

FORMI –CRA MODELO DE DRENAJE PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE DRENES EN RÉGIMEN VARIABLE

Mirábile, C.; L. Fornero

Instituto Nacional del Agua- Centro Regional Andino
INA–CRA; Belgrano 210 Oeste (5500) Mendoza
carlosmirabile@hotmail.com cmirabile@ina.gov.ar

RESUMEN

Para la recuperación de suelos con problemas de drenaje, es importante determinar el tipo de régimen del agua hacia los drenes, variable o permanente. Variable implica que el nivel freático (NF) en algún momento producto de una recarga sufre una elevación, y luego comienza a descender hasta la próxima recarga. En estos casos diseñar un sistema de drenaje para mantener constante el nivel freático es generalmente inviable. Por ello se debe aplicar criterios agronómicos sobre la posición (profundidad) de la freática exigida para evitar daños en cada cultivo y los tiempos en que esas exigencias deben cumplirse.

Para este tipo de régimen, característico en las zonas de riego, encontramos distintas ecuaciones que analizan la situación: “Glover-Dumm, “Bussinesq”etc las que se aplican según las particularidades de cada caso. Todas estas fórmulas relacionan características inherentes al sistema de drenes como: espaciamiento, diámetro y profundidad con parámetros propios del suelo y de los cultivos: conductividad hidráulica; espesor del estrato transmisor, macroporosidad o espacio poroso drenable y profundidad mínima de suelo libre de freática .

Lamentablemente todo esto conlleva a la realización una serie de cálculos (en forma repetitiva) para distintas situaciones a fin de comprobar si los espaciamientos y profundidades de drenes seleccionados responden a las necesidades agronómicas preestablecidas, con lo cual se hace sumamente demoroso el trabajo, obligando al proyectista a realizar numerosas combinaciones de profundidad, espaciamiento, diámetro a fin de optar por la que mas se ajuste.

Por dicho motivo se decidió modelar el proceso utilizando las ecuaciones de Glover Dumm que analiza perfectamente la acción de una recarga instantánea. Conceptualmente el modelo considera que después de un riego (recarga instantánea) el NF que inicialmente se encontraba coincidiendo con la profundidad de los drenes se eleva hasta una altura h_0 . Luego comienza a descender para llegar al cabo de un tiempo “ t ”(momento previo de una nueva recarga/riego) a una altura h_t con respecto al nivel de los drenes. Es decir que la capa freática oscila subiendo inmediatamente después de cada riego una altura y descendiendo durante el intervalo entre riegos una altura cada vez mayor en virtud de una mayor carga hidráulica (h) con respecto al nivel de los drenes. Esto se produce hasta que se llega a la situación de equilibrio, en que la altura que se eleva es igual a la que desciende durante el intervalo entre riegos.

Logrado el equilibrio el modelo calcula la posición o altura “ h ” del NF alcanzada “ N ” días después del riego. Este valor debe cumplir con el criterio de drenaje preestablecido. Si el valor de “ h ” calculado es superior al admisible entonces el espaciamiento entre drenes elegido es excesivo y se debe probar con otro menor, acción que ejecuta el modelo automáticamente.

El efecto acumulado de los sucesivos riegos puede llegar a elevar excesivamente la freática, es por eso que el sistema de drenaje debe anular el efecto de la recarga y cumplir con el criterio agronómico de alcanzar una profundidad mínima libre de agua. Por lo general se parte

de una profundidad de drenes acotada por distintas razones: topográficas, edafológicas, constructivas etc.. Este cálculo se hace por tanteos sucesivos, seleccionando un valor inicial de espaciamiento y considerando que el NF inicial antes de la recarga se encuentra a la misma profundidad que los drenes.

Palabras Clave: Drenaje- Régimen variable- Riego

INTRODUCCIÓN

Todas las ecuaciones de drenaje usadas para el cálculo del dimensionamiento de un sistema de drenaje -espaciamiento, profundidad, descarga- de los drenes son expresiones deducidas de las particulares condiciones del movimiento del agua hacia los drenes en la región de flujo; no obstante todas ellas consideran a modo de simplificación que el flujo es bidimensional, que la recarga se distribuye uniformemente, y se adoptan las suposiciones de Dupuit.-a) las líneas de flujo son horizontales b) el límite superior de la región de flujo es la capa freática, c) la pendiente de la capa o nivel freático determina un gradiente hidráulico y d) en una sección vertical la densidad de flujo es constante

Estas formulas relacionan características inherentes al sistema de drenes como: espaciamiento, diámetro y profundidad con parámetros propios del suelo y de los cultivos: conductividad hidráulica; espesor del estrato transmisor, macro porosidad o espacio poroso drenable y profundidad mínima de suelo libre de freática o velocidad de descenso freático.

Se tiene dos tipos regímenes de flujo del agua hacia los drenes, Reg. Permanente cuando la descarga es igual a la recarga por lo que la ubicación o posición del nivel freático no varía (nivel freático permanece constante) y Reg. Variable cuando la descarga es distinta a la recarga, por lo que no hay un equilibrio y el nivel freático fluctúa, variando de posición.-

El primer caso se da en zonas donde la recarga es de baja intensidad pero constante en el tiempo (filtraciones de canales con dotación permanente, lluvias suaves de larga duración, etc). La aplicación de las ecuaciones de régimen permanente han dado muy buenos resultados en países como Alemania, Holanda, algunas zonas de España y gran parte de Estados Unidos en donde el régimen pluviométrico se caracteriza por la regularidad y baja intensidad de las precipitaciones

Régimen Variable es característico de las áreas bajo riego donde se tienen fuertes recargas en tiempos cortos y esta situación se repite periódicamente (la precolación que se produce después de cada riego), también de las zonas con lluvias de alta intensidad y corta duración..En estos casos diseñar un sistema de drenaje para mantener constante el nivel freático es generalmente inviable ya que el costo de instalación lo haría antieconómico, por ello es aconsejable instalar un sistema más económico (mayor distanciamiento entre drenes y/o menor profundidad de drenes) aunque esto permita que a la finalización de la lluvia o riego la freática haya ascendido e incluso penetrado en la zona de exploración radical, pero que cumpla con ciertas condiciones ó criterios agronómicos de drenaje sobre la posición del nivel freático requerida por cada cultivo y los tiempos en que esas posiciones se deben

producir, es decir deben cumplir la condición que no superar una cierta altura y el tiempo máximo que puede permanecer en esa zona.

