

ANEXO ESPECÍFICO

RD-1309.1

“VALIDACIÓN DE TECNOLOGÍA PARA EL USO DE AGUAS RESIDUALES EN LA
AGRICULTURA”

INFORME FINAL

Jiutepec, Mor., Octubre de 2013

SEMARNAT

SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA
DEL AGUA



INDICE

1. Introducción
2. Antecedentes
3. Selección de parcela experimental
4. Diseño del sistema de riego y trabajos en la parcela
5. Experimentos en campo (pruebas de riego)
6. Desarrollo de software y ajuste con resultados de campo
7. Resultados y conclusiones
8. Anexos

1. Introducción

Reciclar las aguas residuales urbanas y usarlas para los cultivos agrícolas puede ayudar a mitigar los problemas de escasez de agua y reducir la contaminación del agua, pero se trata de una práctica que no está tan extendida como debiera, según un último informe de la FAO.

El uso de aguas residuales tratadas en la agricultura se practica en cerca de medio centenar de países y ocupa una superficie que asciende al 10 por ciento del total de tierras cultivadas a nivel mundial.

Si bien a escala global tan solo una pequeña parte de las aguas residuales tratadas se utilizan para la agricultura, esta práctica atrae cada vez mayor interés en todo el mundo, y en algunos países - México, por ejemplo- un porcentaje elevado de las aguas tratadas se destinan al riego.

Los estudios realizados a nivel mundial indican que una gestión segura de las aguas residuales en la producción alimentaria supone una forma de aliviar la competencia entre las ciudades y la agricultura por el agua en regiones donde la escasez va en aumento; además que puede ayudar también con el tratamiento de las aguas residuales y la consiguiente contaminación de los ríos.

Los campesinos también podrían ahorrarse parte del costo de bombear aguas subterráneas, al tiempo que los nutrientes presentes en las aguas residuales reducen el gasto en fertilizantes.

Los beneficios compensan los costos

Ya que la realización de sistemas adecuados para el tratamiento y reciclaje de las aguas residuales contempla tanto inversiones iniciales de capital y costos operativos permanentes, el mayor beneficio debería resultar del elevado valor del agua potable que se libera para el consumo urbano o el uso industrial. Ello reduciría los costos que deben

soportar las autoridades municipales para localizar recursos hídricos adicionales a través de medios más costosos. Y los costos se podrían compensar aún más reutilizando el biogás generado durante el tratamiento de las aguas como fuente de energía.

El uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura constituye una de las herramientas más valiosas que tienen los países en vías de desarrollo para controlar la contaminación y hacer frente al reto que constituye incrementar la producción agrícola con un recurso hídrico escaso.

Las aguas residuales constituyen un problema sanitario, pero a su vez un recurso muy apreciado para el riego y la piscicultura; de gran valor económico en áreas desérticas o con estiajes prolongados.

Los nutrientes presentes en las aguas residuales tienen valor como fertilizantes y aumentan el rendimiento de los cultivos, estos nutrientes se conservan en el protoplasma de las algas al tratar las aguas residuales en lagunas de estabilización.

Los tóxicos y microorganismos patógenos presentes en las aguas residuales pueden causar efectos nocivos a la salud y/o a los cultivos, si no se utilizan el tratamiento y el manejo adecuados.

Algunas sustancias presentes en las aguas residuales pueden resultar perjudiciales a los suelos, a corto, mediano o largo plazo, si no se toman las medidas correctivas apropiadas.

La aplicación de aguas residuales, crudas o previamente tratadas, al suelo, campos de cultivo, o estanques de piscicultura constituye en sí un tratamiento adicional que mejora la calidad de las mismas.

Con relación a la reutilización de las aguas residuales, tratadas o no, éstas se usan principalmente en el estado de Hidalgo, provenientes de las descargas de la Ciudad de México y en menor proporción en Distritos de Riego de los estados de Guanajuato, México, Jalisco y Michoacán, entre otros. Se estima que actualmente en el país se riega

una superficie aproximadamente 156 000 ha, utilizándose un volumen aproximado de aguas residuales de 1,6 km³/año.

2. Antecedentes

La necesidad de elevar la producción agropecuaria ha estado siempre presente en la historia moderna de nuestro país, debido a que la tasa de crecimiento de la población ha sido considerablemente superior a la de la producción de alimentos básicos. Siendo la actividad agrícola el medio para producir estos satisfactores, es de primordial importancia la atención de los problemas que se presentan en sus procesos productivos, debe tenerse en cuenta que la agricultura de riego en nuestro país aporta la mayor parte de la producción agrícola pero es necesario hacer notar que el avance de la frontera agrícola relacionada con dicha actividad se ha visto muy reducido debido a los elevados costos que implica incorporar una superficie al riego.

A lo anterior debe sumarse que la producción agrícola en los distritos de riego se ve limitada por el deterioro de la calidad de los suelos, derivado principalmente de problemas de salinidad, que se estima cubren una superficie de aproximadamente 700,000 ha. Si la tasa normal de deterioro se suma el efecto del cambio climático en la aceleración del ensalitramiento de los suelos, se hace evidente la necesidad de desarrollar investigación que permita definir estrategias de adaptación o mitigación de los efectos del calentamiento global en relación con la salinidad de los suelos.

Dos estrategias prometedoras para incrementar la frontera agrícola y la productividad de la tierra, son el empleo sustentable de las aguas residuales en la agricultura y la producción intensiva, dos cosechas al año, en zonas subhúmedas donde es posible controlar el régimen de humedad del suelo.

En relación con el impacto del cambio climático en el proceso de ensalitramiento de los suelos, se hace necesario realizar un monitoreo de variables físico-químicas que permitan

identificar el grado de impacto, partiendo en principio de una superficie relativamente reducida, como lo es un módulo de riego.

3. Localización y ubicación del módulo experimental

Se ha seleccionado la parcela experimental dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico de Roque, ya que cuenta con las características idóneas para realizar los trabajos experimentales de riego con aguas residuales tratadas, ya que el Instituto cuenta con su propia planta de tratamiento que colecta las aguas residuales del mismo Instituto y de poblaciones aledañas en la zona.

Localización y ubicación de la parcela experimental.

Se ubica en el Km.8 Carretera Celaya-Juventino Rosas, Municipio de Celaya en el estado de Guanajuato, sus coordenadas geográficas de localización son:

Latitud $20^{\circ}34'44.40''N$ Longitud $100^{\circ}49'49.32''O$

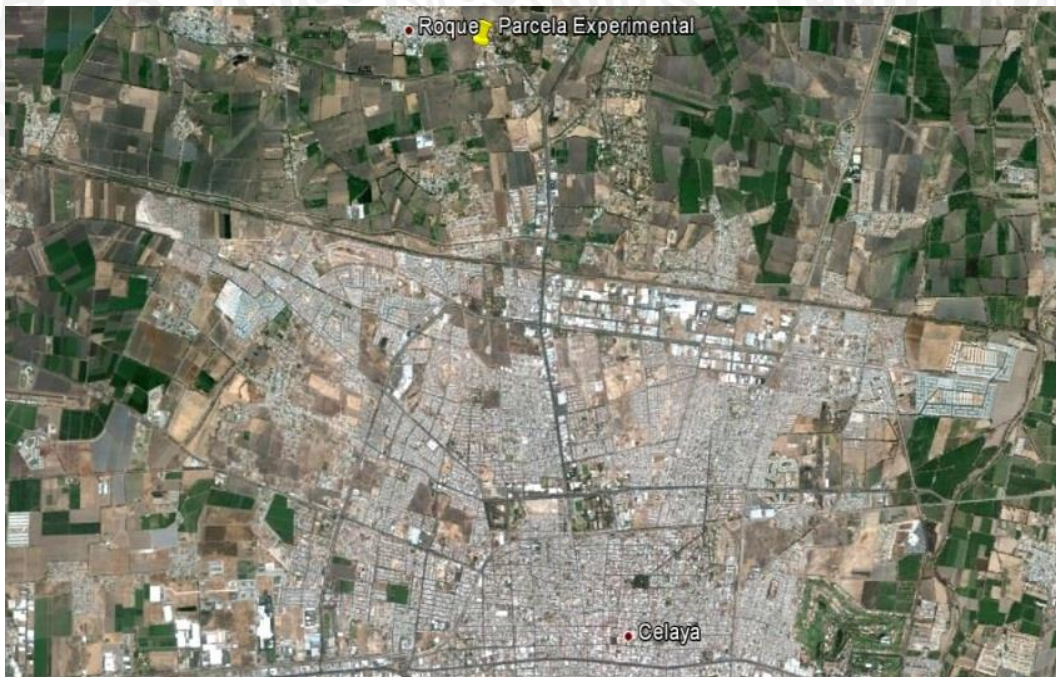


Ilustración 1. Mapa de localización de la parcela experimental.



Ilustración 2. Parcela experimental para riego con agua residual.



Ilustración 3. Parcela experimental para riego con agua residual.



Ilustración 4. Parcela experimental para riego con agua residual.



Ilustración 5. Parcela experimental para riego con agua residual



Ilustración 6. Parcela experimental para riego con agua residual



Ilustración 7. Planta tratadora dentro del ITRoque.



Ilustración 8. Planta tratadora dentro del ITRoque.



Ilustración 9. Planta tratadora y reservorio dentro del ITRoque.



Ilustración 10. Planta tratadora dentro del ITRoque.



Ilustración 11. Reservorio dentro del ITRoque.

4. Diseño del sistema de riego y trabajos en la parcela

- Se realizó el diseño de la red de conducción de agua residual desde la planta tratadora localizada dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico de Roque, hasta las parcelas experimentales regadas con aguas residuales.

El diseño corresponde en una conducción con tubería de PCV, con dos válvulas hidrantes y dos líneas de tubería de multicompuertas para tener un mayor control de las aguas residuales.

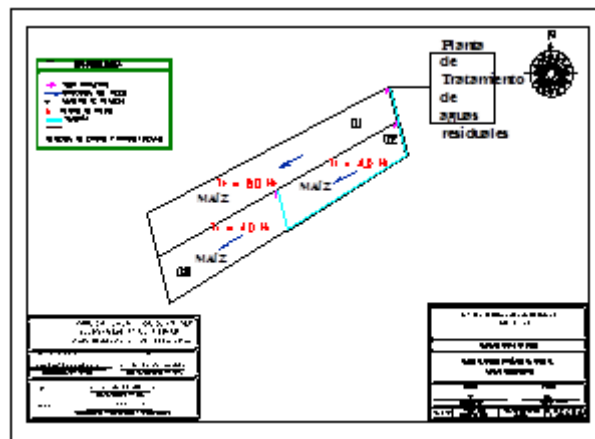


Ilustración 12. Plano de diseño de la red de conducción.

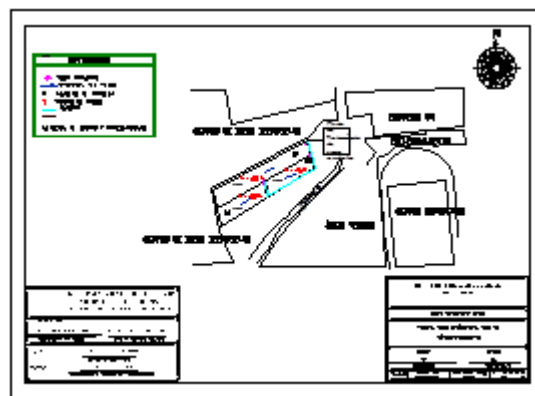


Ilustración 13. Plano general de diseño de la red de conducción.

- Se realizó la construcción del sistema de riego de baja presión en las parcelas experimentales, que consiste en la adecuación a la planta tratadora para sustraer el agua residual y conducirla hasta las parcelas, además de la instalación de la tubería y piezas especiales para tener el funcionamiento correcto del sistema.



Ilustración 14. Adecuación a la planta de tratamiento.



Ilustración 15. Adecuación a la planta de tratamiento.



Ilustración 16. Sistema de riego de baja presión.



Ilustración 17. Líneas de tubería de muticompuestas.



Ilustración 18. Líneas de tubería de muticompuestas y válvula hidrante.

- Se realizó la preparación del terreno, (nivelación del terreno y surcado) además de realizar pruebas granulométricas de los suelos, que se realizaron a través de un muestreo de los suelos en las parcelas experimentales.



Ilustración 19. Trabajos de nivelación de tierras. Niveladora Laser.



Ilustración 20. Trabajos de nivelación de tierras. Laser.



Ilustración 21. Preparación del terreno



Ilustración 22. Preparación del terreno



Ilustración 23. Preparación del terreno



Ilustración 24. Trabajos de surcado en el terreno



Ilustración 25. Trabajos de surcado en el terreno



Ilustración 26. Trabajos de surcado en el terreno



Ilustración 27. Trabajos de muestreo de suelos.



Ilustración 28. Trabajos de muestreo de suelos.



Ilustración 29. Trabajos de muestreo de suelos.



Ilustración 30. Trabajos de muestreo de suelos.



Ilustración 31. Trabajos de muestreo de suelos.



Ilustración 32. Trabajos de muestreo de suelos.



Ilustración 33. Trabajos de muestreo de suelos.

- Se presentan el cuadro con los resultados de los análisis granulométricos de las muestras de suelo obtenidas de la parcela experimental.

Cuadro 1. Textura de los suelos de las parcelas experimentales localizadas dentro de los terrenos del Instituto Tecnológico de Roque, Celaya, Gto.

Identificación	Profundidad	Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura
Pozo 1	0-30	32	44	24	Franco
	30-60	32	40	28	Franco arcilloso
	60-90	40	42	18	Franco
Pozo 2	0-30	28	48	24	Franco
	30-60	34	52	14	Franco limoso
	60-90	36	46	18	Franco
Pozo 3	0-30	30	44	26	Franco
	30-60	34	52	14	Franco limoso
	60-90	24	56	20	Franco limoso

5. Experimentos en campo (pruebas de riego)

El trabajo enfoca los sistemas de riego por surcos y melgas (Riego por Gravedad). El riego superficial es la técnica de aplicación de agua predominante en la agricultura mundial, constituyendo más del 90% de la superficie regada del país, con eficiencias de aplicación que varían entre 30 y 50%.

El riego por surco y/o melgas es una alternativa de este tipo de riego que está orientado a cultivos en hileras y huertos frutales que tienen una rentabilidad económica mayor que otros cultivos extensivos. La eficiencia en un sistema de riego por surcos y/o melgas se sustenta sobre la base de un estudio detallado de los principales factores que afectan la hidráulica del riego superficial, tales como el caudal requerido, velocidad de movimiento de la lámina de agua, longitud que debe recorrer la lámina, tiempo y espesor necesario, micro-relieve del terreno, probabilidades de erosión, textura del suelo, dentro de las más importantes. En conjunto, estos factores permiten diseñar en forma óptima el sistema de riego; sin embargo pueden llegar a constituir una limitación en la superficie destinada a este tipo de riego, haciéndose necesario realizar manejos adecuados, que lleven a solucionar el problema.

Dentro de los objetivos en las pruebas de riego tenemos que:

- Se determinan los factores de diseño de los surcos y/o melgas
- Mediciones del tiempo de avance en surcos y/o melgas
- Determinación de contenidos de humedad en los suelos
- Se determinan los tiempos de riego
- Determinación de caudales (ya definidos)
- Determinación de la conductividad hidráulica (K_s)
- Pendiente del terreno



Ilustración 42. Ensayos en campo (pruebas de riego)



Ilustración 42. Ensayos en campo (pruebas de riego)



Ilustración 43. Ensayos en campo (pruebas de riego)



Ilustración 44. Ensayos en campo (pruebas de riego)



Ilustración 46. Ensayos en campo (pruebas de riego)



Ilustración 47. Ensayos en campo (pruebas de riego)



Ilustración 47. Ensayos en campo (pruebas de riego)



Ilustración 48. Muestra de suelo para la determinación de los contenidos de humedad en el suelo (después de la aplicación del riego)

5. 1 Datos obtenidos de los experimentos en campo (pruebas de riego)

- Experimentos realizados en 2013 (Pruebas de riego)
- Ensayos en campo (pruebas de riego)

Prueba 1 Febrero/2013

Cuadro 2. Datos generales de la parcela y de la prueba de riego 1.

Datos generales Prueba 1	
Longitud del surco	60 m
Tiempo de Riego	25.73 min
Gasto	1.04 l/s

Cuadro 3. Datos de avance de la prueba 1.

