
| $0 < t \leq t_a$ | Q_0 | - | $Q_1 N_s$ |
| $t_a < t \leq 2t_a$ | - | Q_0 | $Q_1 N_s$ |
| $2t_a < t \leq T_c$ | Q_1 | Q_1 | $Q_1 N_s$ |

En las siguientes aplicaciones prácticas del criterio de diseño se han tomado los datos geométricos de cuatro de los surcos usados en la calibración del modelo. Se hace notar que se conserva la longitud original de cada surco. La tabla 15 muestra los gastos óptimos del riego continuo. Los resultados del modelo matemático se presentan en las tablas 16 a 18, donde A_g es el ahorro de agua respecto al riego continuo óptimo. En la tabla 19 se anotan los tiempos y volúmenes obtenidos en el modelo físico para el corte posterior del ensayo 5, al igual que los resultados del modelo matemático para el corte posterior de acuerdo con la calibración efectuada con los datos del apéndice B.

Tabla 15. Diseño óptimo con riego continuo

| Gastos, tiempos y dosis | Schwankl | Tarboton | F-R | II |
|--|----------|----------|------|------|
| Long. del surco, L_s (m) | 250 | 270 | 100 | 52.5 |
| gasto, Q_0 (l/s) | 1.0 | 1.5 | 0.4 | 0.5 |
| tpo. de avance, t_a (min) | 155 | 205 | 80 | 35 |
| tpo. de riego, T_r (min) | 390 | 384 | 339 | 155 |
| dosis, Z_m (cm) | 6.0 | 6.5 | 6.7 | 5.9 |
| lám. acum. prom. (cm) | 9.0 | 10.2 | 7.9 | 7.8 |
| vol. útil, V_a (m ³) | 11.25 | 17.55 | 4.56 | 2.79 |
| vol. infiltrado, V_z (m ³) | 16.80 | 27.53 | 5.22 | 3.64 |
| vol. escurrido, V_s (m ³) | 6.60 | 7.00 | 2.92 | 1.01 |
| vol. ingreso, V_e (m ³) | 23.40 | 34.53 | 8.14 | 4.65 |
| ef. infiltración, η_z (%) | 67 | 64 | 87 | 77 |
| ef. en volumen, η_v (%) | 72 | 80 | 64 | 78 |
| ef. aplicación, η (%) | 48 | 51 | 56 | 60 |
| $Q_0/(L_s/100)$, (l/s/m/100) | 0.4 | 0.56 | 0.4 | 0.95 |

En el último renglón de la tabla anterior se escribe el gasto por cada 100 m de longitud. Se aprecia que tres de los cuatro surcos, cuya longitud no es tan corta como la del Instituto de Ingeniería (II), se encuentran en el intervalo de diseño (0.2 a 0.5 l/s por cada 100 m) recomendado por el Cemagref et Groupe France Agricool (1990).

Tabla 16. Gastos de diseño por surco. Parcela Schwankl

| tiempo (min) y dosis (cm) | N _s /2 | N _s /2 | M _r |
|---------------------------------------|------------------------|-------------------|---------------------|
| | Gastos por surco (l/s) | | |
| 0 < t ≤ 86 | 1.5 | — | 0.75N _s |
| 86 < t ≤ 172 | — | 1.5 | 0.75N _s |
| 172 < t ≤ 455 | 0.75 | 0.75 | 0.75N _s |
| t. avance t _a (min) | 86 | 86 | — |
| t. riego T _r (min) | 455 | 369 | — |
| dosis Z _m (cm) | 6.0 | 6.0 | — |
| lám. prom. \bar{Z} (cm) | 9.2 | 8.5 | — |
| Volúmenes por surco (m ³) | | | ΣVol |
| Útil V _a | 11.25 | 11.25 | 11.25N _s |
| Infiltrado V _z | 15.78 | 15.63 | 15.71N _s |
| Escurrido V _s | 4.71 | 4.87 | 4.79N _s |
| Aplicado V _e | 20.49 | 20.50 | 20.50N _s |
| Eficiencias (%) | | | |
| Infiltración η_z | 71 | 72 | — |
| Volumen η_v | 77 | 76 | — |
| Aplicación η | 55 | 55 | — |
| Ahorro de agua A _g | 12 | 12 | — |

Tabla 17. Gastos de diseño por surco. Parcela Tarboton

| tiempo (min) y dosis (cm) | N _s /2 | N _s /2 | M _r |
|---------------------------------------|------------------------|-------------------|---------------------|
| | Gastos por surco (l/s) | | |
| 0 < t ≤ 147 | 2.0 | — | N _s |
| 147 < t ≤ 294 | — | 2.0 | N _s |
| 294 < t ≤ 539 | 1.0 | 1.0 | N _s |
| t. avance t _a (min) | 147 | 147 | — |
| t. riego T _r (min) | 539 | 392 | — |
| dosis Z _m (cm) | 6.5 | 6.5 | — |
| lám. prom. \bar{Z} (cm) | 10.7 | 10.4 | — |
| Volúmenes por surco (m ³) | | | ΣVol |
| Útil V _a | 17.55 | 17.55 | 17.55N _s |
| Infiltrado V _z | 28.23 | 27.52 | 27.88N _s |
| Escurrido V _s | 4.12 | 4.78 | 4.45N _s |
| Aplicado V _e | 32.35 | 32.30 | 32.33N _s |
| Eficiencias (%) | | | |
| Infiltración η_z | 62 | 64 | — |
| Volumen η_v | 87 | 85 | — |
| Aplicación η | 54 | 54 | — |
| Ahorro de agua A _g | 6 | 6 | — |

Tabla 18. Gastos de diseño por surco. Parcela Fangmeier-Ramsey

| tiempo (min) y dosis (cm) | $N_s/2$ | $N_s/2$ | M_r |
|-------------------------------|------------------------|---------|--------------|
| | Gastos por surco (l/s) | | |
| $0 < t \leq 41$ | 0.6 | — | $0.3N_s$ |
| $41 < t \leq 82$ | — | 0.6 | $0.3N_s$ |
| $82 < t \leq 367$ | 0.3 | 0.3 | $0.3N_s$ |
| t. avance t_a (min) | 41 | 41 | — |
| t. riego T_r (min) | 367 | 326 | — |
| dosis Z_m (cm) | 6.7 | 6.7 | — |
| lám. prom. \bar{Z} (cm) | 8.1 | 7.6 | — |
| Volúmenes por surco (m^3) | | | ΣVol |
| Útil V_a | 4.56 | 4.56 | $4.56N_s$ |
| Infiltrado V_z | 4.97 | 4.97 | $4.97N_s$ |
| Escurrido V_s | 1.64 | 1.62 | $1.63N_s$ |
| Aplicado V_e | 6.61 | 6.59 | $6.60N_s$ |
| Eficiencias (%) | | | |
| Infiltración η_z | 92 | 92 | — |
| Volumen η_v | 75 | 75 | — |
| Aplicación η | 69 | 69 | — |
| Ahorro de agua A_g | 19 | 19 | — |

Tabla 19. Gastos de diseño por surco. Surco II

| tiempo (min) y dosis (cm) | N _s /2 | N _s /2 | M _r |
|---------------------------------------|------------------------|-------------------|--------------------|
| | Gastos por surco (l/s) | | |
| 0 < t ≤ 17 | 0.6 | — | 0.3N _s |
| 17 < t ≤ 34 | — | 0.6 | 0.3N _s |
| 34 < t ≤ 250 | 0.3 | 0.3 | 0.3N _s |
| t. avance t _a (min) | 17 | 17 | — |
| t. riego T _r (min) | 250 | 233 | — |
| dosis Z _m (cm) | 5.7 | 5.8 | — |
| lám. prom. \bar{Z} (cm) | 9.2 | 9.2 | — |
| Volúmenes por surco (m ³) | | | ΣVol |
| Útil V _a | 2.73 | 2.73 | 2.73N _s |
| Infiltrado V _z | 4.26 | 4.25 | 4.26N _s |
| Escurrido V _s | 0.24 | 0.25 | 0.25N _s |
| Aplicado V _e | 4.50 | 4.50 | 4.50N _s |
| Eficiencias (%) | | | |
| Infiltración η _z | 64 | 64 | — |
| Volumen η _v | 95 | 94 | — |
| Aplicación η | 61 | 61 | — |
| Ahorro de agua A _g | 2 | 2 | — |

5.3 Relaciones entre el corte posterior (CP) y el riego continuo óptimo (RCO)

En la tabla 20 se anotan los volúmenes infiltrados, escurridos y de ingreso para el RCO y el CP (las tablas C.13 a C.18 del apéndice C son continuación de la tabla 20). Se anota también el ahorro de agua en % respecto al RCO. El ahorro máximo

es del 14 %, por ello, si un surco en riego continuo con eficiencia menor a la máxima se riega con corte posterior, el ahorro de agua puede ser mayor del 14 %.

El ahorro de agua se calcula con la expresión

$$A_g = 1 - \eta/\eta_c \quad (26)$$

donde η_c es la eficiencia de aplicación en corte posterior.

A través de modelos de regresión similares al de RCO para las eficiencias η y η_c , con las variables independientes S_0 , K , n , w , h , Z_m y D_s se obtiene que

$$\eta = 1.52 S_0^{-0.044} K^{0.097} n^{0.165} w^{0.012} h^{0.036} Z_m^{-0.029} D_s^{-0.064} \quad (27)$$

con un coeficiente de correlación de 0.88, y

$$\eta_c = 1.91 S_0^{-0.05} K^{0.103} n^{0.111} w^{-0.017} h^{0.046} Z_m^{-0.040} D_s^{-0.122} \quad (28)$$

el coeficiente de correlación para esta ecuación es 0.88.

Al sustituir estas dos ecuaciones en la ecuación 26

$$A_g = 1 - 0.8 S_0^{0.006} K^{-0.006} n^{0.054} w^{0.029} h^{-0.01} Z_m^{0.011} D_s^{0.058} \quad (29)$$

donde A_g , como las eficiencias, se encuentra en decimal, S_0 en %, K en cm/min, n en $s/m^{1/3}$, w , h , Z_m y D_s en cm.

El valor de los exponentes indica ahora que las tres variables más importantes en el ahorro de agua son la separación entre surcos, el coeficiente de rugosidad y la humedad inicial.

Tabla 20. Volúmenes del riego continuo óptimo y corte posterior

| Datos básicos | | | | RCO | | | CP | | | Ahorro de agua (%) |
|---------------|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| Ls (m) | Zm (m) | Ds (m) | Va (m ³) | Vz (m ³) | Vs (m ³) | Ve (m ³) | Vzc (m ³) | Vsc (m ³) | Vec (m ³) | |
| 190 | 0.150 | 1.00 | 28.79 | 37.85 | 10.28 | 48.13 | 37.30 | 5.81 | 43.11 | 10.43 |
| 305 | 0.145 | 0.88 | 38.82 | 51.24 | 16.23 | 67.47 | 51.33 | 9.77 | 61.10 | 9.44 |
| 230 | 0.141 | 0.81 | 26.29 | 34.81 | 10.09 | 44.89 | 34.85 | 6.06 | 40.91 | 8.87 |
| 170 | 0.138 | 0.97 | 22.70 | 29.87 | 8.44 | 38.30 | 29.74 | 5.08 | 34.82 | 9.09 |
| 235 | 0.134 | 0.67 | 20.96 | 27.13 | 7.19 | 34.32 | 27.54 | 3.45 | 30.98 | 9.73 |
| 290 | 0.130 | 0.90 | 34.06 | 44.46 | 14.02 | 60.48 | 48.33 | 7.92 | 56.25 | 6.99 |
| 220 | 0.126 | 0.65 | 18.07 | 23.65 | 6.76 | 30.42 | 23.35 | 3.38 | 26.74 | 12.10 |
| 275 | 0.123 | 0.89 | 30.04 | 41.06 | 13.48 | 54.54 | 42.15 | 7.76 | 49.91 | 8.49 |
| 190 | 0.119 | 0.80 | 18.05 | 24.04 | 7.69 | 31.73 | 24.33 | 4.54 | 28.87 | 9.01 |
| 210 | 0.115 | 0.73 | 17.71 | 23.34 | 7.07 | 30.41 | 23.53 | 3.91 | 27.44 | 9.77 |
| 260 | 0.111 | 0.84 | 24.25 | 33.74 | 12.67 | 46.41 | 33.97 | 7.63 | 41.60 | 10.36 |
| 190 | 0.108 | 0.79 | 16.05 | 21.65 | 6.82 | 28.48 | 21.38 | 3.84 | 25.22 | 11.45 |
| 155 | 0.104 | 0.93 | 14.98 | 20.46 | 6.37 | 26.83 | 20.61 | 3.45 | 24.06 | 10.32 |
| 195 | 0.100 | 0.82 | 16.09 | 21.86 | 7.01 | 28.87 | 21.89 | 3.79 | 25.68 | 11.05 |
| 155 | 0.096 | 0.98 | 14.67 | 19.51 | 6.00 | 25.51 | 20.93 | 3.27 | 24.19 | 5.17 |
| 200 | 0.093 | 0.75 | 13.81 | 19.27 | 6.34 | 25.61 | 19.45 | 3.60 | 23.06 | 9.96 |
| 315 | 0.089 | 0.86 | 24.13 | 31.93 | 9.67 | 41.60 | 32.76 | 4.73 | 37.49 | 9.88 |
| 210 | 0.085 | 0.69 | 12.39 | 16.71 | 5.34 | 22.06 | 17.12 | 2.49 | 19.62 | 11.06 |
| 325 | 0.081 | 0.85 | 22.50 | 30.22 | 10.12 | 40.34 | 30.76 | 5.09 | 35.85 | 11.13 |
| 235 | 0.078 | 0.76 | 13.85 | 19.63 | 7.31 | 26.94 | 19.68 | 4.16 | 23.84 | 11.51 |
| 185 | 0.074 | 0.96 | 13.10 | 18.43 | 6.24 | 24.66 | 19.42 | 3.41 | 22.82 | 7.46 |
| 240 | 0.070 | 0.71 | 11.88 | 17.05 | 6.61 | 23.66 | 17.32 | 3.61 | 20.93 | 11.54 |
| 365 | 0.066 | 0.94 | 22.80 | 33.18 | 14.05 | 47.23 | 34.54 | 8.01 | 42.55 | 9.91 |
| 290 | 0.063 | 0.77 | 13.99 | 20.33 | 8.52 | 28.84 | 20.42 | 4.93 | 25.35 | 12.10 |
| 425 | 0.059 | 0.92 | 22.88 | 33.57 | 14.74 | 48.31 | 34.39 | 8.47 | 42.87 | 11.26 |
| 345 | 0.055 | 0.72 | 13.68 | 20.40 | 9.27 | 29.31 | 19.84 | 5.32 | 25.16 | 14.16 |
| 405 | 0.050 | 0.68 | 13.78 | 19.40 | 7.37 | 26.76 | 21.11 | 4.55 | 25.66 | 4.11 |

En el capítulo 4 se mostraron los resultados del modelo matemático para un diseño en RCO con una confiabilidad del 95 %, donde $\eta = 54 \%$. En CP se alcanza una eficiencia de aplicación $\eta_c = 62 \%$ al optimizar la longitud (100 m) con el gasto máximo (2 l/s) que permite la pendiente (0.3 %). El tiempo de avance $t_a = 25$ min y el tiempo de riego $T_r = 157$ min. En RCO se conserva la longitud y se optimiza el gasto (1.5 l/s) para una eficiencia del 54 %. Por tanto, el ahorro de agua por regar con el método de corte posterior es $A_g = 100(1 - \eta/\eta_c) = 100(1 - 0.54/0.62) = 13 \%$. Este ahorro es mayor que el obtenido para una longitud de 52.5 m (2 %), pero con una relación mayor entre el gasto y la longitud por cada 100 m en RCO, debido al diseño conservador por emplear los valores más desfavorables de la conductividad hidráulica y el coeficiente de rugosidad inicial.

Por otra parte, para una revisión preliminar de surcos sin el empleo del modelo matemático se presentan las figuras 15 y 16, donde se muestran, en el eje vertical, eficiencias menores a la máxima para surcos con longitudes y gastos diferentes a los óptimos. La figura 15 se refiere al riego continuo y la figura 16 al método de corte posterior. En el eje horizontal se identifican los parámetros adimensionales

$$\xi = \frac{Q_r S_0 L_s}{0.42 L_r} \quad \text{Y} \quad \xi_c = \frac{Q_r S_0 L_s}{0.6 L_r}$$

donde L_s es la longitud óptima calculada con la ecuación 25; S_0 la

pendiente en % (ver ecuación 24), Q_r el gasto inicial real en l/s y L_r la longitud real del surco.

Con el fin de ilustrar el uso de estas gráficas se presenta el siguiente ejemplo:

Supóngase un surco con $S_0 = 0.4$ %, $K = 0.017$ cm/min, $n = 0.04$, $w = 1$ cm, $h = 5.4$ cm, $Z_m = 7.5$ cm, $D_s = 75$ cm, $L_r = 275$ m y $Q_r = 1$ l/s en riego continuo.

Con las variables S_0 , K , n , w , h , Z_m y D_s la longitud óptima obtenida con la ecuación 25 es $L_s = 550$ m para un gasto $Q_0 = 0.42/S_0 = 0.42/0.4 = 1.05$ l/s. La eficiencia máxima en riego continuo para esta longitud y gasto sería, según la ecuación 27, $\eta = 0.48$. En corte posterior, la eficiencia máxima para la longitud óptima y gasto $Q_0 = 0.6/S_0 = 0.6/0.4 = 1.5$ l/s es $\eta_c = 0.55$ (ecuación 28).

Para las condiciones reales de longitud y gasto

$$\xi = \frac{Q_r S_0 L_s}{0.42 L_r} = \frac{1 \cdot 0.4 \cdot 550}{0.42 \cdot 275} = 1.9 \quad \text{y} \quad \xi_c = \frac{Q_r S_0 L_s}{0.6 L_r} = \frac{1 \cdot 0.4 \cdot 550}{0.6 \cdot 275} = 1.3$$

Lo primero que debe observarse es que para $\xi = 1$ en riego continuo (figura 15), la eficiencia máxima se localiza en la parte inferior del intervalo de resultados; en cambio, para corte posterior (figura 16), la eficiencia máxima se localiza en la parte media, por lo que las lecturas que se hagan para otros valores de ξ y ξ_c también deben localizarse en puntos semejantes de dichos intervalos. Así, en la figura 15 para riego continuo, cuando $\xi = 1.9$, se lee un valor aproximado $\eta = 0.40$, y en la figura 16 para corte posterior, cuando $\xi_c = 1.3$, el valor

aproximado es $\eta_c = 0.53$. El tiempo de riego en el corte posterior, si se acepta el plan de riego de Humpherys, se calcula con la expresión

$$T_c = \frac{L_r Z_m D_s}{\eta_c (Q_r/2)} = \frac{275 * 0.075 * 0.75 * 1000}{0.53 * (1/2) * 60} = 973 \text{ min} = 16.2 \text{ h}$$

Es posible un incremento de la eficiencia en riego continuo si el gasto se reduce de 1 l/s a 0.5 l/s, con la condición de duplicar el número de surcos para que no se altere el módulo de riego; entonces, $\xi = (0.5 * 0.4 * 550) / (0.42 * 275) = 0.95$. De la figura 15, se lee un valor aproximado $\eta = 0.48$; por tanto, el incremento de la eficiencia es del 8 %, con un tiempo de riego

$$T_r = \frac{275 * 0.075 * 0.75 * 1000}{0.48 * 0.5 * 60} = 1074 \text{ min} = 17.9 \text{ h}$$

Ahora bien, si el método de corte posterior se compara con la eficiencia más alta del riego continuo, el incremento de la eficiencia es $\Delta\eta = 0.53 - 0.48 = 0.05 = 5 \%$, para un ahorro de agua $A_g = 1 - 0.48/0.53 = 0.09 = 9 \%$. Si la comparación se hace con el riego continuo en condiciones reales el ahorro de agua es $A_g = 1 - 0.40/0.53 = 0.245 = 24.5 \%$, que es muy favorable.

Los resultados del modelo matemático para riego continuo en condiciones reales son $Q_r = 1 \text{ l/s}$, $\eta = 0.38$ y $T_r = 673 \text{ min}$. Para riego continuo con el doble de los surcos $Q_0 = 0.5 \text{ l/s}$, $\eta = 0.48$ y $T_r = 1069 \text{ min} = 17.8 \text{ h}$. En corte posterior, $Q_r = 1 \text{ l/s}$, $\eta_c = 0.51$ y $T_c = 1015 \text{ min} = 16.9 \text{ h}$, con un tiempo de avance $t_a = 70 \text{ min}$. Las lecturas de las eficiencias son parecidas, con un error del 2 % para el corte posterior, pero con un ahorro de agua $A_g = 1 -$

$0.48/0.51 = 0.06 = 6 \%$, menor en 3 % al obtenido con las gráficas. Respecto a los tiempos de riego, los valores son semejantes.

La conclusión de la revisión es que debe reducirse el gasto de 1 l/s a 0.5 l/s en riego continuo, pero es preferible regar con el método de corte posterior sin modificar el gasto.

Si fuera posible cambiar el gasto, esto es, que el problema fuera de diseño, la eficiencia máxima se obtiene cuando $\xi = 1$ y $\xi_c = 1$, por lo que el gasto óptimo es

$$Q_r = \frac{0.42L_r}{S_0 L_s} \quad (30)$$

para riego continuo, y

$$Q_r = \frac{0.6L_r}{S_0 L_s} \quad (31)$$

para corte posterior.

En el surco que se revisó arriba, los gastos óptimos son $Q_r = (0.42*275)/(0.4*550) = 0.525$ l/s en riego continuo y $Q_r = (0.6*275)/(0.4*550) = 0.75$ l/s en corte posterior, con eficiencias cercanas a las calculadas con las ecuaciones 27 y 28, respectivamente. Con dichas eficiencias, desde un punto de vista práctico, el tiempo de riego para el método tradicional es el mismo, pero en corte posterior

$$T_c = \frac{275*0.075*0.75*1000}{0.53*(0.375)*60} = 1297 \text{ min} = 21.6 \text{ h}$$

Las eficiencias de aplicación y tiempos de riego que calcula el modelo matemático con los gastos anteriores son $\eta = 0.48$ y $T_r = 1029$ min = 17.2 h en riego continuo, y $\eta_c = 0.56$, $t_a = 102$ min y $T_c = 1231$ min = 20.5 h en corte posterior. En este caso el ahorro

de agua sería $A_g = 1 - 0.48/0.56 = 0.14 = 14 \%$, mayor en 8 % al calculado en la revisión porque ahora los gastos son los óptimos en los dos métodos de riego; en cambio, en la revisión el gasto es óptimo para el riego continuo, pero no para el corte posterior.

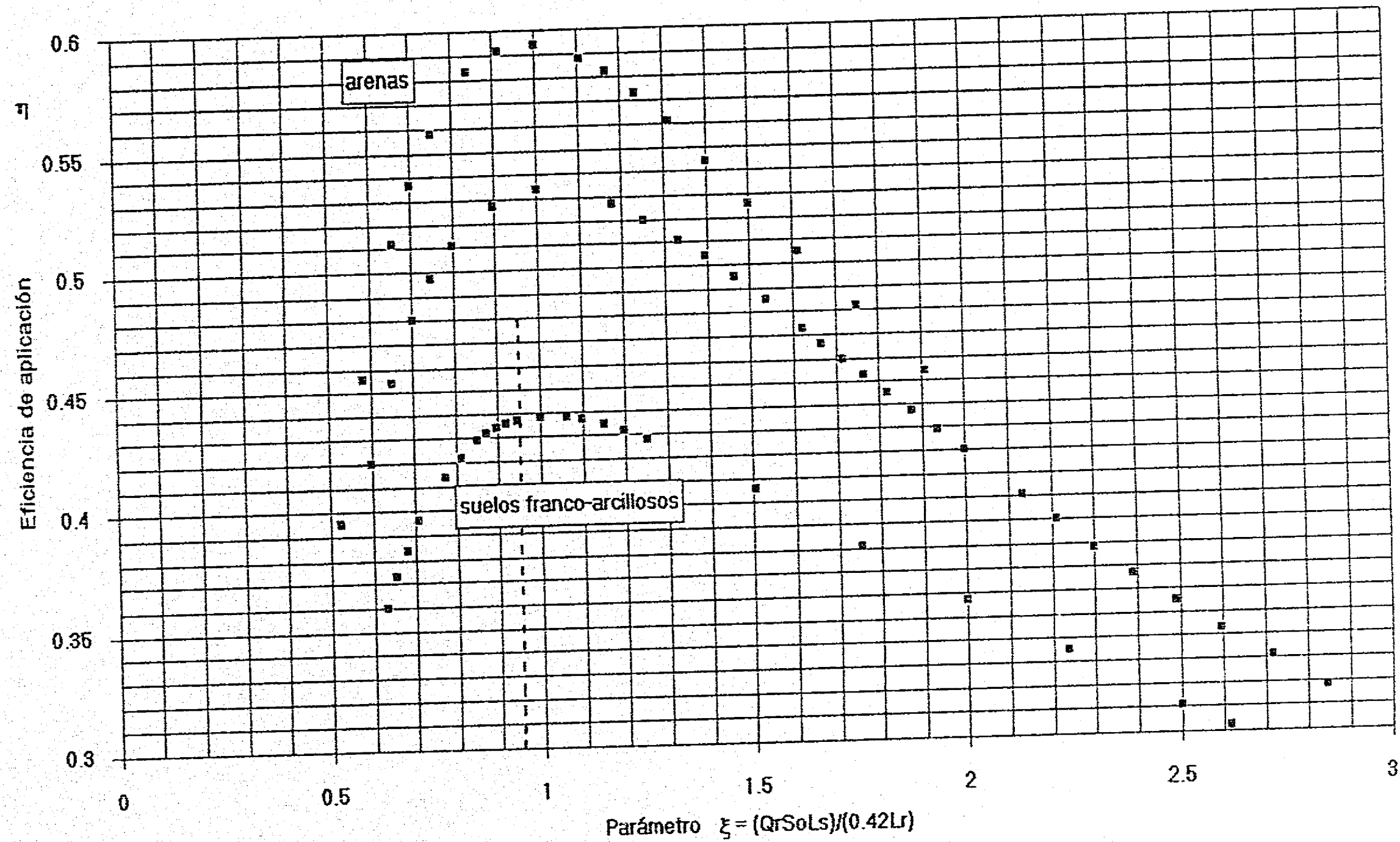
Conviene insistir en la utilidad de las ecuaciones 25, 27, 28, 30 y 31, que permiten diseñar surcos para cualquier longitud sin necesidad del modelo matemático, siempre que los datos de las siete variables independientes se encuentren en los intervalos empleados en las simulaciones numéricas. Por tanto, cuando sea posible regar con el método de corte posterior, la ecuación que calcula el gasto de diseño Q_r para una longitud dada L_r se obtiene al sustituir el valor L_s de la ecuación 25 en la 31, esto es

$$Q_r = 0.12 L_r S_0^{-0.48} K^{0.91} n^{0.29} w^{-0.12} h^{0.36} Z_m^{-0.28} D_s^{0.08} \quad (32)$$

donde Q_r está en l/s, L_r en m y las otras siete variables tienen las mismas dimensiones de la ecuación 25.

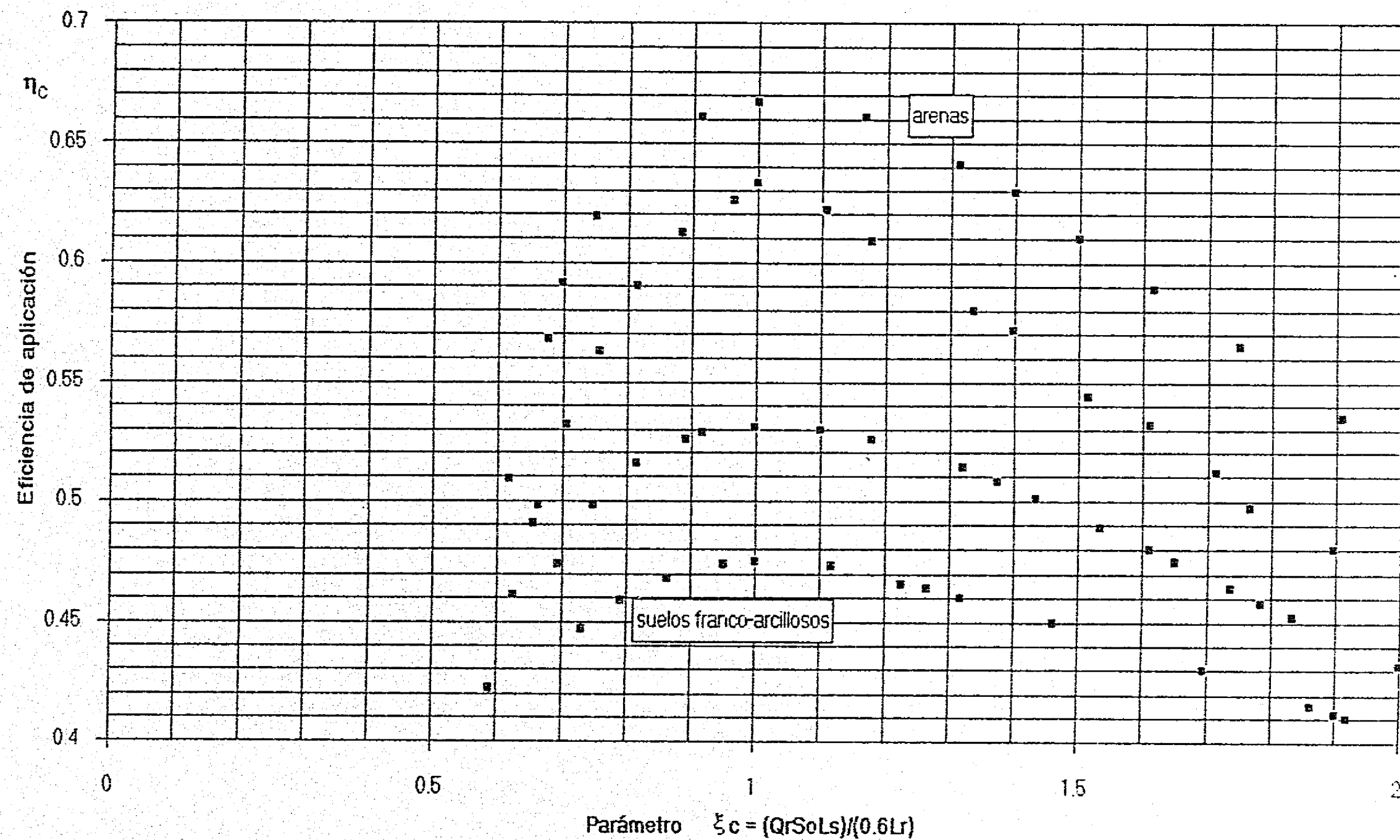
Con el ejemplo anterior, se comprueba una vez más que el método de corte posterior incrementa la eficiencia del riego continuo óptimo, por lo que sólo resta aplicarlo en el campo para que el trabajo teórico y experimental dedicado a esta investigación sea útil.