Los criterios de drenaje para el caso de régimen variable tienen que establecerse en términos dinámicos y ellos son :

Para la época de riego a)si la freática penetró en la capa de exploración radical , “**N**” numero de días después del riego en que la freática tiene que haber descendido hasta una profundidad “**p**” ,

b) si no penetró puede establecerse que el nivel freático se encuentre a nivel de los drenes en el momento de una nueva recarga o sea que el ascenso producido por la recarga se haya anulado completamente al momento de la nueva recarga.

Para la época de lluvia los criterios son que como consecuencia de las lluvias la freática se eleve hasta una profundidad “**p**” y esto se produzca con una frecuencia de “**N**” veces al año

En régimen variable las fórmulas tienen en cuenta el movimiento del NF durante la recarga y la descarga. Cuando la recarga es instantánea (riego por gravedad , lluvia de alta intensidad y corta duración) se aplican las ecuaciones de Glover Dumn ó las de Boussinesq según las condiciones que se presenten.-. **Glover Dumn** fue deducida en principio para un acuífero homogéneo, de espesor constante con drenes abiertos que llegan hasta la capa impermeable, aunque puede tener aplicación en situaciones en que los drenes se sitúen por encima de la capa impermeable, reemplazando el valor del espesor del acuífero por el del estrato equivalente teniéndose así en consideración la resistencia radial en las cercanías del dren.- esta ecuación funciona muy bien en zonas de riego, con suelos homogéneos y con buena profundidad a la capa impermeable de manera que el espesor del acuífero se pueda considerar constante. **Boussinesq** dedujo una ecuación para resolver casos en que en suelos de baja permeabilidad la capa o barrera impermeable esta muy cercana a la zona radical y los drenes se tendrían que ubicar sobre (pegados) la capa impermeable

Cuando la recarga no es tan brusca (lluvias suaves de larga duración, riego por aspersión) se aplica la ecuación de **Kraijenhoff**.-

En zonas donde durante el año se tenga época de riego y época de lluvia se deben hacer los cálculos de espaciamiento de drenes para cada una de las situaciones y luego implementar el sistema de drenaje para la situación mas restrictiva. En definitiva lo aconsejable es usar para el cálculo correspondiente las siguientes ecuaciones, según se observa en la tabla nº 1.

Tabla Nº 1 Ecuaciones de cálculo recomendadas para la época de riego y la de lluvia

	Ecuación	Situación
Época de Riego	Glover Dumn / Boussinesq	riego por Gravedad ó Superficie
	Kraijenhoff	riego por Aspersión
Época de lluvia	Glover Dumn / Boussinesq	lluvias de alta intensidad y corta duración
	Kraijenhoff	lluvias de larga duración

DESCRIPCIÓN

Las zonas cultivadas bajo riego de la Republica Argentina se encuentran fundamentalmente en las regiones áridas y semiáridas en donde el cultivo no puede prosperar sin el suministro de agua que supla el importante déficit evapotranspiratorio. Las escasas lluvias se producen generalmente en época estival y son de relativa alta intensidad y corto tiempo de duración. Ej.: Mendoza, San Juan, Salta, Tucumán, Santiago del Estero, Catamarca, Córdoba, La Rioja, Jujuy, Río Negro, sur de Bs. Aires; en ellas básicamente el periodo crítico de recarga es la época de riego

Otras zonas como el Litoral y la Pampa Húmeda en donde existen zonas cultivadas bajo riego el mismo es complementario ó suplementario y se aplica en función de las necesidades de acuerdo a la ocurrencia de lluvias, las que al igual que en la mayor parte del país se caracterizan por ser de alta intensidad y corta duración. Es por ello que en nuestro país esta ampliamente difundido el uso de las ecuaciones de Glover- Dumn para el dimensionamiento de sistemas de drenaje

OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es poner a disposición de los profesionales y proyectistas que actúan en la temática recuperación de suelos afectados por problemas de drenaje, una herramienta que facilite, a través de la simulación del proceso físico y la ejecución de múltiples iteraciones, la elección de la mejor alternativa posible para solucionar cada situación particular, teniendo presente todas las variables que participan del proceso . Se trata de un modelo de desarrollo local que responde perfectamente a la problemática del drenaje de las áreas regadías.

MATERIAL Y METODO-DESARROLLO

Ecuaciones de Glover Dumn

Como ya se ha expresado, para el desarrollo del modelo se han utilizado la ecuaciones de Glover Dumn que responden muy bien para las situaciones de recarga instantánea que se producen en nuestras áreas de riego. Las mismas son las siguientes:

$$L^2 = \frac{\pi^2 \cdot K \cdot d \cdot t}{\mu \cdot \ln(1,16 \cdot \frac{h_o}{h_t})} = \quad (\text{ec.1})$$

$$h_t = 1,16 \cdot h_o \cdot e^{-\alpha \cdot t} = \quad (\text{ec.2})$$

$$\alpha = \frac{\pi^2 \cdot K \cdot D}{\mu \cdot L^2} = \quad (\text{ec.3})$$

$$d = d_2 + \frac{\bar{h}}{2} = \quad (\text{ec.4})$$

$$d_2 = \frac{D_2}{1 + \frac{8 \cdot D_2}{\pi \cdot L} \cdot \ln \frac{D_2}{u}} = \quad (\text{ec.5})$$

$$\bar{h} = \sqrt{h_o \cdot h_t} = \quad (\text{ec.6 a})$$

Si se quiere mayor margen de seguridad

$$\bar{h} = \frac{h_o + h_t}{2} = \quad (\text{ec.6 b})$$

L = espaciamiento entre drenes (m)

h_o = carga hidráulica máxima inicial (inmediatamente después de la recarga)en el punto medio

entre dos drenes (m)

h_t = carga hidráulica en el punto medio entre dos drenes en el tiempo t (días)

α = factor de reacción a la recarga

d₂ = espesor de estrato equivalente por debajo de la línea de drenes(m)

t = tiempo transcurrido desde que comenzó el descenso del nivel freático (días)