Distancia	Datos de Avance	
	min	seg
0	0	0
5	1	7
10	2	3
15	4	18
20	5	46
30	9	35
40	14	20
50	19	41
60	25	44

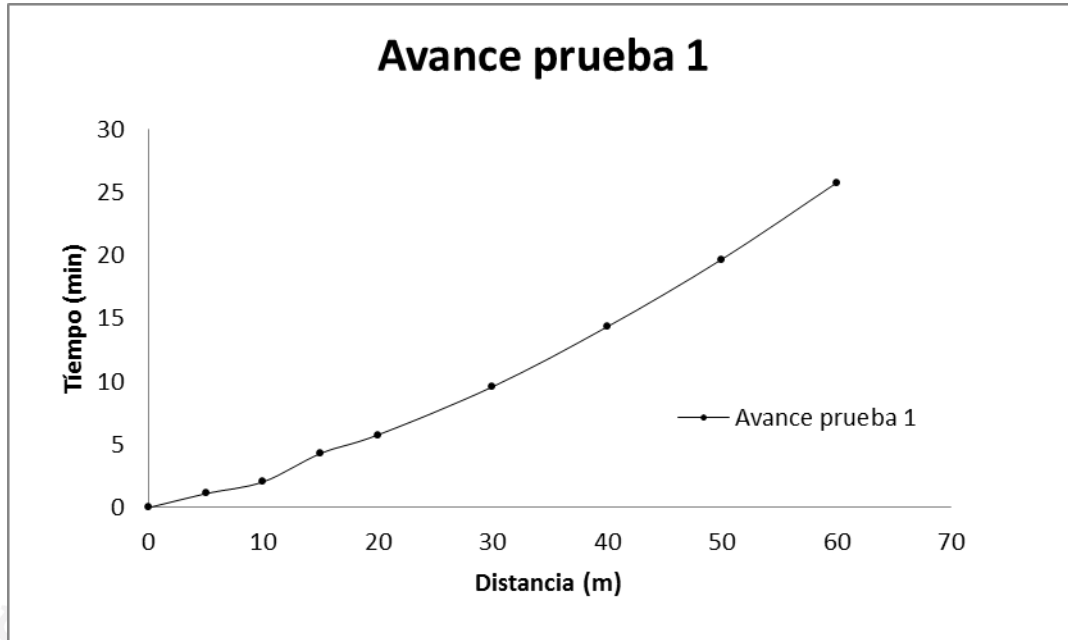


Ilustración (49). Gráfica de avance prueba de riego 1.

Cuadro 4. Datos

Datos del contenido de humedad inicial del suelo		
	Gravimétrico (gr/gr)	Volumétrico (cm ³ /cm ³)
Humedad Inicial (θ_0)	0.15	0.17

Cuadro 5. Datos

Datos del contenido de humedad final del suelo (Sitio 1)		
Humedad Final (θ_s)	Gravimétrico (gr/gr)	Volumétrico (cm ³ /cm ³)
Profundidad		
0-30 cm	0.28	0.33
30-60 cm	0.22	0.23
60-90 cm	0.19	0.19

Cuadro 6. Datos

Datos del contenido de humedad final del suelo (Sitio 2)		
Humedad Final (θ_s)	Gravimétrico (gr/gr)	Volumétrico (cm^3/cm^3)
Profundidad		
0-30 cm	0.27	0.30
30-60 cm	0.15	0.15
60-90 cm	0.11	0.11

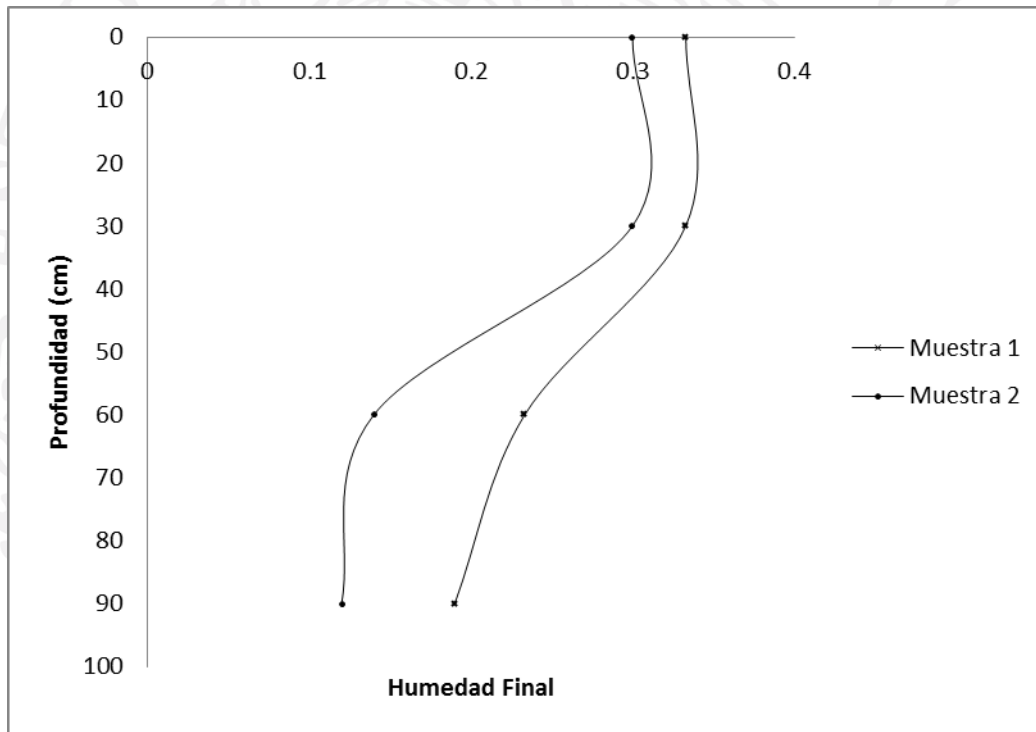


Ilustración (50). Gráfica de humedad final en el suelo, prueba 1.

Prueba 2 Abril/2013

Cuadro 7. Datos generales de la parcela y de la prueba de riego 2.

Datos generales Prueba 2	
Longitud del surco	60 m
Tiempo de Riego	54.0 min
Gasto	0.57 l/s

Cuadro 8. Datos de avance de la prueba 2.

Distancia	Datos de Avance	
	Tiempo	
	min	seg
0	0	0
5	1	37
10	3	4
15	5	25
20	7	41
30	15	45
40	25	26
50	37	26
60	52	11

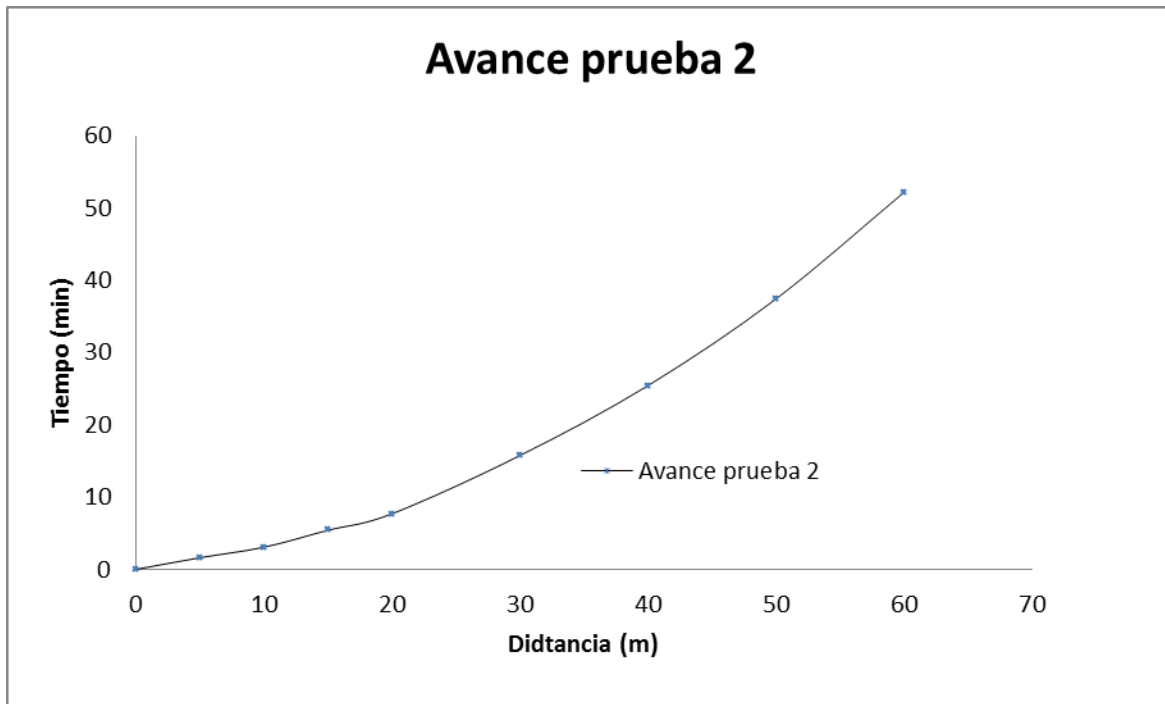


Ilustración (51). Gráfica de avance prueba de riego 2.

Cuadro 9. Datos

Datos del contenido de humedad inicial del suelo		
	Gravimétrico (gr/gr)	Volumétrico (cm ³ /cm ³)
Humedad Inicial (θ_0)	0.12	0.14

Cuadro 10. Datos

Datos del contenido de humedad final del suelo (Sitio 1)		
Humedad Final (θ_s)	Gravimétrico (gr/gr)	Volumétrico (cm ³ /cm ³)
Profundidad		
0-30 cm	0.19	0.21
30-60 cm	0.14	0.14
60-90 cm	0.101	0.101

Cuadro 11. Datos

Datos del contenido de humedad final del suelo (Sitio 2)		
Humedad Final (θ_s) Profundidad	Gravimétrico (gr/gr)	Volumétrico (cm^3/cm^3)
0-30 cm	0.18	0.20
30-60 cm	0.14	0.14
60-90 cm	0.10	0.10

Cuadro 12. Datos

Datos del contenido de humedad final del suelo (Sitio 3)		
Humedad Final (θ_s) Profundidad	Gravimétrico (gr/gr)	Volumétrico (cm^3/cm^3)
0-30 cm	0.18	0.22
30-60 cm	0.13	0.15
60-90 cm	0.09	0.09

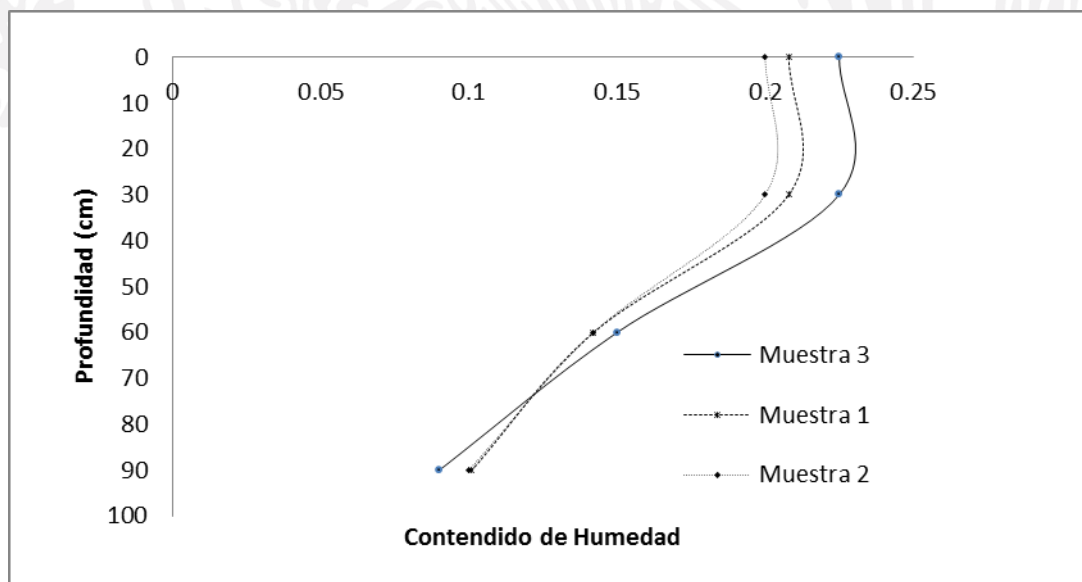


Ilustración (52). Gráfica humedad prueba 2.

Prueba 3 Junio/2013

Cuadro 13. Datos generales de la parcela y de la prueba de riego 3.

Datos generales Prueba 3	
Longitud del surco	60 m
Tiempo de Riego	32 min
Gasto	0.45 l/s

Cuadro 14. Datos de avance de la prueba 3.

Distancia	Datos de Avance	
	Tiempo	
	min	seg
0	0	0
5	1	7
10	2	13
15	3	29
20	4	35
30	8	4
40	15	7
50	21	49
60	30	25

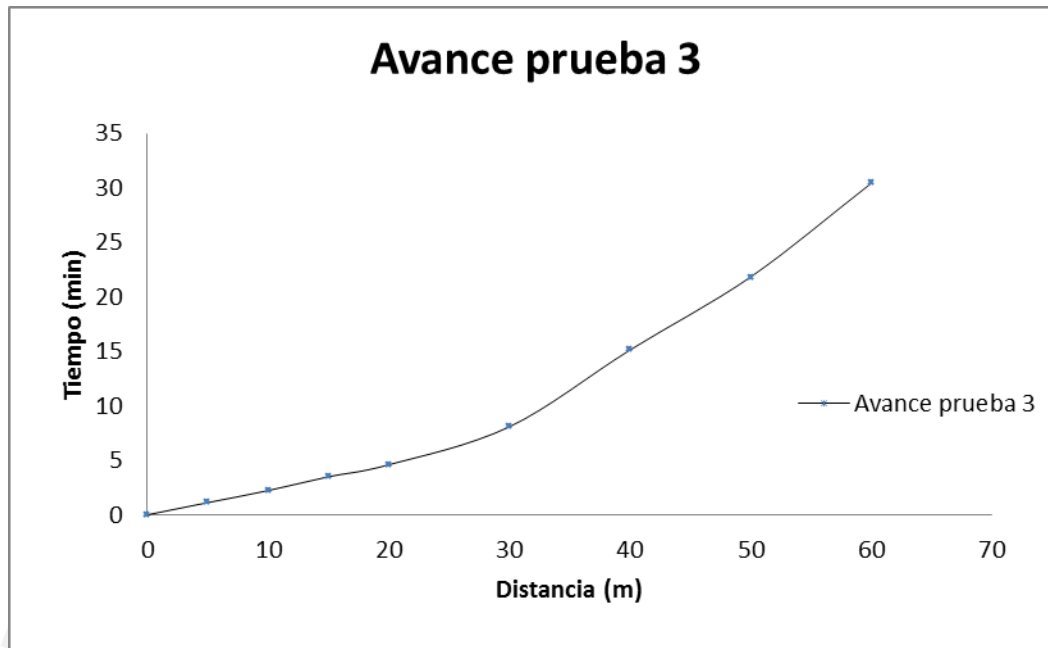


Ilustración (53). Gráfica de avance prueba de riego 3.

Cuadro 15. Datos

Datos del contenido de humedad inicial del suelo		
	Gravimétrico (gr/gr)	Volumétrico (cm ³ /cm ³)
Humedad Inicial (θ_0)	0.14	0.18

Cuadro 16. Datos

Datos del contenido de humedad final del suelo (Sitio 1)		
Humedad Final (θ_s)	Gravimétrico (gr/gr)	Volumétrico (cm ³ /cm ³)
Profundidad		
0-30 cm	0.205	0.24
30-60 cm	0.175	0.175
60-90 cm	0.14	0.14

Cuadro 17. Datos

Datos del contenido de humedad final del suelo (Sitio 2)		
Humedad Final (θ_s) Profundidad	Gravimétrico (gr/gr)	Volumétrico (cm^3/cm^3)
0-30 cm	0.19	0.23
30-60 cm	0.16	0.16
60-90 cm	0.13	0.13

Cuadro 18. Datos

Datos del contenido de humedad final del suelo (Sitio 3)		
Humedad Final (θ_s) Profundidad	Gravimétrico (gr/gr)	Volumétrico (cm^3/cm^3)
0-30 cm	0.18	0.21
30-60 cm	0.15	0.166
60-90 cm	0.13	0.13

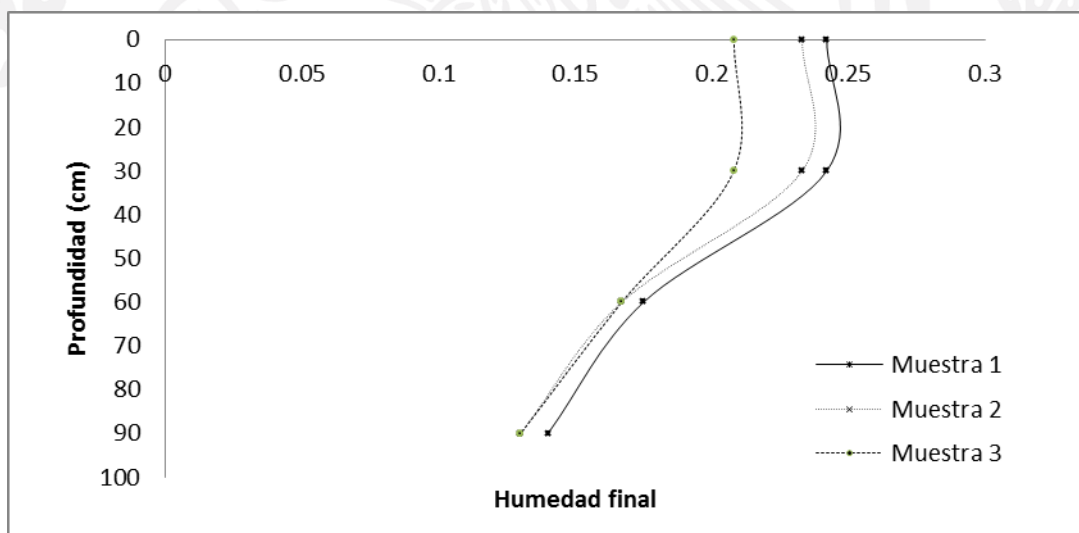


Ilustración (54). Gráfica humedad prueba 3.