Figura 15. Gráfica para revisión de surcos. Riego continuo



ESTR. TESIS M. DEPT.
SALV. DE LA BIBLIOTECA

Figura 16. Gráfica para revisión de surcos. Método de corte posterior



6. CONCLUSIONES

El incremento de la eficiencia del riego por surcos con el método de corte posterior requiere partir del riego continuo óptimo, esto se demuestra gracias al uso de un modelo matemático completo en diferencias finitas que emplea la fórmula de Green-Ampt para infiltrar el agua en el perímetro mojado del surco con dos coeficientes de rugosidad, uno grande en la etapa de avance y otro común en las etapas de llenado y receso.

En el esquema numérico se empleen dos factores de peso, uno tradicional que promedia el tirante en el tiempo con valor igual a 0.70, y otro que promedia el gasto en el espacio, estimado en 0.75, ambos ayudan a usar intervalos de tiempo mayores (hasta 60 segundos) para acelerar el proceso de cálculo, empero, es más notable la influencia del último en la estabilidad de la solución numérica si es mayor de 0.5, que es el valor acostumbrado.

En el análisis de sensibilidad de las variables que determinan la longitud óptima de un surco, se usa el método tradicional de comparación de los exponentes en el modelo de regresión lineal múltiple, complementado con el método del segundo momento estadístico para las variables con mayor incertidumbre (conductividad hidráulica, diferencia de tensiones y humedades del suelo, coeficiente de rugosidad y humedad inicial). Se encuentra que la conductividad hidráulica, la pendiente, la diferencia de tensiones y humedades, el coeficiente de rugosidad, la dosis, la humedad inicial del suelo y la separación entre surcos son las variables independientes dominantes en el diseño de la longitud del surco. El coeficiente de rugosidad inicial (mayor hasta tres veces al valor para suelo mojado), empleado sólo durante la etapa de avance del agua, no influye en el diseño de la longitud; pero sí en el tiempo de avance, en el tiempo de riego y en la eficiencia de aplicación (hasta 2 % menor en los casos desfavorables).

La humedad inicial no tiene influencia preponderante en el diseño de la longitud del surco, pero sí en el incremento del ahorro de agua en suelos con menor humedad inicial (ecuación 29), una diferencia de 2 cm incrementa en 3 % el ahorro de agua, por lo que se justifica haberla incluido en el cálculo al usar la fórmula de Green y Ampt en lugar de la de Kostiaikov, que no la toma en cuenta.

El gasto de alimentación, tanto en riego continuo como en corte posterior, se calcula en función de la pendiente para

obtener la longitud óptima. El gasto inicial en corte posterior debe ser del orden de 1.43 veces el gasto óptimo del riego continuo para que se logre incrementar la eficiencia de aplicación. El método de corte posterior produce mayores ahorros de agua cuando la separación entre surcos, el coeficiente de rugosidad y la humedad inicial tienen valores bajos. Los ahorros de agua calculados respecto al riego continuo óptimo con el modelo matemático son del 2 al 14 %, con un promedio del 10 %, dicho ahorro se relaciona en forma directa con la eficiencia en volumen, ya que es la eficiencia que se incrementa por la reducción de las pérdidas por coleos. En cuanto a las eficiencias de infiltración, en los dos métodos de riego son muy parecidas.

En el cálculo de la infiltración se evita calcular la lámina acumulada de infiltración en cada intervalo de tiempo para volver a sustituirla en la fórmula de Green y Ampt, ya que se prefieren usar los volúmenes acumulados y no las láminas de agua (la transformación de lámina de agua a volumen y viceversa es a través del ancho entre surcos y la longitud de los tramos de surco).

Dado el pequeño porcentaje de error en los volúmenes de infiltración, menores al 3 %, calculados en las simulaciones numéricas respecto a los volúmenes medidos, se concluye que el modelo matemático reproduce en forma aceptable el proceso de riego por surcos.

La comparación de las eficiencias de aplicación calculadas para riego continuo y con el método de corte posterior confirman que es conveniente emplear el segundo método con el fin de tener

ahorros importantes de agua y que, en caso de partir de un buen diseño para riego continuo, es posible acercarse a eficiencias teóricas del 70 % al regar la parcela con el plan propuesto por Humpherys, que resulta ser el más práctico para el manejo del agua sin requerir del uso de alguna estructura hidráulica adicional. Su desventaja es que incrementa también los tiempos de riego, en surcos largos este incremento llega al 30 %. Además, en surcos con pendiente fuerte (mayor de 0.6 %) el gasto reducido puede llegar a ser menor de 0.5 l/s, que no es recomendable en la práctica.

Se demuestra que para incrementar la eficiencia de aplicación con el corte posterior no es suficiente la reducción del gasto de riego continuo a la mitad, sino que es necesario buscar la máxima eficiencia a través de la interrelación de las eficiencias parciales de infiltración y volumen con la aplicación de un gasto inicial mayor al del riego continuo óptimo.

Los resultados del modelo físico han permitido calibrar el modelo numérico y comprobar que el método de corte posterior incrementa la eficiencia total, hasta un 64 %, gracias a que se aplicaron gastos pequeños en condiciones ideales. Es posible que en situaciones reales en el campo con surcos de mayor longitud se alcance la misma eficiencia.

El método experimental hizo ver que el grado de compactación del suelo es significativo y es una variable adicional que se toma en cuenta indirectamente en la fórmula de Green y Ampt a través de la conductividad hidráulica. Como se sabe, a menor grado de

compactación mayor conductividad hidráulica..

El modelo matemático es factible de usarse en el diseño de riego por surcos, tanto para riego continuo como para el método de corte posterior, en busca siempre de la máxima eficiencia de aplicación para un gasto que no produzca erosión en el surco, y de acuerdo a mediciones o estimaciones aceptables de la conductividad hidráulica, la diferencia de tensiones y humedades del suelo, y el coeficiente de rugosidad de Manning. O bien, puede emplearse en diseñar la longitud del surco para un gasto conocido en función de la pendiente, como ha sido el caso en este trabajo.

Se presentan tres ecuaciones de regresión lineal múltiple (ecuaciones 25, 27 y 28) con datos de 189 surcos; útiles para predecir la longitud de diseño del surco y las eficiencias máximas de aplicación en riego continuo y corte posterior, las tres ecuaciones están en función de las variables independientes ya mencionadas. Deben emplearse dentro de los intervalos considerados en la simulación numérica.

Se incluyen dos gráficas para revisión de surcos, una para riego continuo y otra para corte posterior, donde los gastos ya no son determinados en función de la pendiente, así como longitudes diferentes a la óptima calculada con la ecuación 25.

A través de la ecuación 32 se obtiene el gasto de diseño óptimo para aplicar el método de corte posterior en surcos con longitudes fijas sin necesidad de emplear el modelo matemático, el gasto óptimo para riego continuo vale 0.7 veces el gasto anterior. Además, con las eficiencias máximas (ecuaciones 27 y 28) y la

fórmula de la eficiencia (ecuación 1) se calcula el tiempo de riego aproximado.

Como investigación futura se espera que el modelo pueda ser validado en el diseño de parcelas reales en el campo.

REFERENCIAS

- Bautista, E. y W. W. Wallender. 1992. *Hydrodynamic Furrow Irrigation Model with Specified Space Steps*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 118, No. 3.
- Bautista, E. y W. W. Wallender. 1993a. *Reliability of Optimized Furrow-Infiltration Parameters*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 119, No. 5.
- Bautista, E. y W. W. Wallender. 1993b. *Optimal Management Strategies for Cutback Furrow Irrigation*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 119, No. 6.
- Cemagref et Groupe France Agricole. 1990. *Irrigation*. R. Ned-ha, Montpellier, France.
- Clapp, R. B. y G. M. Hornberger. 1978. *Empirical Equations for Some Soil Hydraulic Properties*". Water Resources Research, Vol. 14, No. 4.
- Cuenca, R. H. 1989. *Irrigation System Design*. Prentice Hall. New Jersey, U.S.A.
- Chu, S. T. 1978. *Infiltration During un Unsteady Rain*. Water Resources Research, Vol. 14, No. 3.
- Elliot, R. L., W. R. Walker y G. V. Skogerboe. 1982. *Zero-Inertia Modeling of Furrow Irrigation Advance*. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 108, No. IR3.
- English, M. 1990. *Deficit Irrigation I. Analytical Framework*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 116, No. 3.
- García, V. N. 1991. *Riego Intermitente*. Revista Ingeniería

- Hidráulica en México, IMTA, Vol. VI, No. 2.
- Jensen, M. E. ed. 1980. *Design and Operation of Farm Irrigation Systems*. American Society of Agricultural Engineers.
- Juana, L. y A. Losada. 1994. *Semejanza Hidrodinámica en Riegos por Superficie*. Revista Ingeniería del Agua, Vol. 1, No. 1, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Li, W. H. 1972. *Differential Equations of Hydraulic Transients, Dispersion, and Groundwater Flow*. Prentice-Hall.
- Liggett, J. A. y J. A. Cunge. 1975. *Numerical Methods of Solution of the Unsteady Flow Equations*. Unsteady Flow in Open Channels, Vol. 1, Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado.
- Sánchez, J. L., R. B. Carmona, R. Domínguez y O. A. Fuentes. 1989. *Aplicaciones de Análisis Estocástico a Problemas Hidráulicos*. Instituto de Ingeniería. UNAM.
- Sánchez, J. L. y O. A. Fuentes. 1992. *Posibilidades de Incrementar la Eficiencia del Riego por Surcos*. Informe Interno del Instituto de Ingeniería, UNAM.
- SARH, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1983. Dirección General de Grande Irrigación.
- Schmitz, G. H. y G. J. Seus. 1992. *Mathematical Zero-Inertia Modeling of Surface Irrigation: Advance in Furrows*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 118, No. 1.
- Singh, V. P. y F. X. Yu. 1990. *Derivation of Infiltration Equation Using Systems Approach*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 116, No. 6.

- Stewart, I. and R. M. Hagan. 1973. *Functions to Predict Effects of Crop Water Deficits*. Journal of the Irrigation and Drainage Division. Vol. 99, No. IR4.
- Taylor, S. A. y G. L. Ashcroft. 1972. *Physical Edaphology*. W. H. Freeman.
- Vázquez, E. 1988. *Hacia la Adimensionalidad Completa del Flujo Gradualmente Variado*. Revista Universidad y Ciencia, Vol 5, No. 10, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Vázquez, E. y J. L. Sánchez. 1993. *Método Numérico para Modelar el Riego por Surcos*. Revista de Ingeniería, Vol. XIII, No.2, UNAM.
- Vázquez, E. 1994. *Calibración de un Modelo Hidrodinámico para Riego por Surcos y Aplicaciones al Método de Corte Posterior*. Revista de Ingeniería, Vol. XIV, No. 4, UNAM.
- Vázquez, E. y J. Gracia. 1995. *Criterio de Diseño para el Riego por Surcos al Emplear el Método de Corte Posterior (Cut-back)*. Enviado a la Revista de Ingeniería.
- Walker, R. y G. Skogerboe. 1987. *Surface Irrigation*. Prentice Hall. New Jersey, U.S.A.
- Wallender, W. W. y M. Rayej. 1990. *Shooting Method for Saint Venant Equations of Furrow Irrigation*. Journal of the Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 116, No. 1.
- Wallender, W. W. 1994. *Curso de Riego por Surcos*. Universidad de California en Davis.
- Wylie, E. B. y V. L. Streeter. 1978. *Fluid Transients*. McGraw-Hill.

Yu, F. X. y V. P. Singh. 1990. *Analytical Model for Furrow Irrigation*. Journal of the Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 116, No. 2.

APÉNDICES

APÉNDICE A. ECUACIONES DE SAINT-VENANT

Las ecuaciones dinámica y de continuidad de Saint-Venant pueden obtenerse a partir del análisis de un flujo en un canal prismático de pendiente suave donde la distribución de presiones sea hidrostática (Li, 1972). Supóngase que en la figura A.1 la variación de la presión p en un tramo Δx sea (Liggett, 1975)

$$p - (p + \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x) = - \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x$$

La fuerza debida a la variación de la presión es

$$F_p = - \rho g \Delta x \int_0^y \frac{\partial}{\partial x} (z + y) B dy$$

donde ρ es la densidad del agua, z la cota de la plantilla, x la dirección inclinada del canal, y el tirante del flujo y B el ancho del canal a la altura y .

Si el canal es prismático no hay variación del ancho del

canal en la dirección x, entonces $\partial B/\partial x = 0$. La fuerza queda

$$F_p = - \rho g \Delta x \frac{\partial z}{\partial x} \int_0^y B dy - \rho g \Delta x \frac{\partial y}{\partial x} \int_0^y B dy$$

La integral es el área A de la sección transversal del canal, por tanto

$$F_p = - \rho g \Delta x A \frac{\partial z}{\partial x} - \rho g \Delta x A \frac{\partial y}{\partial x}$$

La fuerza de fricción que se opone al movimiento es (Wylie, 1978)

$$F_f = - \tau P \Delta x$$

donde τ es el esfuerzo cortante que actúa en el fondo del canal y P es el perímetro mojado.

Por otra parte, la cantidad de movimiento (masa por velocidad) es

$$MV = \rho \Delta x AV$$

Por la segunda ley de Newton, el cambio de la cantidad de movimiento es igual a la suma de fuerzas

$$\frac{d}{dt} (\rho \Delta x AV) = - \rho g \Delta x A \frac{\partial z}{\partial x} - \rho g \Delta x A \frac{\partial y}{\partial x} - \tau P \Delta x$$

La cantidad de movimiento varía en la dirección x, así como en el tiempo, de donde

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho \Delta x AV) \frac{dx}{dt} + \frac{\partial}{\partial t} (\rho \Delta x AV) = - \rho g \Delta x A \frac{\partial y}{\partial x} - \rho g \Delta x A \frac{\partial z}{\partial x} - \tau P \Delta x$$

Ya que el gasto $Q = AV$, $dx/dt = V$ y $\partial z/\partial x = -S_0$, donde S_0 es la pendiente del canal, se tiene

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho \Delta x QV) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho \Delta x Q) = - \rho g \Delta x A \frac{\partial y}{\partial x} + \rho g \Delta x A S_0 - \tau P \Delta x$$

Con el desarrollo de la primera derivada

$$\rho \Delta x Q \frac{\partial V}{\partial x} + \rho \Delta x V \frac{\partial Q}{\partial x} + \rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} + \rho g \Delta x A \frac{\partial y}{\partial x} + \tau P \Delta x - \rho g \Delta x A S_0 = 0$$

Al dividir la ecuación entre $\rho g \Delta x A$ se escribe

$$\frac{Q}{gA} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\tau P}{\rho g A} - S_0 = 0$$

El quinto término es la pendiente de fricción S_f , entonces la ecuación dinámica de Saint-Venant es

$$\frac{Q}{gA} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial y}{\partial x} + S_f - S_0 = 0 \quad (\text{A.1})$$

La ecuación de continuidad se obtiene a partir de la diferencia de gastos (entrada menos salida), igualada al cambio de almacenaje en el elemento diferencial Δx considerado

$$AV - (A + \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x) (V + \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x) = \frac{\partial A}{\partial t} \Delta x$$

Si se desprecia el término multiplicado por $(\Delta x)^2$, queda

$$- V \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x - A \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x = \frac{\partial A}{\partial t} \Delta x$$

En función del gasto

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (\text{A.2})$$

Con el fin de introducir también en forma directa el gasto en la ecuación dinámica, los dos primeros términos de la ecuación A.1 se escriben

$$\frac{Q}{gA} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q}{gA} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q}{A} \right) + \frac{Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x}$$

Por la regla de la cadena

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial x} = B \frac{\partial y}{\partial x}$$

donde $B = \partial A / \partial y$. Por tanto, la ecuación dinámica queda

$$\left(1 - \frac{Q^2 B}{gA^3}\right) \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + S_f - S_0 = 0 \quad (\text{A.3})$$

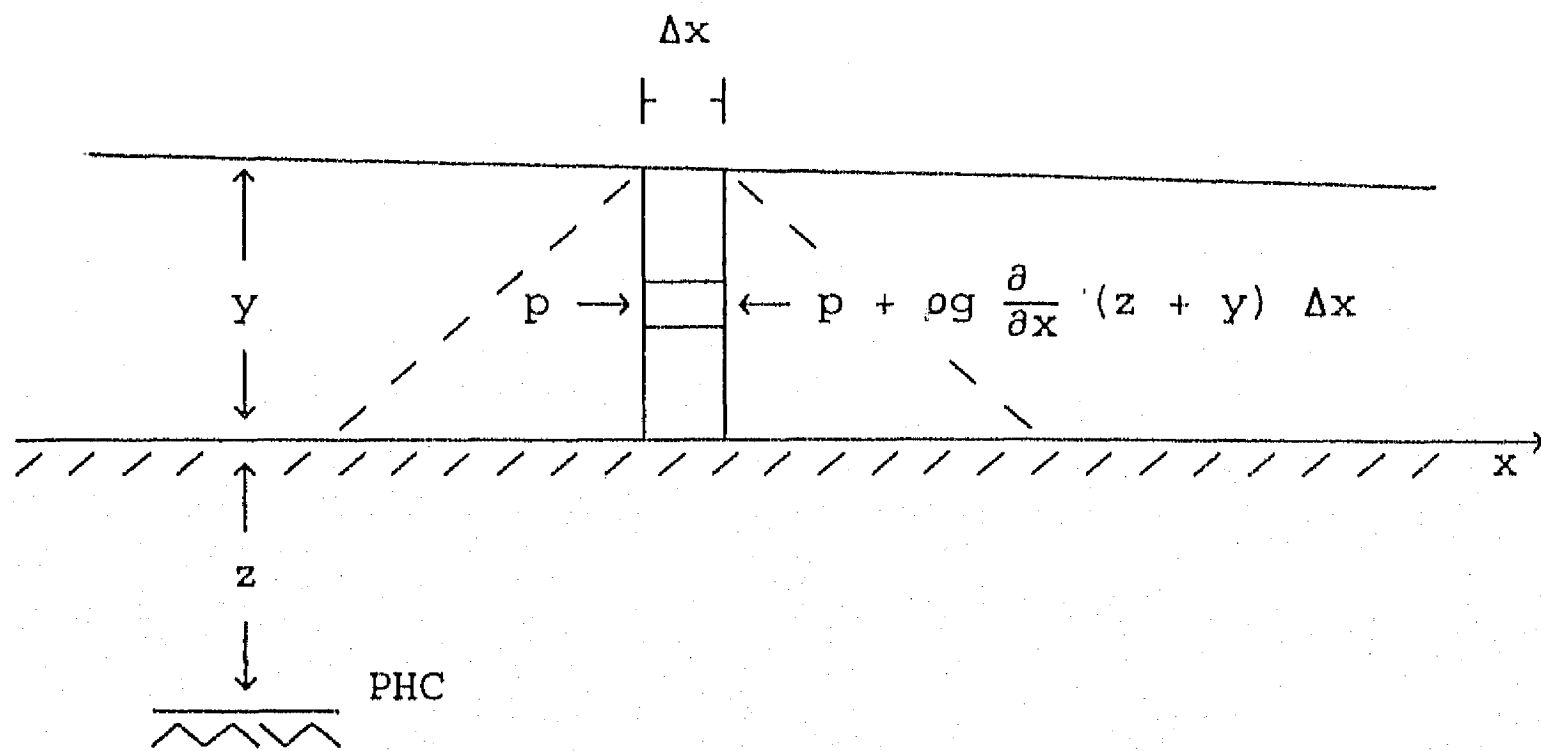


Figura A.1. Corte longitudinal del flujo en un canal

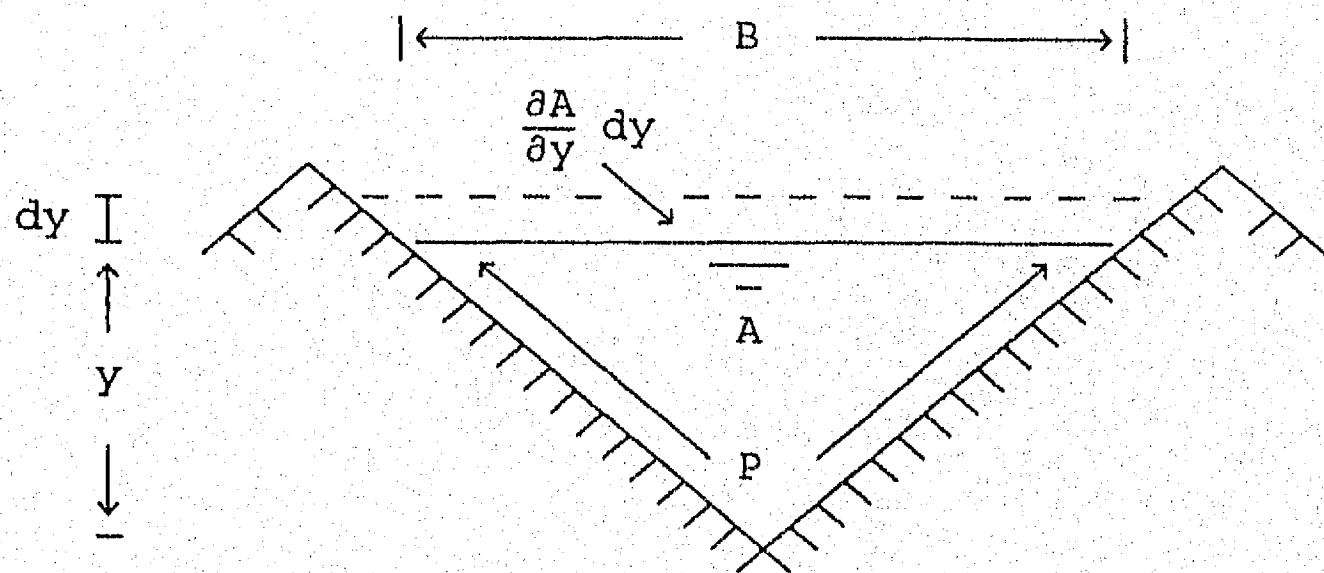


Figura A.2. Corte transversal del flujo en un canal

APÉNDICE B. RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

Con el fin de disponer de mediciones propias para calibrar el modelo numérico y comprobar que el método de corte posterior incrementa la eficiencia de aplicación, se construyó un modelo físico en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. El suelo se cribó por una malla de 5 mm y se clasificó como una arena fina debido a la conductividad hidráulica de 0.061 cm/min medida en un permeámetro. El surco fue de sección transversal triangular con ángulo en el vértice de 120° y 26 cm de profundidad para un ancho entre surcos de 90 cm. El suelo colocado bajo el vértice del triángulo fue compactado ligeramente con pisones de madera y metálicos. El ancho entre muros donde se conformó el surco es de 1.30 m, con una profundidad variable que en su parte más alta alcanza 85 cm medidos desde el vértice, la longitud es de 52.5 m y la pendiente en las cinco pruebas realizadas fue 0.001. Al final

del surco se construyó un vertedor triangular de 30° para derramar el agua no infiltrada sobre un tanque de 5.5 m^3 . Los gastos de alimentación se midieron también sobre un vertedor triangular con el mismo ángulo. En la figura B.1 se muestra un corte longitudinal y una sección transversal de la construcción empleada. Al final de las figuras se presentan fotografías donde se aprecian algunos detalles de la construcción del modelo físico.

Con todo lo anterior puede mencionarse que las condiciones del surco fueron ideales con el propósito de tener un buen control sobre los volúmenes de ingreso y salida, ya que por diferencia se calcularon los volúmenes infiltrados. Además, fue posible visualizar cortes transversales de la humedad después de las pruebas, como el que se muestra en la figura B.2 y en una de las fotografías. Estos cortes hicieron ver que por la dispersión capilar de la humedad el suelo se humedece por arriba del tirante de agua y se forma un bulbo de humedad con forma más o menos circular con centro en el vértice del triángulo. Dicho bulbo se extiende a los lados hasta llegar al ancho entre surcos, lo cual indica que el riego es satisfactorio y sólo debe interesar alcanzar la profundidad radicular con la humedad a capacidad de campo después de terminado el riego. Esto último es precisamente lo que reproduce el modelo matemático a través de cuantificar los volúmenes acumulados de agua, que se distribuyen en el ancho entre surcos. Las mediciones realizadas se presentan en la tabla B.1, donde Z_u es la profundidad de la humedad a los 50 m y \bar{Z} es la profundidad promedio de la humedad.

Se hace la aclaración que en la última prueba no se efectuaron los cortes transversales, por lo que no se midieron las profundidades de humedad para calcular la eficiencia de infiltración. El objetivo de esta prueba fue verificar el efecto de los tallos de las plantas en la etapa de avance, ya que se suponía que, para la misma humedad inicial y gasto, el tiempo de avance sería mayor; sin embargo, el resultado fue que los obstáculos de los tallos no retrasan el avance del agua. Se atribuye al grado de compactación del suelo (o conductividad hidráulica) la influencia dominante en el tiempo de avance.

Tabla B.1. Mediciones en el surco

| N | S_0 | Q_0 | Q_1 | V_z | V_s | V_e | Z_u | \bar{Z} | t_a | T_r | T_f |
|---|-------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|
| | (%) | (l/s) | | (m ³) | | | (cm) | | (min) | | |
| 1 | 0.1 | 1.0 | - | 3.70 | 2.30 | 6.00 | 65 | 75 | 11 | 100 | 114 |
| 2 | 0.1 | 1.0 | 0.42 | 3.00 | 1.00 | 4.00 | 47 | 64 | 11 | 142 | 153 |
| 3 | 0.1 | 0.75 | 0.3 | 3.50 | 0.69 | 4.19 | 40 | 54 | 12 | 215 | 220 |
| 4 | 0.1 | 0.6 | 0.3 | 3.95 | 0.51 | 4.46 | 37 | 53 | 32 | 248 | 254 |
| 5 | 0.1 | 0.6 | 0.3 | 4.24 | 0.26 | 4.50 | - | - | 17 | 233 | 239 |

Las eficiencias obtenidas se muestran en la tabla B.2. Las curvas de avance del agua de las cinco pruebas se presentan en las figuras B.3 a B.7. Los perfiles de las profundidades de la humedad en las figuras B.8 a B.11 (en la prueba número 5 no se midió el perfil de humedad). Con fines comparativos, en las figuras B.12 a B.15 se han dibujado los perfiles de las láminas de

infiltración calculadas por el modelo matemático. Se aprecia que la aproximación es muy aceptable para los ensayos 1 y 4.

En la tabla B.3 se presenta la calibración de parámetros del modelo numérico.

