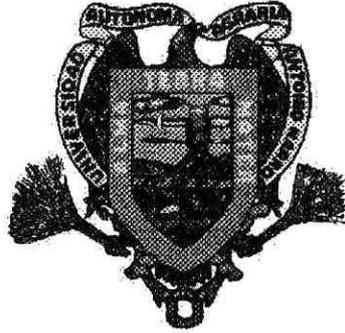


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"
UNIDAD LAGUNA**

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



**ANÁLISIS DE ESCENARIOS BASADO EN UN MODELO DE
SIMULACIÓN PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO
POR SUPERFICIE**

POR

EDGAR RAMÍREZ HORTA

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL TÍTULO DE:**

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"
UNIDAD LAGUNA**

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

**ANÁLISIS DE ESCENARIOS BASADO EN UN MODELO DE SIMULACIÓN PARA EL
DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR SUPERFICIE**

POR

EDGAR RAMÍREZ HORTA

TESIS

**QUE SE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ ASESOR COMO REQUISITO
PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

APROBADA POR:


M.C. CARLOS EFREN RAMÍREZ CONTRERAS
ASESOR PRINCIPAL


M.C. JOSÉ G. GONZÁLEZ QUIRINO
ASESOR


ING. ROLANDO LOZA RODRÍGUEZ
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



COORDINACIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS
UNIDAD LAGUNA

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"
UNIDAD LAGUNA**

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

**ANÁLISIS DE ESCENARIOS BASADO EN MODELO DE SIMULACIÓN
PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR SUPERFICIE**

POR

EDGAR RAMÍREZ HORTA

TESIS

**QUE SE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

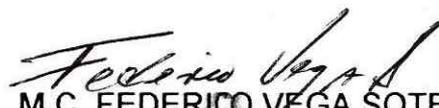
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

APROBADA POR:

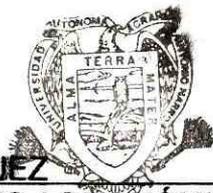

M.C. CARLOS EFRÉN RAMÍREZ CONTRERAS
PRESIDENTE


M.C. JOSÉ G. GONZÁLEZ QUIRINO
VOCAL


ING. GERARDO DELGADO RAMÍREZ
VOCAL


M.C. FEDERICO VEGA SOTELO
VOCAL SUPLENTE


ING. ROLANDO LOZA RODRÍGUEZ
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



COORDINACION DE LA DIVISION
DE CARRERAS AGRONOMICAS
TAAAN UL

TORREON, COAHUILA, MÉXICO

DICIEMBRE DE 2002

CONTENIDO

	Página
Dedicatorias	i
Agradecimientos	ii
Índice de Cuadros	iii
Índice Figuras	iii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	4
III. METAS	4
IV. HIPÓTESIS	4
V. REVISIÓN DE LITERATURA	5
5.1. Energía requerida para la extracción agua.....	5
5.2. Topografía.....	7
5.3. Modelos de simulación matemática.....	8
5.3.1. Hidráulica del riego por superficie.....	8
5.3.2. Modelo hidrodinamico total.....	9
5.3.3. Modelo cero inercia.....	10
5.3.4. Modelo onda cinemática	11
5.3.5. Ecuaciones de infiltración.....	11
5.3.6. Calculo del balance de volumen.....	12
5.4. Software de simulación del riego por superficie	13
5.4.1 Software de simulación RIGRAV	13
5.4.2 Software de Simulación SIRMOD	15
5.5 Diseño del sistema de riego por compuertas.....	16
5.5.1 Diámetro de tubería ciega	16
5.5.2 Diámetro de tubería con compuertas.....	17
5.5.2.1 Modelo hidráulico de la compuerta	17
5.5.2.2 Pérdidas de carga permisible.....	18
5.5.2.3 Determinación del gasto por compuerta	19
5.5.2.4 Determinación del diámetro de la tubería.....	19

ÍNDICE DE CUADROS

	PAGINA
Cuadro 1. Valores mínimos de eficiencia para sistemas de bombeo pozo profundo en operación	7
Cuadro 2. Impacto del análisis de escenarios	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ventana de idioma de trabajo del modelo SIRMOD II	25
Figura 2. Ventana de características de trabajo para melga o surco	26
Figura 3. Ventana de parámetros hidráulicos de melga o surco	27
Figura 4. Ventrana de parámetros numéricos	28
Figura 5. Ventana de comportamiento del riego	29
Figura 6. Ventana de perfiles de avance y recesión	30

DEDICATORIAS

A mi Dios:

Por concederme la oportunidad de lograr una meta más, por tantas cosas buenas y maravillosas de la vida que me brinda, por la vida misma que el me dio. Porque gracias a él estoy por concluir una etapa de mi vida y pidiéndole me lleve siempre a prestar ayuda a mis semejantes y principalmente dar amor y seguir superándome.

A mis Padres

A ellos en especial dedico este trabajo, en especial a mi madre por ser el más grande apoyo que he conocido en mi vida, por las alegrías que siempre me brinda y por darme la herencia que jamás hubiese logrado sin tu apoyo: el amor a la vida y amor al trabajo.

A mis Hermanos:

Jorge, Susana y Sofía Lizeth con profundo cariño y respeto, por su gran apoyo e inmenso amor en todos los momentos de mi vida y por su valiosa ayuda en la formación de mi carrera profesional, GRACIAS.

A mi Novia:

Blanca Irasema por la gran paciencia y apoyo durante este tiempo.

A todos mis compañeros y amigos:

De la XXX generación de Ingenieros agrónomos especialistas en irrigación: Antonio, Daniel, Ricardo, Rene, Octavio, Alonso, Rolando y Fabián, por darme el apoyo necesario para culminar mis estudios.

AGRADECIMIENTO

A mi "ALMA MATER" por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios profesionales.

A mi Tío el M.C. Carlos E. Ramírez Contreras por brindarme sus conocimientos y su apoyo incondicional para la realización de mi carrera universitaria.

A la Familia Rendón Ramírez por brindarme el calor de su hogar y el apoyo necesario para la realización de mis estudios universitarios.

Al Ing. Gerardo Delgado Ramírez por su gran ayuda en la revisión de este trabajo y por su sugerencia para la terminación del mismo.

Al Ing. José G. González Quirino por su gran ayuda en la revisión de este trabajo y por su sugerencia para la terminación del mismo.

Al personal del Programa de Transferencia de Tecnología Integral en Riegos (PROTTIR-COAHUILA) por su apoyo y su amistad.

A todos mis maestros del departamento de riego que contribuyeron en toda mi formación académica.

Al Ing. Aláin Buendía García por su valioso e importante apoyo en la realización de este trabajo.

A la familia Villegas Orona por haberme brindado el apoyo y las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

A Todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron para que yo lograré uno de mis más grandes sueños.

I. INTRODUCCIÓN

El uso eficiente del agua en la agricultura, siempre ha sido una necesidad, ya que este recurso es cada vez menos disponible. Es por eso que actualmente la agricultura se ha estado tecnificando en lo que a irrigación se refiere. Las estadísticas indican que el riego por gravedad se emplea en una superficie de 5´802,182 has lo cual representa el 92.7 por ciento de la superficie total de riego (FAO, 1997), con eficiencias del 30 al 60 por ciento.

En la actualidad se han hecho una diversidad de diseños de sistemas de riego superficial, a los que se le han integrado los sistemas de riego con tubería de compuertas, los cuales no han sido diseñados acorde a las características del suelo, disponibilidad de agua, clima y cultivo.

En 1996, el gobierno de México, creó el programa "Alianza para el Campo" el cual pretendió tecnificar el campo mexicano. Bajo este apoyo en el primer año se beneficiaron 5,369 productores de la Región Lagunera de los estados de Coahuila y Durango, de tal forma que de 1996 a 1999 se instalaron 351 sistemas de riego con tubería con compuertas para 21,726 ha. La inversión total fue de 147.1 millones de pesos, donde el gobierno federal participó con el 33 por ciento, el gobierno estatal con el 9 por ciento y los productores aportaron el 58 por ciento. (FIRCO, 2000).

Uno de los programas inmersos en la Alianza para el Campo es el de Fertirrigación, el cual tuvo como principal misión la modernización del riego. Sin embargo, careció de un programa de capacitación teórica y práctica de los sistemas de riego que se instalaron.

Se deduce de lo anteriormente expuesto, que un porcentaje sustancial de la superficie bajo riego se opera con eficiencias bajas por lo que la inversión dedicada a

subsanan este problema ha sido enorme y que por carecer de un programa de capacitación se han presentado fracasos.

Ante esta problemática, se han puesto en marcha los apoyos económicos para la rehabilitación de pozos y equipos de bombeo para riego agrícola, la modernización de la infraestructura de captación, la correspondiente a la conducción y distribución del agua a nivel interparcelario en las unidades de riego, la instalación de sistemas de riego presurizados y los programas de transferencia de tecnología.

El Actual Gobierno en el 2001 implementó el programa denominado "Tecnificación de la Agricultura de Riego por Bombeo", el cual pretende subsanar todos los problemas que se presentaron en el de "Fertirrigación". Dichos problemas se han resuelto parcialmente en la Comarca Lagunera a través del Programa de Transferencia de Tecnología Integral en Riegos (PROTTIR), generado por los agricultores de la Cámara Agrícola y Ganadera de Torreón (CAGT).