μ = porosidad efectiva

u = perímetro (3,14 · r)

r = radio del dren

P = profundidad de drenes

\\\\\\ capa impermeable

L = distancia entre drenes

p = prof. de suelo libre de freática luego de producida la recarga

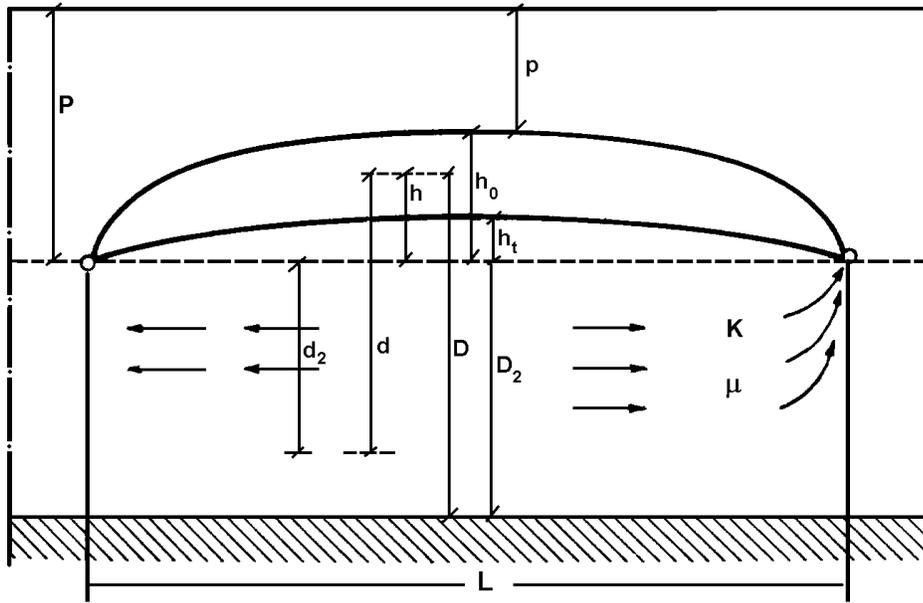


Figura N° 1 : Esquema de una situación de régimen variable con recarga instantánea

Proceso Físico y Funcionamiento del Modelo

En la figura anterior se representa un terreno donde se han instalado drenes a una determinada profundidad (P). Después del riego (recarga instantánea) el NF que inicialmente se encontraba a igual profundidad que los drenes, se eleva hasta una altura h_0 , producto de la percolación en profundidad de parte de la lámina de riego aplicada. Luego comienza a descender para llegar al cabo de un tiempo "t" a una altura h_t con respecto al nivel de los drenes. El efecto acumulado de los sucesivos riegos puede llegar a elevar excesivamente la capa freática, es por eso que el sistema de drenaje debe anular ese efecto.-

Por lo general, para calcular el espaciamiento entre drenes (L), se parte de una profundidad de drenes acotada por distintas razones: topográficas, edafológicas, constructivas, etc. Este cálculo se hace por tanteos sucesivos, seleccionando o suponiendo un valor inicial de espaciamiento y considerando que el NF inicial antes de la recarga se encuentra a la profundidad de los drenes.

Como se ha expresado, luego del 1° riego la freática se eleva un Δh ; que es igual al cociente entre la recarga (R), expresada como lamina de agua, y la porosidad efectiva (μ)

$$\Delta h = R / \mu = h_0 \quad (\text{ec. 7})$$

Δh = elevación del NF. Producido por la recarga

Por ejemplo, si el intervalo entre riegos es de 15 días, justo antes del 2° riego la freática habrá descendido hasta un h_{15} (ec.2), entonces aplicado el 2° riego se tiene un nuevo $h_0 = R/\mu + h_{15}$. Siguiendo igual tratamiento para los riegos subsiguientes se observa que la capa freática oscila subiendo inmediatamente después de cada riego una altura (R/μ) y descendiendo durante el intervalo entre riegos una altura cada vez mayor en virtud de una mayor carga

hidráulica (h) con respecto al nivel de los drenes. Esto se produce hasta que se llega a la situación de equilibrio en que la altura que se eleva en cada riego es exactamente igual a la que desciende durante el intervalo entre riegos. Es decir que a partir de este momento, el NF va a fluctuar entre un máximo y un mínimo, por lo que ahora se debe calcular la posición o altura “h” del NF alcanzada “N” días después del riego. Este valor debe cumplir con el criterio de drenaje establecido

Si el valor de “h” obtenido es superior al permitido entonces el espaciamiento elegido es excesivo y se debe efectuar nuevas pruebas con distancias menores hasta obtener el espaciamiento correcto, que responda al criterio mencionado.

Agronómicamente no hay una gran cantidad de estudios sobre la profundidad óptima de la freática para cada cultivo y menos acerca del tiempo en que esta puede permanecer sobre este valor, sin producir daños significativos. La tendencia general es que la altura de la freática por sobre el dren, en su ascenso no alcance la porción de suelo que debe permanecer libre de freática, al menos por mas de 3 días, es decir que ”N” = 3 días y el “h” se convertiría en un **h₃**.

Aplicación

A fin de una mejor comprensión se desarrolla un ejemplo con datos de una situación real en la que la zona de estudio presenta dos tipos de suelos bien definidos: franco arenosos y franco limosos y está cultivada con hortalizas y frutales por lo que se tomó el criterio de asegurar 0,80 m y 1,20 m de profundidad de suelo libre de freática respectivamente. El modelo se ha corrido para cada una de estas situaciones, considerando que los drenes se pueden instalar a 1,70 y 2 m de profundidad respectivamente.