Tabla B.2. Eficiencias en el modelo físico

| N | ef. de inf. $\eta_z = Z_u/\bar{Z}$ | ef. en vol. $\eta_v = V_z/V_e$ | ef. de apl. $\eta = \eta_z \eta_v$ |
|---|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 0.87 | 0.62 | 0.54 |
| 2 | 0.73 | 0.75 | 0.55 |
| 3 | 0.74 | 0.84 | 0.62 |
| 4 | 0.70 | 0.89 | 0.62 |
| 5 | — | 0.94 | — |

Tabla B.3. Calibración de parámetros

| N | n_1 | n | K (cm/min) | w | h |
|---|-----------------------|-------|---------------|-----|----|
| | (s/m ^{1/3}) | | | | |
| 1 | 0.075 | 0.036 | 0.123 | 4.1 | 15 |
| 2 | 0.100 | 0.036 | 0.081 | 3.3 | 15 |
| 3 | 0.080 | 0.036 | 0.075 | 3.3 | 15 |
| 4 | 0.100 | 0.036 | 0.088 | 3.5 | 15 |
| 5 | 0.067 | 0.050 | 0.087 | 3.5 | 15 |

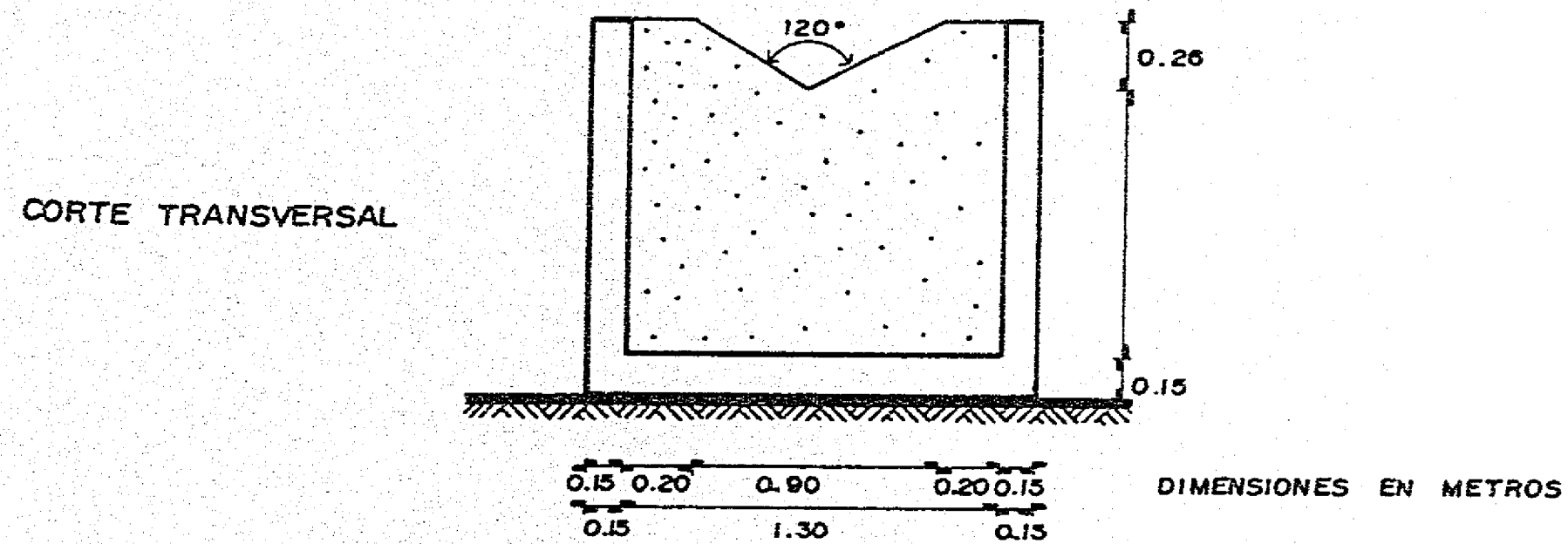
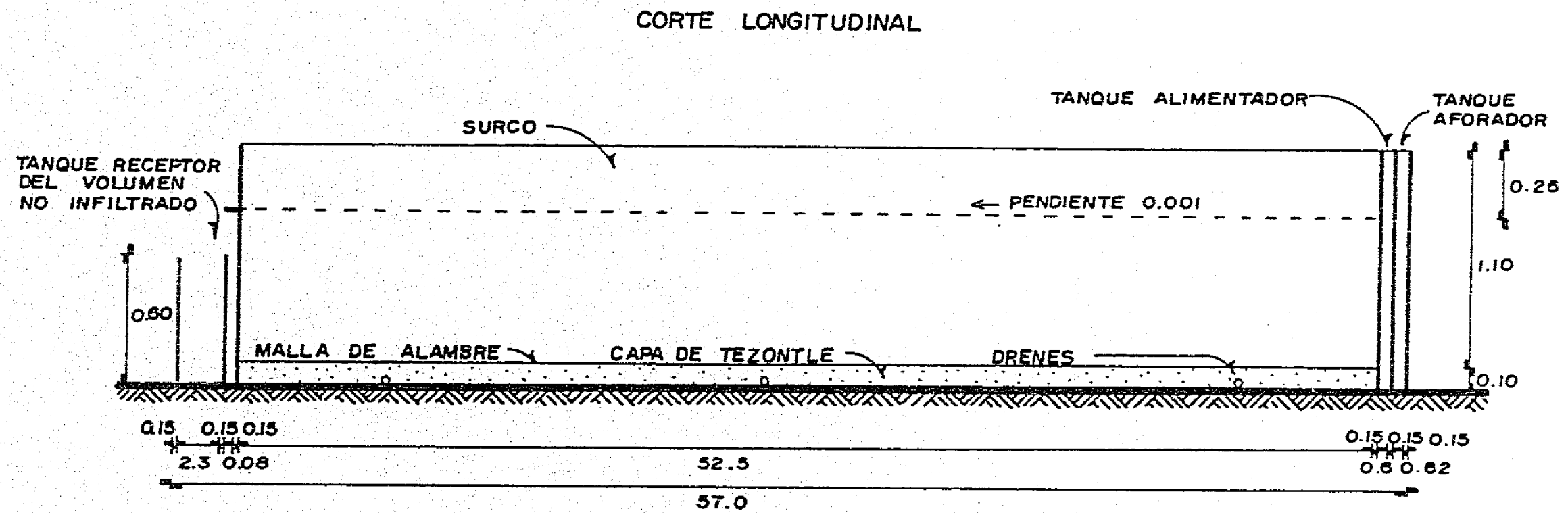
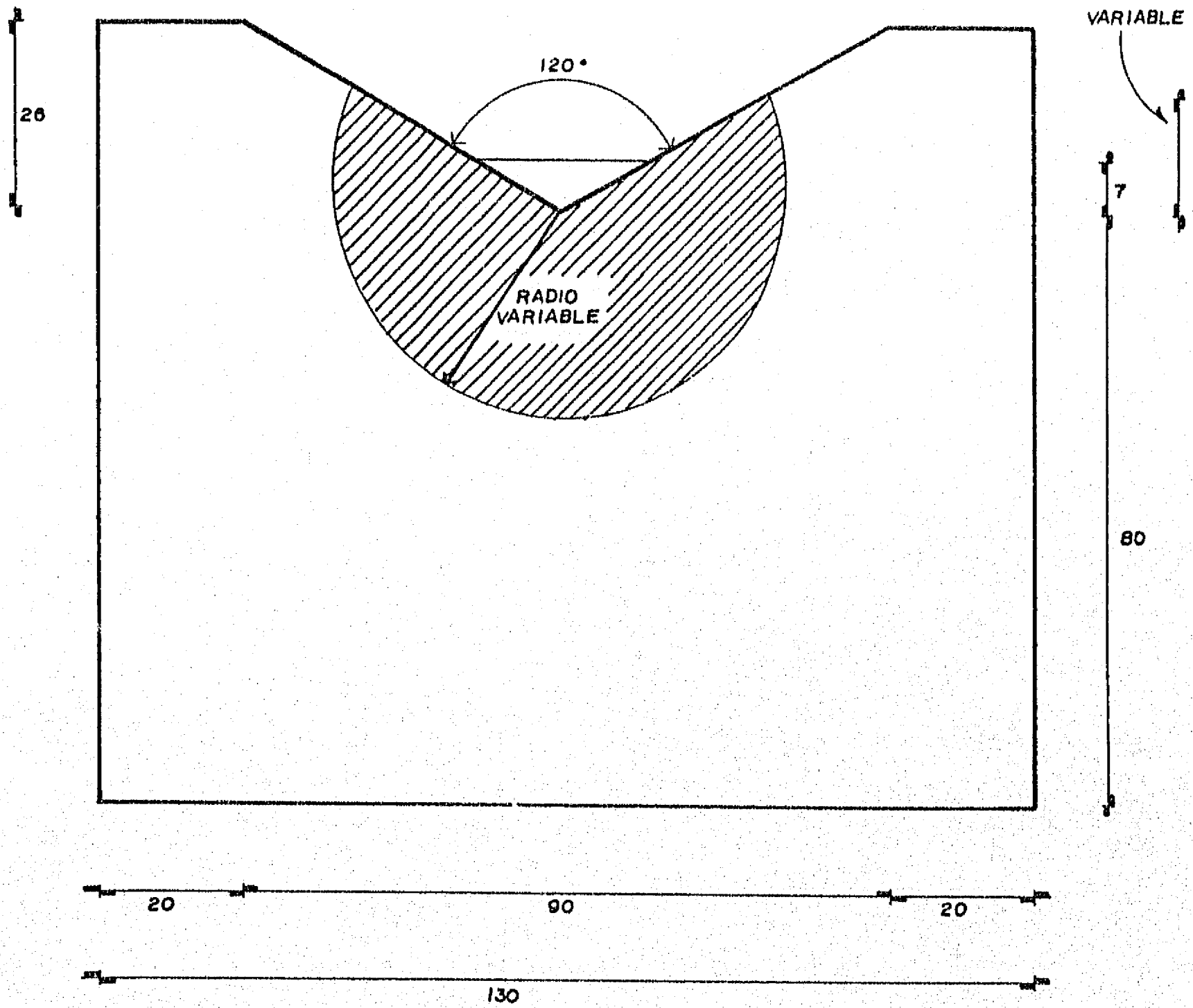


FIG.B.I. CORTES LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL DEL CANAL



DIMENSIONES EN CENTIMETROS

FIG.B.2. BULBO DE HUMEDAD EN EL SURCO.

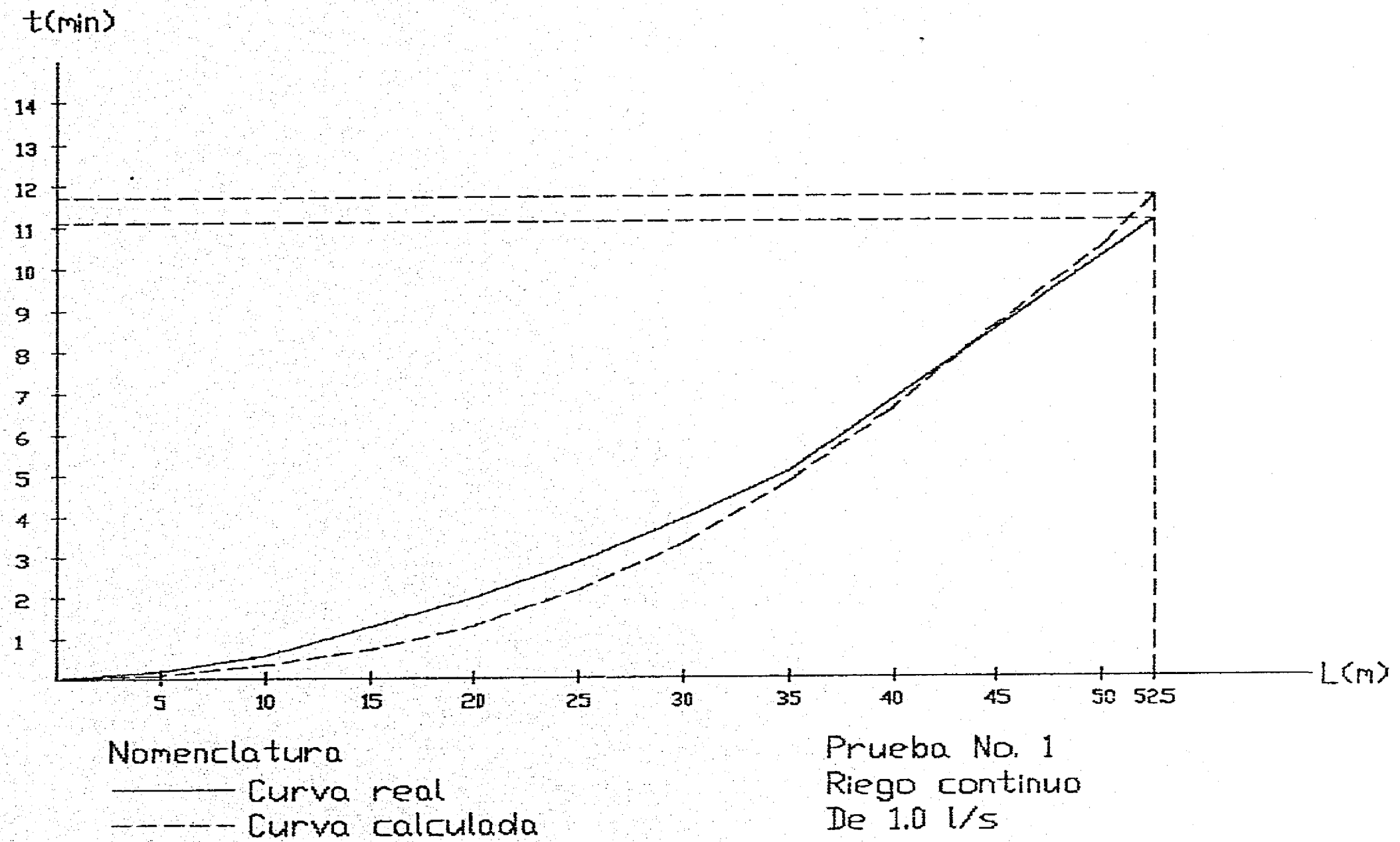


Figura B.3. Curva de avance de la prueba No. 1

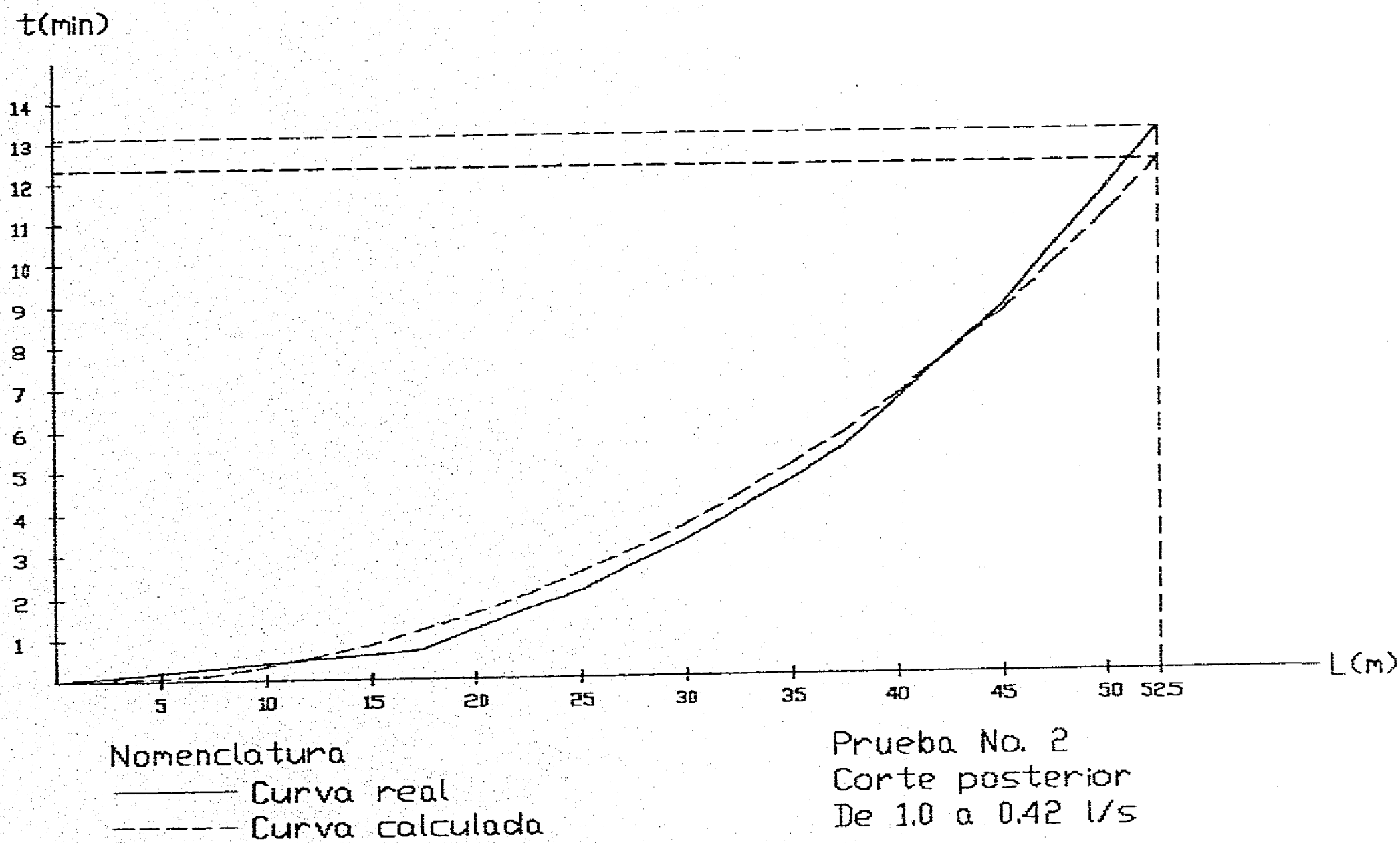


Figura B.4. Curva de avance de la prueba No. 2

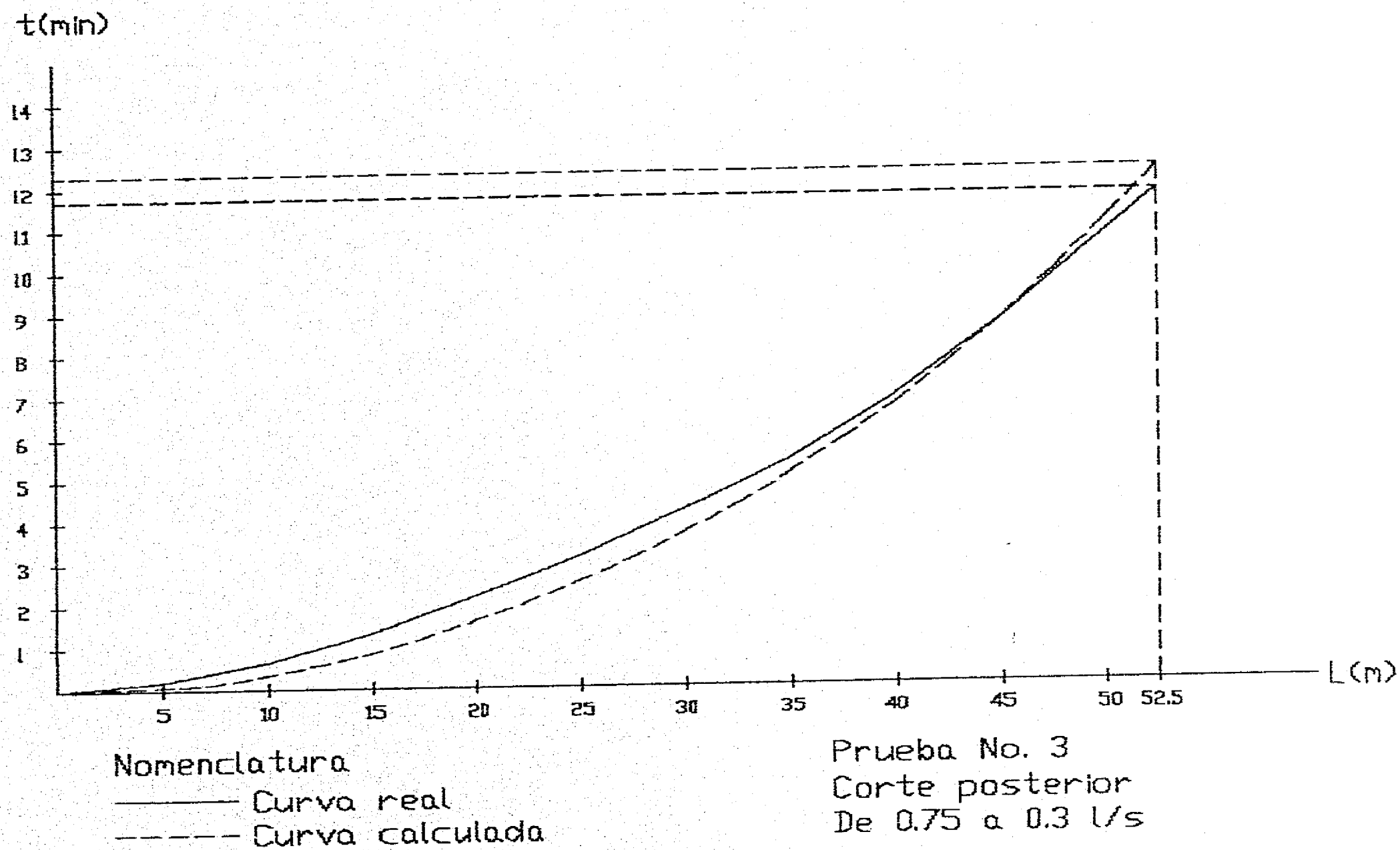


Figura B.5. Curva de avance de la prueba No. 3

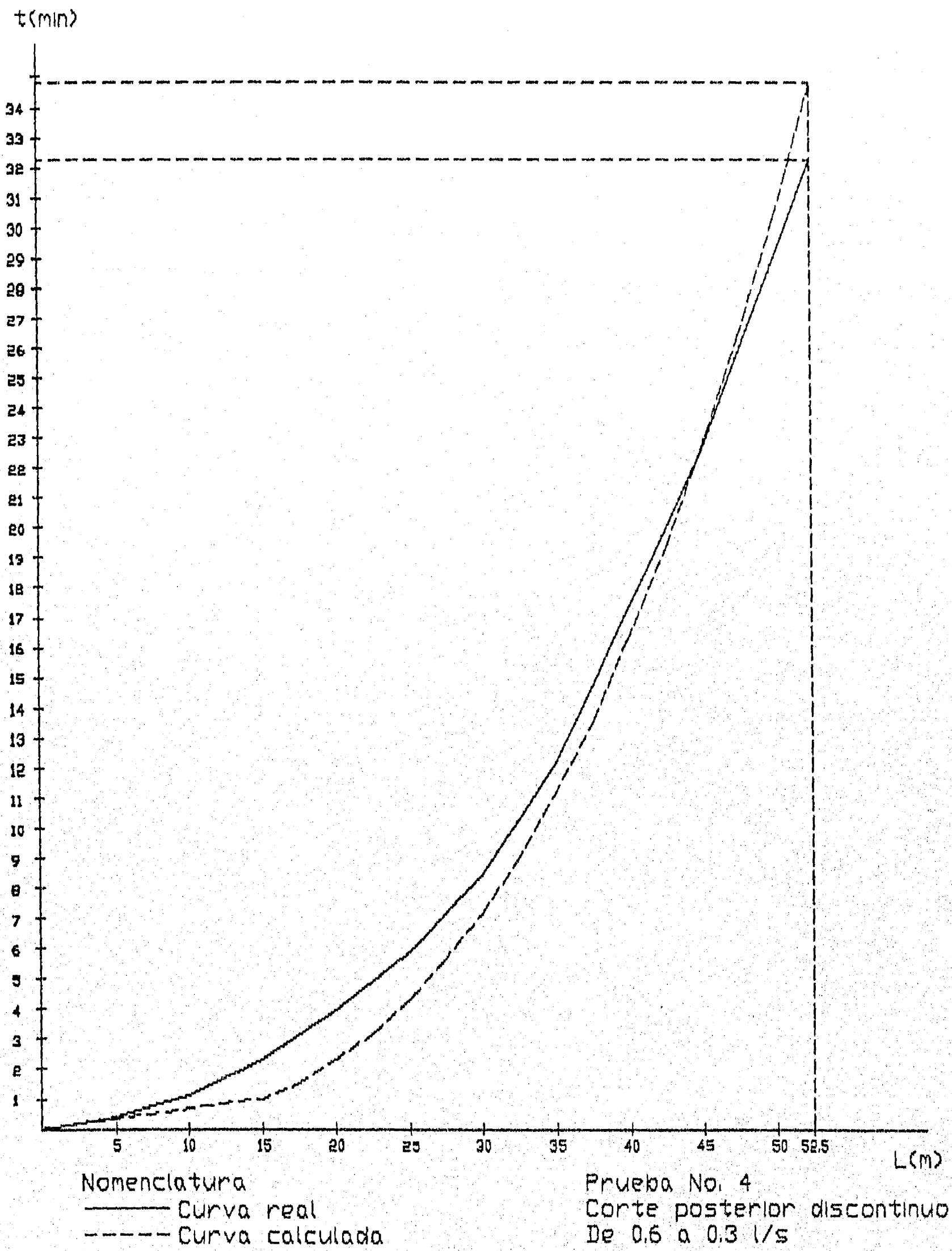


Figura B.6. Curva de avance de la prueba No. 4

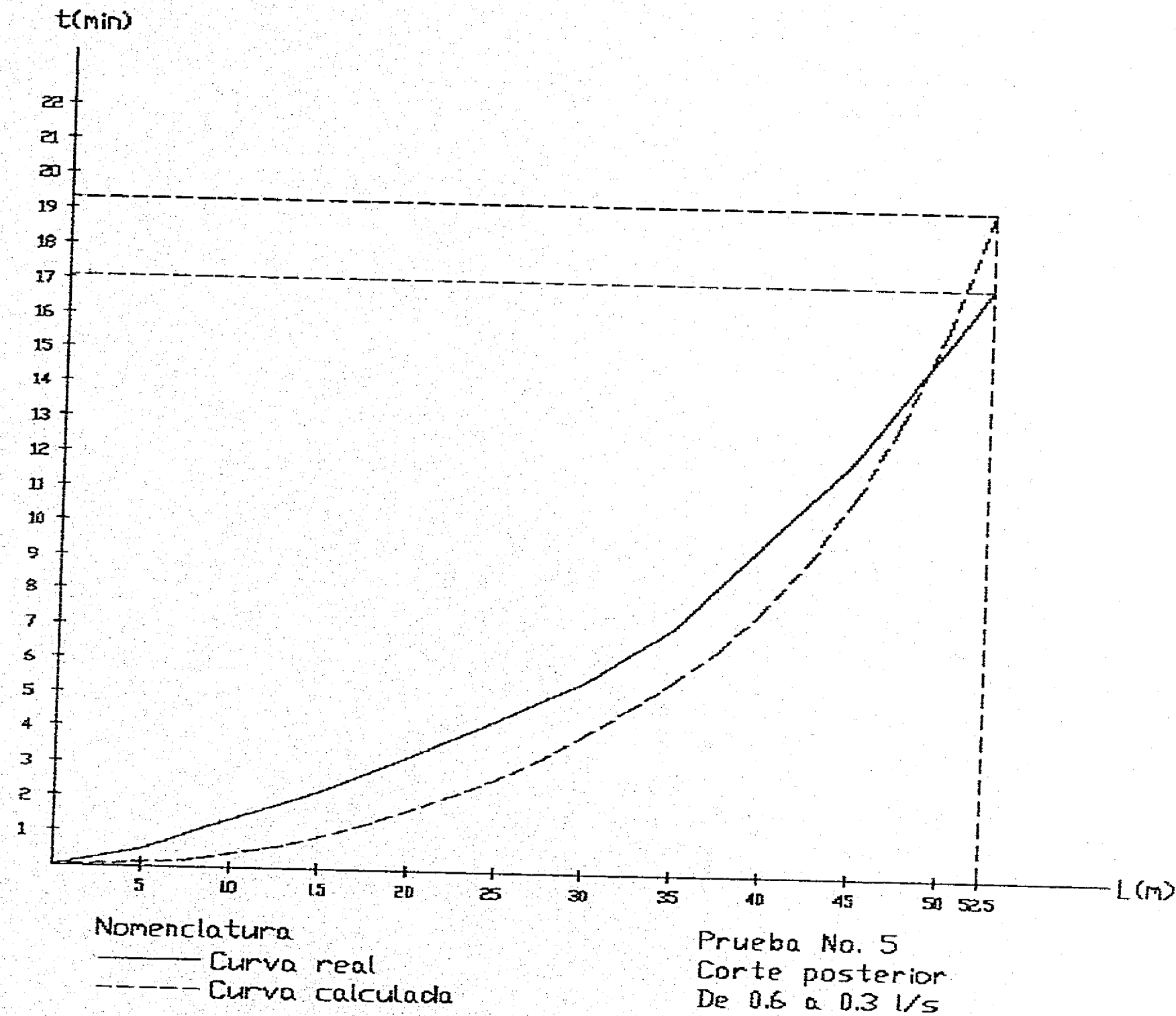
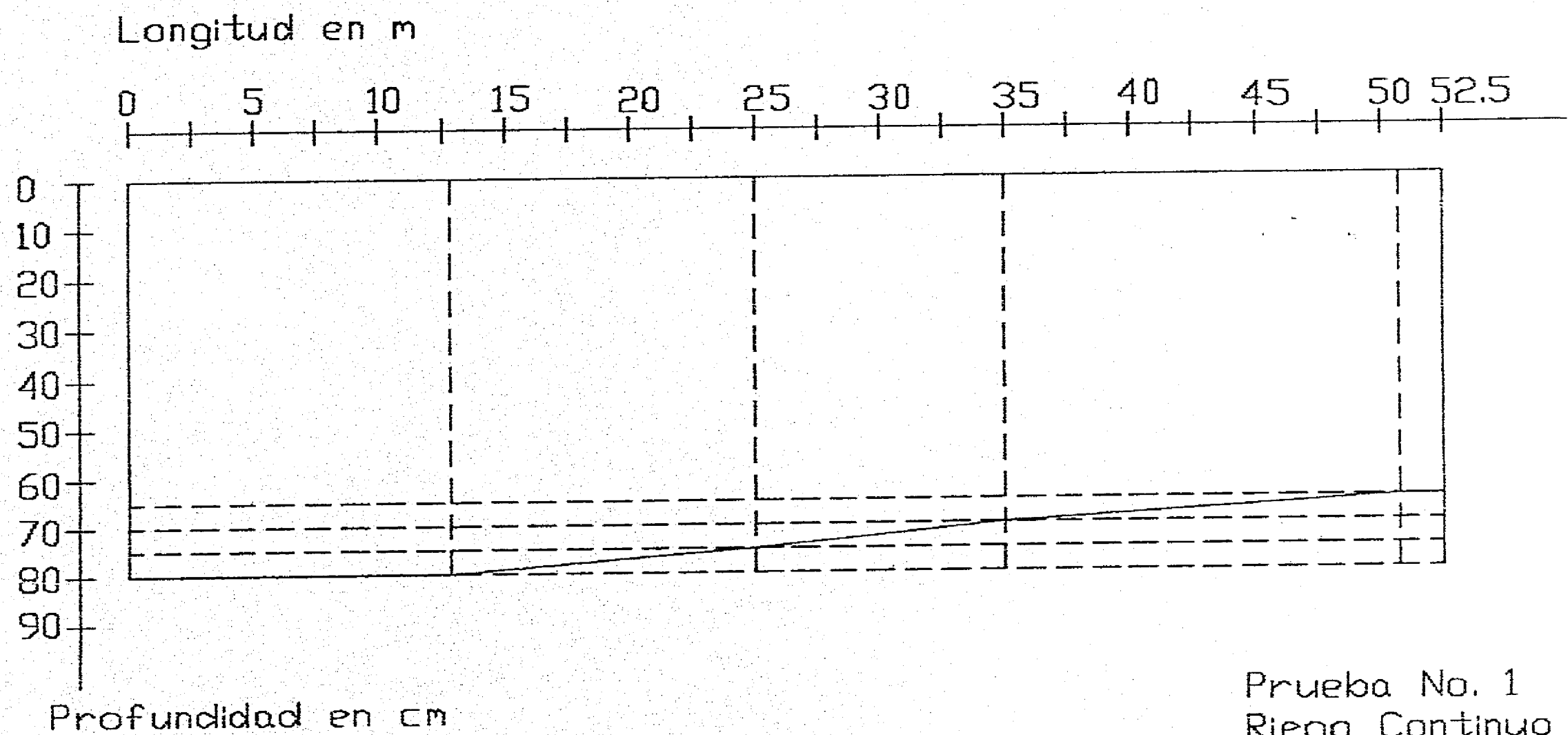