Prueba 4 Agosto/2013

Cuadro 19. Datos generales de la parcela y de la prueba de riego 4.

Datos generales Prueba 4	
Longitud del surco	60 m
Tiempo de Riego	118 min
Gasto	0.16 l/s

Cuadro 20. Datos de avance de la prueba 4.

Distancia	Datos de Avance	
	min	seg
0	0	0
5	3	36
10	8	37
15	16	15
20	25	42
30	41	5
40	62	52
50	87	40
60	116	1

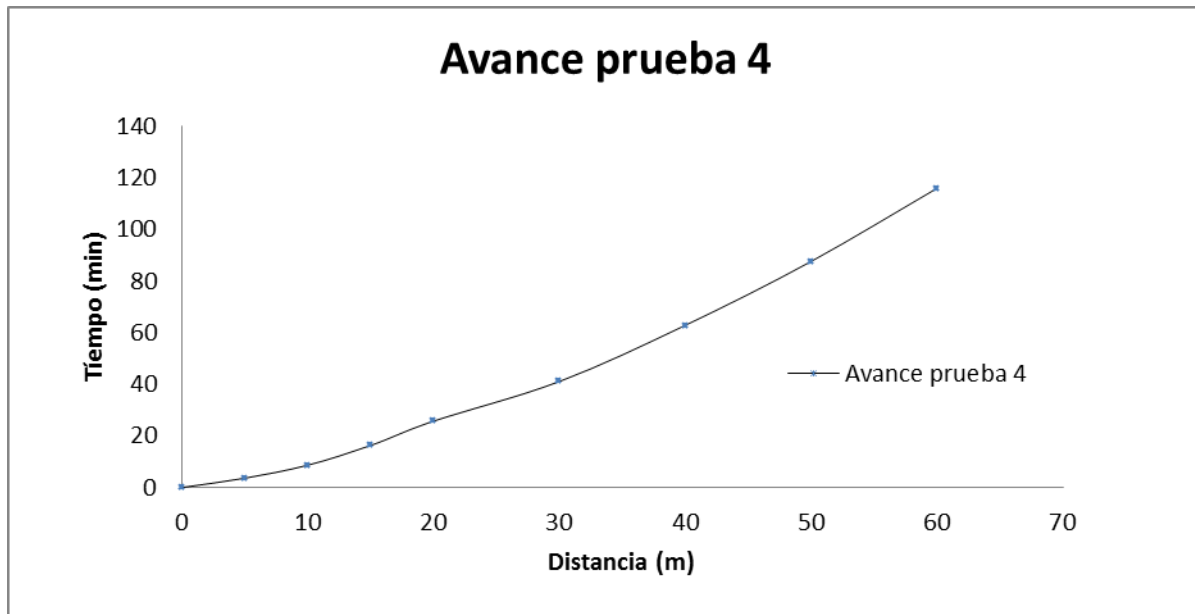


Ilustración (55). Gráfica de avance prueba de riego 4.

Cuadro 21. Datos

Datos del contenido de humedad inicial del suelo		
	Gravimétrico (gr/gr)	Volumétrico (cm ³ /cm ³)
Humedad Inicial (θ_0)	0.165	0.197

Cuadro 22. Datos

Datos del contenido de humedad final del suelo (Sitio 1)		
Humedad Final (θ_s)	Gravimétrico (gr/gr)	Volumétrico (cm ³ /cm ³)
Profundidad		
0-30 cm	0.267	0.4
30-60 cm	0.206	0.275
60-90 cm	0.17	0.17

Cuadro 23. Datos

Datos del contenido de humedad final del suelo (Sitio 2)		
Humedad Final (θ_s)	Gravimétrico (gr/gr)	Volumétrico (cm^3/cm^3)
Profundidad		
0-30 cm	0.267	0.36
30-60 cm	0.193	0.24
60-90 cm	0.159	0.16

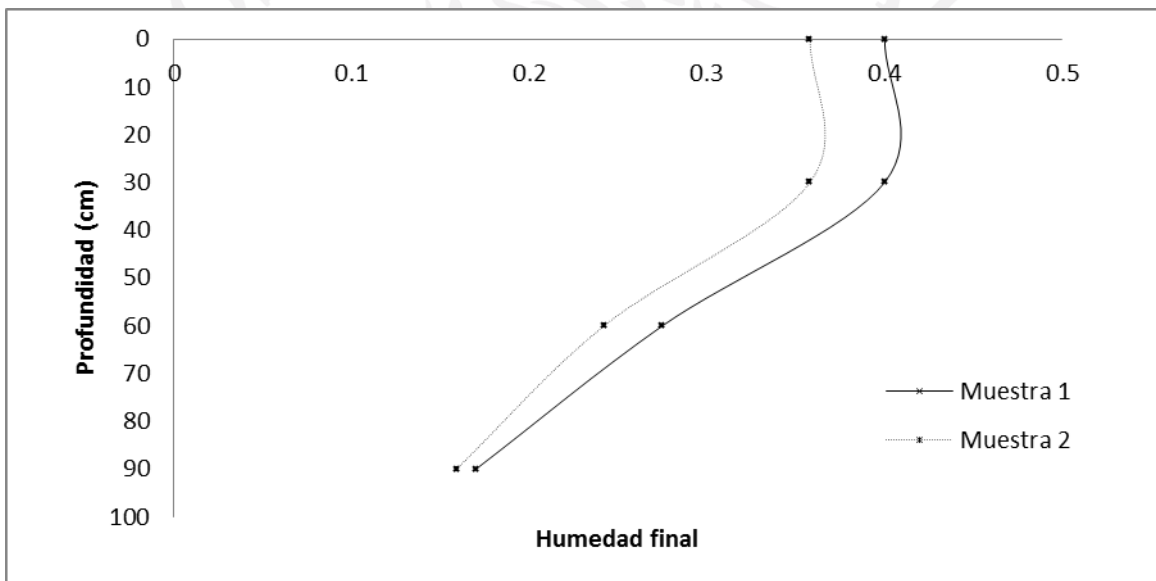


Ilustración (56). Gráfica humedad prueba 4.

6. Desarrollo de software y ajuste con pruebas de campo

Diseño del riego por melgas basado en el uso de las ecuaciones de Saint -Venant y Green y Ampt

6.1 Introducción

El objetivo del diseño de riego por melgas es conseguir la aplicación de una lámina de riego requerida por el cultivo de la manera más uniforme posible conservando una eficiencia de aplicación alta. El diseño del riego consiste en determinar el gasto de aporte y el tiempo durante el cual se aplica dicho gasto en la cabecera de la melga para lograr la mayor uniformidad posible es decir, en determinar el gasto óptimo, para una longitud de surco o melga específica y una caracterización hidrodinámica del suelo.

La escuela húngara de riego ha propuesto que el gasto óptimo debe determinarse para una longitud de melga y que su valor debe actualizarse conforme a la proporción entre la nueva longitud y la longitud para la cual fue determinado el gasto óptimo. Rendón *et al.* (1997) han verificado que, en efecto, el gasto óptimo de diseño guarda una proporción lineal con la longitud de la melga en la cual debe aplicarse. El resultado es obtenido haciendo uso de un modelo formado por las ecuaciones de Lewis y Milne (1938) para describir el flujo del agua sobre la superficie del suelo y de Green y Ampt (1911) para describir el flujo del agua en el suelo.

Se desarrolla un modelo hidrodinámico completo, en el cual se hace uso de las ecuaciones de Saint-Venant, para la descripción del flujo del agua sobre el suelo, acopladas internamente con la ecuación de Green y Ampt, que permite modelar el flujo del agua en el suelo, mediante su aplicación han mostrado que el gasto óptimo de diseño guarda una proporción lineal con la longitud de la melga en la cual debe aplicarse.

Para fines de diseño, el modelo hidrodinámico completo tiene como principal desventaja el tiempo de cómputo necesario para el cálculo del gasto óptimo, mientras que el modelo desarrollado por Rendón *et al.* (1997) tiene como principal desventaja el grado de aproximación grueso de las ecuaciones que utiliza para describir el flujo del agua a superficie libre.

La aproximación presentada en este trabajo, muestra como bondades una reducción muy significativa en el tiempo de cómputo necesario para calcular el gasto óptimo de riego, a la vez que se hace uso de una aproximación detallada del flujo del agua sobre la superficie del suelo.

- Flujo del agua sobre la superficie del suelo

El flujo del agua con una superficie libre es modelado con las ecuaciones de Saint-Venant, que resultan de la aplicación de las leyes de conservación de masa y cantidad de movimiento. En una melga la relación entre su ancho y el tirante de agua permite considerar las ecuaciones correspondientes al escurrimiento sobre una superficie de ancho infinito (Woolhiser, 1975). La ecuación de continuidad se escribe como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial l}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

La ecuación de momentum se escribe en la forma recomendada por Saucedo et al. (2005):

$$\frac{1}{h} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{2q}{h^2} \frac{\partial q}{\partial x} + \left(g - \frac{q^2}{q^3} \right) \frac{\partial h}{\partial x} + g(J - J_0) + \beta \frac{q}{h^2} \frac{\partial l}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

donde $q(x,t)=U(x,t)h(x,t)$ es el gasto por unidad de ancho de melga $[L^2T^{-1}]$, x es la coordenada espacial en la dirección principal del movimiento del agua en la melga $[L]$; t es el tiempo $[T]$; U es la velocidad media; h el tirante de agua $[L]$; J_0 es la pendiente topográfica de la melga $[LL^{-1}]$; J la pendiente de fricción $[LL^{-1}]$; $V_i = \partial l / \partial t$ es el flujo de infiltración $[LT^{-1}]$, es decir el volumen de agua infiltrado en la unidad de tiempo por unidad de ancho y por unidad de longitud de la melga, l es la lámina infiltrada $[L]$; g es la aceleración gravitacional $[LT^{-2}]$; el parámetro adimensional $\beta = 1 - \alpha$, siendo $\alpha = 1 - U_{ix}/U$, donde U_{ix} es la proyección en la dirección del movimiento de la velocidad de salida de la masa de agua debido a la infiltración.

La relación entre las variables hidráulicas q y h con la pendiente de fricción, denominada ley de resistencia hidráulica, es adoptada de acuerdo con Fuentes et al. (2004) haciendo uso de una ley potencial de resistencia:

$$q = kv \left(\frac{h^3 g J}{\nu^2} \right)^2 \quad (3)$$

donde ν es el coeficiente de viscosidad cinemática del agua $[L^2T^{-1}]$ y k es un factor adimensional.

Para establecer las condiciones inicial y de frontera que deben sujetar a las ecuaciones de Saint-Venant para modelar el riego por melgas se tiene en cuenta una melga cerrada, para evitar la pérdida de masa fuera del dominio de riego. Para la fase de avance se tiene:

$$q(x,0)=0 \quad \text{y} \quad h(x,0)=0 \quad (4)$$

$$q(0,t)=q_0, \quad q(x_f,t)=0, \quad h(x_f,t)=0 \quad (5)$$

donde $X_f(t)$ es la posición del frente de onda para el tiempo t y q_0 el gasto de aporte en la entrada de la melga. Para la fase de almacenamiento:

$$q(0,t)=q_0, \quad q(L,t)=0 \quad (6)$$

donde L es la longitud de la melga y q_0 el gasto de aporte en la cabecera de la melga. Para la fase de consumo:

$$q(0,t)=0 \quad q(L,t)=0 \quad (7)$$

Para cerrar el sistema es necesario conocer la forma en que evoluciona en el tiempo la lámina infiltrada en toda posición sobre la melga, es decir la ley de infiltración, la cual es proporcionada con base en la solución de la ecuación de Richards (1931).

- Flujo del agua en el suelo

El modelo de Green y Ampt (1911) se establece a partir de la ecuación de continuidad y la ley de Darcy con las siguientes hipótesis: a) el perfil de humedad inicial en una columna de suelo es uniforme $\theta=\theta_0$, b) la presión del agua en la superficie del suelo es hidrostática: $\Psi=h \geq 0$, donde h es el tirante de agua, c) existe un frente de humedecimiento bien definido caracterizado por una presión negativa: $\Psi=-h_f < 0$, donde h_f es la succión en el frente de humedecimiento y d) la región entre la superficie del suelo y el frente de humedecimiento está completamente saturada (flujo en pistón): $\theta=\theta_s$ y $K=K_s$, donde K_s es la conductividad hidráulica a saturación, es decir, el valor de la conductividad hidráulica de la ley de Darcy correspondiente al contenido volumétrico de agua a saturación. La ecuación diferencial ordinaria resultante es la siguiente:

$$V_l = \frac{dl}{dt} = K_s \left[\frac{(h_f+h)\Delta\theta}{l} \right] \quad (8)$$

donde $\Delta\theta=\theta_s-\theta_0$ es la capacidad de almacenamiento, l es el volumen infiltrado acumulado por unidad de superficie de suelo o lámina infiltrada.

- Solución numérica

Para el cálculo del gasto óptimo, se hace uso de un esquema numérico para las cuatro fases del riego por melgas desarrollado por Saucedo (2003).

La disposición de las celdas de cálculo para las fases de avance, almacenamiento, consumo y recesión se muestra en la ilustración 57.

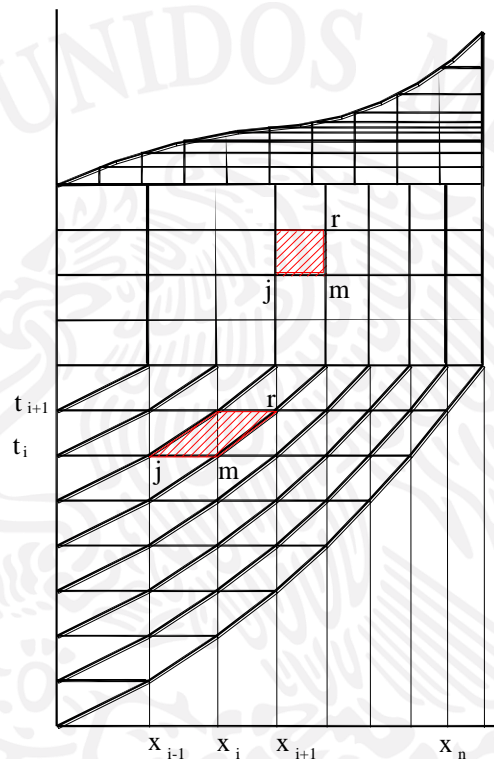


Ilustración 57. Disposición de las celdas de cálculo para las fases de avance, almacenamiento, consumo y recesión.

La forma discreta de la ecuación de continuidad para la fase de avance se escribe como:

$$\begin{aligned}
 & [\omega q_r + (1-\omega)q_j] \delta t - (x_i - x_j) [\omega(h_r + l_r) + (1-\omega)(h_j + l_j)] \\
 & - [\omega q_r + (1-\omega)q_m] \delta t + (x_r - x_m) [\omega(h_r + l_r) + (1-\omega)(h_m + l_m)] \\
 & - [\phi h_i + (1-\phi)h_r + \phi l_i + (1-\phi)l_r] (x_r - x_i) + [\phi h_j + (1-\phi)h_m + \phi l_j + (1-\phi)l_m] (x_m - x_j) = 0
 \end{aligned} \quad (9)$$

para las fases de almacenamiento, consumo y recesión se escribe como:

$$\begin{aligned} & [\omega q_i + (1-\omega)q_j] \delta t - [\omega q_r + (1-\omega)q_m] \delta t - [\phi h_i + (1-\phi)h_r + \phi l_i + (1-\phi)l_r](X_r - X_i) \\ & + [\phi h_j + (1-\phi)h_m + \phi l_j + (1-\phi)l_m](X_m - X_j) = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

La ecuación de momentum guarda la misma forma discreta para las cuatro fases del riego:

$$\begin{aligned} & 2\bar{q}\bar{h}(q_r - q_i)\delta t + (g\bar{h}^3 - \bar{q}^2)(h_r - h_i)\delta t + \bar{h}^2(x_r - x_i)[\omega q_r + (1-\omega)q_i - \omega q_m - (1-\omega)q_j] \\ & + g\delta t \bar{h}^3(x_r - x_i)[\omega J_r + (1-\omega)J_i - J_o] + \beta \delta t \bar{q}\bar{h}(x_r - x_i)[\omega l_r + (1-\omega)l_i - \omega l_m - (1-\omega)l_j] = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

En las ecuaciones (9) y (11) δt es el paso de tiempo, y ω y ϕ son factores de peso en espacio y tiempo y las demás variables se definen de acuerdo con la figura 1. El cálculo de los coeficientes se realiza con base en los valores pertenecientes al nivel de tiempo anterior: $\bar{q} = (1-\phi)q_m + \phi q_j$, $\bar{h} = (1-\phi)h_m + \phi h_j$ (Saucedo *et al.*, 2005).