El PROTTIR analiza el proceso a partir de diagnóstico, diseño de alternativas de solución, implementación y seguimiento, y en forma paralela considera una etapa de capacitación con la finalidad de asegurar el éxito, y así conducir a la conservación del recurso hídrico evitando el derroche de energía eléctrica.

Debido a que el modelo de investigación tradicional de desarrollo y transferencia de tecnología agropecuaria, que se ha utilizado prácticamente en todo el mundo, es ineficiente para enfrentar y resolver problemas tecnológicos de productores agropecuarios. Han surgido enfoques y metodologías como la investigación participativa que se vislumbran como una alternativa de investigación y extensión que pueden permitir dar respuestas más precisas y colaborar al desarrollo no solamente tecnológico sino al desarrollo comunitario en el sector agropecuario (Arriaga C. et al, 1995). El PROTTIR ejerce una transferencia de tecnología de tipo participativa, por lo que la investigación que se realiza en este trabajo no es tradicional.

Esta investigación es un resultado parcial del proyecto “ Sistema de Apoyo para la Aplicación de Riegos en Cultivos Susceptibles en la Comarca Lagunera”, financiado por la FUNDACIÓN PRODUCE, A.C. y la Cámara Agrícola y Ganadera de Torreón, A.C. llevado a cabo en el CENID – RASPA – INIFAP por el M.C. Carlos Efrén Ramírez Contreras, investigador de dicho centro.

Con este trabajo se pretende analizar, desarrollar y aplicar una alternativa de solución mediante un esquema de escenarios utilizando un modelo de simulación de riego por gravedad, generando diferentes alternativas para incrementar la eficiencia global del uso y manejo del agua, además de aumentar la productividad de un predio en función de dichas eficiencias.

II. OBJETIVO

Incrementar la productividad del agua y los cultivos a través de un sistema de riego superficial basado en un modelo de simulación.

III. HIPOTESIS

Mediante el análisis de escenarios de un sistema de riego superficial por melgas, basado en un modelo de simulación, es posible incrementar la productividad agrícola de un predio.

IV. METAS

Diagnosticar un predio y aplicar el mejor escenario en campo para su validación en un tiempo estimado de dos meses. Con la simulación de escenarios se generan recomendaciones para el incremento de eficiencias de riego y la productividad del predio.

V. REVISIÓN DE LITERATURA

Con la finalidad analizar la aplicación del agua en el predio y realizar un diagnostico detallado, dicho análisis se realizo de acuerdo al proceso extracción – conducción y aplicación del agua.

5.1. ENERGÍA REQUERIDA PARA LA EXTRACCIÓN DE AGUA.

La energía requerida para la extracción del agua, es una de las principales preocupaciones de los productores, por su alto costo, debido a esto, en este trabajo es de gran importancia eficientizar este recurso, se llevo a cabo un diagnostico del equipo de bombeo, el cual consistió en evaluar la eficiencia electromecánica.

La eficiencia electromecánica de un equipo de bombeo es la relación de la potencia reactiva y la potencia activa, dicha eficiencia nos muestra la energía que es aprovechada por el sistema electromecánico con relación a la consumida.

$$Ee = \frac{Pr}{Pa} * 100 \quad (1)$$

Donde:

Ee = Eficiencia electromecánica (%).

Pr = Potencia reactiva (kw).

Pa = Potencia activa (kw).

La potencia reactiva es la potencia transferida por la bomba al fluido, medida en la descarga del equipo.

$$Pr = \frac{Ctd * Q}{102} \quad (2)$$

Donde:

Ctd = Carga dinámica total (m).

Ctd = N.d. + Hf_s + Hf_d + Hf_l ± Pv

N.d = Nivel dinámico (m)

Hf_s = Perdidas de carga en la succión (m)

Hf_l = Perdidas de carga localizadas (m)

Hf_d = Perdidas de carga en la descarga (m)

Q = Gasto (lps).

Pv = Proyección vertical (m).

La potencia activa es la que demanda la maquina motriz al motor eléctrico que acciona la bomba, la cual se mide y se expresa en kw (Plauchú, et al, 1999).

$$Pa = \frac{I * V * \sqrt{3} * F.P.}{1000} \quad (3)$$

Donde:

Pa = Potencia activa (kw).

I = Intensidad de corriente eléctrica (Amperes).

V = Tensión eléctrica en la línea (Volts).

F.P. = Factor de potencia en sistema eléctrico (adimensional).

Según la NOM-06-ENER-1995, y publicado en el diario oficial el día 9 de Noviembre de 1995, menciona que cualquier sistema de bombeo para pozo profundo que utilice la energía eléctrica como medio energético para sus fines y que, derivado del diagnóstico de eficiencia electromecánica, ésta resulte menor o igual al 40 por ciento en forma combinada, esto es, del conjunto bomba-motor, deben efectuarse acciones de

rehabilitación o sustitución de los equipos electromecánicos, con el propósito de elevarlos a los niveles establecidos en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Valores mínimos de eficiencia para sistemas de bombeo para pozo profundo en operación.

Intervalo de Potencia nominal		Ee. (%)
Kw	Hp	
5.6 – 14.9	7.5 – 20	52
15.7 – 37.3	21 – 50	56
38.0 – 93.3	51 – 125	60
94.0 – 261	126 - 350	64

5.2. TOPOGRAFÍA.

El plano es parte fundamental de este trabajo, en el se trabajará simulando diferentes opciones de diseño del predio, y posteriormente para el diseño de la tubería de conducción, la cual abastecerá a un sistema de riego basado en tubería con compuertas, para ello se trabajo en el programa AutoCAD 2000, que sirvió como base para el dibujo e impresión del mismo.

Sabater, 2000 menciona que AutoCAD 2000 de Autodesk es una herramienta dentro del campo denominado CAD (Computer Aided Design) o Diseño Asistido por Ordenador. Para ser más exacto AutoCAD es un programa de diseño en CAD analítico (frente a otros sistemas de CAD paramétricos). La versatilidad del sistema lo ha convertido en un estándar general, sobretodo porque permite lo siguiente:

- Dibujar de una manera ágil, rápida y sencilla, con acabado perfecto y sin las desventajas que encontramos si se ha de hacer a mano.
- Permite intercambiar información no sólo por papel, sino mediante archivos, y esto representa una mejora en rapidez y efectividad a la hora de interpretar diseños, sobre todo en el campo de las tres dimensiones. Con herramientas para la gestión de proyectos podemos compartir información de manera eficaz e

inmediata. Esto es muy útil sobretodo en ensamblajes, contrastes de medidas, etc.

- Es importante en el acabado y la presentación de un proyecto o plano, ya que tiene herramientas para que en el documento en el papel sea perfecto, tanto en estética, como, lo más importante, en información, que ha de ser muy clara. Para esto tenemos herramientas de acotación, planos en 2D a partir de 3D, cajetines, textos, colores, etc., a parte de métodos de presentación fotorrealísticos.

5.3. MODELOS DE SIMULACIÓN MATEMÁTICA.

5.3.1. Hidráulica del Riego por Superficie.

Para poder comprender el análisis de la hidráulica del riego por superficie, es necesario entender ciertos conceptos relacionados básicamente con el avance del frente de agua, la infiltración y la recesión.

El movimiento de agua en el suelo y sobre el mismo, es un aspecto que siempre ha llamado la atención. Razón por la que se han realizado diversos estudios relacionados entre las características de infiltración y avance del riego, sin embargo pocos intentos se han realizado para determinar la relación de estas variables con respecto a la recesión del riego, esto trae como consecuencia que se dificulte el análisis completo de la hidráulica del riego por superficie desde un punto de vista teórico.

En la hidráulica del riego por superficie se consideran tres estados:

1. Un periodo de avance del frente de agua o periodo de humedecimiento.
2. Un periodo durante el cual la longitud total del conducto de riego se encuentra inundado y sujeto a infiltración
3. Un periodo de recesión durante el cual una longitud decreciente del conducto de riego se encuentra semi - inundada.

Para analizar estos tres estados se ha utilizado la simulación matemática en la hidráulica del riego por superficie, ya que puede conducir a mejorar la eficiencia y operación de los sistemas de riego, esta formulación permite unir variables para predecir su comportamiento y funcionamiento antes de implementarse en el campo.

El uso de modelos matemáticos se han generalizado en la actualidad como herramientas útiles en la predicción de respuestas a los sistemas de riego referente a los parámetros de diseño y operación del riego superficial. La gran cantidad de modelos que han sido desarrollados para analizar el comportamiento del flujo de agua en el riego por superficie han sido los propuestos por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos de Norteamérica, y se clasifican en:

- Balance de Volumen
- Onda Cinemática
- Hidrodinámico
- Cero – Inercia
- Otros

De los modelos propuestos el que se ha utilizado con mayor frecuencia en las últimas décadas es el Método de Balance de Volumen ya que las variables que utiliza son más fáciles de determinar para calcular y predecir el avance y la recesión del agua en el riego superficial. (Rojas y Ramírez, 1998).

Hernández (1995), menciona que para abordar el diseño de riego por superficie es necesario dar a conocer los principios que rigen el movimiento del agua sobre y dentro del suelo, visto éste como un cuerpo poroso.

5.3.2. Modelo Hidrodinámico Total.

El movimiento del agua en este contexto, es expresado por las ecuaciones de Saint Venant o de continuidad y de momento, las cuales representan el modelo hidrodinámico total, (Strelkolf y Katapodes, 1977).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} = 0 \quad (\text{Continuidad}) \quad (4)$$

$$\frac{1}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A^2g} \frac{\partial Q}{\partial x} + (1-F^2) \frac{\partial y}{\partial x} - (S_0 - S_f) = 0$$

(Momento) (5)

Donde:

A = Área de la sección transversal (m^2).