Martínez Beltrán (1896) presenta una tabla de FAO que expresa las profundidades recomendables (m) de suelo libre de agua freática en régimen variable, para distintos tipos de cultivos. La misma se presenta a continuación. (tabla n° 2)

Tabla N° 2: Profundidad de suelo libre de agua freática

Cultivos	Suelo textura fina	Suelo textura gruesa
Hortícolas	0,9 m	0,9 m
Herbáceos	0,9 m	0,9 m
Frutales	1,4 m	1,1 m

Fuente: Martínez Beltrán (1986)

En función de la opinión de especialistas locales y la tabla precedente se seleccionaron las profundidades de libre de freática para hortalizas de 0,80 m y frutales 1,20 m., considerando que dichos valores aseguran un adecuado margen de seguridad

Valor de recarga = **3,5 mm/día**

La recarga es producto del riego y se ha considerado una eficiencia de riego del 48% (producto de 80 % de eficiencia de conducción y distribución y 60 % de eficiencia de aplicación en la parcela). Esto significa esperar un 52% de pérdidas . Teniendo en cuenta la lámina e intervalo de riego y asumiendo un 52% de pérdidas se tiene una recarga de (3,5 mm/día)

Capa impermeable se encuentra a **5,70 m** de profundidad

La Conductividad hidráulica de los Suelos Franco Arenoso: **K = 1,5 m/día**
Franco Limoso: **K = 0,9 m/día**

La porosidad efectiva de los Suelos Franco Arenoso $\mu = 0,135$
Franco Limoso $\mu = 0,09$

El intervalo entre recargas (riegos) = **15 días**.

Radio del dren = **0,06 m**

Los criterios de drenaje establecidos son:

1) que en caso de penetrar el nivel freático en el espesor de capa libre de freática estipulado, el mismo al cabo de 3 días se encuentre a **0,80 m / 1,20 m** ó mas de profundidad según sea un diseño para zona **hortícola o frutícola**.-

2) que no se produzca un ascenso dinámico del nivel freático (NF) freático, es decir se evite el ascenso gradual del mismo durante el periodo de riego. Para ello el sistema de drenaje debe posibilitar en el lapso que transcurre entre un riego y otro(15 días), un descenso del NF igual a la elevación instantánea producida por la recarga

La carga hidráulica máxima h_0 es igual a la elevación del NF operada (Δh) mas la carga hidráulica mínima (antes de aplicarse el riego) la que puede ser elegida por el diseñador, generalmente entre 0,1 m ó 0 m si consideramos que está a la misma altura que la profundidad de los drenes. En este caso consideramos una carga hidráulica mínima = **0**

Comentarios

Dado que es dificultosa la determinación de algunas de las características del suelo mencionadas con anterioridad y considerando que los parámetros **K** (conductividad Hidráulica) y μ (porosidad efectiva) presentan para un mismo tipo textural de suelos un muy amplio rango de valores, debido a que los mismos no dependen solamente de la textura sino también de otras variables que interactúan con ella. Es coincidencia de la mayoría de los autores e investigadores en drenaje que la utilización de valores correctos de estas variables es mucho mas importante en cuanto al logro de resultados valederos del sistema de drenaje, que la utilización de la ecuación correcta para esa determinada situación.

Lo mas conveniente es medir en campo el valor de dichas variables, no obstante ello en el caso de la **K** se puede recurrir a bibliografía nacional e internacional, que presentan valores de K para distinto tipos texturales de suelos: Martínez Beltrán (1986) tablas de Van Hoorn y del UBSR, así como los datos locales aportados por Mirábile, Carlos (2000) para suelos francos, francos arenosos y francos limosos en mas de 100 determinaciones de campo por el método del pozo barrenado. Sobre la base de esta información se han seleccionado los valores más representativos para su aplicación en este caso.

Con respecto al valor fijado para μ se ha recurrido a las curvas de Van Beer y del USBR mencionadas por Martínez Beltrán (1986) que da el valor de μ , en función de la K y de las ecuaciones $\mu = \sqrt{K}$ y $\mu = EPT - Wc$; donde EPT es espacio poroso total y Wc es capacidad

de campo en valor volumétrico. También se han usado las tablas de Jhonson y de U.S.Bureau Reclamation (Martínez Beltrán, 1986) que expresa rangos de μ en función de la textura del suelo.

RESULTADOS

Se corre el modelo para las situaciones antes mencionadas obteniéndose una serie de salidas que se pueden observar en el “anexo”.-

En el siguiente cuadro se visualiza la salida ejecutada para la situación de un suelo franco arenoso -cultivado con hortalizas en donde se decide instalar drenes de 0,06 m de radio a 1,70 m de profundidad.

Cuadro N° 1-A

Datos		Datos		K	conduct. Hidraulica
K=	1,5 m/dia	t=	15 días	mu	macro porosidad
mu=	0,135	R=	53 mm	D2	espesor del estrato por debajo del dren
D2=	4 m	Prof.min=	0,8 m	d2	espesor del estrato equivalente por debajo del dren
r=	0,06 m	ND=	1,7 m	d	espesor total del estrato
Calculado				r	radio del dren
ho=	0,39 m	L=	100 m	t	intervalo de riego o de recarga
Ht(3)=	0,90 m	Dif=	0,14 m	R	recarga
hmed=	0,196 m			Prof. min	Prof de NF (necesaria), 3 días despues de la recarga
d=	3,247 m			ND	Prof. o Nivel de drenes
alfa=	0,04			ho	Altura inicial, sobre el nivel de drenes
d2=	3,051 m			Ht(3)	Alt. max que el NF puede tener sobre el Dren 3 días despues de prod la recarga
ht=	0,27 m			ht	Alt. sobre el ND al cabo de un tiempo (t) igual al interv. entre recargas
				alfa	Factor de reaccion

Riego	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
h antes	0,00	0,27	0,45	0,57	0,66	0,71	0,75	0,78	0,80	0,81	0,82	0,82	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
h después	0,39	0,66	0,84	0,96	1,05	1,11	1,14	1,17	1,19	1,20	1,21	1,21	1,22	1,22	1,22	1,22	1,2	1,2

$$h_3 = 1,28 \text{ m}$$

Suelo Franco Arenoso- Prof. de Drenes 1,70 m –Cultivos Hortícolas

Se decide probar con un distanciamiento entre drenes de 100m., el modelo comienza a calculando la elevación que se produce después del 1er. Riego 0,39m y el descenso que se opera durante el intervalo de riego, mostrando la altura del NF sobre los drenes momentos antes del 2do riego 0,27m, así lo va haciendo riego a riego observándose que a partir del 13er. riego se produce el equilibrio, a partir de este punto, momento después de cada riego el NF estará 1,22m por encima del dren y al momento de un nuevo riego 0,83m. Lamentablemente el espaciamiento elegido (**100m**) no es el adecuado ya que una vez estabilizado el proceso, la freática luego de un riego penetra **0,32 m** en el espesor radicular y al cabo de **3 días** se en contraria a **1,28m** por encima del dren. penetrando en el punto medio entre drenes **0,38 m** y en promedio **0,14 m (DIF)**

El modelo entonces recalcula para obtener una **Dif = 0** y el valor de espaciamiento obtenido es **84 m**. Como se observa en el cuadro N° 1-B.