Figura B.7. Curva de avance de la prueba No. 5

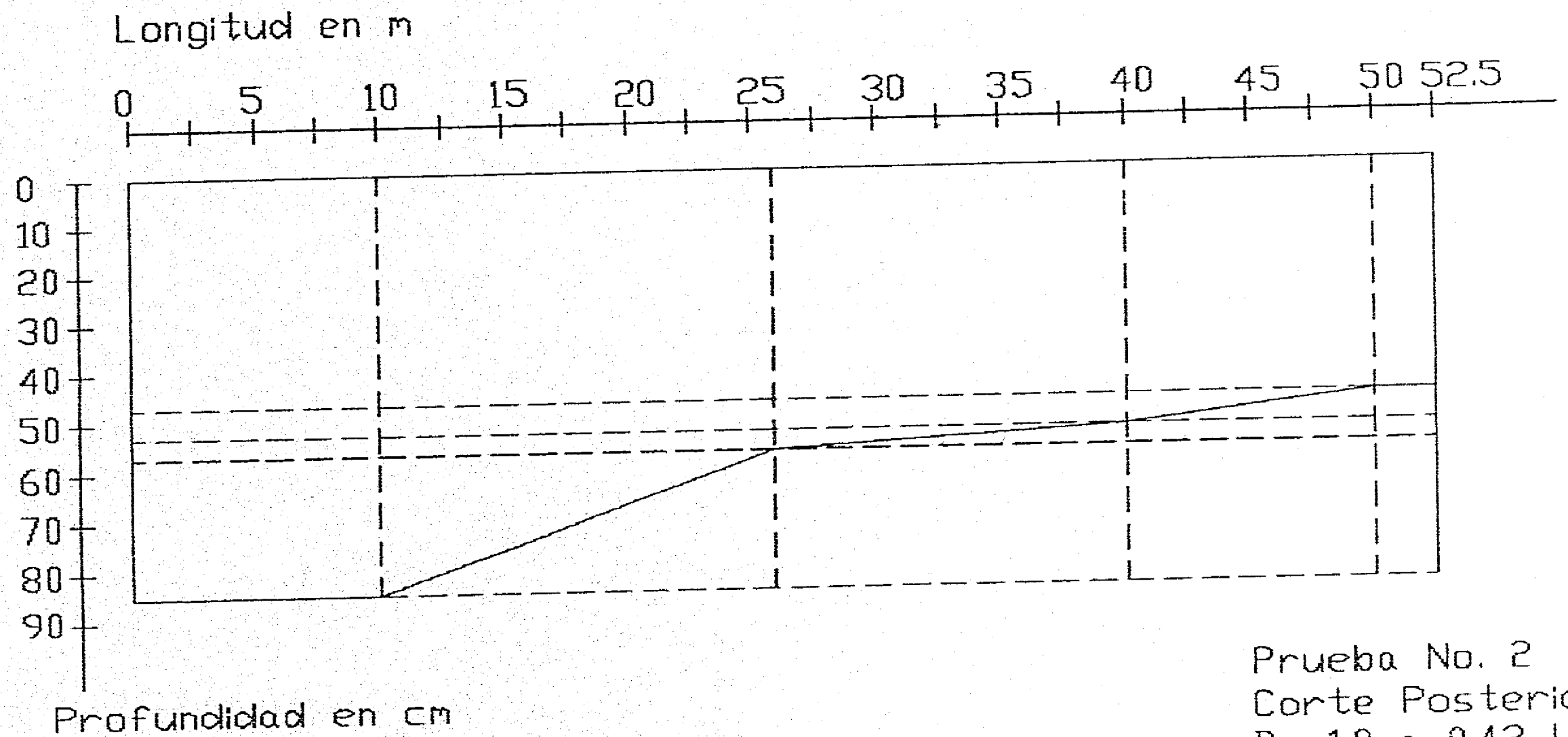


Profundidad en cm

Profundidad promedio 74 cm

Prueba No. 1
 Riego Continuo
 De 1.0 l/s

Figura B.8. Profundidad de humedad. Prueba No. 1



Prueba No. 2
 Corte Posterior
 De 1.0 a 0.42 l/s

Profundidad promedio 55 cm

Figura B.9. Profundidad de humedad. Prueba No. 2

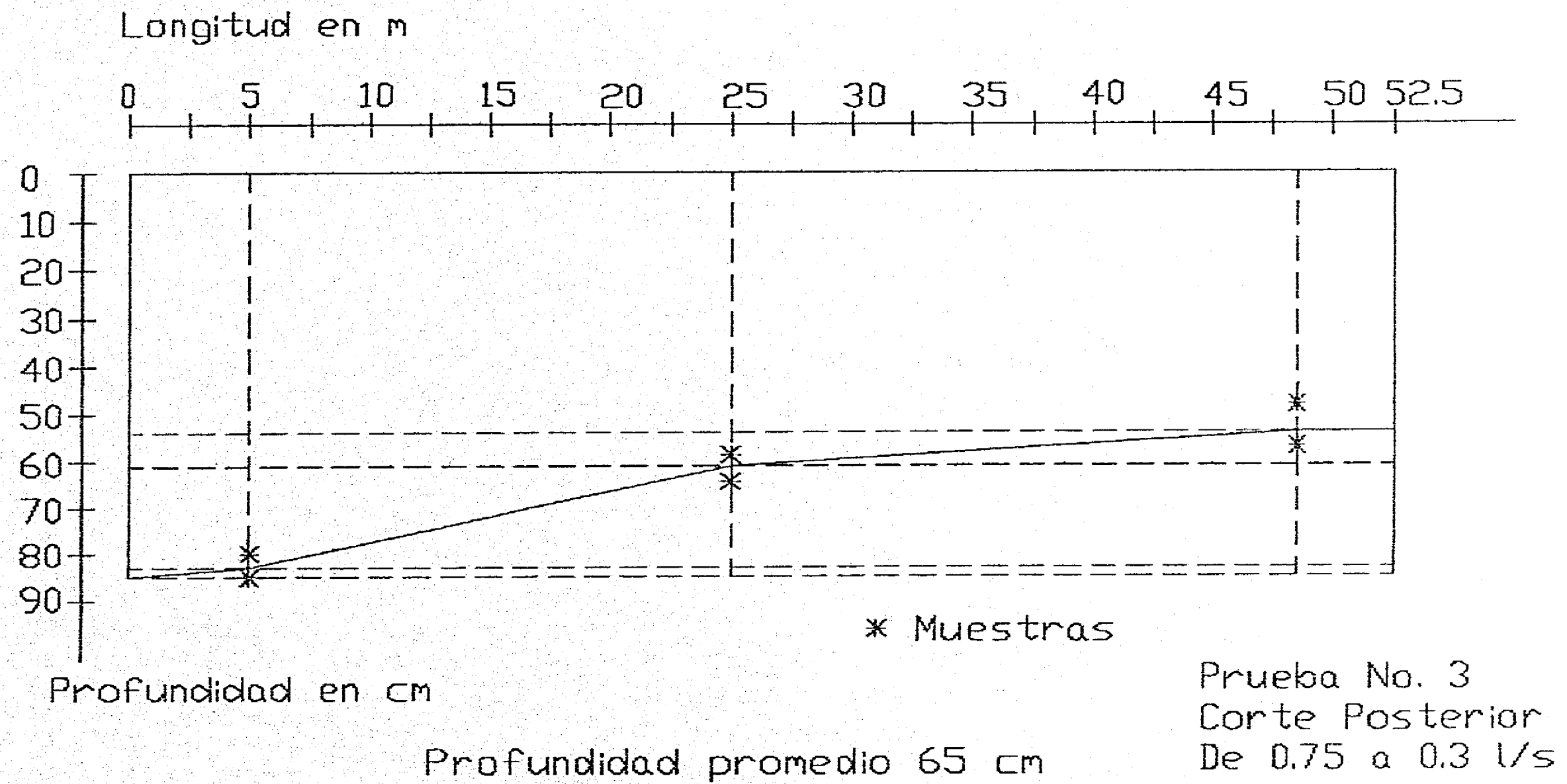
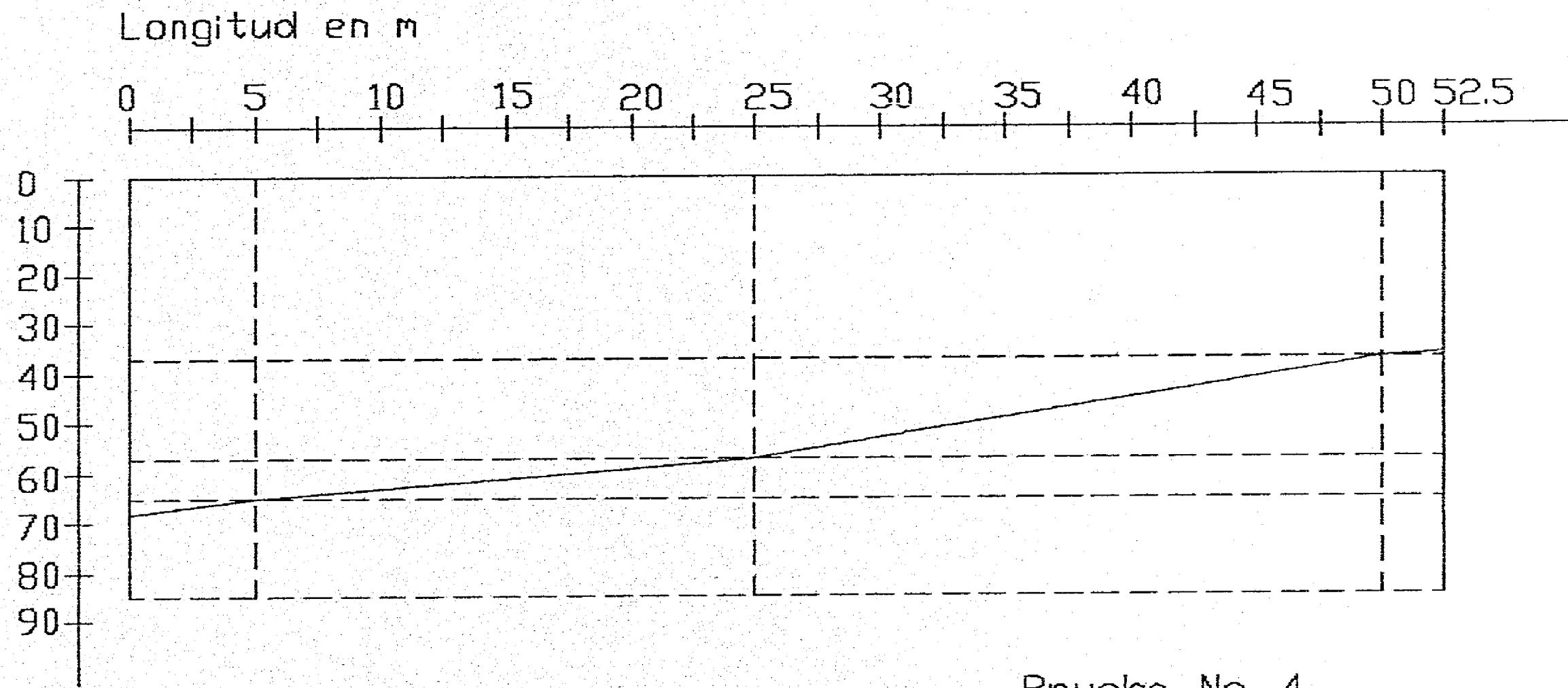


Figura B.10. Profundidad de humedad. Prueba No. 3



Prueba No. 4
 Corte Posterior Discontinuo
 De 0.6 a 0.3 l/s

Profundidad promedio 53 cm

Figura B.11. Profundidad de humedad. Prueba No. 4

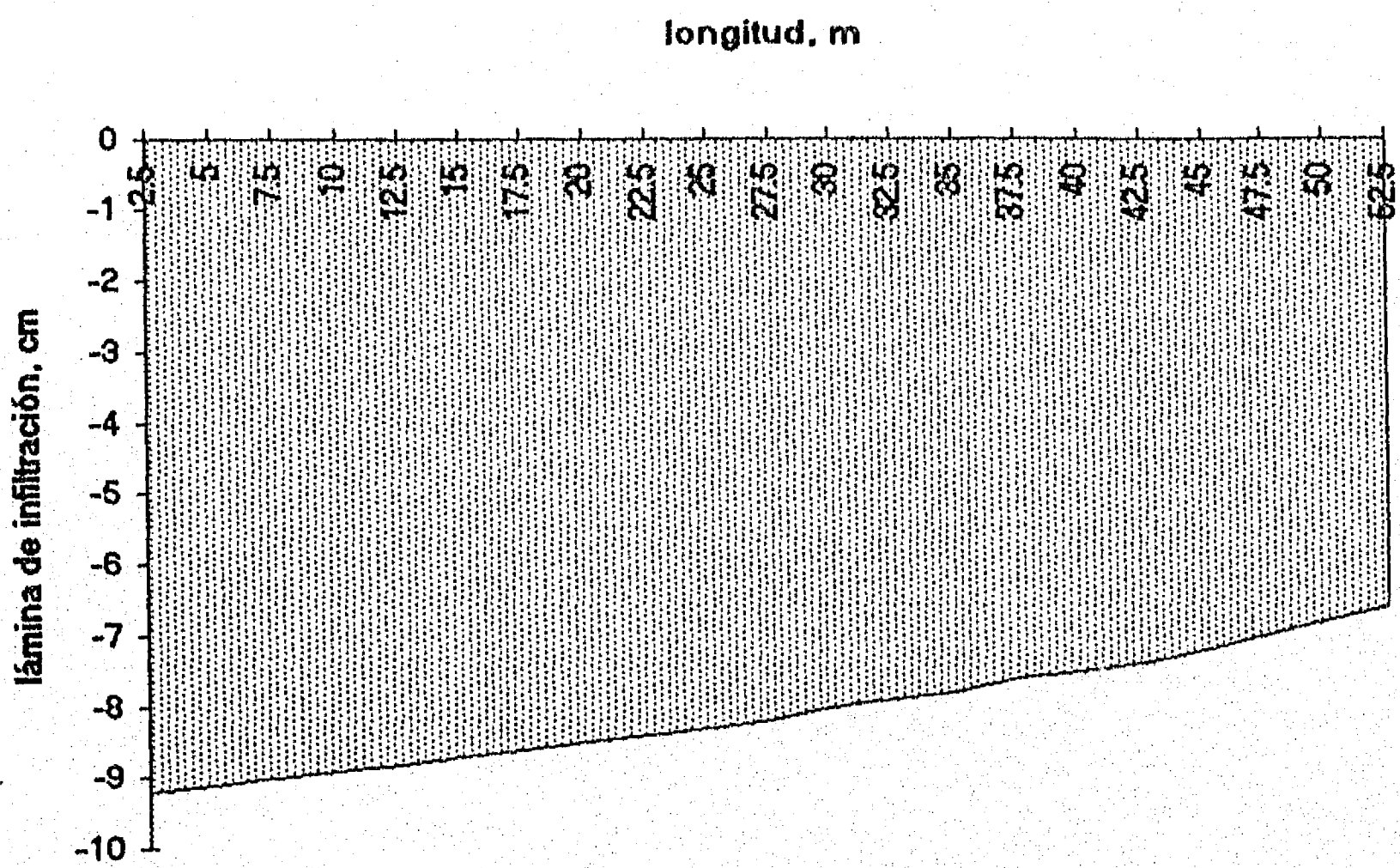


Fig. B.12. Láminas de infiltración. Prueba #1

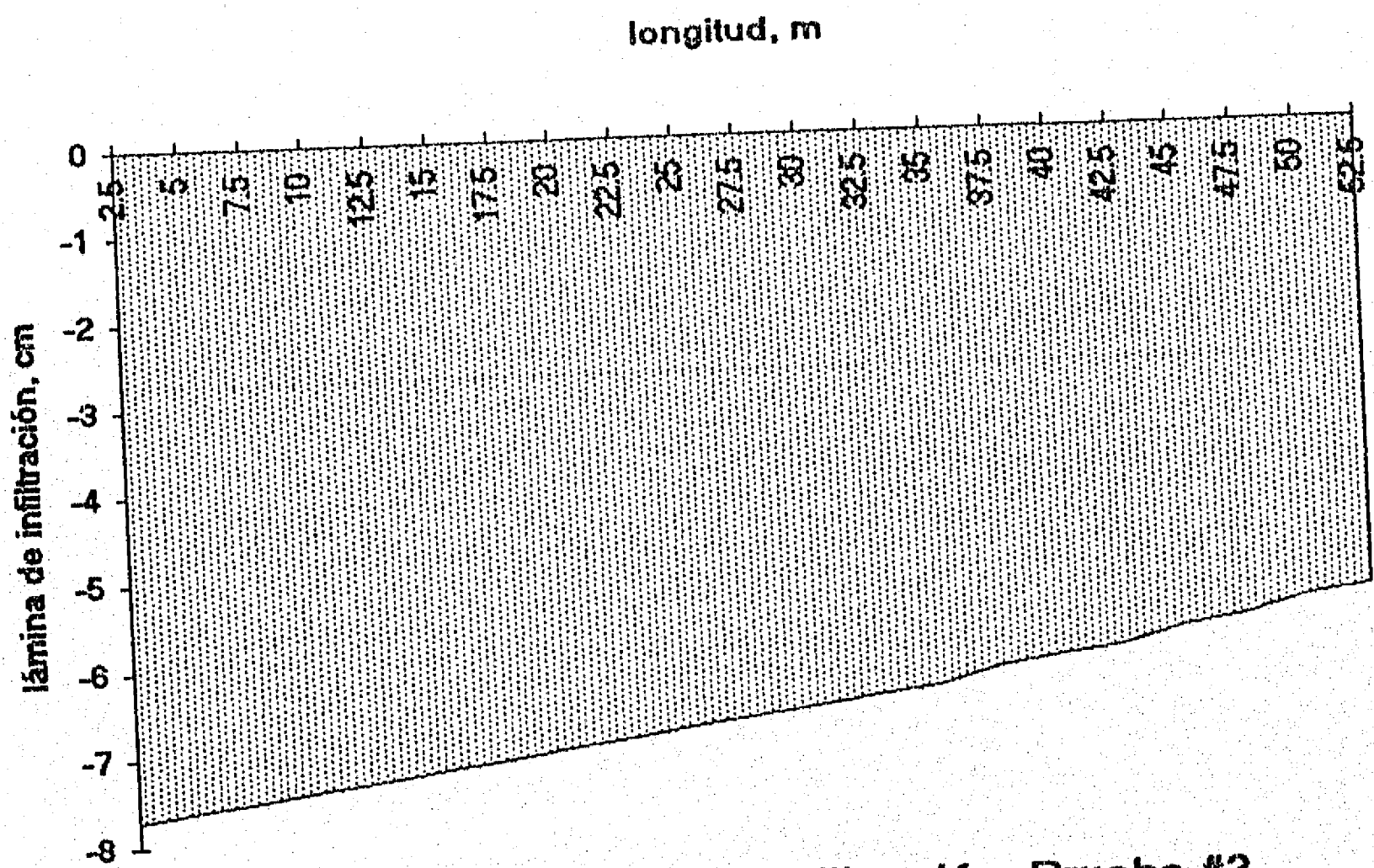


Fig. B.13. Láminas de infiltración. Prueba #2

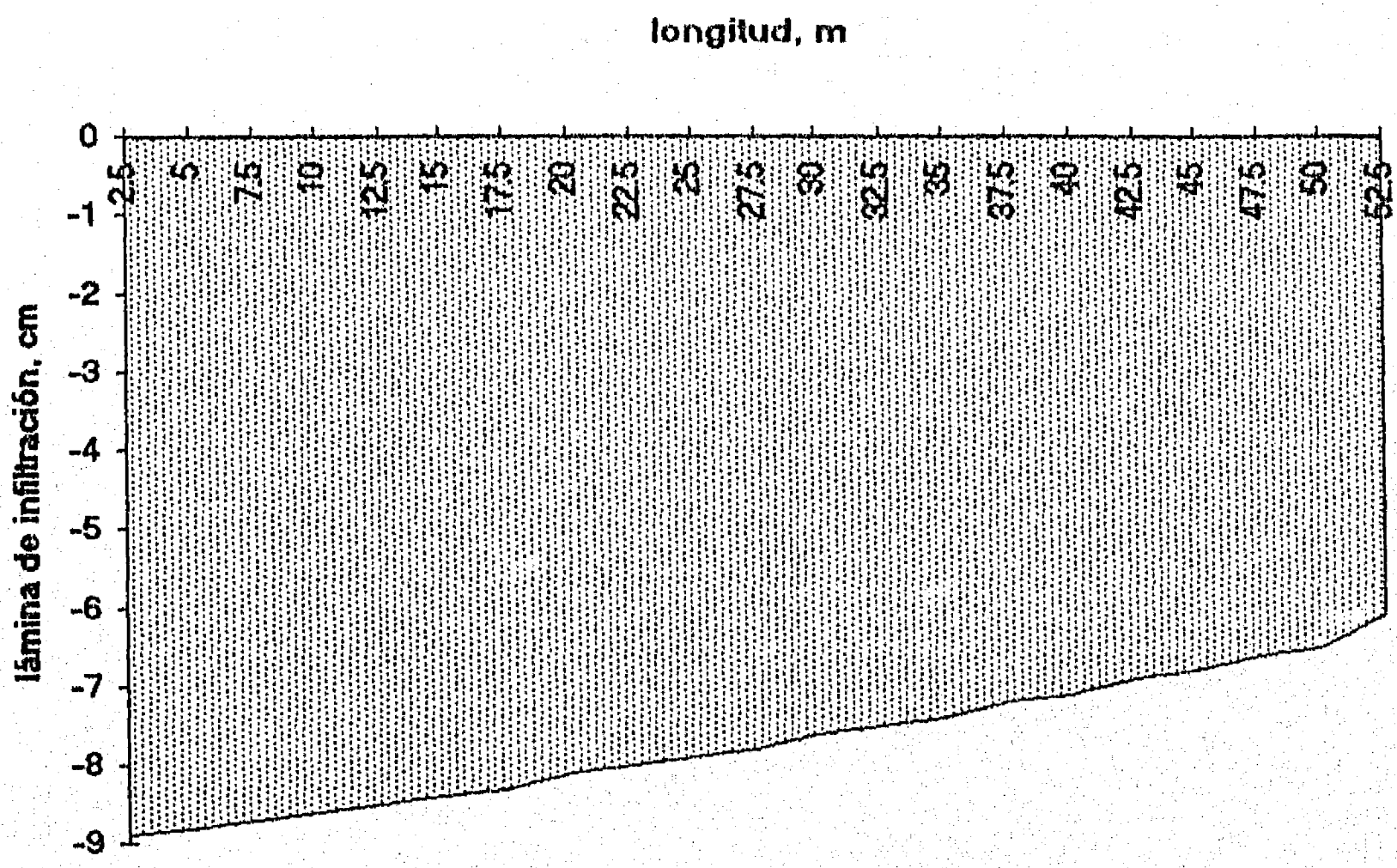


Fig. B.14. Láminas de infiltración. Prueba #3

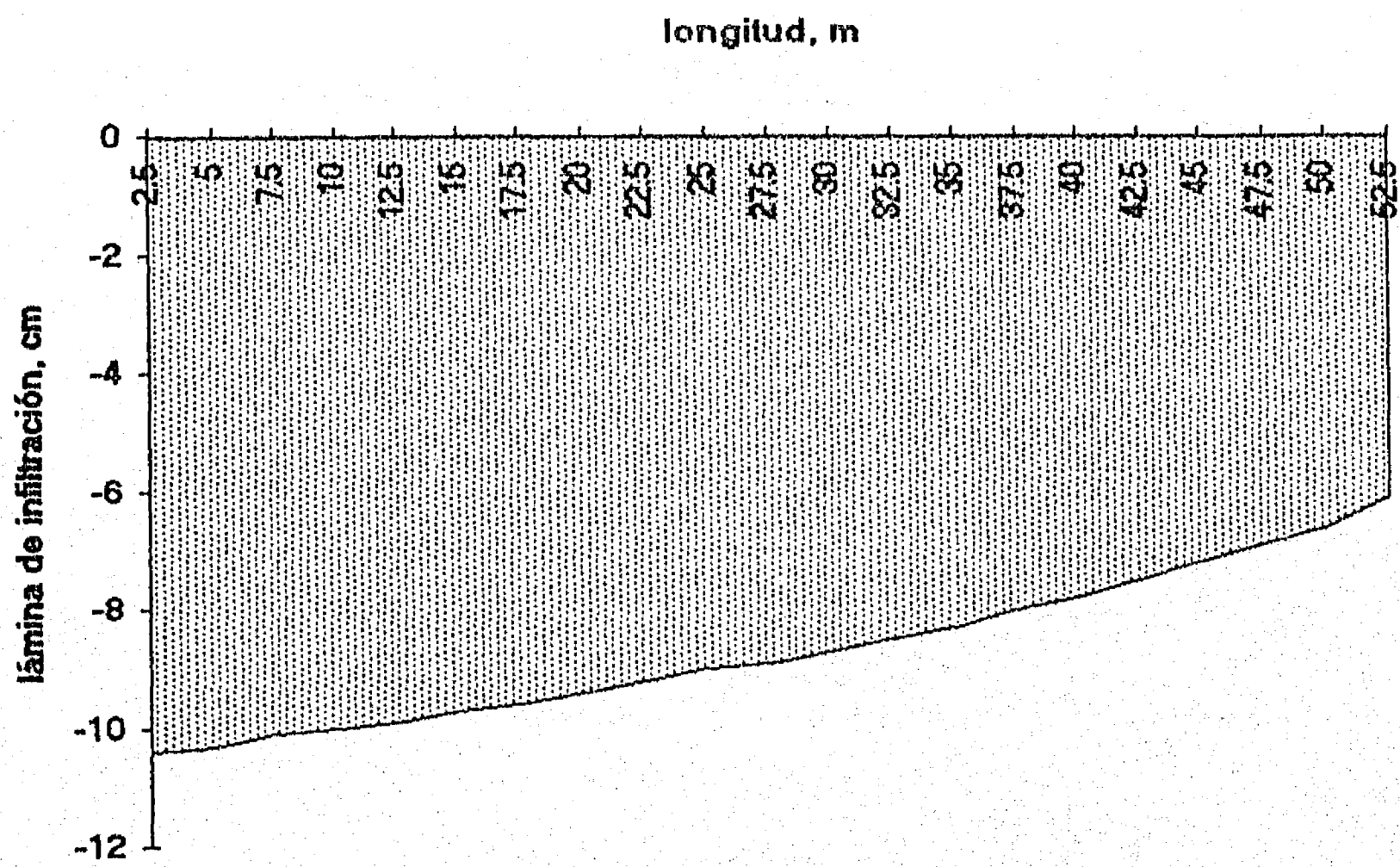
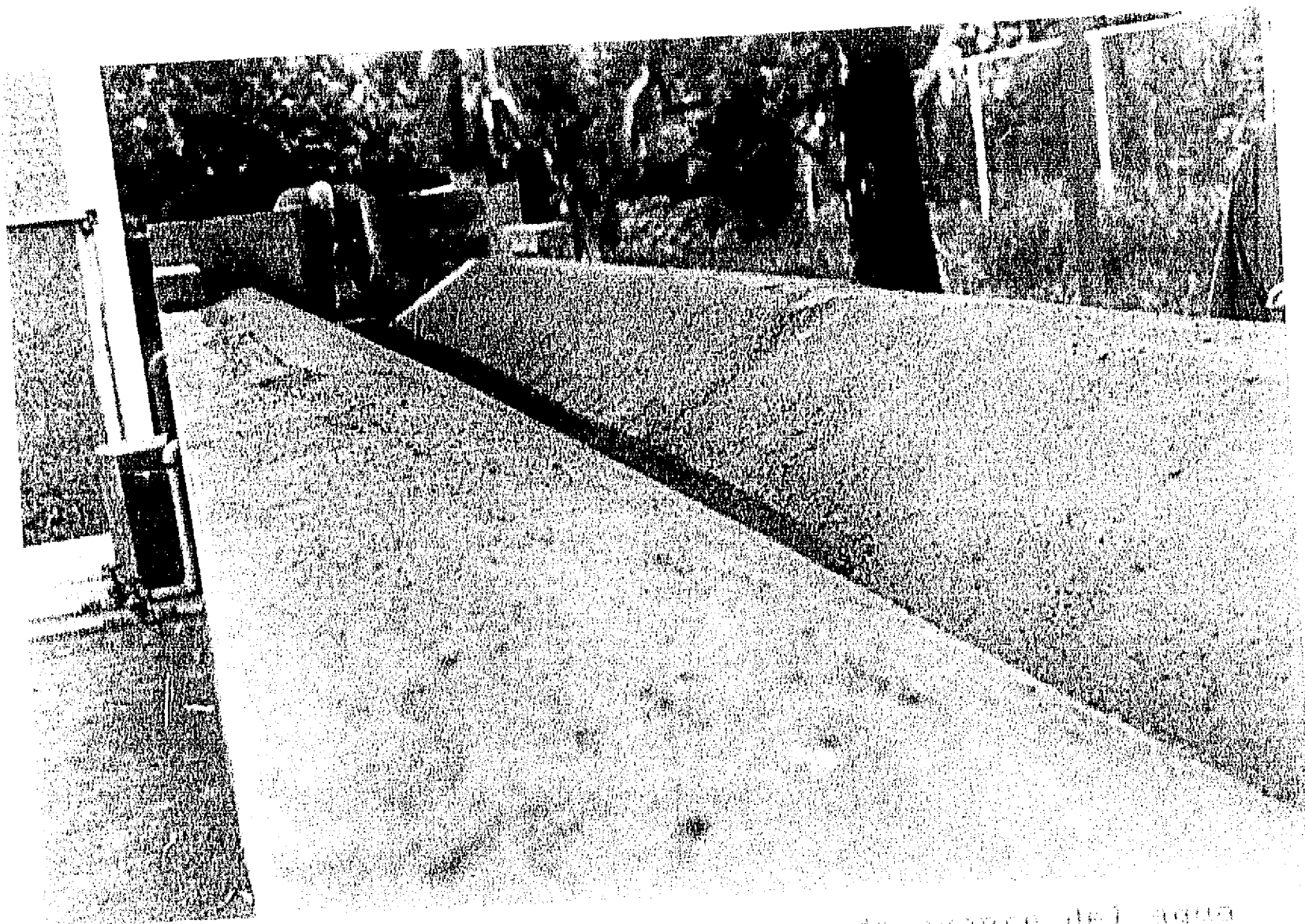
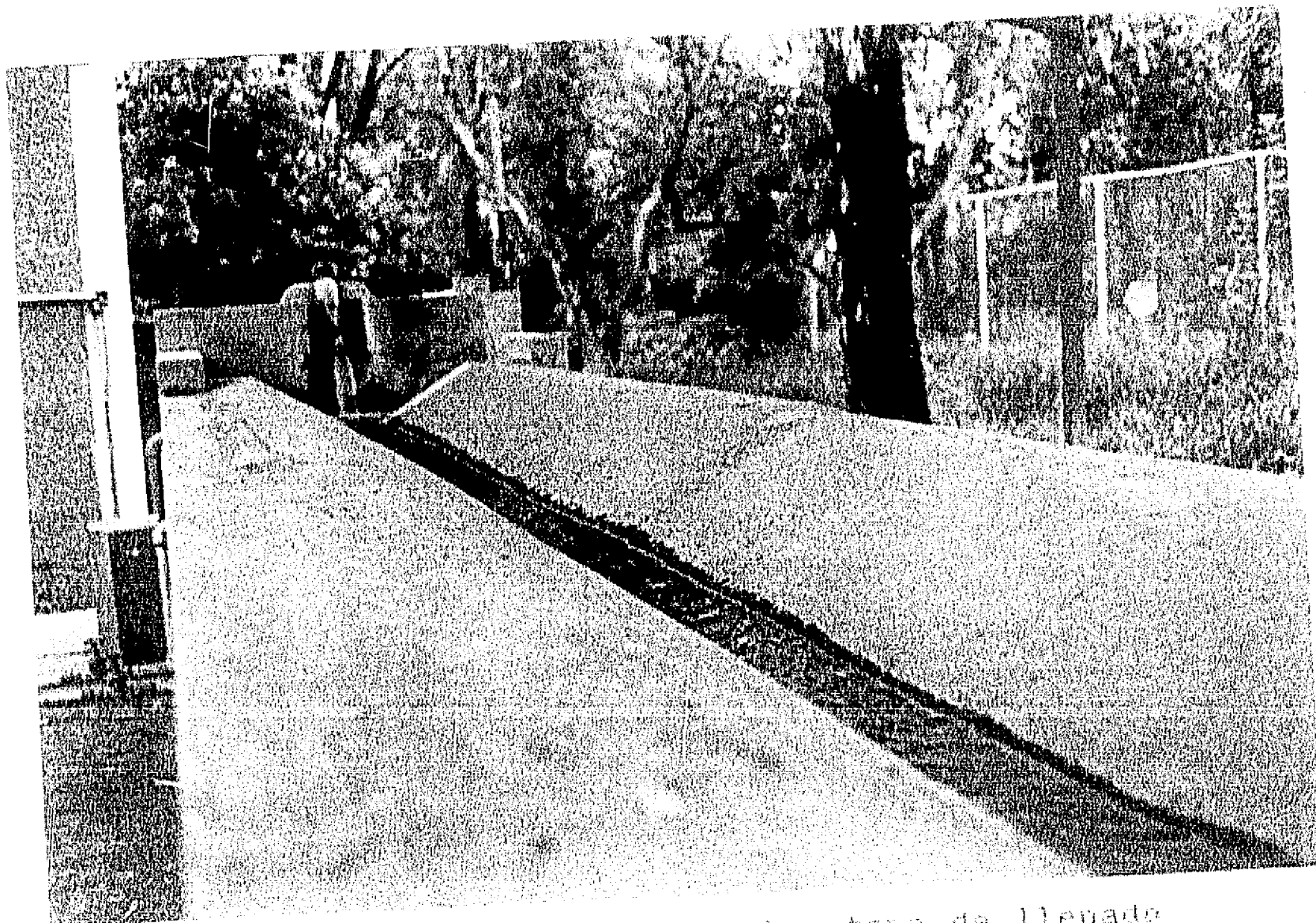


