

DIAGNOSTICO DE DRENAJE DEL DISTRITO DE
RIEGO 029 XICOTENCATL, TAM.

RAMON AVILA DEANTES

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

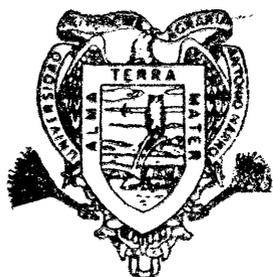
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

EN RIEGO Y DRENAJE



BIBLIOTECA
EGIDIO G. REBONATO
BANCO DE TESIS
U.A.A.A.N.



**Universidad Autónoma Agraria
Antonio Narro**

PROGRAMA DE GRADUADOS

Buenavista. Saltillo, Coah.

AGOSTO DE 1998

10092

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO

SUBDIRECCION DE POSTGRADO

DIAGNOSTICO DE DRENAJE DEL DISTRITO DE RIEGO 029
XICOTENCATL TAM.

TESIS

POR

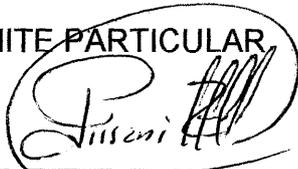
RAMON AVILA DEANTES

Elaborada bajo la supervisión del Comité Particular de Asesoría y aprobada
como requisito parcial para optar al grado de:

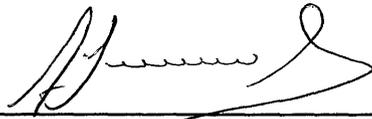
MAESTRO EN CIENCIAS
EN RIEGO Y DRENAJE

COMITE PARTICULAR

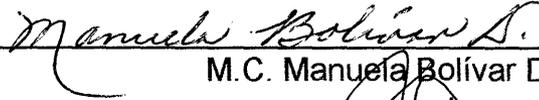
Asesor Principal:

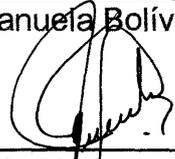

Dr. Juan Francisco Pissani Zúñiga

Asesor:


Dr. Alejandro Zermeño González

Asesor:


M.C. Manuela Bolívar Duarte


Dr. Jesús M. Fuentes Rodríguez
Subdirector de Postgrado

Buenavista, Saltillo, Coahuila. Agosto de 1998

AGRADECIMIENTOS

Mi más profundo agradecimiento a la Comisión Nacional del Agua (CNA) y al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) por el apoyo económico para realizar mis estudios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo en la formación de generaciones, que hagamos que los Mexicanos en un futuro muy cercano seamos capaces de generar nuestra propia tecnología.

Al Doctor Juan Francisco Pissani Zúñiga por la dirección de este trabajo, tanto en la etapa de campo como de gabinete, y su asesoría en las materias de riego superficial y drenaje agrícola.

Al Doctor Alejandro Zermeño González, por las sugerencias en la revisión del trabajo y los conceptos adquiridos en la materia de principios físicos del drenaje subterráneo.

A la M.C. Manuela Bolívar Duarte, por su revisión a este trabajo, y los conocimientos adquiridos en la materia de Salinidad.

Gracias Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por permitirme estudiar esta maestría y poner a nuestra disposición, toda esa amalgama de conocimientos de todos los maestros de Postgrado.

DEDICATORIA

A mi Padre:
Que en paz descanse

Ramón Avila Zúñiga

*Por la luz y
conocimiento que me
diste.*

Para mi Madre

María Deantes Ugalde

*Por tu dedicación y
cariño para todos tus
hijos.*

A mi Esposa

Leticia Martínez Zaleta

*Por todo tu cariño y
amor, alentarme
siempre y darme los
momentos mas felices
de mi vida.*

A Mis Hijos

Ramón Avila Martínez
Dayna Ma. Avila Martínez
Marco Tulio Avila Martínez

*Ustedes son lo mas
preciado que tengo en
la vida y me siento
orgulloso de ser su
padre.*

Para mis Hermanos

Catalina, Bertha,
Guadalupe, Mario, Irene,
Carlos, Efraín, Betty y
Blanca.

*Por los lazos que nos
unen.*

A Mis Sobrinos

Alfredo y Olga

*A quien les tengo un
gran cariño.*

COMPENDIO

Diagnóstico de Drenaje del Distrito de Riego 029 Xicoténcatl Tam.