Q = Gasto de descarga por surco ($m^3\text{seg}^{-1}$).

t = Tiempo transcurrido (seg).

x = distancia desde el inicio del surco (m).

τ = tiempo de oportunidad de infiltración (m).

Z = infiltración acumulada (m).

g = Aceleración de la gravedad $9.81 \text{ m}\cdot\text{seg}^{-2}$.

F = número de Froude (Adim).

S_0 = pendiente del terreno ($m\cdot m^{-1}$).

S_f = pendiente de fricción ($m\cdot m^{-1}$).

y = Tirante hidráulico (m)

5.3.3. Modelo Cero Inercia.

El modelo hidrodinámico descrito, es a menudo costoso operar y puede ser difícil de utilizar debido a su complejidad. Una solución simplificada propuesta por Strelkoff y Katapodes (1977), es el modelo de cero inercia, que esta basado en la asunción que los términos de la inercia y la aceleración de la gravedad en la ecuación de momento serían insignificativos en la mayoría las condiciones del riego superficial, las dos ecuaciones para el modelo de cero inercia son:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} = 0 \quad (\text{Continuidad}) \quad (6)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f \quad (\text{Momento}) \quad (7)$$

5.3.4. Modelo Onda Cinemática.

Si se considera que en riego por superficie, la ecuación de momentum es despreciable, el modelo resultante, y expresado únicamente por la ecuación de continuidad, constituye el modelo de "Onda Cinemática" (Hernández, 1995), el cual consiste en la ecuación 4.

5.3.5. Ecuaciones de infiltración.

En riego por superficie, el factor más importante, pero a la vez más difícil de determinar o predecir con cierta veracidad, es la infiltración. Por lo anterior, a esta característica de los suelos, se le ha puesto mucha atención desde un punto de vista teórico. En la actualidad, existen muchas ecuaciones, nombradas que intentan describir a la infiltración, como: las ecuaciones de Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Horton, Philip y Green-Ampt. La ecuación que se escoja, deberá tener al menos las siguientes dos características: (1) los parámetros que la componen deberán ser definidos durante el riego; y (2) la ecuación deberá de permitir la solución de la ecuación de balance volumétrico a nivel de campo (García, 2000).

$$Z = Kt_0^a + f_0 t_0 \quad (8)$$

Donde:

Z = Infiltración acumulada ($m^3/min/m$)

t_0 = Tiempo de oportunidad en (min)

k y a = Coeficientes empíricos.

f_0 = Infiltración básica ($m^3/m/m/min$)

La mayoría de los procedimientos para diseñar sistemas de riego por superficie, utilizan la Ec. 8, generalmente no es necesario que la ecuación de infiltración tenga los dos términos: de infiltración básica y el de agrietamiento en forma simultánea.

Se han hecho varios intentos para describir k y a como una función del tipo de suelo; uno de los primeros en hacer esto, fue el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (1974), seguido por otro esfuerzo hecho en la Universidad del Estado de Utah (Walker, 1989) y Merriam y Clemmens (1985). Con el fin de simular tanto el riego continuo como el riego por pulsos, un nuevo grupo de valores de estos parámetros se han desarrollado como parte del Modelo SIRMOD II. El Cuadro 3 (Ver Anexos), muestra los valores de a , k y f_0 de la Ecuación de Kostiaikov-Lewis, para diferentes tipos de suelos, como una función del número de familia del NRCS. En la actualidad no existen valores de c , disponibles, sin embargo algunas investigaciones se están desarrollando al respecto (McClymont y Smith, 1996).

Uno de los aspectos más importantes para una ecuación de infiltración, es el uso de la solución del balance volumétrico para estimar el avance del agua sobre la superficie del terreno. La Ec. 8 tiene la ventaja que puede ser evaluada en el campo a través de procedimientos fáciles ya establecidos.

5.3.6. CALCULO DEL BALANCE DE VOLUMEN.

El calculo más importante del balance volumétrico en riego por superficie, ocurre durante la fase de avance. Para efectuar tal calculo, se asume una descripción matemática de la sección hidráulica del agua en el campo, de la infiltración (Ec. 8) y de la trayectoria de avance.

La mayoría de las metodologías de diseño de riego por superficie, utilizan la ecuación de Manning para el cálculo del área de flujo, la ecuación 8 para la infiltración,

y una función potencial para describir la trayectoria de avance. Walker y Skogerboe (1987), Walker (1989) y Clemmens et al (1998) detallan este análisis. Finalmente, la ecuación de balance volumétrico es como sigue:

$$Q_{0t} = \sigma_y A_0 X + \sigma_z K t^a X + (f_0 t X) / (1 - r) \quad (9)$$

Donde:

Q_{0t} = Caudal de entrada por unidad de ancho en ($m^3 \cdot \text{seg}^{-1} \cdot m$).

t = Tiempo de riego (seg).

σ_y = Factor de forma del agua en la superficie, (0.7 a 0.8).

A_0 = Sección hidráulica a la entrada en (m^2).

X = Distancia de recorrido del agua en (m).

σ_z = Factor de la forma del perfil de humedecimiento, el cual describe la lámina de riego promedio infiltrada.

r = Exponente de la ecuación de avance

La ecuación 9 se resuelve para cualquier distancia y así definir el balance volumétrico correspondiente durante la fase de avance. En este procedimiento, quizás lo más importante es la distancia cubierta por el agua, desde la entrada hasta la punta del avance, las melgas son evaluadas por unidad de ancho. (García, 2000).

5.4. SOFTWARE DE SIMULACIÓN DEL RIEGO POR SUPERFICIE.

5.4.1. Software de Simulación RIGRAV.

El modelo de simulación RIGRAV, (Alvarado et al, 2001), generado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua "IMTA" utiliza la función de infiltración de Green-Ampt, (1911).

$$I = K_s t + \lambda \ln \left(1 + \frac{I}{\lambda} \right) \quad (10)$$

Donde:

I = velocidad de infiltración ($m^3/min/m$)

$\lambda = (h + h_f)(\theta_s - \theta_0)$

K_s = conductividad hidráulica a saturación (min/m^3)

θ_0 = contenido de humedad inicial (%)

θ_s = contenido de humedad final (%)

h = Tirante de agua en el surco (m)

h_f = Succión en el frente de humedecimiento (m)

Este modelo se basa en simplificaciones de las ecuaciones de Saint-Venant y Richards, una de estas simplificaciones consiste en presentar la ecuación de la conservación de la masa de manera integral, que se escribe:

$$Q_g t = \int_0^S Ah(x,t) dx + \int_0^S Ai(x,t) dx \quad (11)$$

donde:

S = posición del frente de avance en el tiempo (m)

t = tiempo (seg)

L = longitud del surco, medida a partir de la cabecera (m)

Ah = área hidráulica de la sección transversal (m^2)

Ai = área de la sección transversal del escurrimiento subterráneo (m^2)

Si se considera que el área hidráulica del escurrimiento superficial es constante en el espacio y en el tiempo, y que el suelo es homogéneo, entonces la ecuación (11) se escribe:

$$Q_g t = \overline{Ah} S(t) + \int_0^S Ai(t_0) dx \quad (12)$$

donde:

\overline{Ah} = Valor medio del área hidráulica

t_0 = Tiempo de infiltración definido como: $t_0 = t - tx$

tx = tiempo que tarda en llegar el avance a un punto situado a una distancia x

Si dividimos la ecuación (12) entre el perímetro mojado tenemos:

$$Q_t = \overline{Rh}S(t) + \int_0^S Ri(t_0)dx \quad (13)$$

Donde:

\overline{Rh} = Radio hidráulico medio del escurrimiento superficial (m)

Ri = Lámina infiltrada media en el perímetro mojado (m)

5.4.2. Software de Simulación SIRMOD.

El modelo de simulación SIRMOD II (Walker, et al 1987), fue creado por Utah State University en los Estados Unidos de Norteamérica. En el modelo se presentan tres opciones de solución a las ecuaciones de Saint-Venant (4 y 5) (1871), siendo: el modelo hidrodinámico total, de cero inercia y el de la onda cinemática. (Alvarado et al, 2001).

El modelo de simulación SIRMOD II, (Walker, 1985), provee capacidad analítica con respecto a todas las variables que afectan el diseño y el manejo del riego superficial. No simplifica ninguna de las variables pero a cambio simula la respuesta del sistema a los valores que se le introducen a cada variable. Se identifica así, un óptimo diseño y manejo del riego.

Walker y Skogerboe, 1987. Comentan que a través del Modelo SIRMOD II, se identifican rápidamente las modificaciones y/o ajustes que el productor o regador tiene que realizar para mejorar la eficiencia de aplicación del agua. Además comentan que dados los grandes problemas de demanda de agua por los diferentes usuarios y la baja disponibilidad del recurso, aunado a los problemas de tipo económico que tiene el mundo hoy, el riego superficial continuará teniendo una mayor atención por los profesionistas y agricultores, para mejorar cada día las prácticas de riego parcelario.

El modelo SIRMOD II es un programa que sirve para simular la hidráulica del riego por superficie a nivel parcelario, seleccionar el tamaño de la parcela, los parámetros que maximizan la eficiencia de aplicación y la solución al problema. Esto último lo hace considerando que el problema, es un problema inverso, y utilizando el método de dos puntos, lo cual permite el cálculo de los parámetros de infiltración partiendo de la información de avance (Walker, 1989).