Se introducen las variables pequeñas (Strelkoff y Katopodes, 1977): δh_r , δq_r , δh_i y δq_i , tales que, para las celdas interiores se tiene: $h_i = h_j + \delta h_i$, $h_r = h_m + \delta h_r$, $q_i = q_j + \delta q_i$, y $q_r = q_m + \delta q_r$. Se sustituyen en las formas discretas de las ecuaciones de continuidad y momentum y se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas cuya solución permite avanzar en el tiempo los valores de las variables hidráulicas. El detalle de las entradas al sistema matricial puede consultarse en Saucedo (2003).

La ecuación de Green y Ampt (ecuación 8) se resuelve numéricamente usando un método de diferencias finitas, el procedimiento se encuentra bien documentado en la literatura y puede consultarse por ejemplo en Burden R. y Faires J. (1985).

Se ha utilizado un paso de tiempo constante $\Delta t = 1.0$ s para el acoplamiento de las ecuaciones de Saint-Venant y Green y Ampt.

La discretización utilizada para la solución de la forma completa de las ecuaciones de Saint-Venant guarda semejanza con las reportadas en la literatura: Katopodes y Strelkoff (1977): $\Delta t_{\min} = 5$ s, Akanbi y Katopodes (1988): $\Delta t_{\max} = 1$ s, Playán et al. (1994) $\Delta t_{\min} = 2.12$ s.

- Diseño del riego por gravedad

Para el diseño del riego por melgas se pueden utilizar dos métodos (Rendón et al., 1997): pruebas de riego y modelos físico-matemáticos. Las pruebas de riego consisten en hacer experimentos de campo en donde las variables experimentales son el gasto de riego, la longitud de la melga y el tipo de suelo. Con base en los resultados de los experimentos, para cada tipo de suelo se obtienen combinaciones de gasto de riego unitario y longitud de la melga que hacen posible aplicar con un alto grado de uniformidad una lámina de riego específica. Las pruebas de riego tienen la desventaja de requerir un tiempo considerable para su ejecución, son costosas y debe realizarse una cantidad elevada de pruebas para determinar el gasto de riego para el que se obtiene la mayor uniformidad en el riego, por estas razones, son recomendadas sólo para calibrar los métodos de diseño.

En riego es indispensable distinguir al menos tres eficiencias relacionadas con el proceso, la eficiencia de aplicación, la eficiencia de requerimiento de riego y la eficiencia de uniformidad del riego. La eficiencia de aplicación (E_a) se define como: $E_a = V_r / V_p$, donde V_r es el volumen requerido para satisfacer las necesidades de agua en la zona de raíces del cultivo [L^3] y V_p es el volumen de proyecto [L^3]. V_r se obtiene con la expresión: $V_r = L_n A_r$, donde L_n es la lámina de riego neta [L], definida conforme a los requerimientos de riego del cultivo, y A_r es la superficie de riego considerada [L^2]. El volumen de proyecto se calcula como: $V_p = Q_p * T_r = L_b * A_r$, donde Q_p es el gasto de proyecto [$L^3 T^{-1}$], T_r es el tiempo de riego [T] y L_b es la lámina de riego bruta. Si en la expresión anterior el numerador y el denominador se dividen entre A_r se obtiene: $E_a = L_n / L_b$. La eficiencia de requerimiento de riego (E_r) se define como: $E_r = V_d / v_r$, donde V_d es el volumen disponible [L^3]. Esta eficiencia indica la manera en que se están satisfaciendo las necesidades de agua del cultivo.

La situación ideal respecto a la uniformidad se presenta cuando todas las plantas reciben la misma cantidad de agua, situación que equivale a aplicar una lámina de riego uniforme

en toda la longitud de la melga. Para evaluar la uniformidad en la distribución de la lámina infiltrada puede utilizarse el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC):

$$CUC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |l_i - \bar{l}|}{n\bar{l}} \quad (12)$$

donde l_i es la lámina infiltrada en el punto i [L], \bar{l} es la lámina infiltrada media [L] y n es el número de puntos considerados para efectuar el cálculo.

Empleando un modelo numérico desarrollado para el acoplamiento de las ecuaciones de Saint-Venant y Green y Ampt, es posible determinar el gasto para el cual se obtiene la mayor eficiencia de uniformidad manteniendo valores lo más elevados posibles de las eficiencias de aplicación y de requerimiento de riego, es decir, para determinar el gasto óptimo de riego.

Para calcular el gasto óptimo para diversos tipos de suelo, diferenciados según su caracterización hidrodinámica se ha procedido como a continuación se indica. El valor de la presión en el frente de humedecimiento (h_f), así como la conductividad hidráulica a saturación (K_s), se determinan con base en los valores proporcionados por Rawls y Brakensiek (1981) en relación con la textura del suelo, el contenido volumétrico de agua a saturación ha sido asimilado a la porosidad total del suelo (ϕ), la cual ha sido determinada mediante el mismo procedimiento.

El contenido volumétrico de agua necesario para asignar la condición inicial $\theta = \theta_0$, para la ecuación de Green y Ampt se determinó teniendo en cuenta la humedad aprovechable de cada tipo de suelo, suponiendo que se ha consumido el 50% de dicha humedad antes de la aplicación del riego. La humedad aprovechable se determinó restando los contenidos volumétricos de agua correspondiente a la capacidad de campo (CC) y al punto de marchitamiento permanente (PMP), los valores de CC y PMP para cada tipo de suelo

fueron estimados de acuerdo con los reportados por Rawls y Brakensiek (1981) asociados al triángulo de texturas.

En el cuadro 1 se muestran los valores de los parámetros de la ecuación de Green y Ampt para diez tipos de suelo. El conocimiento de dichos valores y del valor del contenido volumétrico de agua inicial, hace posible calcular la relación entre la longitud de la melga y el gasto de riego óptimo para cada suelo dada una lámina de riego.

El coeficiente de uniformidad varía sensiblemente con el gasto de riego, en la ilustración 58 se muestra esta situación para el caso de tres tipos de suelo diferentes. Los puntos de inflexión de cada una de las curvas coinciden con el valor del gasto óptimo para una longitud de melga de 100 m y una lámina de riego de 10 cm para cada uno de los tipos de suelo especificados en la gráfica.

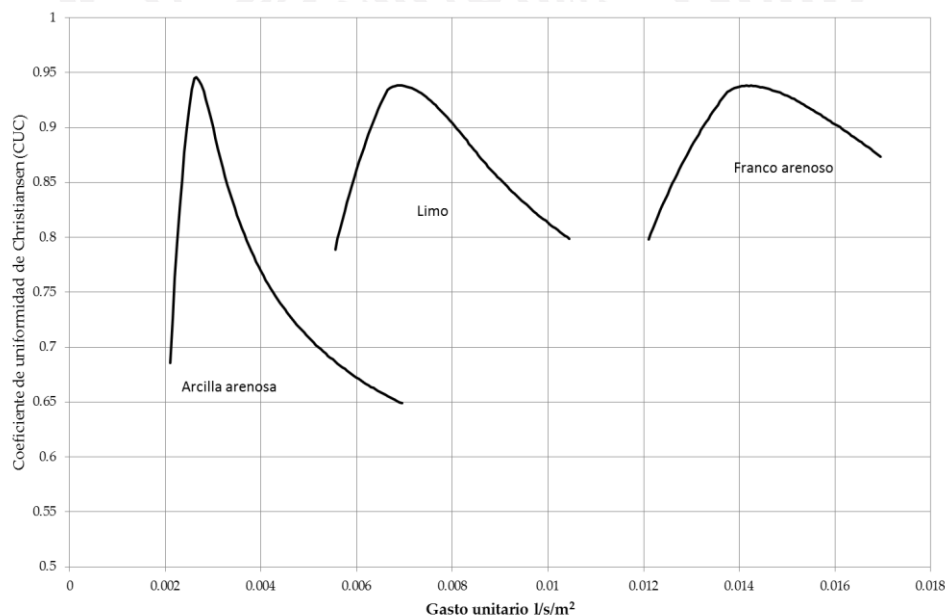


Ilustración 58. Variación de la eficiencia de uniformidad con el gasto de riego para tres tipos de suelo. Lámina de riego 10 cm.

Es posible determinar el gasto de riego óptimo para diferentes longitudes de melga, la representación gráfica de dicho cálculo para un suelo franco se muestra en la ilustración 59 para tres lámina de riego diferentes, puede apreciarse que existe una relación básicamente lineal entre el gasto óptimo de riego y la longitud de la melga, el valor de la constante de proporcionalidad entre dichas variables puede expresarse en términos de gasto de aporte por unidad de área, es decir por unidad de ancho y por unidad de longitud de melga, el resultado es mostrado en el cuadro 25 para tres láminas de riego típicas, 8, 10 y 12 cm. El cuadro presentado puede utilizarse con fines de diseño del riego por melgas.

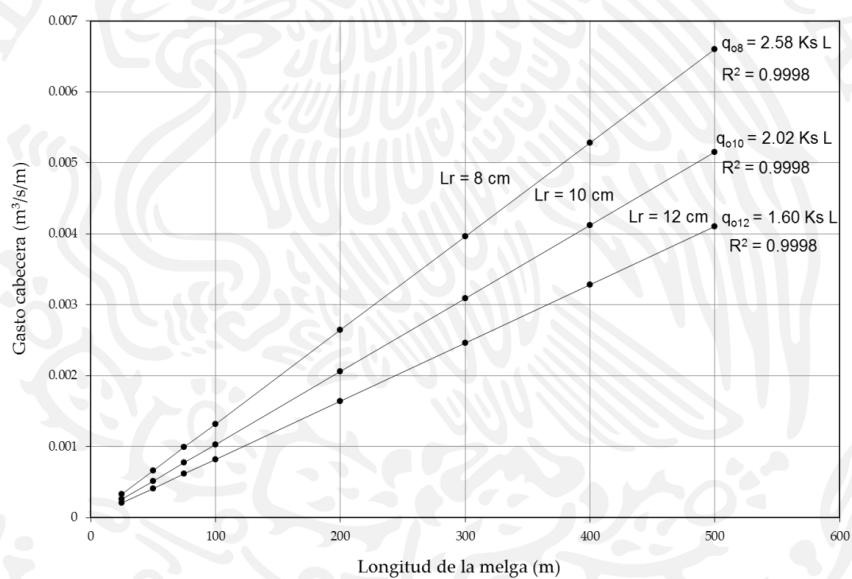


Ilustración 59. Relación entre la longitud de melga y el gasto de aporte óptimo para un suelo franco para tres láminas de aplicación: 8, 10 y 12 cm. K_s en cm/s.

Cuadro 24. Parámetros medios de la ecuación de infiltración de Green y Ampt (1911) utilizados para el diseño del riego por gravedad.

Suelo	θ_o (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	h_f (cm)	κ_s (cm/h)
Franco arenoso	0.16	0.46	12	2.9
Franco	0.20	0.46	25	1.5
Franco limoso	0.17	0.55	30	1.0
Limo	0.14	0.50	35	0.8
Franco arcillo arenoso	0.18	0.42	12	2.0
Franco arcilloso	0.25	0.48	38	0.4
Franco arcillo limoso	0.26	0.49	60	0.15
Arcilla arenosa	0.25	0.42	25	0.5
Arcilla limosa	0.32	0.48	100	0.05
Arcilla	0.36	0.49	100	0.05

Cuadro 25. Cuadro de diseño del riego por melgas: gasto en l/s/m² para la aplicación óptima de la lámina de riego. Factor de fricción $\kappa=1/54$, pendiente topográfica $J_o=0.002$. Modelo de ecuaciones de Saint-Venant y Green y Ampt

Suelo	Lámina de riego 8 cm			Lámina de riego 10 cm			Lámina de riego 12 cm		
	Qopt	TR	CUC	Qopt	TR	CUC	Qopt	TR	CUC
	l/s/m ²	horas	-	l/s/m ²	horas	-	l/s/m ²	horas	-
Franco arenoso	0.01565	1.6	0.921	0.01425	2.2	0.938	0.01330	2.8	0.951
Franco	0.00965	2.6	0.922	0.00875	3.5	0.939	0.00810	4.5	0.952
Franco limoso	0.01040	2.4	0.922	0.00890	3.4	0.936	0.00800	4.5	0.949
Limo	0.00810	3.1	0.924	0.00700	4.3	0.937	0.00620	5.9	0.950
Franco arcillo arenoso	0.01740	1.5	0.923	0.01515	2.0	0.938	0.01360	2.7	0.951
Franco arcilloso	0.00330	7.5	0.927	0.00285	10.6	0.941	0.00270	13.4	0.952
Franco arcillo limoso	0.00175	13.7	0.924	0.00145	20.9	0.940	0.00130	27.9	0.953
Arcilla arenosa	0.00290	8.5	0.929	0.00265	11.4	0.945	0.00245	14.7	0.959
Arcilla limosa	0.00060	40.6	0.888	0.00051	59.0	0.901	0.00046	77.5	0.911
Arcilla	0.00053	46.5	0.888	0.00045	67.3	0.901	0.00040	90.3	0.911

7. Conclusiones

Se desarrolló un método de diseño de riego por melgas, obtenido mediante la aplicación de un modelo basado en el uso de las ecuaciones de Saint-Venant para el flujo del agua sobre el suelo y la ecuación de Green y Ampt que permite modelar el flujo del agua en el suelo manteniendo una buena aproximación en la descripción físico-matemática del riego por melgas.

La principal ventaja del modelo presentado es el muy poco tiempo de cómputo que requiere para su aplicación, comparado con un modelo hidrodinámico completo reportado en la literatura, el cual emplea las ecuaciones de Saint-Venant para el flujo del agua sobre el suelo, acopladas internamente con la ecuación de Richards que permite modelar el flujo del agua en el suelo.

Con los resultados obtenidos en las pruebas de riego se ajusta y valida el modelo para el diseño de riego por gravedad con aguas residuales tratadas, se obtiene el cuadro de diseño de riego.