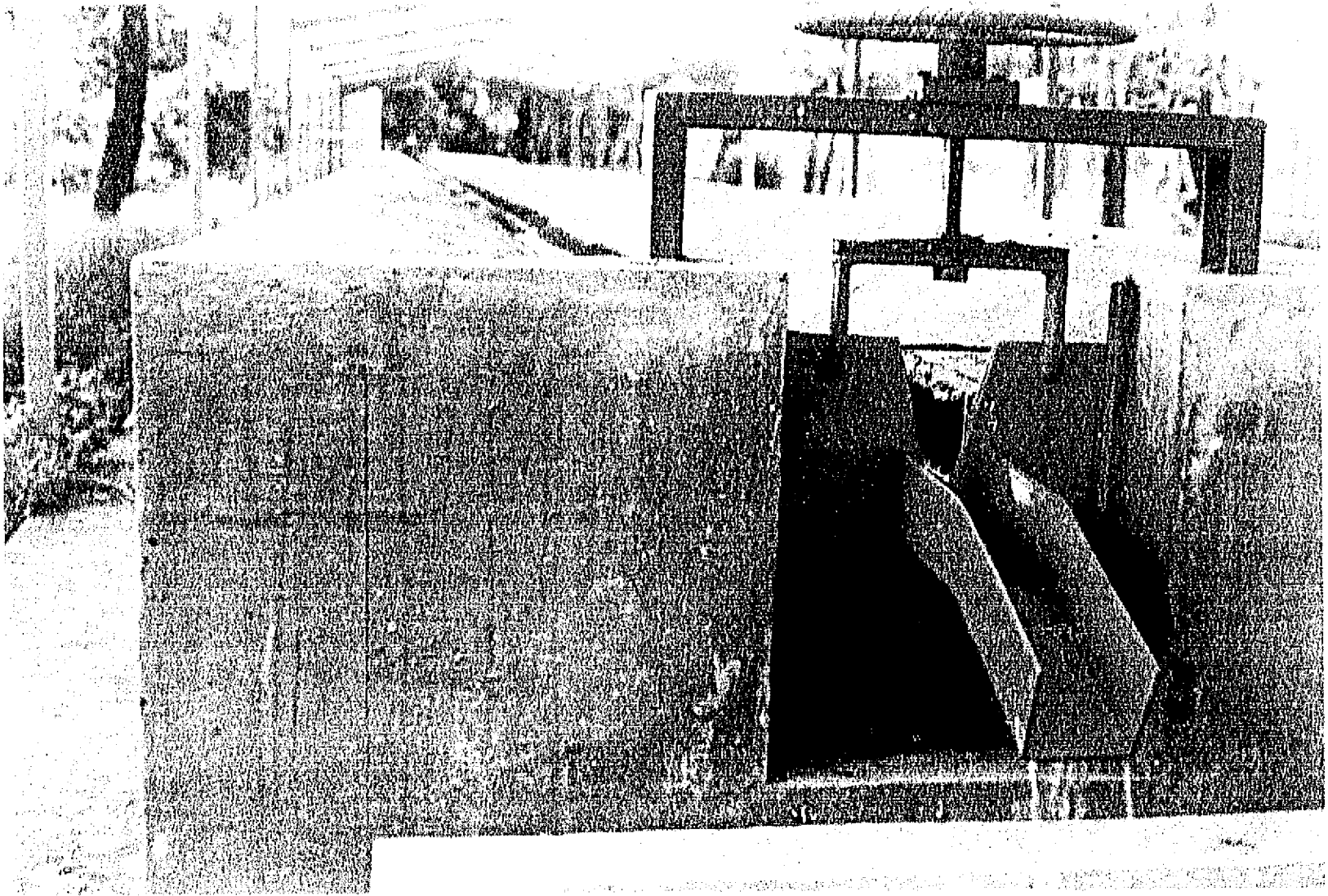
Fig. B.15. Láminas de infiltración. Prueba #4



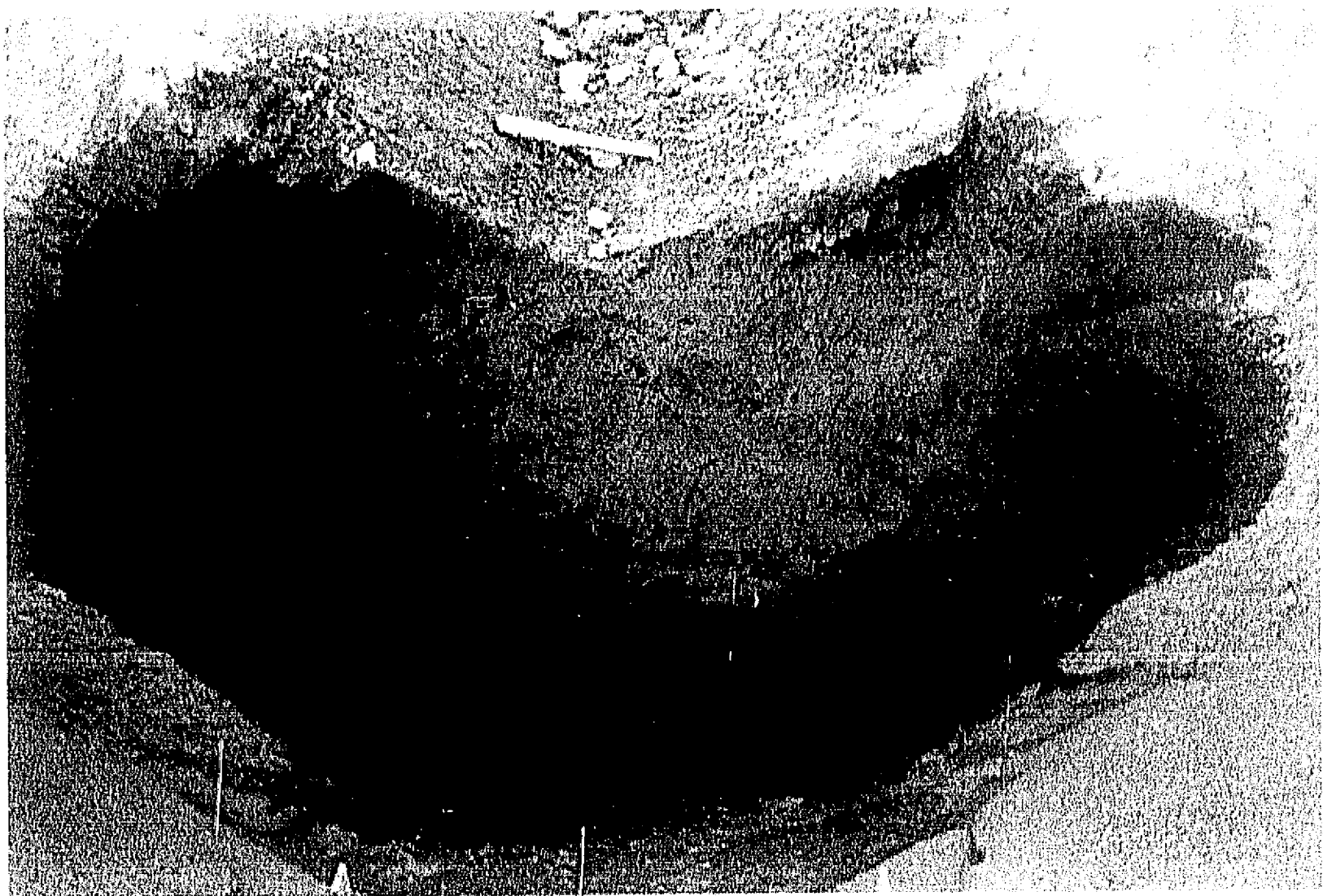
Alimentación al surco en la etapa de avance del agua



Alimentación al surco en la etapa de llenado



Descarga al tanque de almacenamiento en la etapa de receso



Bulbo de humedad después de la prueba

APÉNDICE C. RESULTADOS COMPLEMENTARIOS DEL MODELO MATEMÁTICO

Tabla C.1. Eficiencias en el RCO. Modificación de S_0

| L_s (m) | Q_0 $\left(\frac{l}{s}\right)$ | S_0 (%) | K $\left(\frac{cm}{min}\right)$ | n_1 $\left(s/m^{1/3}\right)$ | n $\left(s/m^{1/3}\right)$ | w (cm) | h (cm) | Z_m (cm) | D_s (cm) | t_a (min) | T_r (min) | η_z (%) | η_v (%) | η (%) |
|--------------|-------------------------------------|--------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------|-------------|---------------|---------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 115 | 0.88 | 0.48 | 0.083 | 0.100 | 0.060 | 1.0 | 3.0 | 15.0 | 99 | 91 | 567 | 76 | 77 | 58 |
| 200 | 0.86 | 0.49 | 0.080 | 0.086 | 0.059 | 1.1 | 3.6 | 14.5 | 88 | 122 | 923 | 72 | 74 | 53 |
| 150 | 0.83 | 0.51 | 0.077 | 0.098 | 0.057 | 1.2 | 4.1 | 14.1 | 81 | 113 | 619 | 74 | 75 | 56 |
| 110 | 0.81 | 0.52 | 0.074 | 0.096 | 0.056 | 1.3 | 4.5 | 13.8 | 97 | 102 | 535 | 74 | 76 | 56 |
| 145 | 0.79 | 0.54 | 0.072 | 0.084 | 0.055 | 1.3 | 5.0 | 13.4 | 67 | 98 | 465 | 75 | 78 | 59 |
| 190 | 0.76 | 0.55 | 0.069 | 0.083 | 0.054 | 1.4 | 5.4 | 13.0 | 90 | 140 | 942 | 72 | 72 | 52 |
| 140 | 0.74 | 0.57 | 0.066 | 0.094 | 0.053 | 1.5 | 5.9 | 12.6 | 65 | 107 | 451 | 75 | 77 | 57 |
| 195 | 0.72 | 0.58 | 0.064 | 0.081 | 0.052 | 1.6 | 6.3 | 12.3 | 89 | 161 | 957 | 70 | 73 | 51 |
| 135 | 0.70 | 0.60 | 0.061 | 0.092 | 0.051 | 1.6 | 6.8 | 11.9 | 80 | 124 | 574 | 72 | 74 | 53 |
| 265 | 2.10 | 0.20 | 0.059 | 0.079 | 0.050 | 1.7 | 7.2 | 11.5 | 73 | 100 | 309 | 75 | 77 | 57 |
| 340 | 1.91 | 0.22 | 0.056 | 0.090 | 0.048 | 1.8 | 7.7 | 11.1 | 84 | 151 | 506 | 73 | 75 | 54 |
| 240 | 1.79 | 0.24 | 0.053 | 0.077 | 0.047 | 1.9 | 8.1 | 10.8 | 79 | 102 | 330 | 75 | 77 | 57 |
| 190 | 1.68 | 0.25 | 0.051 | 0.088 | 0.046 | 1.9 | 8.6 | 10.4 | 93 | 104 | 322 | 74 | 76 | 56 |
| 230 | 1.59 | 0.27 | 0.048 | 0.075 | 0.045 | 2.0 | 9.0 | 10.0 | 82 | 98 | 351 | 75 | 75 | 57 |
| 195 | 1.50 | 0.28 | 0.045 | 0.053 | 0.044 | 2.1 | 9.5 | 9.6 | 98 | 77 | 344 | 76 | 78 | 60 |
| 235 | 1.42 | 0.30 | 0.043 | 0.073 | 0.043 | 2.2 | 9.9 | 9.3 | 75 | 100 | 343 | 74 | 75 | 55 |
| 340 | 1.36 | 0.31 | 0.040 | 0.060 | 0.042 | 2.2 | 10.4 | 8.9 | 86 | 118 | 596 | 73 | 73 | 54 |
| 270 | 1.29 | 0.33 | 0.038 | 0.071 | 0.041 | 2.3 | 10.8 | 8.5 | 69 | 116 | 363 | 74 | 77 | 57 |
| 360 | 1.24 | 0.34 | 0.035 | 0.062 | 0.039 | 2.4 | 11.3 | 8.1 | 85 | 138 | 650 | 71 | 73 | 51 |
| 275 | 1.18 | 0.36 | 0.032 | 0.069 | 0.038 | 2.5 | 11.7 | 7.8 | 76 | 117 | 435 | 72 | 74 | 53 |
| 220 | 1.14 | 0.37 | 0.030 | 0.058 | 0.037 | 2.5 | 12.2 | 7.4 | 96 | 100 | 416 | 72 | 75 | 55 |
| 290 | 1.09 | 0.39 | 0.027 | 0.068 | 0.036 | 2.6 | 12.6 | 7.0 | 71 | 121 | 430 | 70 | 73 | 51 |
| 420 | 1.05 | 0.40 | 0.024 | 0.056 | 0.035 | 2.7 | 13.1 | 6.6 | 94 | 150 | 843 | 70 | 71 | 49 |
| 340 | 1.01 | 0.42 | 0.022 | 0.066 | 0.034 | 2.8 | 13.5 | 6.3 | 77 | 140 | 547 | 69 | 72 | 49 |
| 490 | 0.98 | 0.43 | 0.019 | 0.054 | 0.033 | 2.8 | 14.0 | 5.9 | 92 | 162 | 945 | 69 | 70 | 48 |
| 400 | 0.94 | 0.45 | 0.017 | 0.064 | 0.032 | 2.9 | 14.4 | 5.5 | 72 | 143 | 593 | 68 | 70 | 47 |
| 450 | 0.91 | 0.46 | 0.013 | 0.050 | 0.030 | 3.0 | 15.0 | 5.0 | 68 | 122 | 584 | 68 | 71 | 48 |

Tabla C.2. Eficiencias en el RCO. Modificación de K

| Ls (m) | Q ₀ ($\frac{1}{s}$) | S ₀ (%) | K ($\frac{cm}{min}$) | n _i | n | w | h | Z _m | D _s | t _a | Tr | η _z | η _v | η |
|-----------|-------------------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|-------|------|------|----------------|----------------|----------------|------|----------------|----------------|----|
| | | | | (s/m ^{1/3}) | | (cm) | | | (min) | | (%) | | | |
| 260 | 2.10 | 0.20 | 0.059 | 0.100 | 0.060 | 1.0 | 3.0 | 15.0 | 99 | 129 | 537 | 75 | 77 | 58 |
| 420 | 1.91 | 0.22 | 0.056 | 0.086 | 0.059 | 1.1 | 3.6 | 14.5 | 88 | 158 | 848 | 74 | 74 | 55 |
| 310 | 1.79 | 0.24 | 0.053 | 0.098 | 0.057 | 1.2 | 4.1 | 14.1 | 81 | 141 | 588 | 75 | 75 | 56 |
| 235 | 1.68 | 0.25 | 0.051 | 0.096 | 0.056 | 1.3 | 4.5 | 13.8 | 97 | 130 | 546 | 75 | 76 | 57 |
| 335 | 1.59 | 0.27 | 0.048 | 0.084 | 0.055 | 1.3 | 5.0 | 13.4 | 67 | 138 | 537 | 76 | 77 | 58 |
| 420 | 1.50 | 0.28 | 0.045 | 0.083 | 0.054 | 1.4 | 5.4 | 13.0 | 90 | 200 | 1036 | 71 | 74 | 53 |
| 325 | 1.42 | 0.30 | 0.043 | 0.094 | 0.053 | 1.5 | 5.9 | 12.6 | 65 | 152 | 554 | 75 | 75 | 57 |
| 415 | 1.36 | 0.31 | 0.040 | 0.081 | 0.052 | 1.6 | 6.3 | 12.3 | 89 | 196 | 1078 | 71 | 72 | 52 |
| 300 | 1.29 | 0.33 | 0.038 | 0.092 | 0.051 | 1.6 | 6.8 | 11.9 | 80 | 174 | 692 | 72 | 74 | 53 |
| 330 | 1.24 | 0.34 | 0.035 | 0.079 | 0.050 | 1.7 | 7.2 | 11.5 | 73 | 160 | 702 | 72 | 74 | 53 |
| 430 | 1.18 | 0.36 | 0.032 | 0.090 | 0.048 | 1.8 | 7.7 | 11.1 | 84 | 227 | 1164 | 70 | 70 | 49 |
| 320 | 1.14 | 0.37 | 0.030 | 0.077 | 0.047 | 1.9 | 8.1 | 10.8 | 79 | 160 | 761 | 72 | 72 | 52 |
| 270 | 1.09 | 0.39 | 0.027 | 0.088 | 0.046 | 1.9 | 8.6 | 10.4 | 93 | 183 | 774 | 71 | 73 | 51 |
| 350 | 1.05 | 0.40 | 0.024 | 0.075 | 0.045 | 2.0 | 9.0 | 10.0 | 82 | 181 | 910 | 71 | 71 | 50 |
| 310 | 1.01 | 0.42 | 0.022 | 0.053 | 0.044 | 2.1 | 9.5 | 9.6 | 98 | 147 | 927 | 71 | 73 | 52 |
| 405 | 0.98 | 0.43 | 0.019 | 0.073 | 0.043 | 2.2 | 9.9 | 9.3 | 75 | 192 | 988 | 69 | 69 | 48 |
| 640 | 0.94 | 0.45 | 0.017 | 0.060 | 0.042 | 2.2 | 10.4 | 8.9 | 86 | 256 | 1916 | 68 | 67 | 45 |
| 530 | 0.91 | 0.46 | 0.013 | 0.071 | 0.041 | 2.3 | 10.8 | 8.5 | 69 | 238 | 1253 | 67 | 68 | 46 |
| 130 | 0.88 | 0.48 | 0.083 | 0.062 | 0.039 | 2.4 | 11.3 | 8.1 | 85 | 66 | 308 | 74 | 75 | 55 |
| 100 | 0.86 | 0.49 | 0.080 | 0.069 | 0.038 | 2.5 | 11.7 | 7.8 | 76 | 56 | 202 | 74 | 76 | 56 |
| 75 | 0.83 | 0.51 | 0.077 | 0.058 | 0.037 | 2.5 | 12.2 | 7.4 | 96 | 48 | 183 | 74 | 78 | 58 |
| 90 | 0.81 | 0.52 | 0.074 | 0.068 | 0.036 | 2.6 | 12.6 | 7.0 | 71 | 47 | 165 | 73 | 75 | 55 |
| 130 | 0.79 | 0.54 | 0.072 | 0.056 | 0.035 | 2.7 | 13.1 | 6.6 | 94 | 66 | 318 | 73 | 74 | 54 |
| 95 | 0.76 | 0.55 | 0.069 | 0.066 | 0.034 | 2.8 | 13.5 | 6.3 | 77 | 49 | 185 | 73 | 75 | 54 |
| 125 | 0.74 | 0.57 | 0.066 | 0.054 | 0.033 | 2.8 | 14.0 | 5.9 | 92 | 54 | 286 | 73 | 73 | 53 |
| 95 | 0.72 | 0.58 | 0.064 | 0.064 | 0.032 | 2.9 | 14.4 | 5.5 | 72 | 45 | 164 | 72 | 74 | 53 |
| 90 | 0.70 | 0.60 | 0.061 | 0.050 | 0.030 | 3.0 | 15.0 | 5.0 | 68 | 33 | 135 | 72 | 75 | 54 |

Tabla C.3. Eficiencias en el RCO. Modificación de n

| L_s (m) | Q_0 $\left(\frac{l}{s}\right)$ | S_0 (%) | K $\left(\frac{cm}{min}\right)$ | n_1 $\left(s/m^{1/3}\right)$ | n $\left(s/m^{1/3}\right)$ | w | h | Z_m | D_s | t_a | T_r | η_z | η_v | η |
|--------------|-------------------------------------|--------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|--------|
| | | | | | | (cm) | | | | (min) | | (%) | | |
| 205 | 2.10 | 0.20 | 0.083 | 0.100 | 0.039 | 1.0 | 3.0 | 15.0 | 99 | 121 | 449 | 73 | 75 | 55 |
| 350 | 1.91 | 0.22 | 0.080 | 0.086 | 0.038 | 1.1 | 3.6 | 14.5 | 88 | 173 | 740 | 71 | 74 | 53 |
| 250 | 1.79 | 0.24 | 0.077 | 0.098 | 0.037 | 1.2 | 4.1 | 14.1 | 81 | 143 | 506 | 71 | 74 | 53 |
| 185 | 1.68 | 0.25 | 0.074 | 0.096 | 0.036 | 1.3 | 4.5 | 13.8 | 97 | 129 | 457 | 72 | 74 | 54 |
| 250 | 1.58 | 0.27 | 0.072 | 0.084 | 0.035 | 1.3 | 5.0 | 13.4 | 67 | 122 | 420 | 74 | 75 | 56 |
| 320 | 1.50 | 0.28 | 0.069 | 0.083 | 0.034 | 1.4 | 5.4 | 13.0 | 90 | 198 | 827 | 70 | 73 | 51 |
| 235 | 1.42 | 0.30 | 0.066 | 0.094 | 0.033 | 1.5 | 5.9 | 12.6 | 65 | 130 | 420 | 73 | 74 | 54 |
| 310 | 1.36 | 0.31 | 0.064 | 0.081 | 0.032 | 1.6 | 6.3 | 12.3 | 89 | 200 | 840 | 70 | 71 | 50 |
| 210 | 1.29 | 0.33 | 0.061 | 0.092 | 0.030 | 1.6 | 6.8 | 11.9 | 80 | 151 | 518 | 70 | 71 | 50 |
| 195 | 1.24 | 0.34 | 0.059 | 0.079 | 0.060 | 1.7 | 7.2 | 11.5 | 73 | 91 | 378 | 75 | 78 | 59 |
| 250 | 1.18 | 0.36 | 0.056 | 0.090 | 0.059 | 1.8 | 7.7 | 11.1 | 84 | 131 | 601 | 73 | 75 | 55 |
| 175 | 1.13 | 0.37 | 0.053 | 0.077 | 0.057 | 1.9 | 8.1 | 10.8 | 79 | 85 | 375 | 76 | 77 | 58 |
| 145 | 1.09 | 0.39 | 0.051 | 0.088 | 0.056 | 1.9 | 8.6 | 10.4 | 93 | 98 | 373 | 74 | 77 | 57 |
| 180 | 1.05 | 0.40 | 0.048 | 0.075 | 0.055 | 2.0 | 9.0 | 10.0 | 82 | 93 | 412 | 75 | 77 | 57 |
| 150 | 1.01 | 0.42 | 0.045 | 0.053 | 0.051 | 2.1 | 9.5 | 9.6 | 98 | 71 | 399 | 75 | 78 | 59 |
| 185 | 0.98 | 0.43 | 0.043 | 0.073 | 0.052 | 2.2 | 9.9 | 9.3 | 75 | 90 | 387 | 74 | 76 | 56 |
| 260 | 0.94 | 0.45 | 0.040 | 0.060 | 0.053 | 2.2 | 10.4 | 8.9 | 86 | 99 | 660 | 73 | 74 | 54 |
| 195 | 0.91 | 0.46 | 0.038 | 0.071 | 0.054 | 2.3 | 10.8 | 8.5 | 69 | 87 | 358 | 76 | 77 | 59 |
| 275 | 0.88 | 0.48 | 0.035 | 0.062 | 0.050 | 2.4 | 11.3 | 8.1 | 85 | 110 | 694 | 72 | 73 | 52 |
| 215 | 0.86 | 0.49 | 0.032 | 0.069 | 0.048 | 2.5 | 11.7 | 7.8 | 76 | 93 | 453 | 73 | 74 | 54 |
| 165 | 0.83 | 0.51 | 0.030 | 0.058 | 0.047 | 2.5 | 12.2 | 7.4 | 96 | 74 | 423 | 74 | 75 | 55 |
| 220 | 0.81 | 0.52 | 0.027 | 0.068 | 0.046 | 2.6 | 12.6 | 7.0 | 71 | 92 | 428 | 71 | 74 | 52 |
| 330 | 0.79 | 0.54 | 0.024 | 0.056 | 0.045 | 2.7 | 13.1 | 6.6 | 94 | 115 | 878 | 70 | 71 | 50 |
| 260 | 0.76 | 0.55 | 0.022 | 0.066 | 0.044 | 2.8 | 13.5 | 6.3 | 77 | 99 | 543 | 71 | 72 | 51 |
| 380 | 0.74 | 0.57 | 0.019 | 0.054 | 0.043 | 2.8 | 14.0 | 5.9 | 92 | 112 | 955 | 69 | 70 | 48 |
| 320 | 0.72 | 0.58 | 0.017 | 0.064 | 0.042 | 2.9 | 14.4 | 5.5 | 72 | 112 | 602 | 68 | 71 | 49 |
| 350 | 0.70 | 0.60 | 0.013 | 0.050 | 0.041 | 3.0 | 15.0 | 5.0 | 68 | 79 | 578 | 69 | 71 | 49 |

Tabla C.4. Eficiencias en el RCO. Modificación de w

| Ls | Q ₀ | S ₀ | K | n ₁ | n | w | h | Z _m | D _s | t _a | T _r | η _z | η _v | η |
|-----|-------------------|----------------|----------------------|-----------------------|-------|------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|
| (m) | ($\frac{l}{s}$) | (%) | ($\frac{cm}{min}$) | (s/m ^{1/3}) | | (cm) | | | | (min) | | (%) | | |
| 195 | 2.10 | 0.20 | 0.083 | 0.100 | 0.060 | 2.4 | 3.0 | 15.0 | 99 | 78 | 390 | 77 | 78 | 60 |
| 320 | 1.91 | 0.22 | 0.080 | 0.086 | 0.059 | 2.5 | 3.6 | 14.5 | 88 | 94 | 618 | 75 | 76 | 57 |
| 235 | 1.79 | 0.24 | 0.077 | 0.098 | 0.057 | 2.5 | 4.1 | 14.1 | 81 | 90 | 432 | 76 | 77 | 58 |
| 175 | 1.68 | 0.25 | 0.074 | 0.096 | 0.056 | 2.6 | 4.5 | 13.8 | 97 | 81 | 393 | 76 | 77 | 59 |
| 240 | 1.58 | 0.27 | 0.072 | 0.084 | 0.055 | 2.7 | 5.0 | 13.4 | 67 | 83 | 371 | 78 | 78 | 61 |
| 295 | 1.50 | 0.28 | 0.069 | 0.083 | 0.054 | 2.8 | 5.4 | 13.0 | 90 | 107 | 691 | 74 | 75 | 56 |
| 230 | 1.42 | 0.30 | 0.066 | 0.094 | 0.053 | 2.8 | 5.9 | 12.6 | 65 | 95 | 376 | 76 | 78 | 59 |
| 290 | 1.36 | 0.31 | 0.064 | 0.081 | 0.052 | 2.9 | 6.3 | 12.3 | 89 | 113 | 709 | 73 | 75 | 55 |
| 200 | 1.29 | 0.33 | 0.061 | 0.092 | 0.051 | 3.0 | 6.8 | 11.9 | 80 | 97 | 439 | 74 | 76 | 56 |
| 200 | 1.24 | 0.34 | 0.059 | 0.079 | 0.050 | 1.0 | 7.2 | 11.5 | 73 | 115 | 400 | 74 | 77 | 57 |
| 260 | 1.18 | 0.36 | 0.056 | 0.090 | 0.048 | 1.1 | 7.7 | 11.1 | 84 | 174 | 646 | 71 | 74 | 53 |
| 180 | 1.13 | 0.37 | 0.053 | 0.077 | 0.047 | 1.2 | 8.1 | 10.8 | 79 | 110 | 401 | 74 | 76 | 56 |
| 145 | 1.09 | 0.39 | 0.051 | 0.088 | 0.046 | 1.3 | 8.6 | 10.4 | 93 | 115 | 385 | 73 | 76 | 56 |
| 185 | 1.05 | 0.40 | 0.048 | 0.075 | 0.045 | 1.3 | 9.0 | 10.0 | 82 | 121 | 440 | 73 | 76 | 55 |
| 155 | 1.01 | 0.42 | 0.045 | 0.053 | 0.044 | 1.4 | 9.5 | 9.6 | 98 | 98 | 419 | 74 | 78 | 58 |
| 190 | 0.98 | 0.43 | 0.043 | 0.073 | 0.043 | 1.5 | 9.9 | 9.3 | 75 | 117 | 411 | 72 | 75 | 54 |
| 280 | 0.94 | 0.45 | 0.040 | 0.060 | 0.042 | 1.6 | 10.4 | 8.9 | 86 | 162 | 732 | 70 | 74 | 52 |
| 205 | 0.91 | 0.46 | 0.038 | 0.071 | 0.041 | 1.6 | 10.8 | 8.5 | 69 | 121 | 391 | 74 | 77 | 57 |
| 290 | 0.88 | 0.48 | 0.035 | 0.062 | 0.039 | 1.7 | 11.3 | 8.1 | 85 | 166 | 748 | 70 | 73 | 51 |
| 225 | 0.86 | 0.49 | 0.032 | 0.069 | 0.038 | 1.8 | 11.7 | 7.8 | 76 | 134 | 494 | 71 | 73 | 52 |
| 170 | 0.83 | 0.51 | 0.030 | 0.058 | 0.037 | 1.9 | 12.2 | 7.4 | 96 | 108 | 454 | 72 | 74 | 53 |
| 230 | 0.81 | 0.52 | 0.027 | 0.068 | 0.036 | 1.9 | 12.6 | 7.0 | 71 | 127 | 427 | 74 | 74 | 55 |
| 350 | 0.79 | 0.54 | 0.024 | 0.056 | 0.035 | 2.0 | 13.1 | 6.6 | 94 | 195 | 945 | 69 | 71 | 49 |
| 270 | 0.76 | 0.55 | 0.022 | 0.066 | 0.034 | 2.1 | 13.5 | 6.3 | 77 | 143 | 580 | 70 | 70 | 49 |
| 400 | 0.74 | 0.57 | 0.019 | 0.054 | 0.033 | 2.2 | 14.0 | 5.9 | 92 | 212 | 1026 | 68 | 70 | 47 |
| 325 | 0.72 | 0.58 | 0.017 | 0.064 | 0.032 | 2.2 | 14.4 | 5.5 | 72 | 158 | 636 | 68 | 69 | 47 |
| 360 | 0.70 | 0.60 | 0.013 | 0.050 | 0.030 | 2.3 | 15.0 | 5.0 | 68 | 136 | 611 | 68 | 70 | 48 |