5.5. DISEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO POR COMPUERTAS.

Según Delgado, 2000 se determinan las pérdidas de carga para una longitud crítica de diseño, o sea la más larga, proponiendo un diámetro, donde dichas pérdidas sean menores a 4 m.

5.5.1. Diámetro de Tubería Ciega (Conducción).

Se determinan las pérdidas de carga para una longitud crítica de diseño, o sea la más larga, proponiendo un diámetro, donde dichas pérdidas sean menores a 4 m.

Para calcular las pérdidas de carga en tuberías de conducción, se emplea la siguiente ecuación (Jaquez et al 1978):

$$hf = \frac{10.29 * Q^2 * n^2 * L}{D^{16/3}} \quad (17)$$

Donde:

hf = Pérdidas de carga (m)

Q = Gasto parcelario (m³/seg)

n = Coeficiente de rugosidad = 0.0079 (tubería lisa).

L = Longitud crítica de diseño (m)

D = Diámetro propuesto (m)

Sustituyendo dichos valores en la ecuación, se obtiene como resultado las pérdidas de carga en metros para un diámetro propuesto.

5.5.2. Diámetro de Tubería con Compuertas.

5.5.2.1. Modelo hidráulico de la compuerta.

El comportamiento de una compuerta es el siguiente:

$$q = KH^x \quad (18)$$

Donde:

q = Gasto (lps).

K, x = Constantes.

H = Cargas (m).

Para obtener los valores de K y x de un determinado emisor, resulta sencillo si se cuenta con una tabulación de aforo.

$$x = \frac{\text{Ln}\left(\frac{q_i}{q_f}\right)}{\text{Ln}\left(\frac{H_i}{H_f}\right)} \quad (19)$$

Donde:

q_i = Gasto al inicio (lps)

q_f = Gasto al final (lps)

H_i = Carga inicio (m)

H_f = Carga final (m)

Una vez obtenida "x", el valor de K se despeja resultando:

$$K = \frac{q_i}{H_i^x} \quad (20)$$

5.5.2.2. Pérdida de carga permisible.

Se establece una variación máxima entre gasto de las compuertas más favorecidas (q_o) por la presión (cercanas a la bomba) y el gasto de las compuertas (q_u) menos favorecidas (alejadas de la bomba) de un 10%. Es decir:

$$q_u = 0.9q_o \quad (21)$$

Sustituyendo la ecuación de gasto de cada compuerta:

$$H_u = 0.9^{1/x} H_o \quad (22)$$

Donde H_u es la carga de las últimas compuertas y H_o es la carga de las compuertas más favorecidas. La diferencia de ambas cargas ($H_o - H_u$) será la pérdida de carga que permitirá una variación de un 10% del gasto entre las compuertas más favorecidas y las menos favorecidas, es decir:

$$H_{per} = H_o(1 - 0.9^{1/x}) \quad (23)$$

5.5.2.3. Determinación del gasto por compuerta.

Conociendo el ancho entre bordos, el gasto parcelario y la separación entre compuertas, se obtiene el gasto por compuerta:

$$Q_c = \frac{Q_p}{N_c} \quad (24)$$

Donde:

Q_c = Gasto por Compuerta (lps).

Q_p = Gasto parcelario (lps).

N_c = Número de Compuertas.

5.5.2.4. Determinación del diámetro de la tubería.

La ecuación para calcular el diámetro de la tubería con compuertas parte de la fórmula de Jaquez y Ramírez (1980).

$$N_c = \left[\frac{H_{per}}{\left(\frac{10.29n^2 S q^{-2}}{D^{16/3}} \right) \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2N} + \frac{1}{6N^2} \right)} \right]^{1/3} \quad (25)$$

Como ya se conoce el valor de "N", no es necesario hacer los tanteos, por lo tanto se despeja "D" (diámetro) de la ecuación quedando de la siguiente manera:

$$D = \left[\left(\frac{10.29n^2 L q^2}{H_{per}} \right) * CSM \right]^{3/16} \quad (26)$$

$$CSM = \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2N} + \frac{1}{6N^2} \right) \quad (27)$$

Donde:

L = Longitud de tubería crítica de diseño (m).

q = Gasto por Compuerta (m³/seg)

H_{per} = Pérdida de carga permisible (m).

CSM = Coeficiente de salidas múltiples (Adimensional)

Sustituyendo dichos valores en la ecuación, se tiene como resultado el diámetro de tubería con compuertas que puede operar el sistema de riego a baja presión.

VI. MATERIALES Y METODOS

6.1. Características del Área de Estudio.

6.1.1. Localización Geográfica.

El área de estudio se encuentra ubicada en municipio de Nazas, Dgo.; a un costado del ejido San Pedro del Tongo. La pequeña propiedad Santa Mónica II esta ubicada en la longitud 103° 59' 31", con una Latitud de 25° 18' 23" y una altitud de 1300 msnm.

6.1.2 Clima.

El clima característico del municipio es tanto el templado subhúmedo como el seco o estepario. La temperatura media anual es de 20.8°C. La precipitación media anual es de 300 milímetros. La evaporación media anual es de 1,965.50 milímetros. La primera helada se registra en el mes de octubre y la última en el mes de marzo. Aunque existen testimonios de fenómenos naturales que registran heladas hasta en el mes de abril sin ser comunes provocando con esto una catástrofe en los cultivos agrícolas. (Centro Nacional de Desarrollo Municipal, Gobierno del Estado de Durango, 1999).

6.1.3 Características y Uso del Suelo.

La región está constituida por suelos de tipo fluvisol, luvisol, feozem; la mayor parte del suelo tiene uso agrícola tanto de riego como de temporal y las regiones montañosas son altamente productoras de orégano. La tenencia de la tierra corresponde en un gran porcentaje al ejido y una mínima parte es propiedad privada (Centro Nacional de Desarrollo Municipal, Gobierno del Estado de Durango, 1999).

6.1.4. Infraestructura, Superficie y Patrón de Cultivo.

La pequeña propiedad cuenta con 59.66 ha, de las cuales se explotan 10.46 ha de nogal y alfalfa, como infraestructura de riego, el predio tiene un sistema de riego con tubería de compuertas, el cual es abastecido de un pozo profundo con un gasto total de 39 lps, otra fuente de agua es el derecho de agua de río.

6.2 METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este caso, consiste en realizar un análisis de diagnóstico que implica evaluar las condiciones actuales del uso y manejo del agua, con dicho análisis se obtienen propiedades, características y parámetros de las condiciones de operación del riego. Posterior al diagnóstico, se procede a la etapa de diseño, la cual contiene el análisis de diferentes alternativas de solución con el fin de mejorar o incrementar las eficiencias de riego, para obtener una mejor opción se requiere intensificar el trabajo basado en el análisis de escenarios. La siguiente fase consiste en la implementación de la mejor alternativa, y ésta se debe supervisar en el campo todo el trabajo de instalación, operación, adecuaciones y/o modificaciones que se deben realizar sobre el terreno. La última etapa contiene la información referente a evaluar los resultados de la nueva forma de trabajar, y de comparar las eficiencias de uso y manejo del agua anteriores con las implementadas y así verificar el logro de los objetivos o el incremento en la productividad.

6.2.1. Análisis de Diagnóstico.

6.2.1.1. Plano Topográfico.

Para conocer la superficie del predio se procedió a levantar el plano topográfico, así como señalar las condiciones en que se encuentra (delimitación de tablas, ubicación del pozo de bombeo, infraestructura hidroagrícola) en la cual se utilizó una estación total Nikon DTM 820 y tres prismas.

Para el proceso de los datos levantados en campo, se utilizó el programa Prolink, con el que se trasladan los datos de la estación total a la PC. Después se procesan en el software Autocad 2000.

6.2.1.2. Curvas a nivel.

Las curvas a nivel fueron una herramienta muy importante para el trazo, dimensionamiento y dirección de las tablas.

En obtención de los datos para conocer las curvas a nivel, se cuadrículó el predio en cuadros de 30 por 30 metros, y con una estación total se tomaron los datos, en su procesamiento de los datos levantados se requirió del programa Winsurf, este software tiene la capacidad de interpolar, extrapolar y graficar las curvas de nivel, en dos ó tres dimensiones

6.2.1.3. Eficiencia Electromecánica del equipo de bombeo del pozo profundo.

Conocer la eficiencia electromecánica de la bomba es indispensable tanto para conocer el funcionamiento del equipo, así como para saber el gasto que extrae la bomba.

Para calcular la eficiencia electromecánica se necesitó conocer el nivel dinámico, el cual fue determinado mediante una sonda eléctrica, otro dato que se debe conocer es el gasto que extrae la bomba, éste fue obtenido por medio del aforo utilizando un tambo de volúmen conocido y con un cronómetro tomando el tiempo de llenado, haciendo 10 repeticiones para reducir el error.

Otros parámetros indispensables para conocer la eficiencia electromecánica son voltaje, amperaje, factor de potencia; que fueron obtenidos por medio de un medidor de potencia multifuncional llamado TRMS.

Todos los datos que se tomaron en campo son capturados en un programa que se realizó en el PROTTIR, el cual calcula la eficiencia electromecánica, así como la potencia que está consumiendo el equipo de bombeo.

6.2.1.4. Prueba de Avance.

Para realizar la prueba de avance es necesario conocer lo siguiente:

1.- Seleccionar una melga en la cual se debe de procurar que las características del suelos sean homogéneas y representativas del tipo del suelo.