Cuadro N° 1-B Suelo franco arenoso- prof. de drenes 1,70 m –Cultivos hortícolas
Salida final luego del recalcu

Datos	K= 1,5 m/dia	Datos	t= 15 días	K	conduct. Hidraulica
mu= 0,135	R= 53 mm	mu	macro porosidad	D2	espesor del estrato por debajo del dren
D2= 4 m	Prof.min= 0,8 m	d2	espesor del estrato equivalente por debajo del dren	d	espesor total del estrato
r= 0,06 m	ND= 1,7 m	r	radio del dren	t	intervalo de riego o de recarga
Calculado	L= 84,129 m	R	recarga	Prof. min	Prof de NF (necesaria), 3 dias despues de la recarga
ho= 0,39 m	Dif= 0,00 m	ND	Prof. o Nivel de drenes	ho	Altura inicial, sobre el nivel de drenes
Ht(3)= 0,90 m		Ht(3)	Alt. max que el NF puede tener sobre el Dren	ht	Alt. sobre el ND al cabo de un tiempo (t) igual al interv. entre recargas
hmed= 0,196 m		alfa	Factor de reacción		
d= 3,116 m					
alfa= 0,05					
d2= 2,92 m					
ht= 0,22 m					

Riego	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
h antes	0,00	0,22	0,34	0,41	0,45	0,48	0,49	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
h después	0,39	0,61	0,74	0,81	0,85	0,87	0,88	0,89	0,89	0,89	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90

h3 = 0,90 m

Con un espaciamiento de 84 m la elevación que se produce después del 1er. Riego 0,39m pero el descenso operado durante el intervalo de riego hace que el NF se sitúe momentos antes del 2do riego a **0,22m** sobre los drenes; el punto de equilibrio se logra a partir del **8vo.** riego a partir del cual después de cada riego el NF estará 0,89m por encima del dren y al momento de un nuevo riego **0,50m**. Con este espaciamiento la freática luego de un riego no penetra en el espesor de suelo que debe permanecer libre de freática (espesor radicular) y al cabo de **3 días** se en contraria a **0,90 m** por encima del dren. Con lo cual se cumpliría con el criterio de que a los 3 días de producida la recarga (riego) el cultivo disponga de una profundidad de suelo libre de freática de **0,80m**. (1,70-0,90=0,80 m)

Analizando las salidas del modelo (ver anexo) para las distintas situaciones planteadas se puede observar en la tabla n° 3 la altura en que se estabiliza el NF sobre el nivel de drenes, la altura que se eleva el NF por la recarga producida, la suma de ambas (altura máxima h_o) y la altura disponible entre el nivel de drenes respecto de la profundidad libre de freática (máxima ascenso que podría operar la freática sin que penetre en la capa de suelo fijada como libre de freática).

Para el caso de drenes establecidos a 1,70m de profundidad. se tiene que solamente en la situación establecida para hortalizas en suelo franco arenoso la freática después de un riego no penetra en la zona de exploración radicular libre recomendada, si ocurre en el resto de las situaciones (suelo franco arenoso frutales y suelo franco limosos tanto en hortalizas como frutales). En cuanto a drenes colocados a 2m de profundidad, la elevación del Nivel freático producto de la recarga no produce la penetración del mismo en la zona radicular necesaria libre de freática en prácticamente todas las situaciones excepto la de frutales en suelos francos limosos en que penetra 0,08 m dejando solamente un espesor libre de 1,12 m ; no obstante

ello en todos los casos en que el NF penetra dentro de la zona libre de freática aconsejada , el espaciamiento dado por el modelo cumple con el criterio de drenaje impuesto que al tercer día después de la recarga dicho nivel este a una profundidad igual o mayor que la exigencia impuesta.

Tabla N° 3: Altura sobre el nivel de drenes en que se estabiliza el nivel freático máximo (h_o) luego de la recarga, máximo ascenso posible para cumplir con el criterio establecido y profundidad del NF obtenida (todo en metros)

Profundidad del dren (m)	Altura de	Suelo Franco Arenoso		Suelo Franco Limoso	
		Hortalizas p = 0,80 m	Frutales p = 1,20 m	Hortalizas p = 0,80 m	Frutales p = 1,20 m
1,70	Estabilización	0,50	0,17	0,38	0,08
	Recarga	0,39	0,39	0,59	0,59
	Total (h _o)	0,89	0,56	0,97	0,67
	Máx. ascenso posible.	0,90	0,50	0,90	0,50
	Penetra	No	0,06 (m)	0,07 (m)	0,17 (m)
	Profundidad: P-p	0,81	1,14	0,73	1,03
2,00	Estabilización	0,76	0,42	0,62	0,29
	Recarga	0,39	0,39	0,59	0,59
	Total (h _o)	1,15	0,81	1,21	0,88
	Máx. ascenso posible.	1,20	0,80	1,20	0,80
	Penetra	No	justo	justo	0,08 (m)
	Profundidad: P-p	0,85	1,19	0,79	1,12

En la figura n° 2 se aprecia para el caso de drenes a 1,70m de profundidad Suelo Franco - Cultivos Frutales, la elevación del nivel freático por sobre el dren antes y después de cada riego observándose que hasta el 4 riego la freática tiene una dinámica ascendente luego del cual hasta final del ciclo se estabiliza siendo los ascensos (inmediatamente después del riego iguales a los descensos durante el intervalo de riego por lo que la elevación después de cada riego parte de un mismo nivel (0,17m)