Tabla C.5. Eficiencias en el RCO. Modificación de h

| Ls (m) | Q ₀ ($\frac{l}{s}$) | S ₀ (%) | K ($\frac{cm}{min}$) | n _i | n | w | h | Z _m | D _s | t _a | T _r | η _z | η _v | η |
|-----------|-------------------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|-------|------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|
| | | | | (s/m ^{1/3}) | | (cm) | | | (min) | (%) | | | | |
| 120 | 2.10 | 0.20 | 0.083 | 0.100 | 0.060 | 1.0 | 11.3 | 15.0 | 99 | 85 | 242 | 77 | 78 | 60 |
| 205 | 1.91 | 0.22 | 0.080 | 0.086 | 0.059 | 1.1 | 11.7 | 14.5 | 88 | 119 | 386 | 76 | 78 | 59 |
| 150 | 1.79 | 0.24 | 0.077 | 0.098 | 0.057 | 1.2 | 12.2 | 14.1 | 81 | 95 | 273 | 76 | 77 | 59 |
| 110 | 1.68 | 0.25 | 0.074 | 0.096 | 0.056 | 1.3 | 12.6 | 13.8 | 97 | 82 | 246 | 77 | 77 | 59 |
| 155 | 1.58 | 0.27 | 0.072 | 0.084 | 0.055 | 1.3 | 13.1 | 13.4 | 67 | 86 | 238 | 78 | 79 | 61 |
| 190 | 1.50 | 0.28 | 0.069 | 0.083 | 0.054 | 1.4 | 13.5 | 13.0 | 90 | 122 | 428 | 76 | 76 | 58 |
| 150 | 1.42 | 0.30 | 0.066 | 0.094 | 0.053 | 1.5 | 14.0 | 12.6 | 65 | 92 | 241 | 76 | 78 | 60 |
| 190 | 1.36 | 0.31 | 0.064 | 0.081 | 0.052 | 1.6 | 14.4 | 12.3 | 89 | 126 | 443 | 75 | 76 | 57 |
| 130 | 1.29 | 0.33 | 0.061 | 0.092 | 0.051 | 1.6 | 15.0 | 11.9 | 80 | 94 | 278 | 75 | 77 | 57 |
| 265 | 1.24 | 0.34 | 0.059 | 0.079 | 0.050 | 1.7 | 3.0 | 11.5 | 73 | 90 | 547 | 74 | 75 | 55 |
| 330 | 1.18 | 0.36 | 0.056 | 0.090 | 0.048 | 1.8 | 3.6 | 11.1 | 84 | 129 | 860 | 71 | 71 | 51 |
| 240 | 1.14 | 0.37 | 0.053 | 0.077 | 0.047 | 1.9 | 4.1 | 10.8 | 79 | 97 | 547 | 73 | 74 | 54 |
| 190 | 1.09 | 0.39 | 0.051 | 0.088 | 0.046 | 1.9 | 4.5 | 10.4 | 93 | 105 | 521 | 73 | 74 | 54 |
| 235 | 1.05 | 0.40 | 0.048 | 0.075 | 0.045 | 2.0 | 5.0 | 10.0 | 82 | 100 | 578 | 73 | 73 | 53 |
| 195 | 1.01 | 0.42 | 0.045 | 0.053 | 0.044 | 2.1 | 5.4 | 9.6 | 98 | 72 | 547 | 74 | 75 | 56 |
| 240 | 0.98 | 0.43 | 0.043 | 0.073 | 0.043 | 2.2 | 5.9 | 9.3 | 75 | 101 | 540 | 72 | 72 | 52 |
| 390 | 0.94 | 0.45 | 0.040 | 0.060 | 0.042 | 2.2 | 6.3 | 8.9 | 86 | 172 | 933 | 75 | 75 | 57 |
| 260 | 0.91 | 0.46 | 0.038 | 0.071 | 0.041 | 2.3 | 6.8 | 8.5 | 69 | 114 | 514 | 73 | 75 | 55 |
| 400 | 0.88 | 0.48 | 0.035 | 0.062 | 0.039 | 2.4 | 7.2 | 8.1 | 85 | 195 | 967 | 73 | 74 | 54 |
| 285 | 0.86 | 0.49 | 0.032 | 0.069 | 0.038 | 2.5 | 7.7 | 7.8 | 76 | 123 | 656 | 70 | 71 | 50 |
| 220 | 0.83 | 0.51 | 0.030 | 0.058 | 0.037 | 2.5 | 8.1 | 7.4 | 96 | 100 | 610 | 71 | 72 | 51 |
| 295 | 0.81 | 0.52 | 0.027 | 0.068 | 0.036 | 2.6 | 8.6 | 7.0 | 71 | 126 | 607 | 70 | 71 | 49 |
| 450 | 0.79 | 0.54 | 0.024 | 0.056 | 0.035 | 2.7 | 9.0 | 6.6 | 94 | 172 | 1257 | 68 | 70 | 47 |
| 350 | 0.76 | 0.55 | 0.022 | 0.066 | 0.034 | 2.8 | 9.5 | 6.3 | 77 | 148 | 789 | 68 | 69 | 47 |
| 530 | 0.74 | 0.57 | 0.019 | 0.054 | 0.033 | 2.8 | 9.9 | 5.9 | 92 | 200 | 1381 | 67 | 70 | 47 |
| 420 | 0.72 | 0.58 | 0.017 | 0.064 | 0.032 | 2.9 | 10.4 | 5.5 | 72 | 159 | 849 | 67 | 68 | 45 |
| 480 | 0.70 | 0.60 | 0.013 | 0.050 | 0.030 | 3.0 | 10.8 | 5.0 | 68 | 147 | 812 | 68 | 71 | 48 |

Tabla C.6. Eficiencias en el RCO. Modificación de Z_m

| L_s (m) | Q_0 $\left(\frac{1}{s}\right)$ | S_0 (%) | K $\left(\frac{cm}{min}\right)$ | n_i $\left(s/m^{1/3}\right)$ | n $\left(s/m^{1/3}\right)$ | w | h | Z_m | D_s | t_a | T_r | η_z | η_v | η |
|--------------|-------------------------------------|--------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----|------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|--------|
| | | | | | | | (cm) | | | (min) | | (%) | | |
| 175 | 2.10 | 0.20 | 0.083 | 0.100 | 0.060 | 1.0 | 3.0 | 11.5 | 99 | 79 | 273 | 76 | 77 | 59 |
| 300 | 1.91 | 0.22 | 0.080 | 0.086 | 0.059 | 1.1 | 3.6 | 11.9 | 88 | 113 | 477 | 74 | 77 | 57 |
| 215 | 1.79 | 0.24 | 0.077 | 0.098 | 0.057 | 1.2 | 4.1 | 12.3 | 81 | 95 | 346 | 75 | 76 | 57 |
| 165 | 1.68 | 0.25 | 0.074 | 0.096 | 0.056 | 1.3 | 4.5 | 12.6 | 97 | 93 | 343 | 75 | 78 | 58 |
| 225 | 1.59 | 0.27 | 0.072 | 0.084 | 0.055 | 1.3 | 5.0 | 11.1 | 67 | 92 | 291 | 76 | 79 | 60 |
| 270 | 1.50 | 0.28 | 0.069 | 0.083 | 0.054 | 1.4 | 5.4 | 10.8 | 90 | 121 | 521 | 73 | 76 | 56 |
| 205 | 1.42 | 0.30 | 0.066 | 0.094 | 0.053 | 1.5 | 5.9 | 10.4 | 65 | 92 | 277 | 76 | 77 | 59 |
| 225 | 1.36 | 0.31 | 0.064 | 0.081 | 0.052 | 1.6 | 6.3 | 6.6 | 89 | 81 | 291 | 74 | 76 | 56 |
| 150 | 1.29 | 0.33 | 0.061 | 0.092 | 0.051 | 1.6 | 6.8 | 6.3 | 80 | 61 | 174 | 75 | 75 | 56 |
| 165 | 1.24 | 0.34 | 0.059 | 0.079 | 0.050 | 1.7 | 7.2 | 5.9 | 73 | 58 | 166 | 75 | 77 | 58 |
| 210 | 1.18 | 0.36 | 0.056 | 0.090 | 0.048 | 1.8 | 7.7 | 5.5 | 84 | 81 | 254 | 72 | 74 | 54 |
| 145 | 1.14 | 0.37 | 0.053 | 0.077 | 0.047 | 1.9 | 8.1 | 5.0 | 79 | 50 | 146 | 75 | 76 | 57 |
| 160 | 1.09 | 0.39 | 0.051 | 0.088 | 0.046 | 1.9 | 8.6 | 13.0 | 93 | 130 | 539 | 74 | 75 | 55 |
| 205 | 1.05 | 0.40 | 0.048 | 0.075 | 0.045 | 2.0 | 9.0 | 13.4 | 82 | 137 | 662 | 73 | 74 | 54 |
| 175 | 1.01 | 0.42 | 0.045 | 0.053 | 0.044 | 2.1 | 9.5 | 13.8 | 98 | 115 | 691 | 74 | 76 | 56 |
| 220 | 0.98 | 0.43 | 0.043 | 0.073 | 0.043 | 2.2 | 9.9 | 14.1 | 75 | 151 | 745 | 73 | 73 | 53 |
| 335 | 0.94 | 0.45 | 0.040 | 0.060 | 0.042 | 2.2 | 10.4 | 14.5 | 86 | 226 | 1484 | 70 | 71 | 50 |
| 255 | 0.91 | 0.46 | 0.038 | 0.071 | 0.041 | 2.3 | 10.8 | 15.0 | 69 | 199 | 884 | 73 | 75 | 55 |
| 330 | 0.88 | 0.48 | 0.035 | 0.062 | 0.039 | 2.4 | 11.3 | 10.0 | 85 | 200 | 1072 | 69 | 72 | 50 |
| 255 | 0.86 | 0.49 | 0.032 | 0.069 | 0.038 | 2.5 | 11.7 | 9.6 | 76 | 162 | 710 | 70 | 73 | 51 |
| 200 | 0.83 | 0.51 | 0.030 | 0.058 | 0.037 | 2.5 | 12.2 | 9.3 | 96 | 140 | 680 | 71 | 74 | 52 |
| 260 | 0.81 | 0.52 | 0.027 | 0.068 | 0.036 | 2.6 | 12.6 | 8.9 | 71 | 149 | 667 | 71 | 71 | 50 |
| 405 | 0.79 | 0.54 | 0.024 | 0.056 | 0.035 | 2.7 | 13.1 | 8.5 | 94 | 244 | 1436 | 68 | 70 | 48 |
| 320 | 0.76 | 0.55 | 0.022 | 0.066 | 0.034 | 2.8 | 13.5 | 8.1 | 77 | 198 | 918 | 68 | 70 | 48 |
| 485 | 0.74 | 0.57 | 0.019 | 0.054 | 0.033 | 2.8 | 14.0 | 7.8 | 92 | 289 | 1647 | 67 | 70 | 47 |
| 380 | 0.72 | 0.58 | 0.017 | 0.064 | 0.032 | 2.9 | 14.4 | 7.4 | 72 | 202 | 1013 | 68 | 68 | 46 |
| 430 | 0.70 | 0.60 | 0.013 | 0.050 | 0.030 | 3.0 | 15.0 | 7.0 | 68 | 180 | 1041 | 68 | 69 | 47 |

Tabla C.7. Eficiencias en el CP. Modificación de S_0

| L_s (m) | Q_0 $\left(\frac{1}{s}\right)$ | S_0 (%) | K $\left(\frac{cm}{min}\right)$ | n_i $\left(s/m^{1/3}\right)$ | n | w | h | Z_m | D_s | t_a | T_r | η_z | η_v | η |
|--------------|-------------------------------------|--------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|--------|
| | | | | | | (cm) | | | | (min) | (%) | | | |
| 115 | 1.26 | 0.48 | 0.083 | 0.100 | 0.060 | 1.0 | 3.0 | 15.0 | 99 | 22 | 697 | 72 | 89 | 64 |
| 200 | 1.22 | 0.49 | 0.080 | 0.086 | 0.059 | 1.1 | 3.6 | 14.5 | 88 | 57 | 1142 | 68 | 85 | 58 |
| 150 | 1.19 | 0.51 | 0.077 | 0.098 | 0.057 | 1.2 | 4.1 | 14.1 | 81 | 50 | 722 | 73 | 86 | 62 |
| 110 | 1.15 | 0.52 | 0.074 | 0.096 | 0.056 | 1.3 | 4.5 | 13.8 | 97 | 43 | 635 | 72 | 87 | 63 |
| 145 | 1.12 | 0.54 | 0.072 | 0.084 | 0.055 | 1.3 | 5.0 | 13.4 | 67 | 46 | 575 | 68 | 91 | 62 |
| 190 | 1.09 | 0.55 | 0.069 | 0.083 | 0.054 | 1.4 | 5.4 | 13.0 | 90 | 61 | 1134 | 69 | 83 | 57 |
| 140 | 1.06 | 0.57 | 0.066 | 0.094 | 0.053 | 1.5 | 5.9 | 12.6 | 65 | 48 | 527 | 70 | 89 | 63 |
| 195 | 1.03 | 0.58 | 0.064 | 0.081 | 0.052 | 1.6 | 6.3 | 12.3 | 89 | 67 | 1155 | 67 | 84 | 57 |
| 135 | 1.00 | 0.60 | 0.061 | 0.092 | 0.051 | 1.6 | 6.8 | 11.9 | 80 | 54 | 657 | 71 | 85 | 60 |
| 265 | 3.00 | 0.20 | 0.059 | 0.079 | 0.050 | 1.7 | 7.2 | 11.5 | 73 | 64 | 335 | 75 | 83 | 62 |
| 340 | 2.73 | 0.22 | 0.056 | 0.090 | 0.048 | 1.8 | 7.7 | 11.1 | 84 | 90 | 557 | 73 | 82 | 60 |
| 240 | 2.55 | 0.24 | 0.053 | 0.077 | 0.047 | 1.9 | 8.1 | 10.8 | 79 | 61 | 363 | 75 | 84 | 63 |
| 190 | 2.40 | 0.25 | 0.051 | 0.088 | 0.046 | 1.9 | 8.6 | 10.4 | 93 | 59 | 345 | 76 | 83 | 63 |
| 230 | 2.26 | 0.27 | 0.048 | 0.075 | 0.045 | 2.0 | 9.0 | 10.0 | 82 | 57 | 390 | 76 | 83 | 63 |
| 195 | 2.14 | 0.28 | 0.045 | 0.053 | 0.044 | 2.1 | 9.5 | 9.6 | 98 | 41 | 414 | 72 | 87 | 63 |
| 235 | 2.03 | 0.30 | 0.043 | 0.073 | 0.043 | 2.2 | 9.9 | 9.3 | 75 | 57 | 376 | 74 | 83 | 61 |
| 340 | 1.94 | 0.31 | 0.040 | 0.060 | 0.042 | 2.2 | 10.4 | 8.9 | 86 | 62 | 708 | 71 | 82 | 58 |
| 270 | 1.85 | 0.33 | 0.038 | 0.071 | 0.041 | 2.3 | 10.8 | 8.5 | 69 | 60 | 399 | 72 | 86 | 63 |
| 360 | 1.76 | 0.34 | 0.035 | 0.062 | 0.039 | 2.4 | 11.3 | 8.1 | 85 | 71 | 763 | 68 | 82 | 56 |
| 275 | 1.69 | 0.36 | 0.032 | 0.069 | 0.038 | 2.5 | 11.7 | 7.8 | 76 | 61 | 477 | 73 | 82 | 59 |
| 220 | 1.62 | 0.37 | 0.030 | 0.058 | 0.037 | 2.5 | 12.2 | 7.4 | 96 | 47 | 488 | 71 | 85 | 60 |
| 290 | 1.56 | 0.39 | 0.027 | 0.068 | 0.036 | 2.6 | 12.6 | 7.0 | 71 | 60 | 463 | 71 | 82 | 58 |
| 420 | 1.50 | 0.40 | 0.024 | 0.056 | 0.035 | 2.7 | 13.1 | 6.6 | 94 | 66 | 1012 | 67 | 80 | 54 |
| 340 | 1.45 | 0.42 | 0.022 | 0.066 | 0.034 | 2.8 | 13.5 | 6.3 | 77 | 67 | 603 | 70 | 80 | 56 |
| 490 | 1.40 | 0.43 | 0.019 | 0.054 | 0.033 | 2.8 | 14.0 | 5.9 | 92 | 67 | 1125 | 67 | 80 | 53 |
| 400 | 1.35 | 0.45 | 0.017 | 0.064 | 0.032 | 2.9 | 14.4 | 5.5 | 72 | 70 | 653 | 69 | 78 | 54 |
| 450 | 1.30 | 0.46 | 0.013 | 0.050 | 0.030 | 3.0 | 15.0 | 5.0 | 68 | 63 | 666 | 67 | 80 | 54 |

Tabla C.8. Eficiencias en el CP. Modificación de K

| L _s (m) | Q ₀ ($\frac{l}{s}$) | S ₀ (%) | K ($\frac{cm}{min}$) | n _i | n | w | h | Z _m | D _s | t _a | T _r | η _z | η _v | η |
|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|-------|------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|
| | | | | (s/m ^{1/3}) | | (cm) | | | | (min) | | (%) | | |
| 260 | 3.00 | 0.20 | 0.059 | 0.100 | 0.060 | 1.0 | 3.0 | 15.0 | 99 | 81 | 616 | 74 | 85 | 63 |
| 420 | 2.73 | 0.22 | 0.056 | 0.086 | 0.059 | 1.1 | 3.6 | 14.5 | 88 | 99 | 1009 | 71 | 83 | 59 |
| 310 | 2.55 | 0.24 | 0.053 | 0.098 | 0.057 | 1.2 | 4.1 | 14.1 | 81 | 89 | 672 | 74 | 83 | 61 |
| 235 | 2.40 | 0.25 | 0.051 | 0.096 | 0.056 | 1.3 | 4.5 | 13.8 | 97 | 77 | 620 | 74 | 84 | 62 |
| 335 | 2.26 | 0.27 | 0.048 | 0.084 | 0.055 | 1.3 | 5.0 | 13.4 | 67 | 82 | 600 | 74 | 87 | 65 |
| 420 | 2.14 | 0.28 | 0.045 | 0.083 | 0.054 | 1.4 | 5.4 | 13.0 | 90 | 112 | 1233 | 68 | 83 | 57 |
| 325 | 2.03 | 0.30 | 0.043 | 0.094 | 0.053 | 1.5 | 5.9 | 12.6 | 65 | 88 | 603 | 74 | 85 | 63 |
| 415 | 1.94 | 0.31 | 0.040 | 0.081 | 0.052 | 1.6 | 6.3 | 12.3 | 89 | 108 | 1279 | 69 | 81 | 56 |
| 300 | 1.85 | 0.33 | 0.038 | 0.092 | 0.051 | 1.6 | 6.8 | 11.9 | 80 | 97 | 783 | 71 | 82 | 58 |
| 330 | 1.76 | 0.34 | 0.035 | 0.079 | 0.050 | 1.7 | 7.2 | 11.5 | 73 | 90 | 810 | 71 | 83 | 59 |
| 430 | 1.69 | 0.36 | 0.032 | 0.090 | 0.048 | 1.8 | 7.7 | 11.1 | 84 | 122 | 1344 | 69 | 79 | 54 |
| 320 | 1.62 | 0.37 | 0.030 | 0.077 | 0.047 | 1.9 | 8.1 | 10.8 | 79 | 88 | 883 | 70 | 81 | 57 |
| 270 | 1.56 | 0.39 | 0.027 | 0.088 | 0.046 | 1.9 | 8.6 | 10.4 | 93 | 95 | 872 | 70 | 82 | 58 |
| 350 | 1.50 | 0.40 | 0.024 | 0.075 | 0.045 | 2.0 | 9.0 | 10.0 | 82 | 95 | 1061 | 69 | 80 | 56 |
| 310 | 1.45 | 0.42 | 0.022 | 0.053 | 0.044 | 2.1 | 9.5 | 9.6 | 98 | 66 | 1145 | 67 | 83 | 56 |
| 405 | 1.40 | 0.43 | 0.019 | 0.073 | 0.043 | 2.2 | 9.9 | 9.3 | 75 | 101 | 1139 | 68 | 79 | 54 |
| 640 | 1.35 | 0.45 | 0.017 | 0.060 | 0.042 | 2.2 | 10.4 | 8.9 | 86 | 101 | 2313 | 65 | 77 | 50 |
| 530 | 1.30 | 0.46 | 0.013 | 0.071 | 0.041 | 2.3 | 10.8 | 8.5 | 69 | 125 | 1441 | 66 | 77 | 51 |
| 130 | 1.26 | 0.48 | 0.083 | 0.062 | 0.039 | 2.4 | 11.3 | 8.1 | 85 | 28 | 363 | 71 | 85 | 61 |
| 100 | 1.22 | 0.49 | 0.080 | 0.069 | 0.038 | 2.5 | 11.7 | 7.8 | 76 | 25 | 226 | 75 | 86 | 64 |
| 75 | 1.19 | 0.51 | 0.077 | 0.058 | 0.037 | 2.5 | 12.2 | 7.4 | 96 | 20 | 218 | 71 | 89 | 63 |
| 90 | 1.15 | 0.52 | 0.074 | 0.068 | 0.036 | 2.6 | 12.6 | 7.0 | 71 | 21 | 185 | 73 | 85 | 63 |
| 130 | 1.12 | 0.54 | 0.072 | 0.056 | 0.035 | 2.7 | 13.1 | 6.6 | 94 | 25 | 384 | 70 | 85 | 59 |
| 95 | 1.09 | 0.55 | 0.069 | 0.066 | 0.034 | 2.8 | 13.5 | 6.3 | 77 | 20 | 203 | 75 | 84 | 63 |
| 125 | 1.06 | 0.57 | 0.066 | 0.054 | 0.033 | 2.8 | 14.0 | 5.9 | 92 | 19 | 342 | 71 | 83 | 59 |
| 95 | 1.03 | 0.58 | 0.064 | 0.064 | 0.032 | 2.9 | 14.4 | 5.5 | 72 | 19 | 177 | 74 | 84 | 62 |
| 90 | 1.00 | 0.60 | 0.061 | 0.050 | 0.030 | 3.0 | 15.0 | 5.0 | 68 | 13 | 156 | 71 | 86 | 61 |

Tabla C.9. Eficiencias en el CP. Modificación de n

| Ls | Q ₀ | S ₀ | K | n ₁ | n | w | h | Z _m | D _s | t _a | T _r | η _z | η _v | η |
|-----|-------------------|----------------|----------------------|-----------------------|-------|------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|
| (m) | ($\frac{1}{s}$) | (%) | ($\frac{cm}{min}$) | (s/m ^{1/3}) | | (cm) | | | | (min) | | (%) | | |
| 205 | 3.00 | 0.20 | 0.083 | 0.100 | 0.039 | 1.0 | 3.0 | 15.0 | 99 | 69 | 497 | 74 | 83 | 61 |
| 350 | 2.73 | 0.22 | 0.080 | 0.086 | 0.038 | 1.1 | 3.6 | 14.5 | 88 | 97 | 849 | 70 | 82 | 57 |
| 250 | 2.55 | 0.24 | 0.077 | 0.098 | 0.037 | 1.2 | 4.1 | 14.1 | 81 | 81 | 554 | 73 | 81 | 59 |
| 185 | 2.40 | 0.25 | 0.074 | 0.096 | 0.036 | 1.3 | 4.5 | 13.8 | 97 | 69 | 498 | 74 | 82 | 60 |
| 250 | 2.26 | 0.27 | 0.072 | 0.084 | 0.035 | 1.3 | 5.0 | 13.4 | 67 | 67 | 451 | 75 | 85 | 64 |
| 320 | 2.14 | 0.28 | 0.069 | 0.083 | 0.034 | 1.4 | 5.4 | 13.0 | 90 | 102 | 933 | 70 | 81 | 57 |
| 235 | 2.03 | 0.30 | 0.066 | 0.094 | 0.033 | 1.5 | 5.9 | 12.6 | 65 | 70 | 438 | 75 | 83 | 62 |
| 310 | 1.94 | 0.31 | 0.064 | 0.081 | 0.032 | 1.6 | 6.3 | 12.3 | 89 | 100 | 940 | 70 | 80 | 56 |
| 210 | 1.85 | 0.33 | 0.061 | 0.092 | 0.030 | 1.6 | 6.8 | 11.9 | 80 | 78 | 553 | 73 | 78 | 57 |
| 195 | 1.76 | 0.34 | 0.059 | 0.079 | 0.060 | 1.7 | 7.2 | 11.5 | 73 | 49 | 430 | 75 | 87 | 65 |
| 250 | 1.69 | 0.36 | 0.056 | 0.090 | 0.059 | 1.8 | 7.7 | 11.1 | 84 | 69 | 692 | 72 | 84 | 61 |
| 175 | 1.62 | 0.37 | 0.053 | 0.077 | 0.057 | 1.9 | 8.1 | 10.8 | 79 | 45 | 431 | 75 | 86 | 64 |
| 145 | 1.56 | 0.39 | 0.051 | 0.088 | 0.056 | 1.9 | 8.6 | 10.4 | 93 | 49 | 420 | 73 | 87 | 64 |
| 180 | 1.50 | 0.40 | 0.048 | 0.075 | 0.055 | 2.0 | 9.0 | 10.0 | 82 | 47 | 484 | 72 | 86 | 62 |
| 150 | 1.45 | 0.42 | 0.045 | 0.053 | 0.051 | 2.1 | 9.5 | 9.6 | 98 | 32 | 503 | 69 | 88 | 61 |
| 185 | 1.40 | 0.43 | 0.043 | 0.073 | 0.052 | 2.2 | 9.9 | 9.3 | 75 | 44 | 450 | 72 | 85 | 62 |
| 260 | 1.35 | 0.45 | 0.040 | 0.060 | 0.053 | 2.2 | 10.4 | 8.9 | 86 | 44 | 821 | 68 | 83 | 57 |
| 195 | 1.30 | 0.46 | 0.038 | 0.071 | 0.054 | 2.3 | 10.8 | 8.5 | 69 | 42 | 433 | 70 | 88 | 62 |
| 275 | 1.26 | 0.48 | 0.035 | 0.062 | 0.050 | 2.4 | 11.3 | 8.1 | 85 | 48 | 856 | 68 | 83 | 56 |
| 215 | 1.22 | 0.49 | 0.032 | 0.069 | 0.048 | 2.5 | 11.7 | 7.8 | 76 | 45 | 539 | 71 | 84 | 59 |
| 165 | 1.19 | 0.51 | 0.030 | 0.058 | 0.047 | 2.5 | 12.2 | 7.4 | 96 | 32 | 527 | 69 | 85 | 59 |
| 220 | 1.15 | 0.52 | 0.027 | 0.068 | 0.046 | 2.6 | 12.6 | 7.0 | 71 | 44 | 507 | 69 | 83 | 57 |
| 330 | 1.12 | 0.54 | 0.024 | 0.056 | 0.045 | 2.7 | 13.1 | 6.6 | 94 | 44 | 1100 | 66 | 82 | 54 |
| 260 | 1.09 | 0.55 | 0.022 | 0.066 | 0.044 | 2.8 | 13.5 | 6.3 | 77 | 45 | 641 | 69 | 81 | 56 |
| 380 | 1.06 | 0.57 | 0.019 | 0.054 | 0.043 | 2.8 | 14.0 | 5.9 | 92 | 46 | 1184 | 66 | 80 | 53 |
| 320 | 1.03 | 0.58 | 0.017 | 0.064 | 0.042 | 2.9 | 14.4 | 5.5 | 72 | 51 | 706 | 67 | 81 | 54 |
| 350 | 1.00 | 0.60 | 0.013 | 0.050 | 0.041 | 3.0 | 15.0 | 5.0 | 68 | 43 | 703 | 65 | 82 | 53 |