2.- Determinación de la pendiente.

Una vez seleccionada la melga se le mide el largo y ancho, se deben colocar estacas a cada 20 m, para formar estaciones a lo largo de la melga, y obtener las lecturas con un nivel fijo de cada estación, para calcular la pendiente promedio y su variación a lo largo de la melga mediante una regresión lineal.

3.- Determinación del gasto aplicado.

Para conocer el gasto aplicado se utilizó el método de aforo volumétrico, que consiste en aforar cada compuerta, con un recipiente de volumen conocido y con un cronómetro se obtiene el tiempo de llenado, haciendo una simple división del volumen (litros) entre el tiempo (seg), obtendremos el gasto por compuerta en litros por segundo.

4.- Tiempo de avance.

Con un cronómetro se registra el tiempo en el instante que se abren la compuertas sobre la melga que se va a regar (tiempo de inicio), después se toma el tiempo que tarda en llegar a cada estación, hasta que llegue a la ultima estación, y por último se registra el tiempo de corte. El tiempo de avance es hasta que el agua cubre el total de la melga.

6.2.2. Corrida de SIRMOD II.

Para ejecutar el programa Sirmod II, se procede con los siguientes pasos:

1. Se da doble clic en **Sirmod II. Exe.**
2. Posteriormente se selecciona el idioma en el cual se va a trabajar (Figura 1).

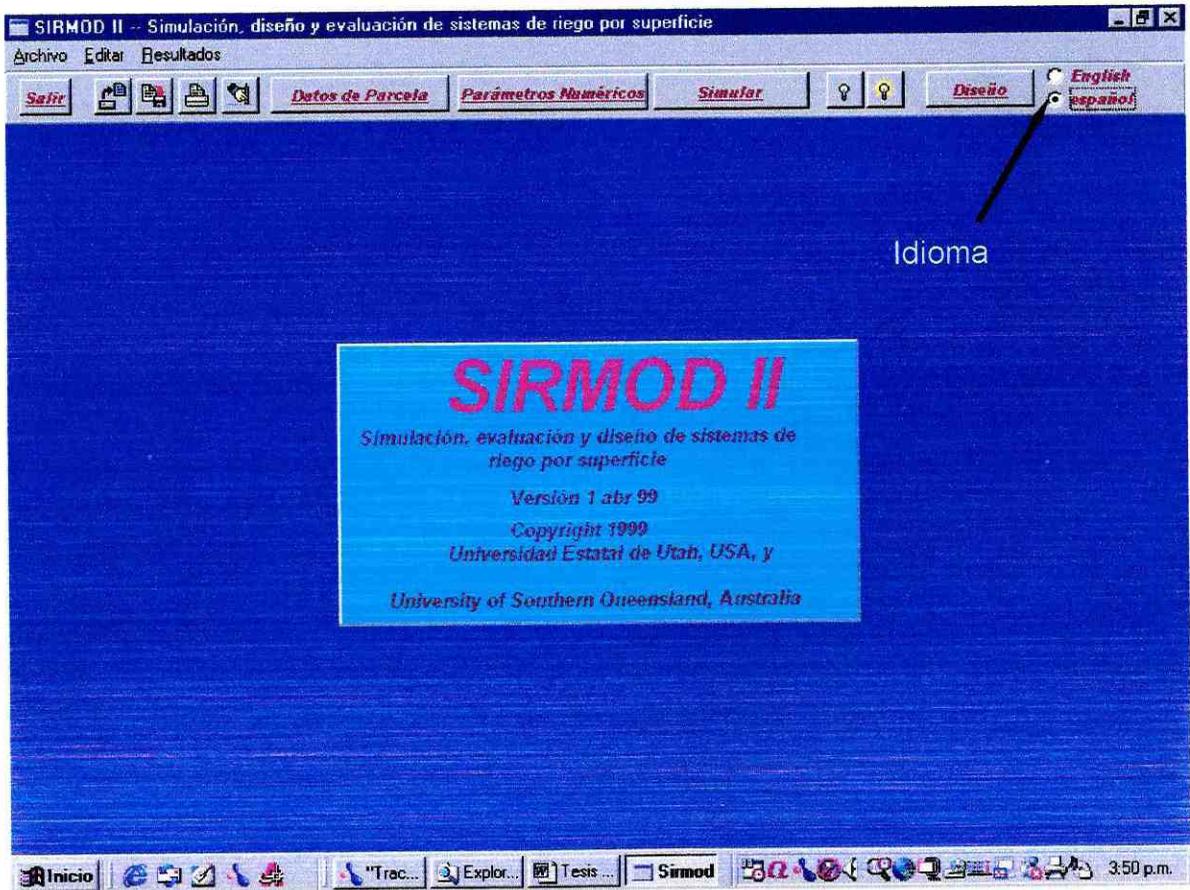


Figura 1. Ventana de idioma de trabajo del modelo Sirmod II.

3. Después se da clic en Datos de Parcela y se abre la pestaña Rugosidad y Topografía, donde se capturan la rugosidad de Manning (0.11 a 0.28) según Walker, 1989. La pendiente del terreno en (m/m), ancho y largo de la melga o surco (Figura 2).

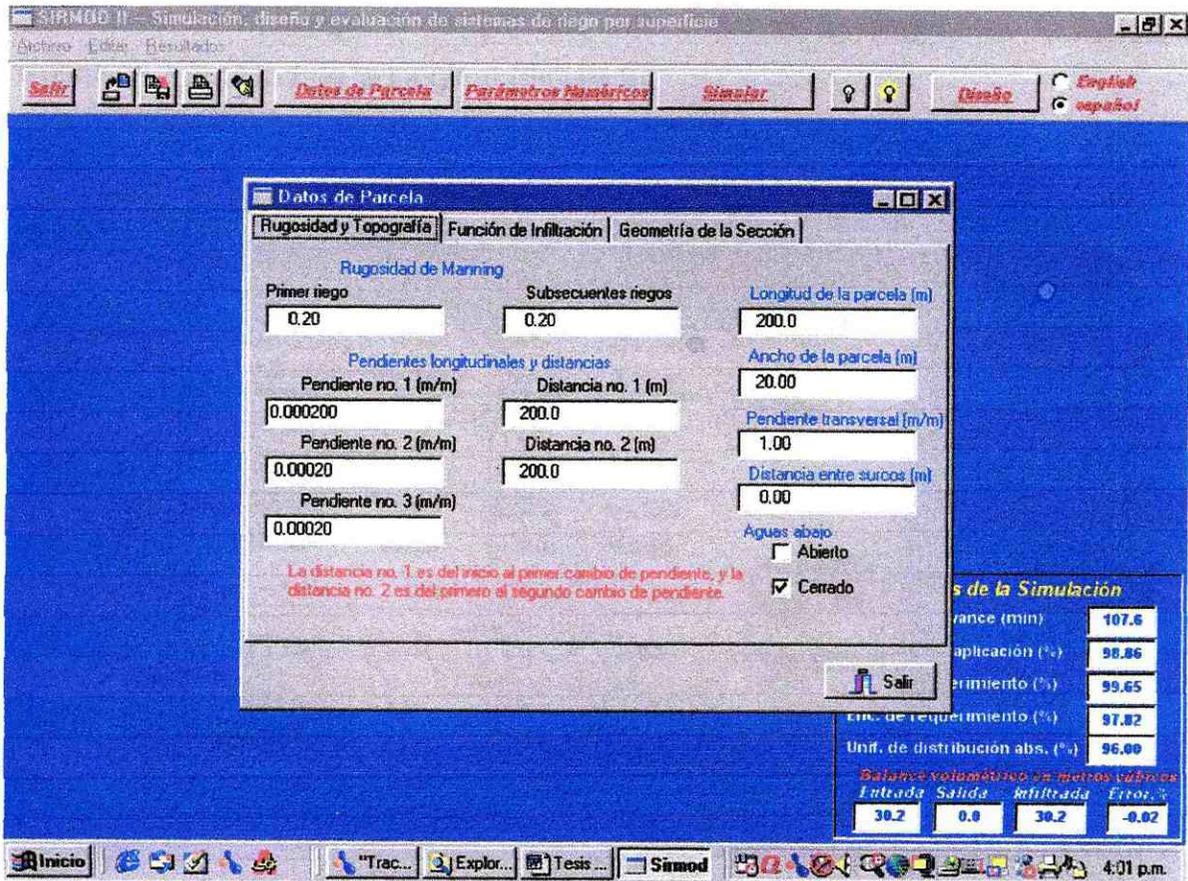


Figura 2. Ventana de características de trabajo para melga o surco.

4. Se abre la pestaña "Función de Infiltración" en la cual se insertan los parámetros hidráulicos del suelo como los son a , k y f_0 . Otro datos que se capturan en este apartado son la lámina requerida, el gasto unitario, el tiempo que tarda el riego en llegar al fin de la melga, el tiempo que a la mitad de la longitud de la melga, así la dimensión a la mitad de la longitud (Figura 3).