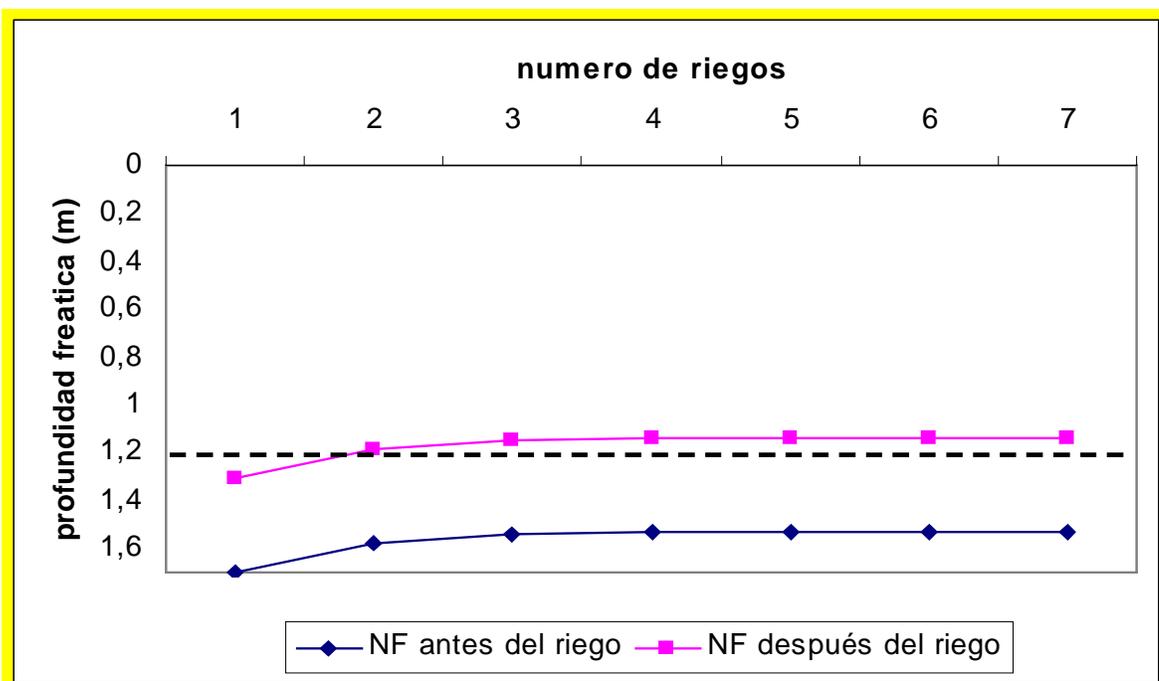


Figura N° 2: Elevación del nivel freático por sobre el dren antes y después de cada riego
 Caso: suelo franco arenoso-dren a 1,70 m de prof.- cultivos frutales (1,2 m libre de freática)

Los resultados en cuanto a los espaciamentos que cumplen con los criterios propuestos se observan en la Tabla n° 4

Tabla N° 4 : Espaciamento entre drenes de 0,06 m de radio (en metros)

Profundidad del dren (m)	Suelo Franco Arenoso		Suelo Franco Limoso	
	p = 0,80 m	p = 1,20 m	p = 0,80 m	p = 1,20 m
1,70	84	59	64	41
2,00	94	77	74	58

Tabla N° 5: Espaciamento entre drenes de 0,04 m de radio (en metros)

Profundidad del dren (m)	Suelo Franco Arenoso		Suelo Franco Limoso	
	p = 0,80 m	p = 1,20 m	p = 0,80 m	p = 1,20 m
1,70	82,5	57	62	40
2,00	93	75	72	56

A fin de poseer mayor información para optar por la mejor solución técnico-económica posible se calcularon nuevos espaciamentos (para las distintas situaciones planteadas) pero suponiendo en este caso la utilización de drenes de 0,04 m de radio (tabla n° 5) siendo los valores obtenidos muy similares a los de 0,06 m., por lo que se debería hacer un estudio de costos a fin de seleccionar el mejor y mas económico diseño. La instalación de un buen sistema de drenaje demanda una muy fuerte inversión inicial y un costo permanente de mantenimiento, por lo que el espaciamento entre drenes, el valor de la tubería a coloca, la

cual depende del diámetro, la profundidad de colocación (zanjeo y tapado),etc intervienen en forma fundamental en la economía del proyecto.

CONCLUSIONES

El modelo interpreta con justeza la dinámica y proceso del nivel freático (NF) producto de una recarga instantánea

Permite en forma rápida y simple la ejecución de múltiples opciones de combinación de variables (profundidad, espaciamiento,) para calcular el espaciamiento que cumpla con los criterios de drenaje establecidos. Suministra además información sobre ascenso freático producido por la recarga, posición de la misma para un tiempo seleccionado, niveles freático antes y después cada riego o recarga y momento y nivel en que se estabiliza la dinámica freática

BIBLIOGRAFÍA

Martínez Beltrán, Julián. 1986. Drenaje Agrícola. Volumen I. Manual Técnico 5. Ministerio de Agricultura, pesca y Alimentación, Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario. España.

Mirábile Carlos, 2000. Mapa de Conductividad Hidráulica del Oasis del Río Tunuyán Inferior. INA-CRA. Mendoza – Argentina.

Pizarro, Fernando, 1978. Drenaje Agrícola y Recuperación de Suelos Salinos. Editorial Agrícola Española.-

ANEXO

Corridas del Modelo

Situación:

Suelo franco arenoso- Prof. de drenes 1,70 m –Cultivos Hortícolas (p = 0,80 m)

DRENA - CRA (Fornero - Mirabile)

Datos

K= 1,5 m/día
 mu= 0,135
 D2= 4 m
 r= 0,06 m

Calculado

ho= 0,39 m
 Ht(3)= 0,90 m
 hmed= 0,196 m
 d= 3,116 m
 alfa= 0,05
 d2= 2,92 m
 ht= 0,22 m

Datos

t= 15 días
 R= 53 mm
 Prof.min= 0,8 m
 ND= 1,7 m

L= 84,129 m

Dif= 0,00 m

K conduct. Hidraulica
mu macro porosidad
D2 espesor del estrato por debajo del dren
d2 espesor del estrato equivalente por debajo del dren
d espesor total del estrato
r radio del dren
t intervalo de riego o de recarga
R recarga
Prof. min Prof de NF (necesaria), 3 dias despues de la recarga
ND Prof. o Nivel de drenes
ho Altura inicial, sobre el nivel de drenes
Ht(3) Alt. max que el NF puede tener sobre el Dren
 3 dias despues de prod la recarga
ht Alt. sobre el ND al cabo de un tiempo (t) igual al interv. entre recargas
alfa Factor de reaccion