Por
RAMON AVILA DEANTES

MAESTRIA
RIEGO Y DRENAJE

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA. JUNIO DE 1998

Dr. Juan Francisco Pissani Zúñiga - Asesor -

Palabras clave: Drenaje subsuperficial, conductividad hidráulica, manto freático
Lluvia de diseño, espaciamiento entre drenes.

Dada la importancia económica que representa el mantener los niveles de productividad de la caña de azúcar en el Distrito de Riego, los resultados del diagnóstico indican la necesidad de mejorar el manejo del agua. Los estudios del clima señalan la existencia de dos períodos con relación a precipitación presentando los dos, problemas de drenaje subsuperficial por lluvia o por un incremento de riegos. Los estudios del manto freático, demuestran la existencia del 32.25 por ciento de la superficie total del Distrito, que es afectada seriamente por mantos freáticos subsuperficiales.

Las fuentes permanentes de recarga del manto freático, son los canales principales San Lorenzo, Xicoténcatl, el Conejo y Alto. Las líneas de corriente se desplazan del norte al sur del Distrito de riego.

El 80 por ciento de los suelos tienen una conductividad hidráulica lenta que va de 0.097 a 1.66 m/d con potencial para salinizarse, por lo que las labores de conservación y mantenimiento del sistema de drenaje a cielo abierto debe mejorarse. Además de construir drenaje interceptor y drenaje subsuperficial a nivel parcelario.

Los métodos que mejor se ajustaron a las condiciones de la región para el cálculo del espaciamiento entre drenes paralelos subsuperficiales, a nivel parcelario, son los de régimen variable, Glover–Dumm para riego y de Krainjenhooff Van de Leur Maasland para lluvia. Para los proyectos de drenaje se consideró una lluvia de diseño de 140 mm por día para un periodo de retorno de ocho años.

ABSTRACT

DRAINAGE DIAGNOSTIC OF 029 XICOTÉNCATL TAM., IRRIGATION DISTRICT

By
RAMON AVILA DEANTES

MASTER OF SCIENCE
IRRIGATION AND DRAINAGE

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA. JUNIO DE 1998

Dr. Juan Francisco Pissani Zúñiga - Mayor Adviser –

Key Words: Subsurface Drainage, conductivity hidraulic, water table, design rainfall , drains spacing.

Dive to the economic importance that represents to maintain the productivity levels of sugarcane in the irrigation district. The results the diagnostic indicates the need of water management. The weather study indicates the existence of two periods related to precipitation, both of them presents subsurface drainage problems by rainfall or by an increase of irrigation. The studys of table water shows the existence of 32.25 percent of total surface of district area, that is severiously sever for subsurface water tables.

The permanent sources of recharge the water table, are the main irrigation San Lorenzo, Xicoténcatl, the Conejo and Alto. The lines of fluids displacement are from north to south of the irrigation district.

80 percent of soils have a slow hydraulic conductivity from 0.097 a 1.66 m/d with potential for salinity, resulting in the need of improving the maintenance of the open drainage network. Besides the build intercept drainage and under ground drainage.

The methods what are best fitted to the conditions of the area for the spacing calculation between parallel drains, under ground drains, are the of variable regimen. Glover-Dumm for irrigation and the Krainjenhoff Van de Leur Massland for rainfall. It is proposed for the drainage projects a rainfall design of 140 mm per day for a return to period the eight years.

INDICE DE CONTENIDO

	Página
INDICE DE FIGURAS	xi
INDICE DE CUADROS	xiii
INTRODUCCION	1
Objetivo	4
REVISION DE LITERATURA	5
Origen del Problema de Drenaje	5
Sistemas de Drenaje	9
Conductividad Hidráulica	10
Espacio Poroso Drenable	14
Aplicación del Kriging Universal	20
Sistemas de Manejo de Agua	22
MATERIALES Y METODOS	27
Reconocimiento del Area de Estudio	27
Localización Geográfica	27
Características Generales del Distrito de Riego 029 Xicoténcatl	28
Estudios de Apoyo	32
Estudio Topográfico	32
Estudio Climático	34
Estudio de Suelos	36
Estudio Hidrológico	39
Estudios Específicos de Drenaje	50
Estudios del Manto Freático	50
Estudios de la Conductividad Hidráulica	55
Estudios del Espacio Poroso drenable	56
Espaciamiento entre Drenes	58
Ecuaciones para Régimen Permanente	60
Ecuaciones para Régimen Variable	64
RESULTADOS Y DISCUSION	72
Temperatura y Precipitación	72
Suelos	74
Lluvia Crítica	75
Volumen de Escurrimiento	81
Coeficiente de Escurrimiento	85
Coeficiente de Drenaje	85
Manto Freático	90