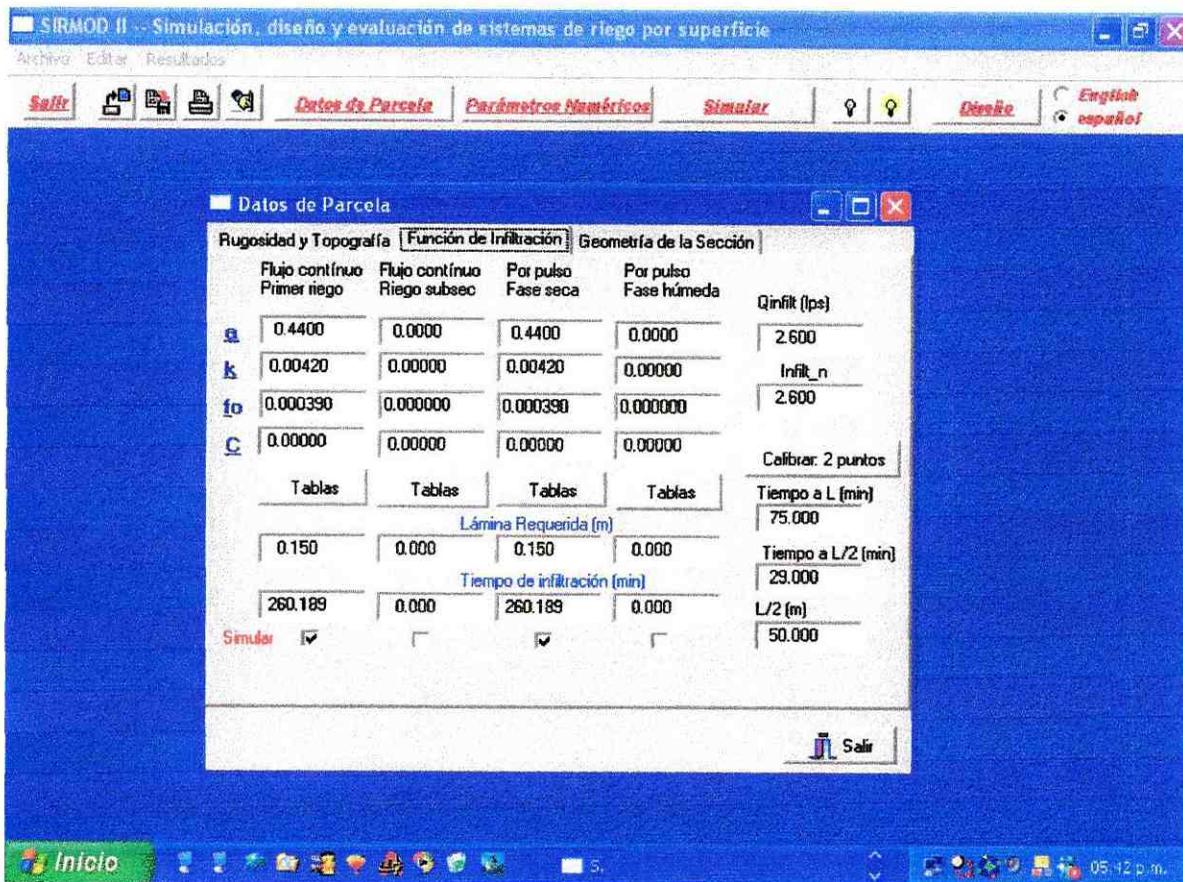


Figura 3. Ventana de parámetros hidráulicos de melga o surco.

5. A continuación se da clic en Parámetros Numéricos, en donde seleccionamos el modelo para simular, el criterio para el tiempo de corte, régimen de caudal entrando, el gasto unitario y tiempo de corte.

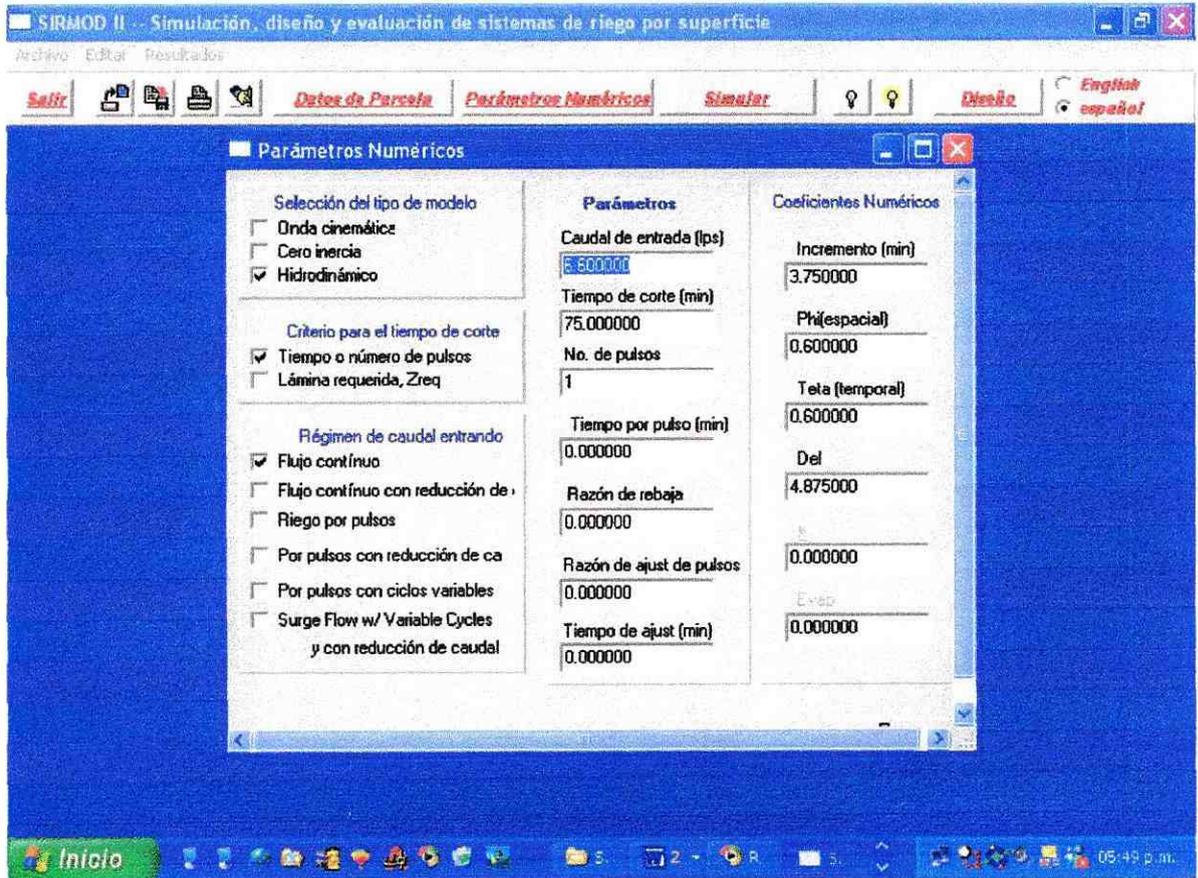


Figura 4. Ventana de parámetros numéricos.

6. Una vez capturada toda la información que **SIRMOD II** solicita, se da clic en simular, en donde nos mostrará la simulación del avance, retención del agua y las eficiencias de riego (Figura 5).

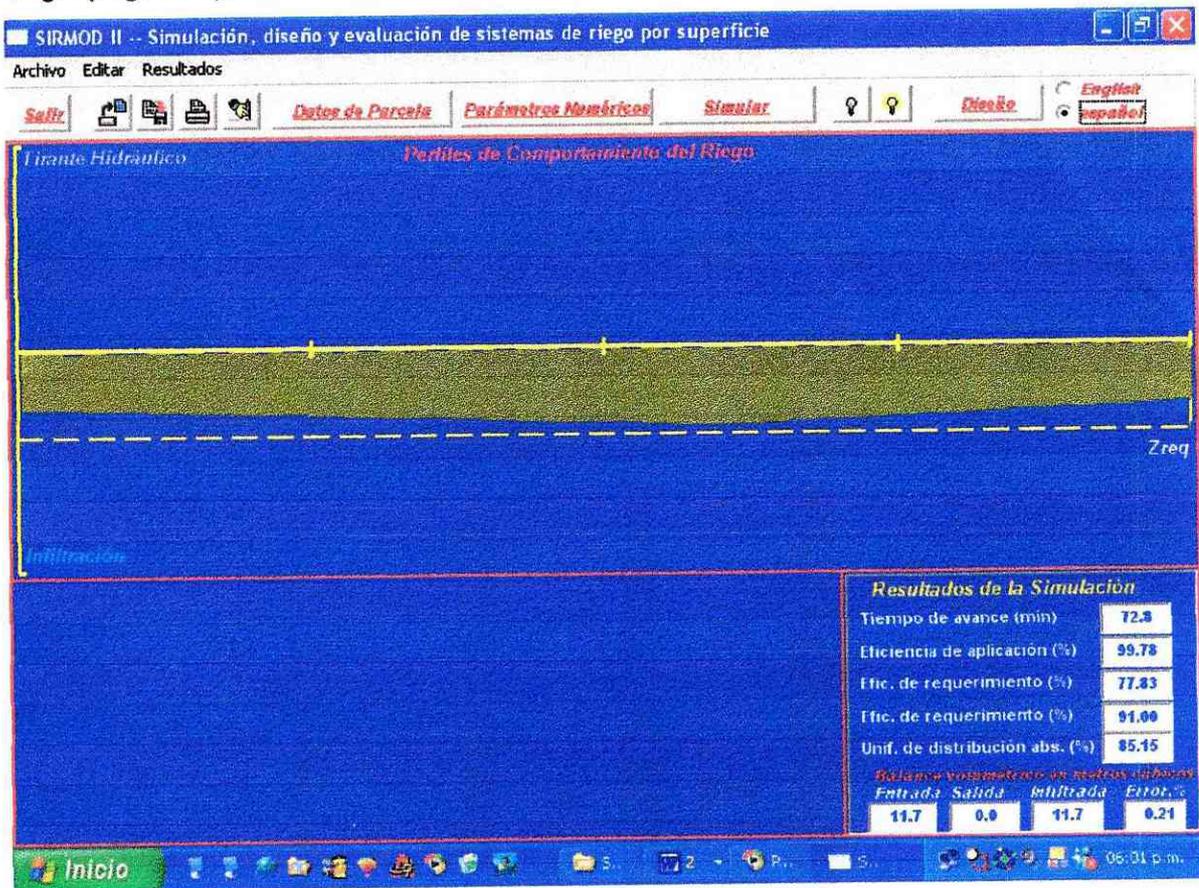


Figura 5. Ventana de comportamiento del riego.