Riego	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
h antes	0,00	0,22	0,34	0,41	0,45	0,48	0,49	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
h después	0,39	0,61	0,74	0,81	0,85	0,87	0,88	0,89	0,89	0,89	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90

h3 = 0,90 m

Suelo franco arenoso- Prof. de drenes 1,70 m –Cultivos frutícolas (p = 1,20 m)

DRENA - CRA (Fornero - Mirabile)

Datos

K= 1,5 m/día
 mu= 0,135
 D2= 4 m
 r= 0,06 m

Datos

t= 15 días
 R= 53 mm
 Prof.min= 1,2 m
 ND= 1,7 m

K conduct. Hidraulica
mu macro porosidad
D2 espesor del estrato por debajo del dren
d2 espesor del estrato equivalente por debajo del dren
d espesor total del estrato
r radio del dren
t intervalo de riego o de recarga
R recarga
Prof. min Prof de NF (necesaria), 3 días despues de la recarga
ND Prof. o Nivel de drenes
ho Altura inicial, sobre el nivel de drenes
Ht(3) Alt. max que el NF puede tener sobre el Dren
 3 días despues de prod la recarga
ht Alt. sobre el ND al cabo de un tiempo (t) igual al interv. entre recargas
alfa Factor de reacción

Calculado

ho= 0,39 m
 Ht(3)= 0,50 m
 hmed= 0,196 m
 d= 2,811 m
 alfa= 0,09
 d2= 2,614 m
 ht= 0,12 m

L= 58,719 m
Dif= 0,00 m

Riego	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
h antes	0,00	0,12	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
h después	0,39	0,51	0,55	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56

h3 = 0,50 m

Suelo franco arenoso- Prof. de drenes 2,00 m –Cultivos hortícolas (p = 0,80 m)

DRENA - CRA (Fornero - Mirabile)

Datos

K= 1,5 m/día
 mu= 0,135
 D2= 3,7 m
 r= 0,06 m

Datos

t= 15 días
 R= 53 mm
 Prof.min= 0,8 m
 ND= 2 m

K conduct. Hidraulica
mu macro porosidad
D2 espesor del estrato por debajo del dren
d2 espesor del estrato equivalente por debajo del dren
d espesor total del estrato
r radio del dren
t intervalo de riego o de recarga
R recarga
Prof. min Prof de NF (necesaria), 3 días despues de la recarga
ND Prof. o Nivel de drenes
ho Altura inicial, sobre el nivel de drenes
Ht(3) Alt. max que el NF puede tener sobre el Dren
 3 días despues de prod la recarga
ht Alt. sobre el ND al cabo de un tiempo (t) igual al interv. entre recargas
alfa Factor de reacción

Calculado

ho= 0,39 m
 Ht(3)= 1,20 m
 hmed= 0,196 m
 d= 3,049 m
 alfa= 0,04
 d2= 2,853 m
 ht= 0,26 m

L= 94,441 m
Dif= 0,00 m

Riego	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
h antes	0,00	0,26	0,43	0,54	0,62	0,67	0,70	0,72	0,74	0,75	0,75	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,77
h después	0,39	0,65	0,82	0,94	1,01	1,06	1,09	1,12	1,13	1,14	1,15	1,15	1,15	1,15	1,16	1,16	1,16	1,16

h3 = 1,20 m

Suelo franco arenoso- Prof. de drenes 2,00 m –Cultivos frutícolas (p = 1,20 m)

DRENA - CRA (Fornero - Mirabile)

Datos

K= 1,5 m/día
mu= 0,135
D2= 3,7 m
r= 0,06 m

Datos

t= 15 días
R= 53 mm
Prof.min= 1,2 m
ND= 2 m

K conduct. Hidraulica
mu macro porosidad
D2 espesor del estrato por debajo del dren
d2 espesor del estrato equivalente por debajo del dren
d espesor total del estrato
r radio del dren
t intervalo de riego o de recarga
R recarga
Prof. min Prof de NF (necesaria), 3 días despues de la recarga
ND Prof. o Nivel de drenes
ho Altura inicial, sobre el nivel de drenes
Ht(3) Alt. max que el NF puede tener sobre el Dren
 3 días despues de prod la recarga
ht Alt. sobre el ND al cabo de un tiempo (t) igual al interv. entre recargas
alfa Factor de reacción

Calculado

ho= 0,39 m
Ht(3)= 0,80 m
hmed= 0,196 m
d= 2,907 m
alfa= 0,05
d2= 2,71 m
ht= 0,20 m

L= 76,817 m
Dif= 0,00 m

Riego	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
h antes	0,00	0,20	0,31	0,36	0,39	0,40	0,41	0,41	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
h después	0,39	0,60	0,70	0,75	0,78	0,80	0,80	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81

h3 = 0,80 m

Suelo franco Limoso- Prof. de drenes 1,70 m –Cultivos Hortícolas (p = 0,80 m)

DRENA - CRA (Fornero - Mirabile)

Datos

K= 0,9 m/día
mu= 0,09
D2= 4 m
r= 0,06 m

Datos

t= 15 días
R= 53 mm
Prof.min= 0,8 m
ND= 1,7 m

K conduct Hidrau
mu macro porosidad
D2 espesor del estrato por debajo del dren
d2 espesor del estrato equivalente por debajo del dren
d espesor total del estrato
r radio del dren
t intervalo de riego o de recarga
R recarga
Prof. min Prof de NF (necesaria), 3 días despues de la recarga
ND Prof. o Nivel de drenes
ho Altura inicial, sobre el nivel de drenes
Ht(3) Alt. max que el NF puede tener sobre el Dren
 3 días despues de prod la recarga
ht Alt. sobre el ND al cabo de un tiempo (t) igual al interv. entre recargas
alfa Factor de reacción

Calculado

ho= 0,59 m
Ht(3)= 0,90 m
hmed= 0,294 m
d= 2,980 m
alfa= 0,07
d2= 2,686 m
ht= 0,23 m