	Página
Capa Impermeable	106
Conductividad Hidráulica	108
Porosidad Total y Porosidad Drenable	109
Espaciamiento entre Drenes para Régimen Permanente	111
Fórmula de Hooghoudt	111
Fórmula de Ernst	113
Espaciamiento entre Drenes para Régimen Variable	114
Fórmula de Glover-Dumm	114
Fórmula de Krainjenhoff Van de Leur-Maasland ...	119
 CONCLUSIONES	 124
 RECOMENDACIONES	 127
 RESUMEN	 130
 LITERATURA CITADA	 131
 APENDICE. A	 135

INDICE DE FIGURAS

Figura No.		Página
3.1	Localización de los Pozos de Observación del Manto Freático	33
3.2	Parámetros utilizados en la fórmula de Hooghoudt	62
3.3	Valor del perímetro mojado del dren "u" dependiendo si se trata de zanja abierta u tubería enterrada	62
3.4	Presencia de un estrato por encima de la capa impermeable	64
3.5	Representación del flujo de acuerdo a Ernst	64
3.6	Suelo homogéneo constituido por un solo estrato	67
3.7	Parámetros utilizados en la fórmula de Glover-Dumm	67
4.1	Climograma de gaussian periodo 1986-1995 estación climatológica Xicoténcatl Tam.	73
4.2	Isobatas de enero de 1993	93
4.3	Isobatas de julio de 1993	94
4.4	Isobatas de enero de 1995	95
4.5	Isobatas de julio de 1995	96
4.6	Gráfica áreas tiempo 1991-1995	97
4.7	Isohipsas de enero de 1993	98
4.8	Isohipsas de julio de 1993	99
4.9	Isohipsas de enero de 1995	100
4.10	Isohipsas de julio de 1995	101
4.11	Isohipsas de mínimas de 1993	102
4.12	Isohipsas de Mínimas de 1995	103
4.13	Incrementos de enero de 1995	104

Figura No.		Página
4.14.	Incrementos de julio de 1995	105
4.15.	Profundidad de la capa impermeable	107

INDICE DE CUADROS

Cuadro No.		Página
3.1.	Características de las presas derivadoras	28
3.2.	Volúmenes brutos, netos y eficiencias de conducción	30
3.3.	Cultivos superficies, láminas, No. de riegos y volúmenes utilizados ciclo agrícola 1995-1996	31
3.4.	Parámetros utilizados en regresión lineal para obtener los valores de a y b en la fórmula de Gumbel	42
3.5.	Condición de humedad antecedente (C.H.A.) en función de la lámina precipitada acumulada	46
3.6.	Valores de "p" criterio época de lluvia	59
3.7.	Valores de "p" para N=3 y N=4 días, criterio época de riego.....	59
3.8.	Criterio de drenaje clase B. Cultivos extensivos	69
4.1.	Distribución de las Unidades de suelo	74
4.2.	Frecuencia y periodo de retorno de las precipitaciones del día 1° al 31 de julio de 1965 a 1996 en la estación climatológica de Xicoténcatl Tam	76
4.3.	Lluvias diarias (mm) registradas en los meses de julio de 1965 a julio de 1966	77
4.4.	Suma de las frecuencias en que la lluvia de 135 a 140 mm es igualada o superada	80
4.5.	Relación cuantía frecuencia fórmula de Gumbel durante el período comprendido del día 1° al 31 de julio en los años de 1965 a 1966 en la estación climatológica de Xicoténcatl Tam.	81
4.6.	Volúmenes de escurrimiento por el método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos	83
4.7.	Coefficiente de escurrimiento para el mes de julio por el método del Servicio de Conservación Suelos de 1996 a 1996	86
4.8.	Lámina infiltrada y lámina escurrida para precipitaciones máxima registradas en diferentes días del mes de julio en 31 años	88