7. Para realizar el ajuste del programa a lo tomado en campo, en el menú se abre la ventana "resultados" y elegimos la opción tabla, posteriormente se da clic en ver y se seleccionamos perfiles de avance y recesión, los cuales deben de coincidir con lo tomado en campo, en caso de que éstos no coincidan, se modifican los parámetros hidráulicos del suelo y la rugosidad, así por aproximaciones sucesivas se logra el ajuste entre los datos de campo y los valores de la características hidráulicas del suelo (Figura 6.)



SIRMOD Avance/Recesión/Infiltración				
Nudo	Distancia de la cabecera (m)	Tiempo de Avance (min)	Tiempo de Recesión (min)	Infiltrada Tirante (m)
0	0.00	0.00	153.75	0.09904
1	11.22	3.75	172.50	0.10518
2	18.20	7.50	183.75	0.10888
3	24.76	11.25	195.00	0.11257
4	31.02	15.00	206.25	0.11700
5	36.95	18.75	217.50	0.12078
6	42.63	22.50	228.75	0.12352
7	48.11	26.25	240.00	0.12875
8	53.42	30.00	247.50	0.13001
9	58.58	33.75	258.75	0.13389
10	63.60	37.50	258.75	0.13147
11	68.05	41.25	255.00	0.12787
12	72.41	45.00	251.25	0.12425
13	76.59	48.75	247.50	0.12062
14	80.58	52.50	243.75	0.11697
15	84.42	56.25	240.00	0.11330
16	88.12	60.00	236.25	0.10962
17	91.69	63.75	236.25	0.10777
18	95.15	67.50	232.50	0.10406
19	98.50	71.25	228.75	0.10033
20	100.00	72.75	228.75	0.09958



Figura 6. Ventana de perfiles de avance y recesión.

6.2.3. Diseño de alternativas de solución.

En esta etapa se procesan y se analizan los datos e información levantada en campo en SIRMOD II, con la cual se realizarán las alternativas tecnológicas para un mejor uso y manejo de agua.

6.2.4 Diseño del sistema de riego por compuertas

La conducción.

Para el diseño del sistema de riego por compuertas, se determinan las pérdidas de carga para la longitud más crítica, proponiendo diámetros y utilizando el gasto de diseño, dichas pérdidas no deberán excederse de 4 m.

Posteriormente se determina el diámetro de la tubería con compuertas mediante la ecuación 25 y el gasto de las compuertas es determinado por el gasto total dividido entre el número de compuertas.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. ANÁLISIS DE ESCENARIOS

De acuerdo al análisis de escenarios basados en un modelo de simulación, se generó el mejor escenario para alcanzar la máxima eficiencia de riego y considerando el gasto que proporciona el estanque resultó lo siguiente:

- I. Se recomienda uniformizar la pendiente a 2 cm/100 m.
- II. Uniformizar la melgas a 142 m de largo.
- III. Estandarizar el ancho de melga a 20 m.
- IV. Levantar bordos de operación (cabecera) para la tubería con compuertas, para que dicha tubería no trabaje ahogada.
- V. Aplicar el riego en un frente (una melga).
- VI. El criterio de corte de riego a seguir de una hora por tendida.

7.2. DISEÑO DE RIEGO CON COMPUERTAS.

Basado en el diseño de riego por superficie en donde se toma en cuenta el ancho de melga para el diseño del diámetro de la tubería el cual va a conducir un gasto parcelario de 120 litros por segundo, en donde se propuso un diámetro de 12 pulgadas y la longitud crítica es de 1250 m, esto nos ocasiona una perdida de carga de 8.17 m; el desnivel que existe desde la descarga del estanque hasta la ultima válvula es de 9.55 m, lo cual nos garantiza que en la ultima válvula fluirán los 120 litros por segundo.

Es necesario mencionar que el sistema de riego con compuertas va a operar con la carga hidráulica del estanque, por lo que no utilizará rebombeo, lo cual repercute en un ahorro de energía para el productor.

7.3. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA.

En el cuadro 2 se muestra el comparativo antes y después de aplicar las alternativas de mejoramiento.

Cuadro 2 Impacto del análisis de escenarios.

Parámetros	Antes	Después
Sup. Reg./día (Ha/día)	0.4	2.3
Turnos de riego (hr)	24	8
Eficiencia de riego	64	92
Sup. Sembrada	8	53
Rendimiento (Ton/Ha)	32	45
Consumo de energía (kw-hr)/ha	2202	498

De acuerdo a la información del cuadro anterior se puede observar un impacto en el incremento de la eficiencia de riego global a nivel parcelario y de producción del cultivo de un 28 por ciento (de 64 a 92 por ciento y de 32 a 45 ton/ha, respectivamente), esto es debido a que el perfil de humedecimiento ocasionado por el modelo presentó un comportamiento de riego más homogéneo en comparación con el manejo tradicional.

El avance de riego a nivel parcelario se incremento de 0.4 ha/día a 2.3 ha/día, esto equivale a un incremento del 575 por ciento, lo cual indica que el tandeo de riego se reducirá evitando estrés del cultivo en periodos de máxima demanda como lo son los meses de mayo, junio y julio.

El consumo de energía por hectárea disminuyó en un 77 por ciento, esto se debe a que se obtuvo una mejor distribución del agua y un mayor avance del riego.

VIII. CONCLUSIONES

Mediante la utilización de un modelo de simulación de riego fue posible aumentar la eficiencia global a nivel parcelario y la productividad del cultivo (ton/ha) en un 28 por ciento respectivamente, así como disminuir el consumo de energía eléctrica hasta en un 77 por ciento (kw-h)/ha.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado M. P., Mojarro D. F., González T. J. 2001. Calibración in Situ de Dos Modelos de Simulación para el Diseño de Riego Superficial en el D.R. 034 Zacatecas. Página de Internet <http://www.ciu.reduaz.mx/investigacion/Ingenieria/TI06.htm>.
- Arriaga C. Sánchez E., Espinoza A., Velásquez L. Desarrollo Participativo de Tecnología: El Caso de Forrajes en Sistemas de Producción Campesinos en el Estado de México. Pagina de Internet: <http://serpiente.dgsca.unam.mx/rer/carriaga1.html>.
- Centro Nacional de Desarrollo Municipal del Gobierno del Estado de Durango. 1999. Enciclopedia de los Municipios de México "Nazas". Pagina de Internet <http://www.e-local.gob.mx/enciclo/durango/mpios/10015a.htm>.
- Clemmens A. J., W. R. Walker, D. D. Fangmeir and L. A. Hardy. 1998. "Design of surface systems". Chapter 14 in: Design and Operation of farm Irrigation Systems. ASAE. Monograph Number 3 (2nd Edition), R. L. Elliott, ed. St. Joseph, Michigan.
- CNA . 1990. Uso Eficiente del Agua y la Energía Hidroeléctrica. Página de Internet <http://www.cna.gob.mx/portal/switch.asp?param=3071170>.
- CNA . 1990. Uso Pleno de la Infraestructura Hidroagrícola. Página de Internet <http://www.cna.gob.mx/portal/switch.asp?param=3071180>.
- Delgado R. G., Ramírez C. C., González Q. J., 2000. Metodología de Diseño de Sistemas de Riego DE Tuberías con Compuertas. Tesis de Ingeniero Agrónomo en Irrigación. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna.

García R. M. 2000. Análisis de Escenarios en Riego por Superficie en Melgas Basado en un Modelo de Simulación. Tesis de Ingeniero Agrónomo en Irrigación. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna.

Hernández Y. C. 1995. Apuntes del curso de Riego Superficial. ITA 10. Coahuila, México.

McClymont D. J. and R. J. Smith. 1996. A infiltration Parameters from Optimization on Furrow Irrigation Advance Data. Irrigation Science.

Rojas P. L., Ramírez, R. L. 1998. Sistemas de Riego por Superficie. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Sabater . 2000. Guia de AutoCad 2000. Pagina de Internet: <http://www.autodesk.com/>.

Secretaria de Energía. 1995. Norma Oficial Mexicana NOM-006-ENER-1995, Eficiencia Electromecánica en Sistemas de Bombeo para Pozo Profundo en Operación.- Límites y Métodos de Prueba. Diario Oficial del día Jueves 9 de Noviembre de 1995.

Walker W. R. and Skogerboe V. G. 1987. Surface Irrigation: "Theory and Practice". Prentice -Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

Walker R. W. SIRMOD II. 1999. Surface Irrigation Simulation, Evaluation and Design User's Guide and Technical Documentation. Department of Biological and Irrigation Engineering Utah State University. Logan Uthah.