Tabla C.10. Eficiencias en el CP. Modificación de w

| L_s (m) | Q_0 $\left(\frac{l}{s}\right)$ | S_0 (%) | K $\left(\frac{cm}{min}\right)$ | n_1 $\left(s/m^{1/3}\right)$ | n $\left(s/m^{1/3}\right)$ | w | h | Z_m | D_s | t_a | T_r | η_z | η_v | η |
|--------------|-------------------------------------|--------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|--------|
| | | | | | | (cm) | | | | (min) | (%) | | | |
| 195 | 3.00 | 0.20 | 0.083 | 0.100 | 0.060 | 2.4 | 3.0 | 15.0 | 99 | 50 | 462 | 74 | 87 | 64 |
| 320 | 2.73 | 0.22 | 0.080 | 0.086 | 0.059 | 2.5 | 3.6 | 14.5 | 88 | 61 | 757 | 72 | 85 | 61 |
| 235 | 2.55 | 0.24 | 0.077 | 0.098 | 0.057 | 2.5 | 4.1 | 14.1 | 81 | 55 | 505 | 74 | 85 | 63 |
| 175 | 2.40 | 0.25 | 0.074 | 0.096 | 0.056 | 2.6 | 4.5 | 13.8 | 97 | 46 | 458 | 74 | 86 | 64 |
| 240 | 2.26 | 0.27 | 0.072 | 0.084 | 0.055 | 2.7 | 5.0 | 13.4 | 67 | 48 | 431 | 74 | 89 | 66 |
| 295 | 2.14 | 0.28 | 0.069 | 0.083 | 0.054 | 2.8 | 5.4 | 13.0 | 90 | 57 | 842 | 71 | 85 | 60 |
| 230 | 2.03 | 0.30 | 0.066 | 0.094 | 0.053 | 2.8 | 5.9 | 12.6 | 65 | 52 | 429 | 73 | 88 | 64 |
| 290 | 1.94 | 0.31 | 0.064 | 0.081 | 0.052 | 2.9 | 6.3 | 12.3 | 89 | 56 | 864 | 70 | 85 | 59 |
| 200 | 1.85 | 0.33 | 0.061 | 0.092 | 0.051 | 3.0 | 6.8 | 11.9 | 80 | 50 | 503 | 73 | 84 | 62 |
| 200 | 1.76 | 0.34 | 0.059 | 0.079 | 0.050 | 1.0 | 7.2 | 11.5 | 73 | 65 | 441 | 74 | 85 | 63 |
| 260 | 1.69 | 0.36 | 0.056 | 0.090 | 0.048 | 1.1 | 7.7 | 11.1 | 84 | 94 | 716 | 71 | 83 | 59 |
| 180 | 1.62 | 0.37 | 0.053 | 0.077 | 0.047 | 1.2 | 8.1 | 10.8 | 79 | 60 | 440 | 74 | 84 | 63 |
| 145 | 1.56 | 0.39 | 0.051 | 0.088 | 0.046 | 1.3 | 8.6 | 10.4 | 93 | 61 | 413 | 75 | 84 | 63 |
| 185 | 1.50 | 0.40 | 0.048 | 0.075 | 0.045 | 1.3 | 9.0 | 10.0 | 82 | 64 | 485 | 73 | 85 | 62 |
| 155 | 1.45 | 0.42 | 0.045 | 0.053 | 0.044 | 1.4 | 9.5 | 9.6 | 98 | 47 | 505 | 70 | 88 | 61 |
| 190 | 1.40 | 0.43 | 0.043 | 0.073 | 0.043 | 1.5 | 9.9 | 9.3 | 75 | 61 | 450 | 73 | 84 | 61 |
| 280 | 1.35 | 0.45 | 0.040 | 0.060 | 0.042 | 1.6 | 10.4 | 8.9 | 86 | 78 | 861 | 68 | 83 | 56 |
| 205 | 1.30 | 0.46 | 0.038 | 0.071 | 0.041 | 1.6 | 10.8 | 8.5 | 69 | 62 | 443 | 70 | 88 | 61 |
| 290 | 1.26 | 0.48 | 0.035 | 0.062 | 0.039 | 1.7 | 11.3 | 8.1 | 85 | 79 | 872 | 68 | 82 | 56 |
| 225 | 1.22 | 0.49 | 0.032 | 0.069 | 0.038 | 1.8 | 11.7 | 7.8 | 76 | 68 | 552 | 71 | 83 | 59 |
| 170 | 1.19 | 0.51 | 0.030 | 0.058 | 0.037 | 1.9 | 12.2 | 7.4 | 96 | 50 | 529 | 70 | 84 | 58 |
| 230 | 1.15 | 0.52 | 0.027 | 0.068 | 0.036 | 1.9 | 12.6 | 7.0 | 71 | 63 | 490 | 69 | 87 | 60 |
| 350 | 1.12 | 0.54 | 0.024 | 0.056 | 0.035 | 2.0 | 13.1 | 6.6 | 94 | 85 | 1117 | 66 | 82 | 54 |
| 270 | 1.09 | 0.55 | 0.022 | 0.066 | 0.034 | 2.1 | 13.5 | 6.3 | 77 | 67 | 643 | 70 | 80 | 56 |
| 400 | 1.06 | 0.57 | 0.019 | 0.054 | 0.033 | 2.2 | 14.0 | 5.9 | 92 | 84 | 1185 | 67 | 80 | 54 |
| 325 | 1.03 | 0.58 | 0.017 | 0.064 | 0.032 | 2.2 | 14.4 | 5.5 | 72 | 72 | 688 | 69 | 79 | 55 |
| 360 | 1.00 | 0.60 | 0.013 | 0.050 | 0.030 | 2.3 | 15.0 | 5.0 | 68 | 55 | 699 | 67 | 81 | 54 |

Tabla C.11. Eficiencias en el CP. Modificación de h

| L_s (m) | Q_0 $\left(\frac{l}{s}\right)$ | S_0 (%) | K $\left(\frac{cm}{min}\right)$ | n_1 $\left(s/m^{1/3}\right)$ | n $\left(s/m^{1/3}\right)$ | w | h | Z_m | D_s | t_a | T_r | η_z | η_v | η |
|--------------|-------------------------------------|--------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|--------|
| | | | | | | (cm) | | | | (min) | | (%) | | |
| 120 | 3.00 | 0.20 | 0.083 | 0.100 | 0.060 | 1.0 | 11.3 | 15.0 | 99 | 50 | 251 | 79 | 85 | 67 |
| 205 | 2.73 | 0.22 | 0.080 | 0.086 | 0.059 | 1.1 | 11.7 | 14.5 | 88 | 69 | 420 | 76 | 85 | 65 |
| 150 | 2.55 | 0.24 | 0.077 | 0.098 | 0.057 | 1.2 | 12.2 | 14.1 | 81 | 56 | 284 | 78 | 84 | 66 |
| 110 | 2.40 | 0.25 | 0.074 | 0.096 | 0.056 | 1.3 | 12.6 | 13.8 | 97 | 47 | 257 | 79 | 85 | 67 |
| 155 | 2.26 | 0.27 | 0.072 | 0.084 | 0.055 | 1.3 | 13.1 | 13.4 | 67 | 49 | 242 | 80 | 88 | 70 |
| 190 | 2.14 | 0.28 | 0.069 | 0.083 | 0.054 | 1.4 | 13.5 | 13.0 | 90 | 66 | 471 | 77 | 85 | 65 |
| 150 | 2.03 | 0.30 | 0.066 | 0.094 | 0.053 | 1.5 | 14.0 | 12.6 | 65 | 52 | 241 | 79 | 88 | 69 |
| 190 | 1.94 | 0.31 | 0.064 | 0.081 | 0.052 | 1.6 | 14.4 | 12.3 | 89 | 63 | 487 | 77 | 85 | 65 |
| 130 | 1.85 | 0.33 | 0.061 | 0.092 | 0.051 | 1.6 | 15.0 | 11.9 | 80 | 52 | 290 | 77 | 84 | 65 |
| 265 | 1.76 | 0.34 | 0.059 | 0.079 | 0.050 | 1.7 | 3.0 | 11.5 | 73 | 54 | 656 | 71 | 84 | 60 |
| 330 | 1.69 | 0.36 | 0.056 | 0.090 | 0.048 | 1.8 | 3.6 | 11.1 | 84 | 70 | 1022 | 69 | 80 | 56 |
| 240 | 1.62 | 0.37 | 0.053 | 0.077 | 0.047 | 1.9 | 4.1 | 10.8 | 79 | 52 | 653 | 71 | 84 | 59 |
| 190 | 1.56 | 0.39 | 0.051 | 0.088 | 0.046 | 1.9 | 4.5 | 10.4 | 93 | 53 | 598 | 72 | 84 | 60 |
| 235 | 1.50 | 0.40 | 0.048 | 0.075 | 0.045 | 2.0 | 5.0 | 10.0 | 82 | 51 | 680 | 71 | 83 | 59 |
| 195 | 1.45 | 0.42 | 0.045 | 0.053 | 0.044 | 2.1 | 5.4 | 9.6 | 98 | 33 | 689 | 68 | 86 | 59 |
| 240 | 1.40 | 0.43 | 0.043 | 0.073 | 0.043 | 2.2 | 5.9 | 9.3 | 75 | 50 | 628 | 71 | 82 | 58 |
| 390 | 1.35 | 0.45 | 0.040 | 0.060 | 0.042 | 2.2 | 6.3 | 8.9 | 86 | 71 | 1101 | 73 | 87 | 63 |
| 260 | 1.30 | 0.46 | 0.038 | 0.071 | 0.041 | 2.3 | 6.8 | 8.5 | 69 | 53 | 609 | 68 | 87 | 59 |
| 400 | 1.26 | 0.48 | 0.035 | 0.062 | 0.039 | 2.4 | 7.2 | 8.1 | 85 | 78 | 1128 | 71 | 85 | 61 |
| 285 | 1.22 | 0.49 | 0.032 | 0.069 | 0.038 | 2.5 | 7.7 | 7.8 | 76 | 54 | 757 | 70 | 81 | 57 |
| 220 | 1.19 | 0.51 | 0.030 | 0.058 | 0.037 | 2.5 | 8.1 | 7.4 | 96 | 40 | 737 | 68 | 83 | 56 |
| 295 | 1.15 | 0.52 | 0.027 | 0.068 | 0.036 | 2.6 | 8.6 | 7.0 | 71 | 56 | 702 | 68 | 82 | 56 |
| 450 | 1.12 | 0.54 | 0.024 | 0.056 | 0.035 | 2.7 | 9.0 | 6.6 | 94 | 61 | 1540 | 65 | 81 | 52 |
| 350 | 1.09 | 0.55 | 0.022 | 0.066 | 0.034 | 2.8 | 9.5 | 6.3 | 77 | 19 | 926 | 69 | 80 | 55 |
| 530 | 1.06 | 0.57 | 0.019 | 0.054 | 0.033 | 2.8 | 9.9 | 5.9 | 92 | 63 | 1670 | 65 | 80 | 52 |
| 420 | 1.03 | 0.58 | 0.017 | 0.064 | 0.032 | 2.9 | 10.4 | 5.5 | 72 | 67 | 946 | 68 | 78 | 53 |
| 480 | 1.00 | 0.60 | 0.013 | 0.050 | 0.030 | 3.0 | 10.8 | 5.0 | 68 | 60 | 953 | 67 | 81 | 54 |

Tabla C.12. Eficiencias en el CP. Modificación de Z_m

| L_s (m) | Q_0 $\left(\frac{l}{s}\right)$ | S_0 (%) | K $\left(\frac{cm}{min}\right)$ | n_1 $\left(s/m^{1/3}\right)$ | n $\left(s/m^{1/3}\right)$ | w | h | Z_m | D_s | t_a | T_r | η_z | η_v | η |
|--------------|-------------------------------------|--------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|--------|
| | | | | | | (cm) | | | | (min) | | (%) | | |
| 175 | 3.00 | 0.20 | 0.083 | 0.100 | 0.060 | 1.0 | 3.0 | 11.5 | 99 | 51 | 300 | 76 | 84 | 64 |
| 300 | 2.73 | 0.22 | 0.080 | 0.086 | 0.059 | 1.1 | 3.6 | 11.9 | 88 | 70 | 551 | 72 | 85 | 62 |
| 215 | 2.55 | 0.24 | 0.077 | 0.098 | 0.057 | 1.2 | 4.1 | 12.3 | 81 | 59 | 384 | 76 | 83 | 63 |
| 165 | 2.40 | 0.25 | 0.074 | 0.096 | 0.056 | 1.3 | 4.5 | 12.6 | 97 | 54 | 381 | 75 | 86 | 65 |
| 225 | 2.26 | 0.27 | 0.072 | 0.084 | 0.055 | 1.3 | 5.0 | 11.1 | 67 | 54 | 312 | 76 | 89 | 67 |
| 270 | 2.14 | 0.28 | 0.069 | 0.083 | 0.054 | 1.4 | 5.4 | 10.8 | 90 | 67 | 600 | 72 | 85 | 61 |
| 205 | 2.03 | 0.30 | 0.066 | 0.094 | 0.053 | 1.5 | 5.9 | 10.4 | 65 | 53 | 288 | 77 | 86 | 66 |
| 225 | 1.94 | 0.31 | 0.064 | 0.081 | 0.052 | 1.6 | 6.3 | 6.6 | 89 | 47 | 322 | 74 | 83 | 62 |
| 150 | 1.85 | 0.33 | 0.061 | 0.092 | 0.051 | 1.6 | 6.8 | 6.3 | 80 | 37 | 178 | 78 | 81 | 63 |
| 165 | 1.76 | 0.34 | 0.059 | 0.079 | 0.050 | 1.7 | 7.2 | 5.9 | 73 | 32 | 172 | 79 | 83 | 66 |
| 210 | 1.69 | 0.36 | 0.056 | 0.090 | 0.048 | 1.8 | 7.7 | 5.5 | 84 | 47 | 273 | 74 | 81 | 60 |
| 145 | 1.62 | 0.37 | 0.053 | 0.077 | 0.047 | 1.9 | 8.1 | 5.0 | 79 | 29 | 153 | 78 | 83 | 65 |
| 160 | 1.56 | 0.39 | 0.051 | 0.088 | 0.046 | 1.9 | 8.6 | 13.0 | 93 | 64 | 607 | 73 | 84 | 62 |
| 205 | 1.50 | 0.40 | 0.048 | 0.075 | 0.045 | 2.0 | 9.0 | 13.4 | 82 | 67 | 775 | 72 | 84 | 60 |
| 175 | 1.45 | 0.42 | 0.045 | 0.053 | 0.044 | 2.1 | 9.5 | 13.8 | 98 | 49 | 866 | 69 | 86 | 59 |
| 220 | 1.40 | 0.43 | 0.043 | 0.073 | 0.043 | 2.2 | 9.9 | 14.1 | 75 | 72 | 872 | 71 | 83 | 58 |
| 335 | 1.35 | 0.45 | 0.040 | 0.060 | 0.042 | 2.2 | 10.4 | 14.5 | 86 | 97 | 1819 | 66 | 82 | 54 |
| 255 | 1.30 | 0.46 | 0.038 | 0.071 | 0.041 | 2.3 | 10.8 | 15.0 | 69 | 86 | 1052 | 68 | 87 | 60 |
| 330 | 1.26 | 0.48 | 0.035 | 0.062 | 0.039 | 2.4 | 11.3 | 10.0 | 85 | 85 | 1285 | 66 | 82 | 54 |
| 255 | 1.22 | 0.49 | 0.032 | 0.069 | 0.038 | 2.5 | 11.7 | 9.6 | 76 | 72 | 819 | 69 | 83 | 57 |
| 200 | 1.19 | 0.51 | 0.030 | 0.058 | 0.037 | 2.5 | 12.2 | 9.3 | 96 | 56 | 819 | 67 | 85 | 57 |
| 260 | 1.15 | 0.52 | 0.027 | 0.068 | 0.036 | 2.6 | 12.6 | 8.9 | 71 | 69 | 776 | 68 | 82 | 56 |
| 405 | 1.12 | 0.54 | 0.024 | 0.056 | 0.035 | 2.7 | 13.1 | 8.5 | 94 | 89 | 1731 | 65 | 81 | 53 |
| 320 | 1.09 | 0.55 | 0.022 | 0.066 | 0.034 | 2.8 | 13.5 | 8.1 | 77 | 83 | 1049 | 67 | 81 | 54 |
| 485 | 1.06 | 0.57 | 0.019 | 0.054 | 0.033 | 2.8 | 14.0 | 7.8 | 92 | 103 | 1965 | 65 | 81 | 52 |
| 380 | 1.03 | 0.58 | 0.017 | 0.064 | 0.032 | 2.9 | 14.4 | 7.4 | 72 | 84 | 1149 | 68 | 78 | 53 |
| 430 | 1.00 | 0.60 | 0.013 | 0.050 | 0.030 | 3.0 | 15.0 | 7.0 | 68 | 60 | 1226 | 67 | 80 | 53 |

Tabla C.13. Volúmenes del RCO y CP. Modificación de S_0

| Datos básicos | | | | RCO | | | CP | | | Ahorro de agua (%) |
|---------------|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| Ls (m) | Zm (m) | Ds (m) | Va (m ³) | Vz (m ³) | Vs (m ³) | Ve (m ³) | Vzc (m ³) | Vsc (m ³) | Vec (m ³) | |
| 115 | 0.150 | 1.00 | 17.44 | 23.05 | 6.93 | 29.98 | 24.15 | 3.07 | 27.22 | 9.21 |
| 200 | 0.145 | 0.88 | 25.44 | 35.14 | 12.51 | 47.65 | 37.33 | 6.59 | 43.92 | 7.83 |
| 150 | 0.141 | 0.81 | 17.15 | 23.28 | 7.56 | 30.83 | 23.65 | 3.89 | 27.54 | 10.67 |
| 110 | 0.138 | 0.97 | 14.67 | 19.78 | 6.25 | 26.03 | 20.40 | 3.01 | 23.41 | 10.07 |
| 145 | 0.134 | 0.67 | 12.96 | 17.19 | 4.87 | 22.06 | 18.97 | 1.89 | 20.86 | 5.44 |
| 190 | 0.130 | 0.90 | 22.34 | 31.07 | 11.88 | 42.96 | 32.50 | 6.58 | 39.08 | 9.03 |
| 140 | 0.126 | 0.65 | 11.50 | 15.43 | 4.62 | 20.05 | 16.32 | 1.96 | 18.28 | 8.83 |
| 195 | 0.123 | 0.89 | 21.29 | 30.27 | 11.09 | 41.36 | 31.75 | 6.04 | 37.79 | 8.63 |
| 135 | 0.119 | 0.80 | 12.83 | 17.86 | 6.25 | 24.11 | 18.02 | 3.30 | 21.31 | 11.61 |
| 265 | 0.115 | 0.73 | 22.33 | 29.89 | 9.10 | 39.00 | 29.80 | 6.15 | 35.95 | 7.82 |
| 340 | 0.111 | 0.84 | 31.60 | 43.49 | 14.56 | 58.05 | 43.29 | 9.70 | 52.99 | 8.72 |
| 240 | 0.108 | 0.79 | 20.31 | 27.21 | 8.24 | 35.44 | 27.21 | 5.26 | 32.47 | 8.38 |
| 190 | 0.104 | 0.93 | 18.33 | 24.66 | 7.85 | 32.51 | 24.19 | 4.90 | 29.09 | 10.52 |
| 230 | 0.100 | 0.82 | 18.95 | 25.12 | 8.41 | 33.53 | 25.06 | 5.25 | 30.31 | 9.60 |
| 195 | 0.096 | 0.98 | 18.43 | 24.10 | 6.86 | 30.96 | 25.51 | 3.77 | 29.28 | 5.43 |
| 235 | 0.093 | 0.75 | 16.22 | 21.96 | 7.30 | 29.27 | 21.77 | 4.60 | 26.37 | 9.91 |
| 340 | 0.089 | 0.86 | 26.07 | 35.54 | 13.09 | 48.63 | 36.78 | 8.02 | 44.79 | 7.90 |
| 270 | 0.085 | 0.69 | 15.93 | 21.66 | 6.48 | 28.13 | 22.00 | 3.45 | 25.45 | 9.53 |
| 360 | 0.081 | 0.85 | 24.87 | 35.25 | 13.14 | 48.40 | 36.18 | 7.84 | 44.02 | 9.05 |
| 275 | 0.078 | 0.76 | 16.28 | 22.68 | 8.12 | 30.80 | 22.29 | 5.01 | 27.30 | 11.36 |
| 220 | 0.074 | 0.96 | 15.58 | 21.50 | 6.99 | 28.49 | 22.06 | 3.93 | 25.99 | 8.78 |
| 290 | 0.070 | 0.71 | 14.42 | 20.67 | 7.49 | 28.15 | 20.13 | 4.35 | 24.48 | 13.04 |
| 420 | 0.066 | 0.94 | 26.18 | 37.58 | 15.56 | 53.14 | 39.02 | 9.47 | 48.49 | 8.75 |
| 340 | 0.063 | 0.77 | 16.40 | 23.88 | 9.30 | 33.18 | 23.43 | 5.74 | 29.17 | 12.09 |
| 490 | 0.059 | 0.92 | 26.51 | 38.66 | 16.91 | 55.57 | 39.84 | 10.26 | 50.10 | 9.84 |
| 400 | 0.055 | 0.72 | 15.84 | 23.34 | 10.13 | 33.47 | 22.85 | 6.43 | 29.28 | 12.52 |
| 450 | 0.050 | 0.68 | 15.33 | 22.62 | 9.30 | 31.91 | 22.82 | 5.63 | 28.45 | 10.84 |

Tabla C.14. Volúmenes del RCO y CP. Modificación de K

| Datos básicos | | | | RCO | | | CP | | | Ahorro de agua (%) |
|---------------|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| Ls (m) | Zm (m) | Ds (m) | Va (m ³) | Vz (m ³) | Vs (m ³) | Ve (m ³) | Vzc (m ³) | Vsc (m ³) | Vec (m ³) | |
| 260 | 0.150 | 1.00 | 39.35 | 52.24 | 15.43 | 67.66 | 53.48 | 9.29 | 62.77 | 7.23 |
| 420 | 0.145 | 0.88 | 53.52 | 72.31 | 24.93 | 97.24 | 75.09 | 15.65 | 90.74 | 6.68 |
| 310 | 0.141 | 0.81 | 35.48 | 47.40 | 15.81 | 63.20 | 48.11 | 10.11 | 58.22 | 7.88 |
| 235 | 0.138 | 0.97 | 31.37 | 41.57 | 13.46 | 55.04 | 42.16 | 8.02 | 50.18 | 8.83 |
| 335 | 0.134 | 0.67 | 29.93 | 39.25 | 12.03 | 51.28 | 40.20 | 6.07 | 46.27 | 9.77 |
| 420 | 0.130 | 0.90 | 49.26 | 69.37 | 23.92 | 93.28 | 71.98 | 14.40 | 86.38 | 7.40 |
| 325 | 0.126 | 0.65 | 26.72 | 35.58 | 11.66 | 47.24 | 35.83 | 6.22 | 42.05 | 10.99 |
| 415 | 0.123 | 0.89 | 45.34 | 63.56 | 24.41 | 87.96 | 65.72 | 15.01 | 80.72 | 8.23 |
| 300 | 0.119 | 0.80 | 28.48 | 39.80 | 13.76 | 53.56 | 40.21 | 8.60 | 48.81 | 8.87 |
| 330 | 0.115 | 0.73 | 27.81 | 38.66 | 13.56 | 52.23 | 39.35 | 8.17 | 47.52 | 9.02 |
| 430 | 0.111 | 0.84 | 40.13 | 57.49 | 24.96 | 82.45 | 58.41 | 15.91 | 74.33 | 9.85 |
| 320 | 0.108 | 0.79 | 27.05 | 37.60 | 14.49 | 52.09 | 38.38 | 8.81 | 47.19 | 9.41 |
| 270 | 0.104 | 0.93 | 26.03 | 36.72 | 13.90 | 50.62 | 36.97 | 8.27 | 45.23 | 10.65 |
| 350 | 0.100 | 0.82 | 28.80 | 40.72 | 16.64 | 57.36 | 41.70 | 10.29 | 52.00 | 9.34 |
| 310 | 0.096 | 0.98 | 29.28 | 41.11 | 15.08 | 56.19 | 43.87 | 8.83 | 52.70 | 6.21 |
| 405 | 0.093 | 0.75 | 27.96 | 40.29 | 17.83 | 58.12 | 40.96 | 11.12 | 52.08 | 10.39 |
| 640 | 0.089 | 0.86 | 49.04 | 72.36 | 35.70 | 108.06 | 75.43 | 22.36 | 97.78 | 9.51 |
| 530 | 0.085 | 0.69 | 31.18 | 46.43 | 22.02 | 68.44 | 47.20 | 13.88 | 61.08 | 10.75 |
| 130 | 0.081 | 0.85 | 9.00 | 12.17 | 4.08 | 16.25 | 12.57 | 2.23 | 14.80 | 8.92 |
| 100 | 0.078 | 0.76 | 5.89 | 7.97 | 2.49 | 10.46 | 7.92 | 1.30 | 9.22 | 11.85 |
| 75 | 0.074 | 0.96 | 5.31 | 7.17 | 1.97 | 9.15 | 7.52 | 0.97 | 8.50 | 7.10 |
| 90 | 0.070 | 0.71 | 4.44 | 6.05 | 1.99 | 8.04 | 6.07 | 1.04 | 7.11 | 11.57 |
| 130 | 0.066 | 0.94 | 8.12 | 11.20 | 3.88 | 15.08 | 11.65 | 2.07 | 13.72 | 9.02 |
| 95 | 0.063 | 0.77 | 4.59 | 6.29 | 2.15 | 8.44 | 6.14 | 1.15 | 7.29 | 13.63 |
| 125 | 0.059 | 0.92 | 6.74 | 9.22 | 3.49 | 12.71 | 9.55 | 1.93 | 11.48 | 9.68 |
| 95 | 0.055 | 0.72 | 3.77 | 5.25 | 1.84 | 7.09 | 5.08 | 0.97 | 6.05 | 14.67 |
| 90 | 0.050 | 0.68 | 3.07 | 4.26 | 1.39 | 5.65 | 4.35 | 0.73 | 5.08 | 10.09 |

Tabla C.15. Volúmenes del RCO y CP. Modificación de n

| Datos básicos | | | | RCO | | | CP | | | Ahorro de agua (%) |
|---------------|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| Ls (m) | Zm (m) | Ds (m) | Va (m ³) | Vz (m ³) | Vs (m ³) | Ve (m ³) | Vzc (m ³) | Vsc (m ³) | Vec (m ³) | |
| 205 | 0.150 | 1.00 | 31.01 | 42.54 | 14.10 | 56.64 | 42.11 | 8.83 | 50.94 | 10.06 |
| 350 | 0.145 | 0.88 | 44.59 | 63.01 | 21.85 | 84.86 | 63.61 | 13.86 | 77.48 | 8.70 |
| 250 | 0.141 | 0.81 | 28.62 | 40.08 | 14.32 | 54.40 | 39.21 | 9.40 | 48.62 | 10.63 |
| 185 | 0.138 | 0.97 | 24.66 | 34.25 | 11.82 | 46.07 | 33.55 | 7.27 | 40.82 | 11.40 |
| 250 | 0.134 | 0.67 | 22.29 | 30.05 | 9.82 | 39.86 | 29.87 | 5.25 | 35.12 | 11.89 |
| 320 | 0.130 | 0.90 | 37.64 | 54.04 | 20.44 | 74.47 | 53.78 | 12.67 | 66.45 | 10.77 |
| 235 | 0.126 | 0.65 | 19.31 | 26.47 | 9.32 | 35.78 | 25.78 | 5.16 | 30.94 | 13.53 |
| 310 | 0.123 | 0.89 | 33.97 | 48.77 | 19.81 | 68.58 | 48.22 | 12.34 | 60.56 | 11.69 |
| 210 | 0.119 | 0.80 | 19.92 | 28.47 | 11.62 | 40.09 | 27.43 | 7.61 | 35.05 | 12.57 |
| 195 | 0.126 | 0.73 | 16.46 | 21.91 | 6.21 | 28.12 | 21.99 | 3.30 | 25.29 | 10.06 |
| 250 | 0.111 | 0.84 | 23.32 | 31.86 | 10.73 | 42.59 | 32.33 | 6.23 | 38.56 | 9.46 |
| 175 | 0.108 | 0.79 | 14.78 | 19.48 | 5.98 | 25.46 | 19.83 | 3.33 | 23.16 | 9.03 |
| 145 | 0.104 | 0.93 | 14.02 | 18.89 | 5.51 | 24.39 | 19.05 | 2.92 | 21.97 | 9.92 |
| 180 | 0.100 | 0.82 | 14.86 | 19.91 | 6.04 | 25.96 | 20.54 | 3.35 | 23.89 | 7.97 |
| 150 | 0.096 | 0.98 | 14.19 | 18.82 | 5.39 | 24.21 | 20.42 | 2.86 | 23.28 | 3.84 |
| 185 | 0.093 | 0.75 | 12.78 | 17.30 | 5.49 | 22.78 | 17.65 | 3.10 | 20.75 | 8.91 |
| 260 | 0.089 | 0.86 | 19.93 | 27.37 | 9.85 | 37.22 | 29.21 | 5.85 | 35.05 | 5.83 |
| 195 | 0.085 | 0.69 | 11.52 | 15.10 | 4.47 | 19.57 | 16.39 | 2.15 | 18.54 | 5.26 |
| 275 | 0.081 | 0.85 | 19.05 | 26.64 | 10.04 | 36.68 | 28.22 | 5.93 | 34.16 | 6.87 |
| 215 | 0.078 | 0.76 | 12.66 | 17.30 | 6.07 | 23.37 | 17.94 | 3.44 | 21.37 | 8.56 |
| 165 | 0.074 | 0.96 | 11.69 | 15.79 | 5.31 | 21.10 | 16.97 | 2.97 | 19.94 | 5.50 |
| 220 | 0.070 | 0.71 | 10.88 | 15.33 | 5.51 | 20.83 | 15.86 | 3.16 | 19.02 | 8.69 |
| 330 | 0.066 | 0.94 | 20.63 | 29.49 | 12.14 | 41.63 | 31.37 | 7.09 | 38.46 | 7.61 |
| 260 | 0.063 | 0.77 | 12.53 | 17.72 | 7.04 | 24.76 | 18.26 | 4.17 | 22.43 | 9.41 |
| 380 | 0.059 | 0.92 | 20.50 | 29.53 | 12.88 | 42.41 | 31.34 | 7.76 | 39.10 | 7.80 |
| 320 | 0.055 | 0.72 | 12.67 | 18.51 | 7.53 | 26.04 | 18.94 | 4.46 | 23.40 | 10.14 |
| 350 | 0.050 | 0.68 | 11.95 | 17.33 | 6.95 | 24.28 | 18.28 | 4.12 | 22.40 | 7.74 |