8. Anexos

Se presenta el código de programación del modelo desarrollado.

```
#include<iostream.h>
```

```
#include<math.h>
```

```
#include<conio.h>
```

```
#include<stdlib.h>
```

```
#include<fstream.h>
```

```
#include<iomanip.h>
```

```
class UNO
```

```
{//acoplamiento, fases de almacenamiento,  
consumo y recesion con melga cerrada
```

```
public:
```

```
double *potestcon, TR, Ea;
```

```
long int
```

```
conta, nnutoc, nivelt, niveltimp, dtimp, nucoI;
```

```
double tiem, dt, dtini, pendiente, nM, sfm;
```

```
double
```

```
lamina, resis, courj, *vel, *Jf, balance, Jultima, Qulti  
ma;
```

```
long int contaco, contasv, indicour, nivelesriego;
```

```
long int indires, indiresant, nivelres, indicador;
```

```
double Qminres, tircab;
```

```
double limiteresrec, resrec;
```

```
double *Ytot, longitud;
```

```
long int indicalong;
```

```
long int final;
```

```
double sumaR, sumaH, sumaL;
```

```
double *Residual;
```

```
double Qcab, LaminaR;
```

```
long int nivalmac;
```

```
double laminabruta, laminaplicada, CUC;
```

```
double vedermax, *laminafin, *Rfina;
```

```
double l, tHaverkamp, hsup;
```

```
int borrararreglos;
```

```
void Inicio(); void Ensamble(); void
```

```
Pantalla(); void Archivar(); void
```

```
Condiciones();
```

```
void Cour(); void Qoptimo();
```

```
void Iniciosv(); void Avance(double *, double
```

```
); void Almacenamiento(double *, double *);
```

```
void Recesion(double *, double *);
```

```

void Saint(); void Pantallasv();void
Choleskiv(double *); void Efici();

long int Invesv(long int, long int); long int
Minimosv(long int, long int); void
Residuales();

void Consumo(double *, double *);
};

void UNO::inicio()
{
long int i;

ofstream Escribe;

Escribe.open("c:\\Acople\\potencialescolSV
GA.txt",ios::trunc); Escribe.close();

Escribe.open("c:\\Acople\\laminascosVGA.t
xt",ios::trunc); Escribe.close();

Escribe.open("c:\\Acople\\funcionescosVGA
A.txt",ios::trunc); Escribe.close();

Escribe.open("c:\\Acople\\iniciondaSVGA.txt
",ios::trunc); Escribe.close();

Escribe.open("c:\\Acople\\balancexSVGA.txt
",ios::trunc); Escribe.close();

nucol=1800*5;

potestcon=new double [nucol+1];

Residual=new double[nivelesriego+1];

for (i=1;i<=nucol;i++)potestcon[i]=0.;
for (i=1;i<=nivelesriego;i++)Residual[i]=0.;

}

//*****rutinas para las ecuaciones de
Saint-VEnant*****

void UNO::Iniciosv()
{
long int i;

ofstream Escribe;

Escribe.open("c:\\Acople\\tirantecolSVGA.tx
t",ios::trunc); Escribe.close();

Escribe.open("c:\\Acople\\frentecolSVGA.txt
",ios::trunc);Escribe.close();

```

```

beta=2.;
nnutod=2000*5; sbsv=3; ninco=2*nnutod-2;
tamvecsv=ninco*ninco-(ninco-
sbsv)*(1+ninco-sbsv);
Ksv=new double[tamvecsv+1]; for
(i=1;i<=tamvecsv;i++)Ksv[i]=0.;
Bsv=new double[ninco+1]; solsv=new
double[ninco+1]; xxxsv=new
double[ninco+1];
vel=new double[ninco+1]; Jf=new
double[ninco+1]; laminafin=new
double[ninco];
for(i=1;i<=nnutod;i++) Rfin[i]=0.;
for (i=1;i<=ninco;i++){solsv[i]=0.;
incoant[i]=0.;
incoest1[i]=0.;incoest2[i]=0.;avanza[i]=0.;
vel[i]=0.; Jf[i]=0.; laminafin[i];}
for (i=1;i<=nnutod;i++){Y[i]=0.; Rini[i]=0.;
Rfin[i]=0.; Ytot[i]=0. ;}
leyres=1; //ley de resistencia fractal
//leyres=0; //ley de resistencia de Manning

```

```

DF=1.;
if(DF==1.) kappa=1./54.;
if(DF==.5) kappa=1./54.;
conti=0; //continuidad sin betaf
//conti=1; //continuidad con betaf
}
void UNO::Avance(double *Ksv, double *Bsv)
{
    long int i,n,iveii;
    double
    aux,aux1,aux2,sfa,sfp,Qm,hm,omegacl,phicl;
    double omegaini,phini,phiz,phizcl,phizini;
    for (i=1;i<=tamvecsv;i++)Ksv[i]=0.;
    for (i=1;i<=ninco;i++)Bsv[i]=0.;
    viscosidad=.01; grav=981.;

```



```
CLR=pow(pow(viscosidad,2.*DF-
1.)/(kappa*pow(grav,DF)),1./DF);
```

```
//primera celda
```

```
if(nivelt>1)
```

```
{
```

```
omega=.6; phi=.5; phiz=.5;
```

```
Qm=Q1*phi;
```

```
hm=incoant[1]*phi;
```

```
//if(hm>2.5)cout<<"tirantes raros..."<<endl;
```

```
//if(Qm>32.5)cout<<"gastos raros..."<<endl;
```

```
if
```

```
(leyres==0)sfa=pow(nM,2.)*Q1*Q1/pow(p
ow(incoant[1],10.),1./3.);
```

```
if
```

```
(leyres==1)sfa=CLR*pow(Q1,1./DF)/pow(i
ncoant[1],3.);
```

```
//continuidad
```

```
if(conti==0)
```

```
{
```

```
Ksv[1]=(-phi*Y[2])*1./dt;
```

```
Ksv[2]=(-omega*dt)*1./dt;
```

```
Ksv[3]=(Y[2]*(phi+omega-1.))*1./dt;
```

```
Bsv[1]=(-Y[2]*(-phi*Rfin[1]+(1.-
omega)*Rini[1]+(omega+phi-
1.)*Rfin[2]))*1./dt;
```

```
}
```

```
if(conti==1)
```

```
{
```

```
Ksv[1]=Y[2]*phi/dt;
```

```
Ksv[2]=omega;
```

```
Ksv[3]=Y[2]*(1.-phi-omega)/dt;
```

```
aux=(phi*Y[2]/dt)*(Rfin[2]-Rfin[1]);
```

```
Bsv[1]=aux;
```

```
}
```

```
//momentum
```

```
if(leyres==0)
```

```
{
```

```
Ksv[4]=-((1+(5./3.*Y[2]*sfa/incoant[1]));
```

```
Ksv[5]=Y[2]*sfa/Q1;
```

```

Ksv[6]=(1-(5./3.*Y[2]*sfa/incoant[1]));
Bsv[2]=Y[2]*(pendiente-sfa);
}

if(leyres==1)
{
Ksv[4]=(-dt*(grav-
pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))-
3.*phi*grav*dt*Y[2]*sfa/incoant[1])*1./dt;
Ksv[5]=(2.*Qm*dt/pow(hm,2.)+(1.-
phi)*grav*dt*Y[2]*sfa/(DF*Q1)+(1.-
phi)*Y[2]/hm)*1./dt;
Ksv[6]=(dt*(grav-
pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))-3.*(1.-
phi)*grav*dt*Y[2]*sfa/incoant[1])*1./dt;

Bsv[2]=(-grav*Y[2]*dt*(sfa-pendiente)-
beta*(Qm/pow(hm,2.))*Y[2]*((1.-
phi)*Rfin[2]+phi*Rfin[1]-Rini[1]))*1./dt;
}
}

//celdas interiores

if(nivelt>2)
{
if(nivelt<=nivelesriego)nincot=2*nivelt;

n=2;
for(i=3;i<=nincot-2;i++)
{
iveii=Invesv(i,i);
if (i/2<i/2.)//continuidad
{
if(conti==0)
{
Ksv[iveii-1]=(omega*dt)*1./dt;
Ksv[iveii]=(-omega*(Y[n]-Y[n-1])-
phi*(Y[n+1]-Y[n]))*1./dt;
Ksv[iveii+1]=(-omega*dt)*1./dt;
Ksv[iveii+2]=((omega+phi-1.)*(Y[n+1]-
Y[n]))*1./dt;

aux=(dt*(incoant[i-1]-incoant[i-
3]))*1./dt;
}
}
}
}

```

```

    aux1=(-(Y[n]-Y[n-1]))*(phi*incoant[i-
2]+phiz*Rini[n-1]+(1.-phi)*incoant[i]+(1.-
phiz)*Rini[n]-omega*(incoant[i-2]+Rfin[n]))-
(1.-omega)*(incoant[i-2]+Rini[n-
1])))*1./dt;

    aux2=(-(Y[n+1]-
Y[n]))*(omega*(incoant[i]+Rfin[n+1]))+(1.-
omega)*(incoant[i]+Rini[n])-phi*incoant[i-
2]-phiz*Rfin[n]-(1.-phi)*incoant[i]-(1.-
phiz)*Rfin[n+1])))*1./dt;

    Bsv[i]=aux+aux1+aux2;
}

if(conti==1)
{
    Ksv[iveii-1]=-omega;

    Ksv[iveii]=phi*(Y[n+1]-
Y[n])/dt+omega*(Y[n]-Y[n-1])/dt;

    Ksv[iveii+1]=omega;

    Ksv[iveii+2]=(1.-omega-phi)*(Y[n+1]-
Y[n])/dt;

    Bsv[i]=(phi*(Y[n+1]-Y[n])/dt+(1.-
phi)*(Y[n]-Y[n-1])/dt)*(incoant[i]+Rini[n]-
incoant[i-2]-Rini[n-1])+incoant[i-3]-
incoant[i-1];
}

}

if (i/2==i/2.) //momentum
{
    Qm=(incoant[i-2]+incoant[i-4])/2.;
    hm=(incoant[i-1]+incoant[i-3])/2.;

    //if(hm>2.5)cout<<"tirantes raros..."<<endl;

    //if(Qm>32.5)cout<<"gastos raros..."<<endl;

    if(leyres==0)
    {
        sfa=pow(nM,2.)*incoant[i-4]*incoant[i-
4]/pow(pow(incoant[i-3],10.),1./3.);

        sfp=pow(nM,2.)*incoant[i-2]*incoant[i-
2]/pow(pow(incoant[i-1],10.),1./3.);
    }

    if(leyres==1)
    {

```

```

sfa=CLR*pow(incoant[i-4],1./DF)/pow(incoant[i-3],3.);
sfp=CLR*pow(incoant[i-2],1./DF)/pow(incoant[i-1],3.);
}

if(leyres==0)
{
Ksv[iveii-2]=(Y[n+1]-Y[n])*sfa/incoant[i-4];
Ksv[iveii-1]=-(1.+5./3.*(Y[n+1]-Y[n])*sfa/incoant[i-3]);
Ksv[iveii]=(Y[n+1]-Y[n])*sfp/incoant[i-2];
Ksv[iveii+1]=(1.-5./3.*(Y[n+1]-Y[n])*sfp/incoant[i-1]);

Bsv[i]=(pendiente-.5*(sfa+sfp))*(Y[n+1]-Y[n]-incoant[i-1]+incoant[i-3]);
}

if(leyres==1)
{
Ksv[iveii-2]=(-2.*Qm*dt/pow(hm,2.)+grav*phi*dt*(Y[n+1]-Y[n])*sfa/(DF*incoant[i-4])+phi*(Y[n+1]-Y[n])/hm)*1./dt;
Ksv[iveii-1]=(-dt*(grav*pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))-3.*phi*grav*dt*(Y[n+1]-Y[n])*sfa/incoant[i-3])*1./dt;
Ksv[iveii]=(2.*Qm*dt/pow(hm,2.)+(1.-phi)*grav*dt*(Y[n+1]-Y[n])*sfp/(DF*incoant[i-2])+phi*(Y[n+1]-Y[n])/hm)*1./dt;
Ksv[iveii+1]=(dt*(grav*pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))-3.*(1.-phi)*grav*dt*(Y[n+1]-Y[n])*sfp/incoant[i-1])*1./dt;
Bsv[i]=(-2.*Qm*dt*(incoant[i-2]-incoant[i-4])/pow(hm,2.)-dt*(grav*pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))*(incoant[i-1]-incoant[i-3])-grav*(Y[n+1]-Y[n])*dt*((1.-phi)*sfa+phi*sfp-pendiente)-beta*(Qm/pow(hm,2.))*(Y[n+1]-Y[n])*((1.-phi)*Rfin[n+1]+phi*Rfin[n]-(1.-phi)*Rini[n]-phi*Rini[n-1]))*1./dt;
}

n++; //nudo siguiente
}

Ksv[iveii-2]=(-2.*Qm*dt/pow(hm,2.)+grav*phi*dt*(Y[n+1]-Y[n])*sfa/(DF*incoant[i-4])+phi*(Y[n+1]-Y[n])/hm)*1./dt;
}
}

```

```
//ultima celda
if(nivelt>1)
{
if(nivelt<=nivelesriego)nincot=2*nivelt;
incoant[0]=Q1; Y[0]=0.;
iveii=Invesv(nincot,nincot);

//*****
*****factores fin

omegac1=.6; phic1=3.1416/4.;
phizc1=3.1416/4.;
//omegac1=.6; phic1=.7; phizc1=2./3.;
//omegac1=.6; phic1=.5; phizc1=.5;

if(leyres==0)sfa=pow(nM,2.)*incoant[nincot-4]*incoant[nincot-4]/pow(pow(incoant[nincot-3],10.),1./3.);
if(leyres==1)sfa=CLR*pow(incoant[nincot-4],1./DF)/pow(incoant[nincot-3],3.);

//**valores medios**

if(nivelt<3){Qm=Q1*phic1;hm=incoant[1]*phic1;}

//if(nivelt>=3){Qm=(incoant[(nincot-2)-2]+incoant[(nincot-2)-4])/2.;
hm=(incoant[(nincot-2)-1]+incoant[(nincot-2)-3])/2.;}

if(nivelt>=3){Qm=incoant[(nincot-2)-2]*phic1; hm=incoant[(nincot-2)-1]*phic1;}

//if(hm>2.5)cout<<"tirantes raros..."<<endl;
//if(Qm>32.5)cout<<"gastos raros..."<<endl;

//continuidad
if(conti==0)
{
Ksv[iveii-6]=(omegac1*dt)*1./dt;
Ksv[iveii-5]=((-omegac1-phic1)*(Y[nivelt]-Y[nivelt-1]))*1./dt;
Ksv[iveii-4]=(-phizc1*Rfin[nivelt]-phizc1*incoant[nincot-3])*1./dt;

aux=(-dt*incoant[nincot-4])*1./dt;
aux1=(incoant[nincot-3]*(Y[nivelt]-Y[nivelt-1]))*1./dt;
aux2=((-(phizc1+omegac1-1.)*Rini[nivelt-1]+(omegac1+phizc1)*Rfin[nivelt])*(Y[nivelt]-Y[nivelt-1]))*1./dt;

```

```

Bsv[nincot-1]=aux+aux1+aux2;
}

if(conti==1)
{
Ksv[iveii-6]=-omegacl;

Ksv[iveii-5]=((1/(1.+betaf))+omegacl)*(Y[nivelt]-Y[nivelt-1])/dt;

Ksv[iveii-4]=incoant[nincot-3]/((1.+betaf)*dt)+Rini[nivelt-1]/((1.+potenK)*dt);

Bsv[nincot-1]=incoant[nincot-4]-(Y[nivelt]-Y[nivelt-1])/dt*(incoant[nincot-3]+Rini[nivelt-1]);
}

//momentum
if(leyres==0)
{
Ksv[iveii-2]=2.*sfa/incoant[nincot-4];

Ksv[iveii-1]=-(betaf/(Y[nivelt]-Y[nivelt-1])+(10.*sfa/(3.*incoant[nincot-3])));

Ksv[iveii]=betaf*incoant[nincot-3]/pow(Y[nivelt]-Y[nivelt-1],2.);

Bsv[nincot]=0.;

if(leyres==1)
{
Ksv[iveii-2]=(phi*(Y[nivelt]-Y[nivelt-1])/hm-2.*dt*Qm/pow(hm,2.)+grav*dt*(Y[nivelt]-Y[nivelt-1])*sfa/(incoant[nincot-4]*DF))*1./dt;Ksv[iveii-1]=(-dt*(grav-pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))-3.*grav*dt*(Y[nivelt]-Y[nivelt-1])*sfa/incoant[nincot-3])*1./dt;

Ksv[iveii]=(grav*dt*(sfa-pendiente)+(phizcl*beta*Qm/pow(hm,2.))*(Rfin[nivelt]-Rini[nivelt-1]))*1./dt;

Bsv[nincot]=(2.*Qm*dt*incoant[nincot-4]/pow(hm,2.)+dt*(grav-pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))*incoant[nincot-3]-dt*grav*(Y[nivelt]-Y[nivelt-1])*(sfa-pendiente)-phizcl*beta*(Qm/pow(hm,2.))*(Y[nivelt]-Y[nivelt-1])*(Rfin[nivelt]-Rini[nivelt-1]))*1./dt;
}
}