Walker W. R. 1989. Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems. FAO. Irrigation and Drainage Paper 45, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

ANEXOS

Cuadro a.1. Valores de “a”, “k” y “fo” para la Ecuación de Kostiakov-Lewis como una Función del Número de la Familia de Curva, NRCS, para Riego Continúo y Riego por Pulsos, (primer riego y riegos subsecuentes).

Número de Familia, NRCS	Tipo de Suelo	a	k m ³ /min ^a	fo m ³ /min	c m ³
0.01	Muy Arcilloso	0.200	0.0044	0.000011	0.00
0.05	Arcilloso	0.258	0.0043	0.000022	0.00
0.10	Arcilloso	0.317	0.0048	0.000035	0.00
0.15	Arcilla Ligera	0.357	0.0036	0.000046	0.00
0.20	Franco Arcilloso	0.388	0.0035	0.000057	0.00
0.25	Franco Arcilloso	0.415	0.0034	0.000068	0.00
0.30	Franco Arcilloso	0.437	0.0033	0.000078	0.00
0.35	Limoso	0.457	0.0033	0.000088	0.00
0.40	Limoso	0.474	0.0032	0.000098	0.00
0.45	Franco Limoso	0.490	0.0032	0.000107	0.00
0.50	Franco Limoso	0.504	0.0032	0.000117	0.00
0.60	Franco Limoso	0.529	0.0032	0.000136	0.00
0.70	Franco Limoso	0.550	0.0032	0.000155	0.00
0.80	Franco Arenoso	0.568	0.0032	0.000174	0.00
0.90	Franco Arenoso	0.584	0.0032	0.000193	0.00
1.00	Franco Arenoso	0.598	0.0033	0.000212	0.00
1.50	Arenoso	0.642	0.0034	0.000280	0.00
2.00	Arenoso	0.672	0.0036	0.000325	0.00
4.00	Arenoso	0.750	0.0042	0.000390	0.00

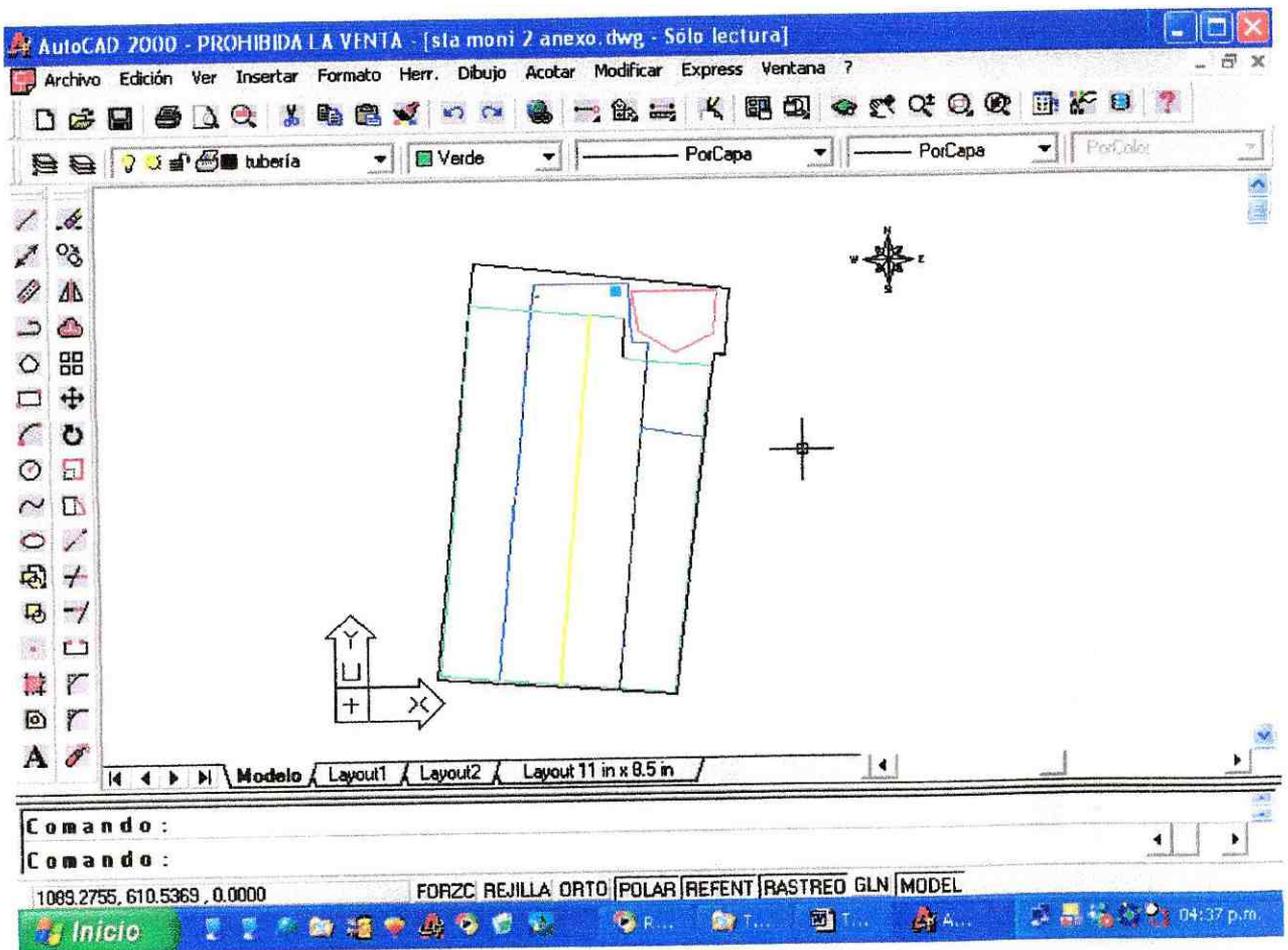


Figura a.1. Plano del terreno en Auto Cad 2000.

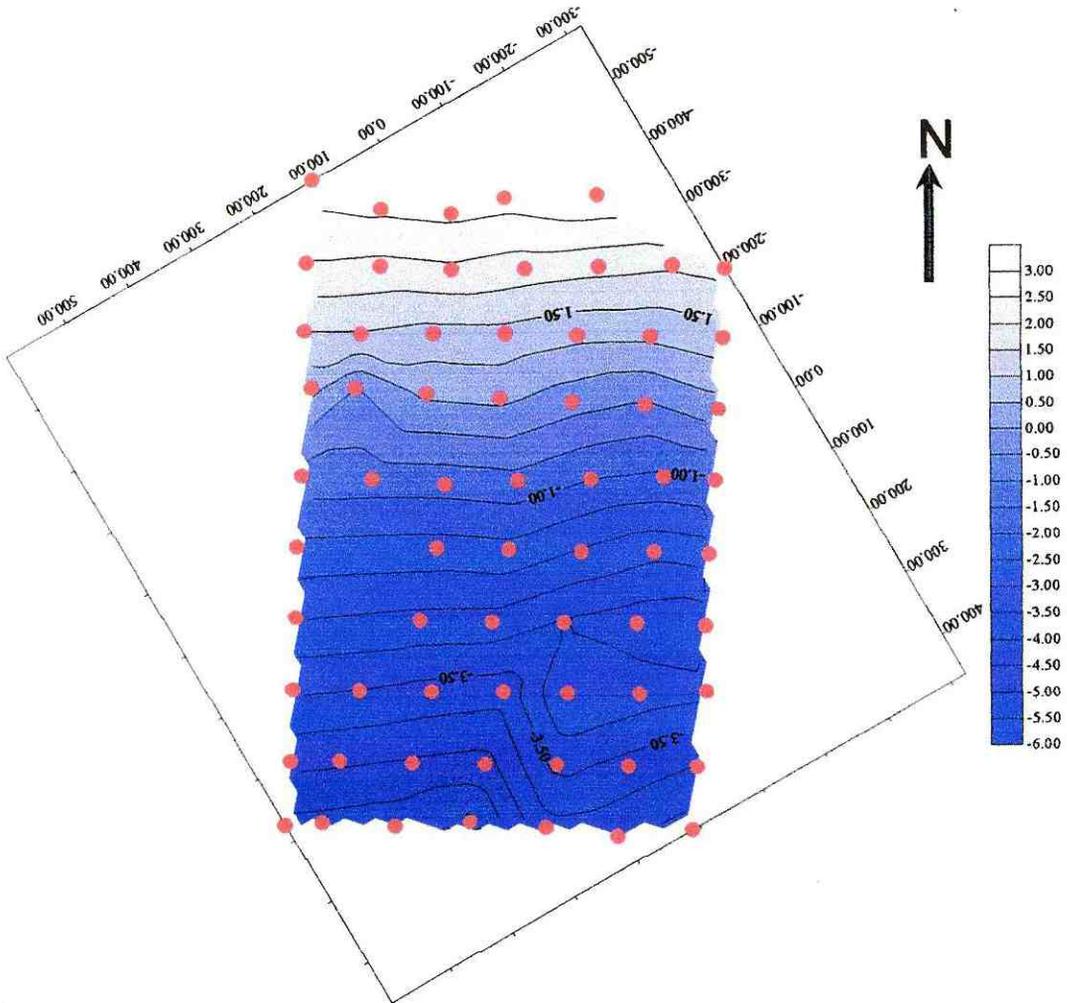


Figura a.2. Curvas a nivel generadas en el programa Winsurf.