L= 63,603 m
Dif= 0,000 m

Riego	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
h antes	0,00	0,23	0,32	0,35	0,37	0,37	0,37	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
h después	0,59	0,82	0,91	0,94	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96

h3 = 0,90 m

Suelo franco limoso- Prof. de drenes 1,70 m – Cultivos grupo frutales (p = 1,20 m)

DRENA-CRA (Fornero -Mirabile)

Datos

K= 0,9 m/dia
 mu= 0,09
 D2= 4 m
 r= 0,06 m

Calculado

ho= 0,59 m
 Ht(3)= 0,50 m
 hmed= 0,294 m
 d= 2,578 m
 alfa= 0,15
 d2= 2,283 m
 ht= 0,07 m

Datos

t= 15 días
 R= 53 mm
 Prof.min= 1,2 m
 ND= 1,7 m

L= 41,387 m
 Dif= 0,000 m

K conduct Hidrau
 mu macro porosidad
 D2 espesor del estrato por debajo del dren
 d2 espesor del estrato equivalente por debajo del dren
 d espesor total del estrato
 r radio del dren
 t intervalo de riego o de recarga
 R recarga
 Prof. min Prof de NF (necesaria), 3 días despues de la recarga
 ND Prof. o Nivel de drenes
 ho Altura inicial, sobre el nivel de drenes
 Ht(3) Alt. max que el NF puede tener sobre el Dren
 3 días despues de prod la recarga
 ht Alt. sobre el ND al cabo de un tiempo (t) igual al interv. entre recargas
 alfa Factor de reacción

Riego	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
h antes	0,00	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
h después	0,59	0,66	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67

h3 = 0,50 m

Suelo franco limoso- Prof. de drenes 2,00 m –Cultivos hortícolas (p = 0,80 m)

DRENA - CRA (Fornero - Mirabile)

Datos

K= 0,9 m/dia
 mu= 0,09
 D2= 3,7 m
 r= 0,06 m

Calculado

ho= 0,59 m
 Ht(3)= 1,20 m
 hmed= 0,294 m
 d= 2,975 m
 alfa= 0,05
 d2= 2,68 m
 ht= 0,30 m

Datos

t= 15 días
 R= 53 mm
 Prof.min= 0,8 m
 ND= 2 m

L= 73,724 m
 Dif= 0,000 m

K conduct Hidrau
 mu macro porosidad
 D2 espesor del estrato por debajo del dren
 d2 espesor del estrato equivalente por debajo del dren
 d espesor total del estrato
 r radio del dren
 t intervalo de riego o de recarga
 R recarga
 Prof. min Prof de NF (necesaria), 3 días despues de la recarga
 ND Prof. o Nivel de drenes
 ho Altura inicial, sobre el nivel de drenes
 Ht(3) Alt. max que el NF puede tener sobre el Dren
 3 días despues de prod la recarga
 ht Alt. sobre el ND al cabo de un tiempo (t) igual al interv. entre recargas
 alfa Factor de reacción

Riego	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
h antes	0,00	0,30	0,46	0,54	0,58	0,60	0,62	0,62	0,62	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
h después	0,59	0,89	1,05	1,13	1,17	1,19	1,20	1,21	1,21	1,21	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22

Suelo franco limoso- Prof. de drenes 2,00 m –Cultivos Frutales (p = 1,20 m)

DRENA - CRA (Forno - Mirabile)

Datos

K= 0,9 m/dia
mu= 0,09
D2= 3,7 m
r= 0,06 m

Datos

t= 15 días
R= 53 mm
Prof.min= 1,2 m
ND= 2 m

K conduct Hidrau
mu macro porosidad
D2 espesor del estrato por debajo del dren
d2 espesor del estrato equivalente por debajo del dren
d espesor total del estrato
r radio del dren
t intervalo de riego o de recarga
R recarga
Prof. min Prof de NF (necesaria), 3 dias despues de la recarga
ND Prof. o Nivel de drenes
ho Altura inicial, sobre el nivel de drenes
Ht(3) Alt. max que el NF puede tener sobre el Dren
 3 dias despues de prod la recarga
ht Alt. sobre el ND al cabo de un tiempo (t) igual al interv. entre recargas
alfa Factor de reaccion

Calculado

ho= 0,59 m
Ht(3)= 0,80 m
hmed= 0,294 m
d= 2,782 m
alfa= 0,08
d2= 2,487 m
ht= 0,20 m

L= 57,529 m

Dif= 0,000 m

Riego	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
h antes	0,00	0,20	0,26	0,28	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
h después	0,59	0,79	0,85	0,87	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88

h3 = 0,80 m

A continuación se presenta una pequeña guía de manejo del modelo a fin de facilitar su uso

El modelo se ha desarrollado sobre una planilla Excel.

1- Se utiliza coma para los números decimales Ej: 0,80

2- Cargar los datos de entrada solicitados.

3- **L** es un dato de entrada (se debe colocar un valor tentativo Ej: 100 m)

Si con ese valor de **L** se obtiene una **Dif es distinta de 0** => Hay que posicionarse sobre el valor de **L** ó de **Dif** e ir a:

Herramientas

Solver

Resolver

y el modelo arroja un nuevo valor de **L** con el cual **Dif = 0** ó sea dá el espaciamiento mas eficiente ;el mayor espaciamiento que cumple con la condición que: **H₁₃ = h₃**

Para Correr El Modelo Sobre Una Salida o Ejercicio Hecho

- Se debe borrar todos los datos de entrada.
- Al realizar la operación anterior, se borran todos los datos calculados, permaneciendo solamente el valor de **L**.
- Ahora se puede borrar dicho valor e incorporar uno tentativo, o dejarlo como si fuese el primer dato de entrada que se incorpora en esta nueva corrida o ejercicio

Se supone que al comienzo de la temporada de riego, la freática es horizontal y está al nivel de los drenes. Estas suposiciones no modifican el resultado final de espaciamiento.-

Muchas veces no se alcanza la situación de equilibrio donde a partir de ese momento las ascensos son iguales a los descensos, ya sea por que el número de riegos no suficiente o por que varía el intervalo entre riegos, entonces se debe estudiar la temporada completa de riegos y escoger el intervalo mas desfavorable para calcular la altura **h** correspondiente a **N** días después del riego