```

```
}  
}  
}  
}  
//fin de subrutina  
  
void UNO::Consumo(double *Ksv, double  
*Bsv)  
{  
    long int i,n,iveii;  
  
    double  
aux,aux1,aux2,aux3,sfa,sfp,Qm,hm,omegacl,p  
hicl,phizcl;  
  
    double phiz;  
  
    for (i=1;i<=tamvecsv;i++)Ksv[i]=0.;  
    for (i=1;i<=ninco;i++)Bsv[i]=0.;  
  
    viscosidad=.01; grav=981.;  
  
    CLR=pow(pow(viscosidad,2.*DF-  
1.)/(kappa*pow(grav,DF)),1./DF);  
  
    //recargas  
  
    if (contaco==1 && nivelt>1)  
    {  
        if(tiem<=60000.){for(i=1;i<=nivelt-  
1;i++){Rfin[i]=Rini[i]*pow((tiem+dt)/tiem,  
5);}}  
  
        if(tiem>60000.){for(i=1;i<=nivelt-  
1;i++){Rfin[i]=Rini[i]*pow((tiem+dt)/tiem,  
85);}}  
  
        if(tiem>200000.){for(i=1;i<=nivelt-  
1;i++){Rfin[i]=Rini[i]*pow((tiem+dt)/tiem,1  
.);}}  
  
        Rfin[nivelt]=Rini[nivelt-1];  
    }  
  
    //primera celda  
    if(nivelt==nivalmac)  
    {  
        Q1=0.; TR=nivelt*dt;  
        omega=.6; phi=.5; phiz=.5;  
  
        //omega=.76; phi=.5; phiz=.5;  
        //omega=.5; phi=.5; phiz=.5;  
        Qm=(1.-phi)*incoant[2]+phi*Q1;  
        hm=(1.-phi)*incoant[3]+phi*incoant[1];  
    }  
}
```

```

if
(leyres==0)sfa=pow(nM,2.)*Q1*Q1/pow(p
ow(incoant[1],10.),1./3.);

if
(leyres==1)sfa=CLR*pow(Q1,1./DF)/pow(i
ncoant[1],3.);

if
(leyres==0)sfp=pow(nM,2.)*incoant[2]*inco
ant[2]/pow(pow(incoant[3],10.),1./3.);

if
(leyres==1)sfp=CLR*pow(incoant[2],1./DF)
/pow(incoant[3],3.);

//continuidad
Ksv[1]=(phi*Y[2])*1./dt;
Ksv[2]=(omega*dt)*1./dt;
Ksv[3]=(Y[2]*(1.-phi))*1./dt;
Bsv[1]=(dt*((1.-omega)*Q1-
incoant[2])+Y[2]*(phi*(Rini[1]-
Rfin[1])+(1.-phi)*(Rini[2]-Rfin[2])))
*1./dt;

//Bsv[1]=dt*(Q1-
incoant[2])+Y[2]*(phi*(Rini[1]-
Rfin[1])+(1.-phi)*(Rini[2]-Rfin[2]));

//momentum
if(leyres==0)
{
Ksv[4]=-((1+(5./3.*Y[2]*sfa/incoant[1])));
Ksv[5]=Y[2]*sfa/Q1;
Ksv[6]=(1-(5./3.*Y[2]*sfa/incoant[1]));
Bsv[2]=Y[2]*(pendiente-sfa);}

if(leyres==1)
{
Ksv[4]=(-dt*(grav-
pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))-
3.*phi*grav*dt*Y[2]*sfa/incoant[1])*1./dt;
Ksv[5]=(2.*Qm*dt/pow(hm,2.)+(1.-
phi)*grav*dt*Y[2]*sfp/(DF*incoant[2])+(1.-
phi)*Y[2]/hm)*1./dt;
Ksv[6]=(dt*(grav-
pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))-3.*(1.-
phi)*grav*dt*Y[2]*sfp/incoant[3])*1./dt;

//aux=((-
2.*Qm*dt/pow(hm,2.)+phi*grav*dt*Y[2]*sf
p/(DF*incoant[2])+phi*Y[2]/hm)*Q1)*1./
dt;

aux=0.;
}

```



```

aux1=(-grav*Y[2]*dt*((1.-phi)*sfp+phi*sfa-
pendiente)-
beta*(Qm/pow(hm,2.))*Y[2]*(phi*(Rfin[1]
-Rini[1])+(1.-phi)*(Rfin[2]-
Rini[2])))*1./dt;

aux2=(2.*Qm*(Q1-
incoant[2])*dt/pow(hm,2.)+dt*(grav-
pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))*(incoant[1]-
incoant[3]))*1./dt;

Bsv[2]=aux+aux1+aux2;
}
}

if(nivelt>nivalmac)
{
if(nivelt>nivalmac)Q1=0.;
omega=.6; phi=.5; phiz=.5;
//omega=.76; phi=.5; phiz=.5;
//omega=.5; phi=.5; phiz=.5;
Qm=(1.-phi)*incoant[2]+phi*Q1;
hm=(1.-phi)*incoant[3]+phi*incoant[1];

if
(leyres==0)sfa=pow(nM,2.)*Q1*Q1/pow(p
ow(incoant[1],10.),1./3.);

if
(leyres==1)sfa=CLR*pow(Q1,1./DF)/pow(i
ncoant[1],3.);

if
(leyres==0)sfp=pow(nM,2.)*incoant[2]*inco
ant[2]/pow(pow(incoant[3],10.),1./3.);
if
(leyres==1)sfp=CLR*pow(incoant[2],1./DF)
/pow(incoant[3],3.);

//continuidad
Ksv[1]=(phi*Y[2])*1./dt;
Ksv[2]=(omega*dt)*1./dt;
Ksv[3]=(Y[2]*(1.-phi))*1./dt;
Bsv[1]=(dt*(Q1-
incoant[2])+Y[2]*(phi*(Rini[1]-
Rfin[1])+(1.-phi)*(Rini[2]-Rfin[2])))*1./dt;

//momentum
if(leyres==0)
{
Ksv[4]=-((1+(5./3.*Y[2]*sfa/incoant[1])));
Ksv[5]=Y[2]*sfa/Q1;
Ksv[6]=(1-(5./3.*Y[2]*sfa/incoant[1]));
}
}

```

```

}

Bsv[2]=Y[2]*(pendiente-sfa);
}

}

//celdas interiores

if(leyres==1)
{
Ksv[4]=(-dt*(grav-
pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))-
3.*phi*grav*dt*Y[2]*sfa/incoant[1])*1./dt;

Ksv[5]=(2.*Qm*dt/pow(hm,2.)+(1.-
phi)*grav*dt*Y[2]*sfp/(DF*incoant[2]))+(1.-
phi)*Y[2]/hm)*1./dt;

Ksv[6]=(dt*(grav-
pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))-3.*(1.-
phi)*grav*dt*Y[2]*sfp/incoant[3])*1./dt;

aux=(-grav*Y[2]*dt*((1.-phi)*sfp+phi*sfa-
pendiente)-
beta*(Qm/pow(hm,2.))*Y[2]*(phi*(Rfin[1]
-Rini[1]))+(1.-phi)*(Rfin[2]-
Rini[2]))*1./dt;

aux1=(2.*Qm*(Q1-
incoant[2])*dt/pow(hm,2.)+dt*(grav-
pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))*incoant[1]-
incoant[3])*1./dt;

Bsv[2]=aux+aux1;
}

}

if(nivelt>2)
{
if(nivelt<nivelesriego)nincot=2*nivelt;

n=2;

for(i=3;i<=nincot-2;i++)
{
iveii=Invesv(i,i);

if (i/2<i/2.)//continuidad
{
Ksv[iveii-1]=(-omega*dt)*1./dt;

Ksv[iveii]=(phi*(Y[n+1]-Y[n]))*1./dt;

Ksv[iveii+1]=(omega*dt)*1./dt;

Ksv[iveii+2]=((1.-phi)*(Y[n+1]-
Y[n]))*1./dt;
}
}
}

```

```

    aux=(dt*(incoant[i-1]-
incoant[i+1]))*1./dt;

    aux1=((Y[n+1]-Y[n])*(phiz*(Rini[n]-
Rfin[n])+(1.-phiz)*(Rini[n+1]-
Rfin[n+1])))*1./dt;

    Bsv[i]=aux+aux1;
}

if (i/2==i/2.) //momentum
{
    Qm=phi*incoant[i]+(1.-phi)*incoant[i-2];
    hm=phi*incoant[i-1]+(1.-phi)*incoant[i+1];

    if(leyres==0)
    {
        sfa=pow(nM,2.)*incoant[i-2]*incoant[i-
2]/pow(pow(incoant[i-1],10.),1./3.);
        sfp=pow(nM,2.)*incoant[i]*incoant[i]/pow(
pow(incoant[i+1],10.),1./3.);
    }

    if(leyres==1)
    {
        sfa=CLR*pow(incoant[i-
2],1./DF)/pow(incoant[i-1],3.);
        sfp=CLR*pow(incoant[i],1./DF)/pow(incoan
t[i+1],3.);
    }

    if(leyres==0)
    {
        Ksv[iveii-2]=(Y[n+1]-Y[n])*sfa/incoant[i-
2];
        Ksv[iveii-1]=-(1.+5./3.*(Y[n+1]-
Y[n])*sfa/incoant[i+1]);
        Ksv[iveii]=(Y[n+1]-Y[n])*sfp/incoant[i-2];
        Ksv[iveii+1]=(1.-5./3.*(Y[n+1]-
Y[n])*sfp/incoant[i+1]);
        Bsv[i]=(pendiente-.5*(sfa+sfp))*(Y[n+1]-
Y[n])-incoant[i+1]+incoant[i+1];
    }

    if(leyres==1)
    {
        Ksv[iveii-2]=(-
2.*Qm*dt/pow(hm,2.)+grav*phi*dt*(Y[n+1

```

```

]-Y[n])*sfa/(DF*incoant[i-
2])+phi*(Y[n+1]-Y[n])/hm)*1./dt;
//ultima celda
if(nivelt>1)
{
Ksv[iveii-1]=(-dt*(grav-
pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))-
3.*phi*grav*dt*(Y[n+1]-Y[n])*sfa/incoant[i-
1])*1./dt;
if(nivelt<nivelesriego)nincot=2*nivelt;
incoant[0]=Q1; Y[0]=0.;
iveii=Invesv(nincot,nincot);
Ksv[iveii]=(2.*Qm*dt/pow(hm,2.)+(1.-
phi)*grav*dt*(Y[n+1]-
Y[n])*sfp/(DF*incoant[i])+(1.-
phi)*(Y[n+1]-Y[n])/hm)*1./dt;
//*****
*****factores fin
Ksv[iveii+1]=(dt*(grav-
pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))-3.*(1.-
phi)*grav*dt*(Y[n+1]-
Y[n])*sfp/incoant[i+1])*1./dt;
omegacl=.6; phicl=.5; phizcl=.5;
//omegacl=.6; phicl=3.1416/4.;
phizcl=3.1416/4.;
Bsv[i]=(2.*Qm*dt*(incoant[i-2]-
incoant[i])/pow(hm,2.)+dt*(grav-
pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))*(incoant[i-1]-
incoant[i+1])-grav*(Y[n+1]-Y[n])*dt*((1.-
phi)*sfa+phi*sfp-pendiente)-
beta*(Qm/pow(hm,2.))*(Y[n+1]-
Y[n])*(phi*(Rfin[n]-Rini[n])+(1.-
phi)*(Rfin[n+1]-Rini[n+1]))))*1./dt;
//pendientes de friccion
if(leyres==0)sfa=pow(nM,2.)*incoant[nincot-
2]*incoant[nincot-
2]/pow(pow(incoant[nincot-1],10.),1./3.);
if(leyres==1)sfa=CLR*pow(incoant[nincot-
2],1./DF)/pow(incoant[nincot-1],3.);
}
n++; //nudo siguiente
}
//valores medios
}
if(nivelt==nivalmac)
}

```

```

{
    Qm=incoant[nincot-2]*phicl;
    hm=incoant[nincot-1]*phicl;
}

//momentum
if(leyres==0)
{
    Qm=incoant[nincot-2]*phicl;
    hm=incoant[nincot]*phicl+incoant[nincot-1]*(1.-phicl);
}

//continuidad
Ksv[iveii-6]=(omegac1*dt)*1./dt;
Ksv[iveii-5]=(-phicl*(Y[nivelesriego]-Y[nivelesriego-1]))*1./dt;
Ksv[iveii-4]=(-(1.-phicl)*(Y[nivelesriego]-Y[nivelesriego-1]))*1./dt;

    aux=(-dt*incoant[nincot-2])*1./dt;
    aux1=((Y[nivelesriego]-Y[nivelesriego-1])*(phizcl*(Rfin[nivelesriego-1]-Rini[nivelesriego-1]))+(1.-phizcl)*(Rfin[nivelesriego]-Rini[nivelesriego]))*1./dt;
    Bsv[nincot-1]=aux+aux1;

}

if(leyres==1)
{
    Ksv[iveii-2]=(2.*sfa/incoant[nincot-4])*1./dt;
    Ksv[iveii-1]=(-(betaf/(Y[nivelesriego]-Y[nivelesriego-1]))+(10.*sfa/(3.*incoant[nincot-3])))*)*1./dt;
    Ksv[iveii]=(betaf*incoant[nincot-3]/pow(Y[nivelesriego]-Y[nivelesriego-1],2.))*1./dt;
    Bsv[nincot]=0.;
}

```

1])/hm+grav*dt*phi*(Y[nivelesriego]-
Y[nivelesriego-1])*sfa/(incoant[nincot-
2]*DF))*1./dt;

Ksv[iveii-1]=(-(grav-
pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))*omegacl*dt-
3.*grav*phi*dt*(Y[nivelesriego]-
Y[nivelesriego-1])*sfa/incoant[nincot-
1])*1./dt;

//Ksv[iveii]=((grav-
pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))*omegacl*dt-
3.*grav*(1.-phi)*dt*(Y[nivelesriego]-
Y[nivelesriego-
1])*sfa/incoant[nincot])*1./dt;

Ksv[iveii]=((grav-
pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))*omegacl*dt)*1./
dt;

aux=(2.*Qm*dt*incoant[nincot-
2]/pow(hm,2.))*1./dt;

aux1=-(grav-
pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))*dt*(incoant[ninc
ot]-incoant[nincot-1])*1./dt;

aux2=(-dt*grav*(Y[nivelesriego]-
Y[nivelesriego-1])*(phi*sfa-
pendiente))*1./dt;

aux3=(-
beta*(Qm/pow(hm,2.))*(Y[nivelesriego]-
Y[nivelesriego-1])*((1.-
phizcl)*(Rfin[nivelesriego]-

Rini[nivelesriego])+phizcl*(Rfin[nivelesriego-
1]-Rini[nivelesriego-1]))*1./dt;

Bsv[nincot]=aux+aux1+aux2+aux3;

}

}

//fin de subrutina

void UNO::Recesion(double *Ksv, double
*Bsv)

{

long int i,n,iveii;

double

aux,aux1,aux2,aux3,sfa,sfp,Qm,hm,omegacl,p
hicl,phizcl;

double phiz;

for (i=1;i<=tamvecsv;i++)Ksv[i]=0.;

for (i=1;i<=ninco;i++)Bsv[i]=0.;

viscosidad=.01; grav=981.;

CLR=pow(pow(viscosidad,2.*DF-
1.)/(kappa*pow(grav,DF)),1./DF);

```

if(contaco==1 && nivel>nivelres)      }
{                                     }
if(nivel==nivelres+1)
{
//recargas (la estimacion de la recarga es
indires=0;                          independiente de la fase de recesion)
}                                     if (contaco==1)
//if(incoant[2]<Qminres && incoant[2]>0.) {
if(incoant[2]<Qminres)               if(tiem<=60000.){for(i=1;i<=nivel-
{                                     1;i++){Rfin[i]=Rini[i]*pow((tiem+dt)/tiem,
incoant[2]=0.;                       5);}}
indires++;                            if(tiem>60000. &&
aux=Y[2];                             tiem<=2000.){for(i=1;i<=nivel-
potestcon[indires]=incoant[1];        1;i++){Rfin[i]=Rini[i]*pow((tiem+dt)/tiem,
//modificaciones a la malla debidas a  85);}}
la posicion del frente en recesion   if(tiem>200000.){for(i=1;i<=nivel-
for(i=1;i<=nivelesriego-             1;i++){Rfin[i]=Rini[i]*pow((tiem+dt)/tiem,1
indires+1;i++)Y[i]=Y[i]-aux;         .);}}
for(i=1;i<=nivelesriego-             Rfin[nivel]=Rini[nivel-1];
indires+1;i++)Y[i]=Y[i+1];          }
Y[nivelesriego-indires+1]=0.;        //primera celda
for(i=1;i<=nincot;i++)incoant[i]=incoant[i+2
];
nincot=nincot-2;                     if(nivel>nivelesriego)Q1=0.;
                                     omega=.6; phi=.5; phiz=.5;
                                     Qm=(1.-phi)*incoant[2]+phi*Q1;

```

```

hm=(1.-phi)*incoant[3]+phi*incoant[1];

if
(leyres==0)sfa=pow(nM,2.)*Q1*Q1/pow(p
ow(incoant[1],10.),1./3.);
if
(leyres==1)sfa=CLR*pow(Q1,1./DF)/pow(i
ncoant[1],3.);
if
(leyres==0)sfp=pow(nM,2.)*incoant[2]*inco
ant[2]/pow(pow(incoant[3],10.),1./3.);
if
(leyres==1)sfp=CLR*pow(incoant[2],1./DF)
/pow(incoant[3],3.);

//continuidad
Ksv[1]=phi*Y[2];
Ksv[2]=omega*dt;
Ksv[3]=Y[2]*(1.-phi);
Bsv[1]=dt*(Q1-
incoant[2])+Y[2]*(phi*(Rini[1+indires]-
Rfin[1+indires]))+(1.-phi)*(Rini[2+indires]-
Rfin[2+indires]));

//momentum
if(leyres==0)
{
Ksv[4]=-((1+(5./3.*Y[2]*sfa/incoant[1])));
Ksv[5]=Y[2]*sfa/Q1;
Ksv[6]=((1-(5./3.*Y[2]*sfa/incoant[1])));
Bsv[2]=Y[2]*(pendiente-sfa);
}
if(leyres==1)
{
Ksv[4]=-dt*(grav-
pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))-
3.*phi*grav*dt*Y[2]*sfa/incoant[1];
Ksv[5]=2.*Qm*dt/pow(hm,2.)+(1.-
phi)*grav*dt*Y[2]*sfp/(DF*incoant[2])+(1.-
phi)*Y[2]/hm;
Ksv[6]=dt*(grav-pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))-
3.*(1.-phi)*grav*dt*Y[2]*sfp/incoant[3];
aux=-grav*Y[2]*dt*((1.-phi)*sfp+phi*sfa-
pendiente)-
beta*(Qm/pow(hm,2.))*Y[2]*(phi*(Rfin[1+
indires]-Rini[1+indires]))+(1.-
phi)*(Rfin[2+indires]-Rini[2+indires]));
}