Tabla C.16. Volúmenes del RCO y CP. Modificación de w

| Datos básicos | | | | RCO | | | CP | | | Ahorro de agua (%) |
|---------------|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| Ls (m) | Zm (m) | Ds (m) | Va (m ³) | Vz (m ³) | Vs (m ³) | Ve (m ³) | Vzc (m ³) | Vsc (m ³) | Vec (m ³) | |
| 195 | 0.150 | 1.00 | 29.50 | 38.49 | 10.71 | 49.20 | 40.01 | 6.07 | 46.08 | 6.34 |
| 390 | 0.145 | 0.88 | 40.69 | 53.98 | 16.85 | 70.82 | 56.92 | 10.03 | 66.95 | 5.46 |
| 235 | 0.141 | 0.81 | 26.91 | 35.61 | 10.78 | 46.40 | 36.43 | 6.45 | 42.88 | 7.59 |
| 175 | 0.138 | 0.97 | 23.36 | 30.66 | 8.95 | 39.61 | 31.38 | 4.91 | 36.29 | 8.38 |
| 240 | 0.134 | 0.67 | 21.44 | 27.47 | 7.74 | 35.22 | 28.80 | 3.71 | 32.51 | 7.69 |
| 295 | 0.130 | 0.90 | 34.65 | 46.92 | 15.27 | 62.19 | 49.02 | 8.70 | 57.72 | 7.19 |
| 230 | 0.126 | 0.65 | 18.91 | 24.88 | 7.15 | 32.04 | 25.77 | 3.52 | 29.29 | 8.58 |
| 290 | 0.123 | 0.89 | 31.69 | 43.44 | 14.45 | 57.89 | 45.31 | 8.20 | 53.51 | 7.57 |
| 200 | 0.119 | 0.80 | 19.00 | 25.72 | 8.26 | 33.98 | 25.91 | 4.78 | 30.69 | 9.68 |
| 200 | 0.126 | 0.73 | 16.88 | 22.90 | 6.86 | 29.76 | 22.75 | 3.94 | 26.69 | 10.32 |
| 260 | 0.111 | 0.84 | 24.26 | 34.07 | 11.70 | 45.77 | 33.99 | 7.06 | 41.04 | 10.33 |
| 180 | 0.108 | 0.79 | 15.26 | 20.56 | 6.63 | 27.19 | 20.44 | 3.83 | 24.28 | 10.70 |
| 145 | 0.104 | 0.93 | 14.01 | 19.07 | 6.14 | 25.21 | 18.71 | 3.47 | 22.18 | 12.02 |
| 185 | 0.100 | 0.82 | 15.33 | 21.00 | 6.75 | 27.75 | 20.90 | 3.80 | 24.70 | 10.99 |
| 155 | 0.096 | 0.98 | 14.68 | 19.87 | 5.52 | 25.39 | 21.08 | 2.93 | 24.01 | 5.44 |
| 190 | 0.093 | 0.75 | 13.11 | 18.18 | 5.99 | 24.17 | 18.02 | 3.44 | 21.46 | 11.21 |
| 280 | 0.089 | 0.86 | 21.45 | 30.54 | 10.78 | 41.32 | 31.72 | 6.33 | 38.05 | 7.91 |
| 205 | 0.085 | 0.69 | 12.07 | 16.40 | 4.95 | 21.35 | 17.26 | 2.43 | 19.69 | 7.78 |
| 290 | 0.081 | 0.85 | 20.07 | 28.70 | 10.83 | 39.54 | 29.56 | 6.37 | 35.93 | 9.13 |
| 225 | 0.078 | 0.76 | 13.26 | 18.72 | 6.77 | 25.49 | 18.80 | 3.90 | 22.71 | 10.91 |
| 170 | 0.074 | 0.96 | 12.08 | 16.72 | 5.92 | 22.64 | 17.34 | 3.34 | 20.68 | 8.66 |
| 230 | 0.070 | 0.71 | 11.43 | 15.46 | 5.29 | 20.75 | 16.54 | 2.55 | 19.09 | 8.00 |
| 350 | 0.066 | 0.94 | 21.87 | 31.90 | 12.90 | 44.80 | 32.99 | 7.41 | 40.40 | 9.82 |
| 270 | 0.063 | 0.77 | 13.03 | 18.60 | 7.87 | 26.47 | 18.59 | 4.64 | 23.23 | 12.24 |
| 400 | 0.059 | 0.92 | 21.57 | 31.85 | 13.75 | 45.60 | 32.36 | 8.01 | 40.38 | 11.45 |
| 325 | 0.055 | 0.72 | 12.89 | 19.07 | 8.42 | 27.49 | 18.56 | 4.94 | 23.51 | 14.48 |
| 360 | 0.050 | 0.68 | 12.28 | 18.06 | 7.63 | 25.69 | 18.25 | 4.37 | 22.62 | 11.95 |

Tabla C.17. Volúmenes del RCO y CP. Modificación de h

| Datos básicos | | | | RCO | | | CP | | | Ahorro de agua (%) |
|---------------|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| Ls (m) | Zm (m) | Ds (m) | Va (m ³) | Vz (m ³) | Vs (m ³) | Ve (m ³) | Vzc (m ³) | Vsc (m ³) | Vec (m ³) | |
| 120 | 0.150 | 1.00 | 18.17 | 23.72 | 6.77 | 30.49 | 23.13 | 3.96 | 27.09 | 11.15 |
| 205 | 0.145 | 0.88 | 26.11 | 34.34 | 9.95 | 44.29 | 34.11 | 5.90 | 40.01 | 9.66 |
| 150 | 0.141 | 0.81 | 17.16 | 22.65 | 6.67 | 29.32 | 21.95 | 4.06 | 26.01 | 11.29 |
| 110 | 0.138 | 0.97 | 14.70 | 19.08 | 5.72 | 24.80 | 18.61 | 3.24 | 21.85 | 11.90 |
| 155 | 0.134 | 0.67 | 13.86 | 17.78 | 4.79 | 22.56 | 17.41 | 2.32 | 19.73 | 12.54 |
| 190 | 0.130 | 0.90 | 22.37 | 29.44 | 9.12 | 38.56 | 29.19 | 5.25 | 34.44 | 10.68 |
| 150 | 0.126 | 0.65 | 12.31 | 16.11 | 4.42 | 20.53 | 15.64 | 2.20 | 17.84 | 13.10 |
| 190 | 0.123 | 0.89 | 20.75 | 27.64 | 8.51 | 36.15 | 27.15 | 4.86 | 32.01 | 11.45 |
| 130 | 0.119 | 0.80 | 12.36 | 16.47 | 5.05 | 21.52 | 15.99 | 2.96 | 18.95 | 11.94 |
| 265 | 0.126 | 0.73 | 22.35 | 30.41 | 10.33 | 40.73 | 31.51 | 5.97 | 37.49 | 7.95 |
| 330 | 0.111 | 0.84 | 30.80 | 43.19 | 17.70 | 60.89 | 44.44 | 10.90 | 55.34 | 9.11 |
| 240 | 0.108 | 0.79 | 20.29 | 27.84 | 9.61 | 37.45 | 28.80 | 5.47 | 34.26 | 8.52 |
| 190 | 0.104 | 0.93 | 18.37 | 25.25 | 8.82 | 34.07 | 25.53 | 4.93 | 30.47 | 10.57 |
| 235 | 0.100 | 0.82 | 19.38 | 26.58 | 9.84 | 36.41 | 27.22 | 5.68 | 32.89 | 9.67 |
| 195 | 0.096 | 0.98 | 18.45 | 24.98 | 8.17 | 33.15 | 26.97 | 4.42 | 31.39 | 5.31 |
| 240 | 0.093 | 0.75 | 16.57 | 23.03 | 8.75 | 31.78 | 23.37 | 5.10 | 28.48 | 10.38 |
| 390 | 0.089 | 0.86 | 29.90 | 39.66 | 12.96 | 52.62 | 41.17 | 6.31 | 47.48 | 9.77 |
| 260 | 0.085 | 0.69 | 15.31 | 21.02 | 7.05 | 28.07 | 22.42 | 3.40 | 25.83 | 7.98 |
| 400 | 0.081 | 0.85 | 27.70 | 37.69 | 13.36 | 51.06 | 38.77 | 6.84 | 45.62 | 10.65 |
| 285 | 0.078 | 0.76 | 16.83 | 24.06 | 9.79 | 33.85 | 24.10 | 5.60 | 29.70 | 12.26 |
| 220 | 0.074 | 0.96 | 15.63 | 21.98 | 8.42 | 30.40 | 23.06 | 4.69 | 27.75 | 8.72 |
| 295 | 0.070 | 0.71 | 14.57 | 20.95 | 8.57 | 29.52 | 21.55 | 4.64 | 26.19 | 11.28 |
| 450 | 0.066 | 0.94 | 28.12 | 41.43 | 18.17 | 59.61 | 43.47 | 10.33 | 53.80 | 9.75 |
| 350 | 0.063 | 0.77 | 16.87 | 24.90 | 11.08 | 35.98 | 24.65 | 6.24 | 30.88 | 14.17 |
| 530 | 0.059 | 0.92 | 28.56 | 42.63 | 18.69 | 61.32 | 44.28 | 10.84 | 55.11 | 10.13 |
| 420 | 0.055 | 0.72 | 16.63 | 24.88 | 11.80 | 36.68 | 24.37 | 6.93 | 31.30 | 14.67 |
| 480 | 0.050 | 0.68 | 16.35 | 24.08 | 10.04 | 34.12 | 24.61 | 5.77 | 30.38 | 10.96 |

Tabla C.18. Volúmenes del RCO y CP. Modificación de Z_m

| Datos básicos | | | | RCO | | | CP | | | Ahorro de agua (%) |
|---------------|-----------|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|
| L_s (m) | Z_m (m) | D_s (m) | V_a (m ³) | V_z (m ³) | V_s (m ³) | V_e (m ³) | V_{zc} (m ³) | V_{sc} (m ³) | V_{ec} (m ³) | |
| 175 | 0.115 | 1.00 | 20.27 | 26.64 | 7.76 | 34.40 | 26.63 | 4.91 | 31.55 | 8.28 |
| 300 | 0.119 | 0.88 | 31.28 | 42.26 | 12.41 | 54.66 | 43.22 | 7.60 | 50.82 | 7.03 |
| 215 | 0.123 | 0.81 | 21.35 | 28.34 | 8.82 | 37.16 | 28.28 | 5.61 | 33.89 | 8.80 |
| 165 | 0.126 | 0.97 | 20.20 | 26.90 | 7.67 | 34.57 | 26.95 | 4.37 | 31.32 | 9.40 |
| 225 | 0.111 | 0.67 | 16.73 | 21.99 | 5.77 | 27.76 | 22.02 | 2.83 | 24.85 | 10.48 |
| 270 | 0.108 | 0.90 | 26.25 | 35.79 | 11.10 | 46.89 | 36.37 | 6.48 | 42.85 | 8.62 |
| 205 | 0.104 | 0.65 | 13.84 | 18.26 | 5.34 | 23.60 | 17.93 | 2.87 | 20.80 | 11.86 |
| 225 | 0.066 | 0.89 | 13.28 | 17.96 | 5.80 | 23.76 | 17.89 | 3.62 | 21.51 | 9.47 |
| 150 | 0.063 | 0.80 | 7.59 | 10.09 | 3.38 | 13.47 | 9.64 | 2.30 | 11.93 | 11.43 |
| 165 | 0.059 | 0.73 | 7.13 | 9.53 | 2.86 | 12.39 | 8.96 | 1.83 | 10.80 | 12.83 |
| 210 | 0.055 | 0.84 | 9.68 | 13.36 | 4.63 | 17.98 | 13.18 | 3.06 | 16.24 | 9.68 |
| 145 | 0.050 | 0.79 | 5.72 | 7.63 | 2.39 | 10.02 | 7.29 | 1.53 | 8.82 | 11.98 |
| 160 | 0.130 | 0.93 | 19.39 | 26.37 | 8.92 | 35.28 | 26.47 | 4.91 | 31.38 | 11.05 |
| 205 | 0.134 | 0.82 | 22.64 | 30.81 | 10.89 | 41.71 | 31.63 | 6.23 | 37.87 | 9.21 |
| 175 | 0.138 | 0.98 | 23.65 | 31.83 | 10.09 | 41.91 | 34.36 | 5.47 | 39.83 | 4.96 |
| 220 | 0.141 | 0.75 | 23.17 | 31.95 | 11.88 | 43.84 | 32.79 | 6.88 | 39.67 | 9.51 |
| 335 | 0.145 | 0.86 | 41.88 | 59.85 | 23.89 | 83.74 | 63.36 | 14.25 | 77.61 | 7.32 |
| 255 | 0.150 | 0.69 | 26.57 | 36.26 | 12.01 | 48.27 | 38.85 | 5.58 | 44.43 | 7.96 |
| 330 | 0.100 | 0.85 | 28.10 | 40.92 | 15.73 | 56.64 | 42.68 | 9.12 | 51.80 | 8.55 |
| 255 | 0.096 | 0.76 | 18.63 | 26.69 | 9.97 | 36.66 | 26.95 | 5.66 | 32.61 | 11.05 |
| 200 | 0.093 | 0.96 | 17.78 | 25.17 | 8.74 | 33.90 | 26.44 | 4.80 | 31.24 | 7.85 |
| 260 | 0.089 | 0.71 | 16.30 | 23.04 | 9.38 | 32.42 | 24.07 | 5.11 | 29.18 | 9.99 |
| 405 | 0.085 | 0.94 | 32.50 | 47.91 | 20.16 | 68.07 | 49.70 | 11.47 | 61.16 | 10.15 |
| 320 | 0.081 | 0.77 | 20.03 | 29.49 | 12.37 | 41.86 | 29.85 | 7.18 | 37.03 | 11.54 |
| 485 | 0.078 | 0.92 | 34.47 | 51.40 | 21.73 | 73.13 | 53.34 | 12.44 | 65.78 | 10.05 |
| 380 | 0.074 | 0.72 | 20.19 | 29.75 | 14.04 | 43.78 | 29.87 | 8.23 | 38.10 | 12.97 |
| 430 | 0.070 | 0.68 | 20.56 | 30.14 | 13.61 | 43.75 | 30.84 | 7.76 | 38.59 | 11.79 |

APENDICE D

```

REM METODO NUMERICO PARA MODELAR EL RIEGO POR SURCOS
REM DEPEI-INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM, 1993
CLEAR
REM DATOS GENERALES ENSAYO NO. 4 CON CORTE POSTERIOR DISCONTINUO
READ LS, QF, SO, KF, RA, RR, SM, SH, ZL, FP, CP, DN, FR
DATA 52.5, .6, .1, .135, .1, .036, 2.2, 5.9, 8.15605, 1.1, .01, 2, 2
READ JT, Z, FI, TE, QP, DX, DT
DATA 12, 999999, .75, .7, .1, 2.5, 30
READ SM1, SM2, R01, R02, KT, PR
'seccion triangular surco II
DATA 1.732051, 2, 0.433013, 0.5, 0.267949, 0.26
DS = SM1 * SM2 * (PR ^ (SM2 - 1))
RG = RA
QF = QF / 1000
QP = QP / 1000
QF = QF + QP
QT = QF
IF CP = 1 THEN 70
QR = (QF - QP) / DN + QP
GOTO 80
70   QR = QP
80   SO = SO / 100
SM = (SM / 100) * DX * DS
ZL = (ZL / 100) * DX * DS
SH = (SH / 100) * DX * DS
KG = (KF / 100) / 60
CLS
PRINT "longitud del surco en m ="; LS
PRINT "longitud de los tramos en m ="; DX
LT = LS + 2 * DX
N = LT / DX
PRINT "num. total de tramos ="; N
PRINT "num. de tramos reales="; LS / DX
PRINT "talud del vertedor triangular al final ="; KT
PRINT "pendiente del canal en % ="; SO * 100
PRINT "coeficiente de rugosidad inicial ="; RA
PRINT "coeficiente de rugosidad posterior ="; RR
PRINT "intervalo de tiempo en seg ="; DT
PRINT "conductividad hidraulica K en cm/min ="; KF
PRINT "humedad inicial SM en cm ="; (SM * 100) / (DX * DS)
PRINT "deficit de humedad en cm ="; (SH * 100) / (DX * DS)
PRINT "lamina acumulada para el corte final en cm ="; ZL * 100
PRINT "factor de corte posterior="; CP
PRINT "separacion entre surcos en m ="; DS
PRINT "factor para el tiempo de avance="; FP
PRINT "fraccion para reducir el gasto inicial ="; DN
PRINT "factor para el riego en corte posterior ="; FR
PRINT "gasto base en l/s ="; QP * 1000
PRINT "gasto de riego inicial en l/s="; (QF - QP) * 1000

```

```

PRINT "gasto de riego (corte posterior) en l/s ="; (QR - QP) * 1000
REM TIRANTES PARA LAS CONDICIONES INICIALES
C1 = (QP * QP) / 9.81
C2 = SM2 / (SM1 * SM1)
C3 = 1 / (2 * SM2 + 1)
YC = (C1 * C2) ^ C3
N1 = (RG * QP) / SQRT(SO)
N2 = SM1 * (RO1 ^ .6667) * (SM1 ^ (2 * RO1 / 3))
N3 = 1 / (SM2 * (1 + 2 * RO2 / 3))
YN = (N1 / N2) ^ N3
'PRINT "tirante critico="; YC; "*";
'PRINT "tirante normal="; YN
AC = SM1 * (YC ^ SM2)
VC = QP / AC
RC = RO1 * (AC ^ RO2)
PC = AC / RC
SC = ((VC * RG) ^ 2) / (RC ^ (4 / 3))
IF SO >= SC THEN 4000
'PRINT "pendiente critica="; SC
'PRINT "numero total de intervalos de tiempo ="; Z
TC = (JT * DT) / 60
'PRINT "tiempo de calentamiento en minutos ="; TC
TS = (Z * DT) / 60
'PRINT "tiempo maximo de infiltracion en minutos="; TS
DIM Y(N), TC(N), CZ(N), Z(N), P(N), QE(N), QS(N)
DIM QZ(N), V(N), Q(N), C(N, N), D(N), H(N), BB(N)
DIM CM(N, N), QM(N, N), FM(N, N), YY(N), PM(N)
REM CONDICIONES INICIALES
YY = YN / YC
SS = SC / SO
SX = (3.63 * YY) / (SS ^ .2) - 3.52 / (SS ^ .13)
XT = (SX * YC) / SO
FOR I = 0 TO N - 1
Q(I) = QP
QM(I, I + 1) = QP
NEXT I
Q(N) = QP
FOR I = 0 TO N
RX = (LT - I * DX) / XT
YX = 1.26 * (RX ^ .285)
Y(I) = YC + (YN - YC) * YX
IF Y(I) > YN THEN Y(I) = YN
'PRINT "Y("; I; ")="; Y(I)
NEXT I
GT = 9.81 * DT
QQS = 0
QQE = 0
QVZ = 0
FOR I = 1 TO N - 2
QZ(I) = SM
NEXT I

```

```

REM INICIA CALCULO DINAMICO
TIME# = TIME#
PRINT TIME#
      FOR T = 1 TO Z
TI = (T - JT) * DT
TM = (TI / 60)
TH = TM / 60
TP = INT(TM)
IF TI < 0 THEN 780
IF TI >= 0 THEN 810
780 Q(0) = QP
GOTO 830
810 Q(0) = QF
IF TI < (FR * TC(N - 2)) THEN Q(0) = QP
IF TI < 0 THEN 840
830 REM PRINT "TS="; TI
DIM A(N, N), B(N), E(N), F(N)
840 FOR I = 0 TO N - 1
A1 = SM1 * (Y(I) ^ SM2)
A2 = SM1 * (Y(I + 1) ^ SM2)
AM = (A1 + A2) / 2
BB(I) = SM1 * SM2 * (Y(I) ^ (SM2 - 1))
BB(I + 1) = SM1 * SM2 * (Y(I + 1) ^ (SM2 - 1))
BM = (BB(I) + BB(I + 1)) / 2
R1 = R01 * (A1 ^ R02)
R2 = R01 * (A2 ^ R02)
RM = (R1 + R2) / 2
PM(I) = A1 / R1
PM(I + 1) = A2 / R2
PM = (PM(I) + PM(I + 1)) / 2
IF RM < 0 THEN BEEP
YM = (Y(I) + Y(I + 1)) / 2
VM = QM(I, I + 1) / AM
FM(I, I + 1) = (VM ^ 2) / (9.810001 * (AM / BM))
FM(I + 1, I) = FM(I, I + 1)
GM = 2 / (9.810001 * (AM ^ 2))
NM = (ABS(QM(I, I + 1)) * DX * RG ^ 2) / ((AM ^ 2) * (RM ^ 1.3333))
MX = DX / (GT * AM)
CM(I, I + 1) = NM + MX + GM * (Q(I + 1) - Q(I))
CM(I + 1, I) = CM(I, I + 1)
D(I) = BB(I) * (DX / DT)
A(I, I + 1) = -TE * ((1 - FM(I, I + 1)) / CM(I, I + 1))
A(I + 1, I) = A(I, I + 1)
C(I, I + 1) = (S0 * DX + MX * QM(I, I + 1)) / CM(I, I + 1)
C(I + 1, I) = C(I, I + 1)
NEXT I
C(N - 1, N) = (S0 * DX + MX * QM(N - 1, N)) / CM(N - 1, N)
D(0) = D(0) / 2
FOR I = 0 TO N - 1
A(I, I) = ABS(A(I, I + 1)) + D(I)
B(I) = -C(I, I + 1) + D(I) * Y(I)

```

```

NEXT I
FOR I = 1 TO N - 1
A(I, I) = A(I, I) + ABS(A(I, I - 1))
B(I) = B(I) + C(I, I - 1)
YY(I) = Y(I)
NEXT I
IF TI <= 0 THEN 1220
IF TC(N - 2) > 0 THEN 1205
REM TIEMPOS DE ALCANCE DE LA ONDA DE SUPERFICIE
FOR I = 0 TO N - 3
IF TC(I + 1) > 0 THEN 1200
IF QM(I, I + 1) <= QP THEN 1205
IF QM(I, I + 1) > (FP * QP) THEN TC(I + 1) = TI
TC(I + 2) = 0
GOTO 1205
1200 NEXT I
REM GASTOS DE INFILTRACION
1205 FOR K = 1 TO N - 2
IF QM(K - 1, K) <= QP THEN 1210
IF TC(N - 2) > 0 THEN 1207
IF QM(K - 1, K) <= QM(K, K + 1) THEN 1210
IF TC(K) = 0 THEN 1210
1207 H(K) = (PM(K) / Y(K)) * DX * KG * (1 + SH / QZ(K))
A(K, K) = A(K, K) + TE * H(K)
GOTO 1215
1210 H(K) = 0
1215 NEXT K
1220 B(0) = B(0) + Q(0)
NUM1 = 1 - FM(0, 1)
B(0) = B(0) + (1 - TE) * (NUM1 / CM(0, 1)) * (Y(1) - Y(0))
B(N - 1) = B(N - 1) + ABS(A(N - 1, N)) * Y(N)
MULT1 = (1 - FM(N - 1, N)) / CM(N - 1, N)
B(N - 1) = B(N - 1) + (1 - TE) * MULT1 * (Y(N - 1) - Y(N))
FOR I = 1 TO N - 1
B(I) = B(I) - (1 - TE) * H(I) * YY(I)
MULT2 = (1 - FM(I, I - 1)) / CM(I, I - 1)
B(I) = B(I) + (1 - TE) * MULT2 * (Y(I - 1) - Y(I))
MULT3 = (1 - FM(I, I + 1)) / CM(I, I + 1)
B(I) = B(I) + (1 - TE) * MULT3 * (Y(I + 1) - Y(I))
NEXT I
REM SOLUCION DEL SISTEMA DE ECUACIONES
E(0) = A(0, 0)
F(0) = B(0)
L = N - 1
FOR I = 1 TO L
E(I) = A(I, I) - (A(I, I - 1) * A(I - 1, I)) / E(I - 1)
F(I) = B(I) - (A(I, I - 1) * F(I - 1)) / E(I - 1)
NEXT I
Y(L) = F(L) / E(L)
FOR I = L - 1 TO 0 STEP -1
Y(I) = F(I) / E(I) - (A(I, I + 1) / E(I)) * Y(I + 1)

```

```

NEXT I
REM GASTOS PROMEDIO
FOR J = 0 TO N - 1
QM(J, J + 1) = C(J, J + 1) + ABS(A(J, J + 1)) * (Y(J) - Y(J + 1))
Q(J + 1) = (QM(J, J + 1) - (1 - FI) * Q(J)) / FI
NEXT J
ERASE A, B, E, F
REM GASTO DE SALIDA
QS = Q(N)
REM CONDICION DE FRONTERA AGUAS ABAJO
IF QS < 0 THEN BEEP
IF KT = 0 THEN 1670
IF QZ(N - 2) < SM THEN 1670
RT1 = QS / SQRT(9.81)
RT2 = SQRT(2 * KT)
RT3 = KT ^ 1.5
Y(N) = ((RT1 * RT2) / RT3) ^ .4
GOTO 1730
1670 RR1 = (QS * QS) / 9.81
RR2 = SM2 / (SM1 * SM1)
RR3 = 1 / (2 * SM2 + 1)
Y(N) = (RR1 * RR2) ^ RR3
REM GASTOS Y LAMINAS DE INFILTRACION
1730 FOR I = 1 TO N - 2
P(I) = H(I) * (TE * Y(I) + (1 - TE) * YY(I))
QZ(I) = QZ(I) + P(I) * DT
NEXT I
IF TI < 0 THEN 1800
IF TP < TM THEN 1800
PRINT "QZ("; N - 2; TI / 60; ")="; (QZ(N - 2) / (DX * DS)) * 100;
PRINT "Q("; N; ")="; Q(N) * 1000; "QF="; Q(0) * 1000
1800 IF TI <= 0 THEN 1810
QQE = QQE + (Q(0) - QP) * DT
IF QZ(N - 2) <= SM THEN 1805
RG = RR
QQS = QQS + (Q(N) - QP) * DT
GOTO 1810
1805 IF Q(N) > QP THEN 1810
QVZ = QVZ + (QP - Q(N)) * DT
1810 FOR I = 1 TO N - 2
CZ(I) = QZ(I)
NEXT I
IF QZ(N - 2) <= ZL THEN 1820
FOR I = 1 TO N - 3
IF CZ(I) <= CZ(I + 1) THEN CZ(I + 1) = CZ(I)
ZM = CZ(I + 1)
NEXT I
QZ(N - 2) = ZM
1820 IF TC(N - 2) <= 0 THEN 2930
IF QF = QR THEN 1860
IF QF = QP THEN 1890

```



```

IF QZ(N - 2) >= CP * ZL THEN TR = (TI - TC(1)) / 60
1860 IF QZ(N - 2) >= CP * ZL THEN QF = QR
IF QF = QP THEN 1890
IF QZ(N - 2) >= ZL THEN TR2 = (TI - TC(1)) / 60
1890 IF QZ(N - 2) >= ZL THEN QF = QP
1900 IF ZM >= CP * ZL THEN 1920
1910     GOTO 2930
1920 IF QS <= QP THEN 2940
2930     NEXT T
2940 BEEP
VZ = 0
RZ = 0
VE = 0
VS = 0
SZP = 0
FOR I = 1 TO N - 2
VZ = VZ + QZ(I) - SM
RZ = RZ + (QZ(I) - SM)
NEXT I
ZP = RZ / (N - 2)
FOR I = 1 TO N - 2
SZP = SZP + ABS((QZ(I) - SM) - ZP)
NEXT I
CU = 1 - SZP / ((N - 2) * ZP)
ZM = ZM - SM
ZL = ZL / (DX * DS)
ZP = ZP / (DX * DS)
ZM = ZM / (DX * DS)
SM = SM / (DX * DS)
SH = SH / (DX * DS)
HV = VZ / QQE
VZT = QQE - QQS
LZD = ZM * LS * DS
HZ = LZD / VZT
HQ = VZT / QQE
HT = HQ * HZ
TF = (TI - TC(1)) / 60
ETA = LZD / QQE
TF = (TI - TC(1)) / 60
CLS
PRINT
PRINT "LS="; LS; "QF="; QF; "QT="; QT; "SO="; SO; "K="; KF;
PRINT "RA="; RA; "RG="; RG; "SM="; SM; "SH="; SH
PRINT "ZL="; ZL; "DX="; DX; "DT="; DT; "QP="; QP; "QR="; QR;
PRINT "FP="; FP; "FR="; FR; "CP="; CP
PRINT "SG1="; SM1; "SG2="; SM2; "RO1="; RO1;
PRINT "RO2="; RO2; "KT="; KT; "PR="; PR; "DS="; DS
PRINT
PRINT "HZ="; HZ; "HV="; HV; "HQ="; HQ; "HT="; HT; "ZP="; ZP; "ZM="; ZM
PRINT "VZ="; VZ; "VZT="; VZT; "VS="; VS; "VE="; VE; "VA="; VA; "LZD="; LZD; "CU="; CU
PRINT

```

```
PRINT "TR1="; TR; "TA="; TC(N - 2) / 60;  
PRINT "TF="; TF; "FI="; FI; "TE="; TE; "TINI="; TINI$  
PRINT "TR2="; TR2; "PM="; PM; "**PGR: SURCOVOL";  
PRINT "**TFIN="; TIME$; "**FECHA="; DATE$  
4000 END
```

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO - DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS
SUBDIRECCION DE SERVICIOS BIBLIOTECARIOS. DEPARTAMENTO DE TESIS
RELACION TESIS DEL AÑO: 1 9 9 6

CLAVE: 01183

Universidad :
Facultad : Facultad de Ingenieria
Carrera : Doctorado en Ingenieria (Hidraulica)

R O L L O 1

A U T O R

TITULO

1. Fuentes Mariles, Oscar Arturo Propagacion del oleaje en la proximidad de la costa
2. Vazquez Fernandez, Ernesto Formulacion de un criterio para incrementar la eficiencia del riego por surcos.