```



```

aux1=2.*Qm*(Q1-
incoant[2])*dt/pow(hm,2.)+dt*(grav-
pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))*(incoant[1]-
incoant[3]);
Bsv[2]=aux+aux1;
}

//celdas interiores
if(nivelt<nivelesriego)nincot=2*nivelt;

n=2;
for(i=3;i<=nincot-2;i++)
{
iveii=Invesv(i,i);
if (i/2<i/2.)//continuidad
{
Ksv[iveii-1]=-omega*dt;
Ksv[iveii]=phi*(Y[n+1]-Y[n]);
Ksv[iveii+1]=omega*dt;
Ksv[iveii+2]=(1.-phi)*(Y[n+1]-Y[n]);

aux=dt*(incoant[i-1]-incoant[i+1]);
aux1=(Y[n+1]-
Y[n])*(phiz*(Rini[n+indires]-
Rfin[n+indires])+(1.-
phiz)*(Rini[n+1+indires]-
Rfin[n+1+indires]));
Bsv[i]=aux+aux1;
}
}

if (i/2==i/2.) //momentum
{
Qm=phi*incoant[i]+(1.-phi)*incoant[i-2];
hm=phi*incoant[i-1]+(1.-phi)*incoant[i+1];
if(leyres==0)
{
sfa=pow(nM,2.)*incoant[i-2]*incoant[i-
2]/pow(pow(incoant[i-1],10.),1./3.);
sfp=pow(nM,2.)*incoant[i]*incoant[i]/pow(
pow(incoant[i+1],10.),1./3.);
}
}

if(leyres==1)
{

```

```

sfa=CLR*pow(incoant[i-2],1./DF)/pow(incoant[i-1],3.);
sfp=CLR*pow(incoant[i],1./DF)/pow(incoant[i+1],3.);
}
if(leyres==0)
{
Ksv[iveii-2]=(Y[n+1]-Y[n])*sfa/incoant[i-2];
Ksv[iveii-1]=-(1.+5./3.*(Y[n+1]-Y[n])*sfa/incoant[i+1]);
Ksv[iveii]=(Y[n+1]-Y[n])*sfp/incoant[i-2];
Ksv[iveii+1]=(1.-5./3.*(Y[n+1]-Y[n])*sfp/incoant[i+1]);
Bsv[i]=(pendiente-.5*(sfa+sfp))*(Y[n+1]-Y[n])-incoant[i+1]+incoant[i+1];
}
}
if(leyres==1)
{
Ksv[iveii-2]=-
2.*Qm*dt/pow(hm,2.)+grav*phi*dt*(Y[n+1]-Y[n])*sfa/(DF*incoant[i-2])+phi*(Y[n+1]-Y[n])/hm;
Ksv[iveii-1]=-dt*(grav-pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))-3.*phi*grav*dt*(Y[n+1]-Y[n])*sfa/incoant[i-1];
Ksv[iveii]=2.*Qm*dt/pow(hm,2.)+(1.-phi)*grav*dt*(Y[n+1]-Y[n])*sfp/(DF*incoant[i])+ (1.-phi)*(Y[n+1]-Y[n])/hm;
Ksv[iveii+1]=dt*(grav-pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))-3.*(1.-phi)*grav*dt*(Y[n+1]-Y[n])*sfp/incoant[i+1];
Bsv[i]=2.*Qm*dt*(incoant[i-2]-incoant[i])/pow(hm,2.)+dt*(grav-pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))*(incoant[i-1]-incoant[i+1])-grav*(Y[n+1]-Y[n])*dt*((1.-phi)*sfa+phi*sfp-pendiente)-beta*(Qm/pow(hm,2.))*(Y[n+1]-Y[n])* (phi*(Rfin[n+indires]-Rini[n+indires]))+(1.-phi)*(Rfin[n+1+indires]-Rini[n+1+indires]));
}
n++; //nudo siguiente
}
}
}

```

```
//ultima celda
if(nivelt==nivelres)indires=0;
incoant[0]=Q1; Y[0]=0.;
iveii=Invesv(nincot,nincot);

//*****
*****factores fin

omegacl=.6; phicl=.5; phizcl=.5;
//omegacl=.6; phicl=3.1416/4.;
phizcl=3.1416/4.;

//pendientes de friccion
if(leyres==0)sfa=pow(nM,2.)*incoant[nincot-2]*incoant[nincot-2]/pow(pow(incoant[nincot-1],10.),1./3.);
if(leyres==1)sfa=CLR*pow(incoant[nincot-2],1./DF)/pow(incoant[nincot-1],3.);

//valores medios
Qm=incoant[nincot-2]*phicl;
hm=incoant[nincot-1]*phicl;

//continuidad
if(conti==0)
{
Ksv[iveii-6]=omegacl*dt;
Ksv[iveii-5]=-phicl*(Y[nivelesriego-indires]-Y[nivelesriego-1-indires]);Ksv[iveii-4]=- (1.-phicl)*(Y[nivelesriego-indires]-Y[nivelesriego-1-indires]);
aux=-dt*incoant[nincot-2];
aux1=(Y[nivelesriego-indires]-Y[nivelesriego-1-indires])*(phizcl*(Rfin[nivelesriego-1]-Rini[nivelesriego-1])+(1.-phizcl)*(Rfin[nivelesriego]-Rini[nivelesriego]));
Bsv[nincot-1]=aux+aux1;
}

//momentum
if(leyres==0)
{
Ksv[iveii-2]=2.*sfa/incoant[nincot-4];
```

```
Ksv[iveii-1]=-(betaf/(Y[nivelesriego-indires]-
Y[nivelesriego-1-
indires]))+(10.*sfa/(3.*incoant[nincot-3]]));
```

```
Ksv[iveii]=betaf*incoant[nincot-
3]/pow(Y[nivelesriego-indires]-
Y[nivelesriego-1-indires],2.);
```

```
Bsv[nincot]=0.;
```

```
}
```

```
if(leyres==1)
```

```
{
```

```
Ksv[iveii-2]=-
2.*Qm*omegac*dt/pow(hm,2.)+phicl*(Y[ni
velesriego-indires]-Y[nivelesriego-1-
indires])/hm+grav*dt*omegac*(Y[nivelesrieg
o-indires]-Y[nivelesriego-1-
indires])*sfa/(incoant[nincot-2]*DF);
```

```
Ksv[iveii-1]=-(grav-
pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))*omegac*dt-
3.*grav*omegac*dt*(Y[nivelesriego-indires]-
Y[nivelesriego-1-indires])*sfa/incoant[nincot-
1];
```

```
Ksv[iveii]=(grav-
pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))*omegac*dt;
```

```
aux=2.*Qm*dt*incoant[nincot-
2]/pow(hm,2.);
```

```
aux1=- (grav-
pow(Qm,2.)/pow(hm,3.))*dt*(incoant[ninc
ot]-incoant[nincot-1]);
```

```
aux2=-dt*grav*omegac*(Y[nivelesriego-
indires]-Y[nivelesriego-1-indires])*(sfa-
pendiente);
```

```
aux3=-
beta*(Qm/pow(hm,2.))*(Y[nivelesriego-
indires]-Y[nivelesriego-1-indires])*((1.-
phizcl)*(Rfin[nivelesriego]-
Rini[nivelesriego])+phizcl*(Rfin[nivelesriego-
1]-Rini[nivelesriego-1]));
```

```
Bsv[nincot]=aux+aux1+aux2+aux3;
```

```
}
```

```
//fin de subrutina
```

```
void UNO::Saint()
```

```
{
```

```
long int i,maxit,n;
```

```
double toll,res1,aux;
```

```
toll=.001; maxit=500; contasv=1;
```

```
do
```

```

{
//FASE DE AVANCE
if (nivelt<nivelesriego)Avance(Ksv,Bsv);
//FASE DE ALMACENAMIENTO
//verificacion de la lamina aplicada media
sumaL=0;
n=1;
for(i=1;k<=nincot;i++)
{
if (i/2<i/2.)
{
sumaL+=(Rfin[n]+incoant[i]);
n++;
}
}
//FASE DE CONSUMO
if(nivelt>=nivalmac &&
nivelt<nivelres)Consumo(Ksv, Bsv);
//FASE DE RECESION
if (nivelt>=nivelres)Recesion(Ksv,Bsv);
if(nivelt>1) Choleskiv(incoest2);
if (nivelt<=nivelres) {gotoxy(1,23);cout<<"
";}
if (nivelt<=nivelres)
{gotoxy(1,23);cout<<"Lamina aplicada..."<<"
"<<laminaplicada<<" "<<"lamina necesaria
"<<laminabruta;}
if(nivelt==1)
{
res1=0.;
for (i=1;k<=ninco;i++)
{
if(incoest1[i]!=0.){
aux=fabs((incoest1[i]-
incoest2[i])/incoest1[i]);
if (res1<aux) res1=aux;
}}
}else res1=0.;
if (nivelt==1)
{for(i=1;k<=ninco;i++){incoest1[i]=(incoest1
[i]+incoest2[i])/2.;}
}

```

```

if(contasv>maxit) break; contasv++;

}while(res1>tol1);

if(nivelt==1) Y[2]=incoest2[2];

if(nivelt<nivelesriego)
{
if (nivelt>1)
{
avanza[1]=incoant[1]+incoest2[1];
avanza[2]=Q1+incoest2[2];
for (i=3;i<=nincot-1;i++){avanza[i]=incoant[i-2]+incoest2[i];}
avanza[nincot]=0.;
Y[nivelt+1]=2.*Y[nivelt]-Y[nivelt-1]+incoest2[nincot]; //asigna un valor para la malla
if(Y[nivelt+1]>longitud && indicalong<1){
nivelesriego=nivelt+1; indicalong=1;}
}
}

if(nivelt==nivelesriego)
{
avanza[1]=incoant[1]+incoest2[1];
avanza[2]=Q1+incoest2[2];
for
(i=3;i<=nincot;i++){avanza[i]=incoant[i]+incoest2[i];}
}
if(nivelt>nivelesriego)
{
for
(i=1;i<=nincot;i++){avanza[i]=incoant[i]+incoest2[i];}
if(incoant[2]<Qminres && nivelt<nivelres)
{
nivelres=nivelt;
indires=1;
indiresant=0;
gotoxy(1,10);cout<<"
";
}
}

```

```

gotoxy(1,10);cout<<"Inicia la recesion..."<<"
"<<(nivelres*dt)<<"
"<<"gasto1..."<<incoant[2];
}
//if(nivelt>nivelres+2)
{
gotoxy(1,24);cout<<"
";
gotoxy(1,24);cout<<"Gasto
inicionda..."<<incoant[2]<<" "<<"Indires....
"<<indires;
}
}
if(nivelt>nivelres)
{
if(avanza[2]<0.0 && avanza[4]<0.0)
{
niveltimp=nivelt;
Archivar();
Efici();
final=1;
}
}
}
if(nivelt>=nivelesriego)Residuales();
}
long int UNO::Invesv(long int i, long int j)
{
long int ivec,L;
ivec=j;
if(i>1)
{if(i>sbsv) ivec+=sbsv-i;
ivec=ivec+(i-1)*(2*sbsv-1);
ivec=ivec-((2*sbsv-
Minimosv(sbsv,i))*(Minimosv(sbsv,i)-1)/2);
L=i-ninco+sbsv-2;
if(L>0) ivec=ivec-(L*(L+1)/2);}
return ivec;
}
long int UNO::Minimosv(long int i, long int j)
{long int mini;
if(i>j) mini=j; if(i<j) mini=i; if(i==j) mini=i;
return mini;}

```

```

void UNO::Choleskisv(double *tirante)
{
    long int i,s,j1,j2,j,k1,k2,ij,ii,ikini;
    long int ik,iveii,ivesj;
    double aux;
//descomposicion del sistema
    j1=1; j2=sbsv; ij=0;
    for (i=1; i<=ninco; i++)
    {
        ii=ij+i-j1+1;
        k1=j1;
        ikini=ij+1;
        for (j=j1; j<=j2; j++)
        {
            ij+=1;
            if (j>sbsv && i<j)
            {
                k1+=1;
                ikini+=1;
            }
            aux=Minimosv(i,j);
            k2=aux-1;
            if (k2>=k1)
            {
                ik=ikini;
                for (s=k1; s<=k2; s++)
                {
                    ivesj=Invesv(s,j);
                    Ksv[ij]+=-Ksv[ik]*Ksv[ivesj];
                    ik+=1;
                }
            }
            if (i<j && Ksv[ii]!=0.)
                Ksv[ij]=Ksv[ij]/Ksv[ii];
            if (i<j && Ksv[ii]==0.) Ksv[ij]=0.;
        }
        if (i>=sbsv) j1+=1;
        if (j2<ninco) j2+=1;
    }
//Solucion al sistema
    for (i=1; i<=ninco; i++) xxxsv[i]=Bsv[i];
    xxxsv[1]=xxxsv[1]/Ksv[1];
    k2=1;
    for (i=2; i<=ninco; i++)
    {
        if (i>sbsv) k2+=1;
        iveii=Invesv(i,i);
        if (i>k2)
        {
            ik=iveii-1;
            for (s=i-1; s>=k2; s--) {xxxsv[i]+=-
                Ksv[ik]*xxxsv[s]; ik+=-1;}
        }
    }
}

```



```

    if (Ksv[iveii]!=0.)
xxxsv[i]=xxxsv[i]/Ksv[iveii]; if
(Ksv[iveii]=0.) xxxsv[i]=0.;
}
j=ninco-sbsv+1;
k2=ninco;
for(i=ninco-1;i>=1;i--)
{if(i<j) k2+=-1;
if(i<k2)
{iveii=Invesv(i,i);
ik=iveii+1;
for (s=i+1;s<=k2;s++){xxxsv[i]+=-
Ksv[ik]*xxxsv[s]; ik+=1;}
}
}
for(i=1;i<=ninco;i++)tirante[i]=xxxsv[i];
}
void UNO::Ensamble()
{
double aux,auxx,Ks,dtheta, hf;
long int i,n;
ifstream Lee;
}
//*****
***** DT *****
longitud=10000.;
laminabruta=10.;
pendiente=0.002;
indicalong=0;
nivelesriego=30000;
nivalmac=100000;//asignacion inicial al nivel
de tiempo en que termina el almacenamiento
nivelres=100000;//asignacion inicial al nivel
de tiempo en que empieza la recesion
//discretizacion
dtini=20.; dt=dtini;
//impresion
niveltimp=50; dtimp=50;
//gasto minimo para la recesion
//Qminres=Qcab/10.;
//Qminres=.01;//arenas

```

Qminres=.05;//arcilla

//Calculo de recargas con Green & Ampt

final=2;

//para suelo franco Ks puede variar entre 0.3 y
2.5

Inicio();

Iniciosv();

Ks=2.2/3600.; dtheta=(.4865-(.4865*.5));
hf=32.75;

//valores en la
frontera*****

Q1=Qcab;

/*if(nivelt==1)

{

nivelt=1;

aux=Ks*dt/2.;

Rfin[1]=aux+pow(pow(aux,2.)+dt*Ks*dtheta
a*(2.*hf+avanza[1]),.5);

}

do

{

if(nivelt>1)

if (nivelt==1) tiem=dt; if (nivelt>1) tiem+=dt;

{

contaco=1;

aux=Ks*dt/2.;

do

Rfin[1]=aux+pow(pow(aux,2.)+pow(Rini[1],
2.)+Ks*dt*Rini[1]+dt*Ks*dtheta*(2.*hf+ava
nza[1]+incoant[1]),.5);

Saint();

```

for(i=2;i<=nivelt-1;i++)
{
aux=(Ks*dt)/2.;
Rfin[i]=aux+pow(pow(aux,2.)+pow(Rini[i],2.)+Ks*dt*Rini[i]+dt*Ks*dtheta*(2.*hf+avanza[2*i-1]+incoant[2*i-1]),.5);
}
}*/

if(nivelt==1)
{
//Rfin[1]=Ks*dt;//+aux+pow(pow(aux,2.)+dt*Ks*dtheta*(2.*hf+avanza[1]),.5);
Rfin[1]=Ks*dt+pow(pow(Ks*dt,2.)+pow(Rini[1],2.)+Ks*dt*Rini[1]+dt*Ks*dtheta*(2.*hf+avanza[1]+incoant[1]),.5);
}

if(nivelt>1)
{
Rfin[1]=Ks*dt+Rini[1]+dt*Ks*dtheta*(hf+avanza[1]+incoant[1])/Rini[1];
}

for(i=2;i<=nivelt-1;i++)
{
//Rfin[1]=Ks*dt+Rini[1]+dt*Ks*dtheta*(hf+avanza[1]+incoant[1])/Rini[1];
Rfin[i]=Ks*dt+Rini[i]+dt*Ks*dtheta*(hf+avanza[2*i-1]+incoant[2*i-1])/Rini[i];
}
}

resrec=0.;
for(i=1;i<=nivelt;i++)
{aux=fabs(Rfin[i]-Rfina[i]);
if(resrec<aux) resrec=aux;}

for(i=1;i<=nnutod;i++) Rfina[i]=Rfin[i];

contaco++; if(contaco>5) break;
//gotoxy(1,21);cout<<"resrec "<<resrec;

limiteresrec=.001;

```

```

n=1;
if(nivelt<nivelres && indires!=0)indires=0;
}while(resrec>limiteresrec);
Residuales();
//asignacion de valores iniciales para el
siguiente nivel de tiempo
if
(nivelt==1){incoant[1]=incoest2[1];incoant[
2]=incoest2[2];Y[2]=incoest2[2];}
if(nivelt>1)for
(i=1;i<=nincot;i++){incoant[i]=avanza[i];}
for (i=1;i<=nivelt;i++){Rini[i]=Rfin[i];}
Ytot[nivelt+1]=Y[nivelt+1];//asigna un valor
para la malla fija de calculo de eficiencia
//calculo de balance de masa
sumaR=0;
sumaH=0;
n=1;
for(i=1;i<=nincot;i++)
{
if (i/2<i/2.)
{
sumaR+=(Rfin[n]+Rfin[n+1])*(Y[n+1]-
Y[n])/2.;
sumaH+=(incoant[i]+incoant[i+1+1])*(Y[n
+1]-Y[n])/2.;
n++;
}
}
if (nivelt<=nivelesriego) auxx=Qcab*tiem;
if (nivelt>nivelesriego)
auxx=Qcab*nivelesriego*dt;
balance=(1.-(sumaR+sumaH)/auxx)*100.;
//impresiones para tiempos especiales
if(nivelt==nivelesriego)niveltimp=nivelt;
if(nivelt==nivelesriego+1)niveltimp=nivelt;
if(nivelt==nivelesriego+2)niveltimp=nivelt;
if(nivelt==nivelres)niveltimp=nivelt;

```

```

if(nivelt==nivelres+1) niveltimp=nivelt;

// niveltimp=nivelt;

Archivar();

nivelt++;

//getch()

gotoxy(1,22);cout<<"
"<<endl;

gotoxy(1,22);cout<<"Time  "<<tiem<<"
"<<"dt  "<<dt<<"  "<<"frente
"<<Y[nivelt]<<endl;

if(final==1) break;

}while (tiem<1000.*3600.);

//if(final<1){gotoxy(1,22);cout<<"El
numero de incognitas necesario supera a las
definidas..."<<endl; getch();}

//if(final==1){gotoxy(1,22);cout<<"Recesio
n completa..."<<"  "<<"CUC  "<<CUC<<"
"<<"Ea  "<< Ea<<endl;}

}

```

```

void UNO::Qoptimo()
{
double Qcabini, CUCini, CUCant;

int i;

ofstream Escribe;

Escribe.open("c:\\Acople\\CUCSVGA.txt",ios::trunc);Escribe.close();

Qcabini=12.;

CUCini=.1;

Qcab=Qcabini;

CUCant=CUCini;

borrararreglos=0;

for(i=1;k=100;i++)

{

Ea=((laminabruta*longitud)/(TR*Qcab));

```

```
Escribe.open("c:\\Acople\\CUCSVGA.txt",ios::app);
```

```
// Escribe<<Qcab<<" "<<CUCant<<"
"<<balance<<" "<<(nivelesriego*dt)<<"
"<<(nivelt*dt)<<" "<<(nivelres*dt)<<endl;
```

```
Escribe<<Qcab<<" "<<CUCant<<"
"<<balance<<" "<<TR<<"
"<<Ea<<endl;
```

```
Escribe.close();
```

```
gotoxy(1,10);cout<<"
"<<endl;
```

```
gotoxy(1,10);cout<<"Qcabini...
"<<Qcabini<<" "<<"CUC "<<CUCini<<endl;
```

```
Ensamble();
```

```
/* if(CUCant>CUC)
```

```
{
```

```
gotoxy(1,5);cout<<"Ooptimo...
"<<(Qcab+.1)<<"CUC "<<CUCant<<endl;
```

```
Escribe.open("c:\\Acople\\CUCSVGA.txt",ios::app);
```

```
Escribe<<Qcab<<" "<<CUCant<<endl;
```

```
Escribe.close();
```

```
getch();
```

```
}*/
```

```
//if(CUCant<CUC)
```

```
Qcab+=.1; //busqueda para gastos mayores
```

```
CUCant=CUC;
```

```
gotoxy(1,11);cout<<"
"<<endl;
```

```
gotoxy(1,11);cout<<"Qcab... "<<Qcab<<"
"<<"CUC "<<CUC<<"
"<<borrararreglos<<endl;
```

```
if(i>=1)borrararreglos=0;
```

```
//borradora de arreglos
```

```
//Green & Ampt  
//delete [] K;  
//delete [] B;  
//delete [] M;  
//delete [] sol;  
//delete [] xxx;  
//delete [] Q;  
//delete [] potantcol;  
//delete [] potestcol;  
//delete [] V;  
//delete [] potcencol;  
//delete [] Z;  
//delete [] theta;  
//delete [] Kh;  
//delete [] Cesp;  
//delete [] thetaini;  
//delete [] laminacon;  
delete [] potestcon;  
//delete [] frontera;  
delete [] Residual;  
//delete [] potant;  
  
//delete [] potantit;  
//San Venancio  
delete [] Ksv;  
delete [] Bsv;  
delete [] solsv;  
delete [] xxxsv;  
delete [] vel;  
delete [] Jf;  
delete [] laminafin;  
delete [] incoant;  
delete [] incoest1;  
delete [] incoest2;  
delete [] Y;  
delete [] Rini;  
delete [] Rfin;  
delete [] avanza;  
delete [] Ytot;  
  
//acople  
delete [] Rfina;  
  
}
```

}

{UNO Wagner;

Wagner.Qoptimo(); return 0;}

main(void)



Referencias

- Akanbi A., y N. Katopodes, 1988. *Model for flow propagation on initially dry land*. Journal of Hydraulic Engineering. Vol 114, No. 7.
- Burden R. L. y J. D. Faires. 1985. *Análisis Numérico*. Grupo Editorial Iberoamérica. 721 pp.
- Fuentes, C., B de León, H. Saucedo, J.Y. Parlange y A. Antonino, 2004. El sistema de ecuaciones de Saint-Venant y Richards del riego por gravedad: 1. La ley potencial de resistencia hidráulica. *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XVIII, núm. 2, pp. 121-131.
- Green, W. H., y G. A. Ampt, 1911. *Studies in soil physics, I: the flow of air and water through soils*. J. Agric. Sci., 4:1-24.
- Katopodes N., y T. Strelkoff, 1977. *Hydrodynamics of border irrigation, complete model*. Journal of the Irrigation and Drainage Division. IR3:309-324.13188.
- Lewis M. R. y W.E. Milne. 1938. *Analysis of border irrigation*. Transactions of the ASAE. 19:267-272.
- Playán E., W.R. Walker y G.P. Merkley, 1994. *Two-dimensional simulation of basin irrigation. I. Theory*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Vol 120, No.5.
- Rawls, W.J. y D.L. Brakensiek, 1981. *Estimating soil water retention from soil properties*. Amer. Soc. Civ. Eng., 108(IR2):167-171.
- Rendón, L., C. Fuentes y G. Magaña. 1997. *Diseño del riego por gravedad*. En *Manual para diseño de zonas de riego pequeñas*, editado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Pp I-75 a I-87.
- Richards, L. A., 1931. *Capillary conduction of liquids through porous mediums*. Physics 1:318-333.
- Saucedo H., C. Fuentes y M. Zavala. 2005. *El sistema de ecuaciones de Saint-Venant y Richards del riego por gravedad: 2. Acoplamiento numérico para la fase*

de avance en el riego por melgas. Ingeniería. Hidráulica en México, vol XX, núm 2, abril-junio de 2005, pp 109-119.

- Saucedo H., M. Zavala y C. Fuentes. 2011. Modelo hidrodinámico completo para riego por melgas. Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería Hidráulica en México, vol. II, núm. 2, abril-junio de 2011, pp. 23-38.
- Strelkoff T., y N. Katopodes, 1977. Border-irrigation hydraulics with zero inertia. Journal of the Irrigation and Drainage Division. IR3:325-342. 13189.
- Woolhiser, D. A., 1975. Simulation of unsteady overland flow. En Unsteady flow in open channels, editado por K. Mahmood y V. Yevjevich, Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA, vol II: 485-508.
- Arias R., H.M. 1989. Calidad del Agua y su manejo en las cuencas de los ríos Tula y Salado en Hidalgo. Términos de Referencia para estudios de impacto ambiental. Documento Mimeografiado. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillos, Méx.
- Arshad, M.A. y Coen, G.M. 1992. Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria. American J. of Alternative Agriculture 7: 25-31.
- Bautista, C. A., J. Etchevers B., R.F. del Castillo y C. Gutiérrez. 2004. Ecosistemas 2004/2 (URL: <http://www.aeet.org/ecosistemas/042/revision2.htm>).
- Conagua, 2010. Estadística del agua, edición 2010. 10 años de presentar al agua en cifras. SEMARNAT. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/EAM2010.pdf>.
- De la Peña, s/f. Salinidad de los suelos agrícolas. Su origen – clasificación – prevención y recuperación. Boletín Técnico No. 10. SARH.
- Díaz M., J, A. 1990. Variabilidad de cuatro características de calidad del agua en el Río Tula (Tramo Presa Requena-Ixmiquilpan). Tesis de Maestría. Centro de Edafología. Colegio de Posgraduados. Institución de Enseñanza e Investigación. Montecillos, Méx.

- Díaz M., J. A. 1996. Experiencias en el manejo de tres hortalizas regadas con aguas residuales. Memoria del XXI Congreso Nacional de Ingeniería, A.C. Pág. 68-74. Cholula, Pue.
- Díaz M., J. A., Namuche V., R. 2001. Medición de la conductividad hidráulica con el miniinfiltrómetro en horizontes del suelo del DR014 Río Colorado, B. C. XI Congreso Nacional de Irrigación. Simposio 2. Drenaje y Salinidad, Pág. 21-28.
- Díaz, M., J. A. 1999. Guía de análisis de horizontes de suelos en fosas edafológicas con fines de drenaje agrícola (Manual de campo). Documento de uso interno. Subcoordinación de Contaminación y Drenaje Agrícola. Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje. IMTA. Jiutepec, Morelos.
- Frías F., R. 1990. Acondicionamiento de aguas residuales para el reuso en riego agrícola. Pág. C-153 - C-159, Memoria del Séptimo Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. SMISSC. Oaxaca, Oax.
- Fuentes. 1997. Caracterización mínima del suelo con fines de riego. Capítulo 1.1. del libro Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. IMTA.
- Haverkamp R., P. J. Ross, K. R. J. Smettem and J. Y. Parlange. 1994. Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. Water Resources Research, vol 30, pag. 2931-2935.
- Kowal, N.E., Pahren, H.R. and Akin, E.W. 1980. Microbiological Health Effects Associated with the Use of Municipal Wastewater for Irrigation. Municipal Wastewater in Agriculture. Edited by Frank M Ditri, Jorge Aguirre Martínez and Mauricio Athie Lámbarri. Academic Press. A Subsidiary of Harcourt Brace. Jovanovich, Publisher. New York.
- Larson, W.E. y Pierce, F.J. 1991. Conservation and Enhancement of Soil Quality. In Evaluation for sustainable land management in the developing world. En Proc. of the Int. Work-shop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World, Chiang Rai. pp. 175-203. 15-21 Sept. 1991. Int. Board of Soil Res. and Manage., Bangkok, Thailand.

- Lugo M., R. D. 2009. El uso de aguas residuales en la agricultura. Ambiente y Desarrollo. Volumen XIII No. 24, enero-junio. Bogotá, Colombia.
- Mara, D. y Cairncross. 1990. Directrices para el uso sin riesgos de aguas residuales y excretas en agricultura y Acuacultura. Publicada por la OMS en colaboración con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. OMS. Ginebra, Suiza.
- NMX-AA-003, 1980. Aguas Residuales - Muestreo. Norma Mexicana. NMX-AA-003. Dirección General de Normas. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.
- NMX-AA-034-SCFI, 2001. Análisis de Agua - Determinación de Sólidos y Sales Disueltas en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas - Método de Prueba (Cancela a las NMX-AA-020-1980 Y NMX-AA-034-1981). Secretaria de Economía.
- NMX-AA-102-1987 Calidad de Agua - Detección Enumeración de Organismos Coliformes, Organismos Coliformes Termotolerantes y Escherichia coli Presuntiva- Método de Filtración en Membrana. Water Quality-Detection and Enumeration of Coliform Bodies, Coliform Thermotolerant Bodies and Escherichia coli Presumptive-Method of Filtration in Membrane. <http://www.imta.gob.mx/cotennser/images/docs/NOM/NMX-AA-102-1987.pdf>.
- NMX-AA-42-1987. Calidad del Agua determinacion del Numero Mas Probable (Nmp) de Coliformes Totales, Coliformes Fecales (Termotolerantes) Y Escherichia Coli Presuntiva. Direccion General De Normas. Secretaria De Comercio Y Fomento Industrial.
- NOM-001-ECOL-1996. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT 1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ratificación publicada en el Diario Oficial de la Federación del 23 de abril del 2003.

- Palacios V., O. y Aceves N., E. 1970. Instructivo para el muestreo registro de datos e interpretación de la calidad del agua para el riego agrícola. Serie de apuntes No. 15. Rama de Riego y Drenaje. ENA-C.P.: SAG. Chapingo, México.
- Perroux y White, 1988. Designs for disc permeameter. Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 52, pag. 1205-1214.
- Philips J. R., 1957. The theory of infiltration: 4, Sorptivity and algebraic infiltration equations. Soil Sci. Vol 84, pag 257-264.
- Ramírez A., A. 1978. Microorganismos patógenos presentes en el agua residual doméstica y en suelos irrigados con ella. Pág. 284-298. Vol. 1. Memoria del Primer Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. SMISSC. Guadalajara, Jal.
- Richards, L. A. 1974. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual 60. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. Ed. Limusa. México, D.F.
- Saucedo, H., M. Zavala y C. Fuentes. 2011. Modelo hidrodinámico completo para riego por melgas. Tecnología y Ciencias del Agua. Vol. II, Núm. 2, abril-junio. Pág. 23-38. Jiutepec. Morelos. México.
- Semarnat, 2002. Informe de la situación del medio ambiente en México. http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas_2000/informe_2000/.
- Seybold, C.A., Mausbach, M.J., Karlen, D.L. y Rogers, H.H. 1997. Quantification of Soil Quality. En Soil Process and the Carbon Cycle (eds. Lal, R., Kimble, J.M., Follet, R.F. y Stewart, B.A.), pp. 387-403, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Smettem, K. R., Parlange, J. Y., Ross, P. J., Haverkamp, R. 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: 1. A capillary-based theory. Water Resources Research, vol 30, pag. 2925-2929.
- Van der Hoek, W. 2001. USO DE AGUAS RESIDUALES NO TRATADAS EN LA AGRICULTURA: ESTRATEGIAS PARA EL MANEJO DE LOS RIESGOS PARA LA SALUD. Documento de discusión para el tópico 1. Conferencia electrónica del RUAFA-IWMI sobre el "Uso de Aguas Residuales Urbanas no Tratadas para la

Agricultura en Países de Bajos Ingresos. Instituto Internacional para el Manejo de los Recursos Hídricos (IWMI).

- Vandervaere, J. P., Vauclin, M., Elrick, D. E. 2000. Transient flow from tension infiltrometers: I The two-parameter equation. Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 64. pag. 1263-1272.
- Wooding R. A. 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. Water Resources Res. Vol. 4, pag 1259-1273.