Cuadro No.		Página
4.9.	Variación de los coeficientes de drenaje en relación a la lámina precipitada y coeficiente de escurrimiento	91
4.10.	Superficies afectadas por niveles freáticos año más húmedo 1993 y más seco 1995 durante los años 1991 a 1995	91
4.11.	Precipitaciones mensuales registradas en la estación Xicoténcatl Tam. durante los años 1991 a 1995	106
4.12.	Valores obtenidos en campo para determinar la conductividad hidráulica	108
4.13.	Valores de conductividad hidráulica obtenidos para diferentes puntos y texturas del suelo	109
4.14.	Porosidad total. porosidad drenable, altura del nivel freático con lluvia de 14.0 cm para los diferentes sitios de perforación	110
4.15.	Parámetros utilizados en fórmula de Hooghoudt para obtener la separación entre drenes para época de lluvia	111
4.16.	Parámetros utilizados en fórmula de Hooghoudt para obtener la separación entre drenes para época de riego	112
4.17.	Parámetros utilizados en fórmula de Ernst para obtener la separación entre drenes para época de lluvia	113
4.18.	Parámetros utilizados en fórmula de Ernst para obtener la separación entre drenes para época de riego	113
4.19.	Parámetros utilizados en fórmula de Glover y Dumm para obtener la separación entre drenes para época de lluvia.....	114
4.20.	Parámetros utilizados en fórmula de Glover y Dumm para obtener la separación entre drenes para época de riego	116
4.21.	Estabilización del nivel freático al aplicar el riego	118
4.22.	Variación de las alturas de los niveles freáticos en días considerando una separación entre drenes de 34 m.	122
4.23.	Separación entre drenes para régimen permanente y régimen variable	123

INTRODUCCIÓN

Iniciando el siglo veinte las necesidades de alimento de una población en constante aumento motivó que la superficie bajo condiciones de riego, en el mundo se duplicara, pasando de 48 millones de hectáreas en 1900 a 94 millones de hectáreas en 1950. Estimando alcanzar 400 millones de hectáreas al final del siglo. Se estima que actualmente existen 234 millones de hectáreas con riego a nivel mundial, Cámara (1994).

México ocupa el sexto lugar en el mundo en superficie irrigada, con una superficie de riego de 6 millones de hectáreas, de éstas 3.2 millones están distribuidas en 78 Distritos de Riego y 2.8 millones en Unidades de Riego para el Desarrollo Rural (URDERAL).

Los altos costos de la conservación y el mantenimiento de las redes de distribución, drenaje y estructuras de control y medición, y las bajas cuotas del cobro por el servicio de riego no son suficientes para cubrir estos costos lo cual ocasiona que esta se difiera, incrementándose con esto la problemática existente, altas pérdidas de volumen en la conducción, incremento de las

Superficies afectadas por altos niveles fráticos y salinidad afectando la estructura productiva.

El 50 por ciento de la superficie de riego se concentra en tres estados, del norte del País, Sinaloa con 21 por ciento, Sonora con 17 por ciento Tamaulipas con 12 por ciento.

El estado de Tamaulipas cuenta con una capacidad de almacenamiento de 7,438.28 millones de m³. Existen 18 presas importantes de almacenamiento y derivación, e inciden en la operación del estado las presas internacionales “La Amistad” y “Falcón”, las cuales se rigen por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), y la presa el “Cuchillo” localizada en el estado de Nuevo León (Mora, 1995).

La superficie regable del estado es de 620,618 hectáreas, de éstas 498,022 hectáreas pertenecen a 7 Distritos de Riego, transferidos a los usuarios organizados en 30 módulos de riego para llevar a cabo la operación, conservación, mantenimiento y administración, y 122,596 hectáreas distribuidas en 809 URDERAL. El volumen bruto medio utilizado para el riego es de 2,011.459 millones de m³.

Los Distritos de Riego en Tamaulipas presentan problemas similares a otros Distritos del País, existe una superficie afectada por diferentes grados de salinidad de 74,373 hectáreas que representa el 14.9 por ciento de la superficie

total de riego y una superficie afectada con niveles friáticos de 0 a 1.5 m de 125,494 hectáreas, que representa el 25 por ciento de la superficie total de riego.

El Distrito de Riego 029 Xicoténcatl, se encuentra transferido a los productores a través de dos módulos de Riego, el módulo I por la Asociación Civil de Usuarios de Xicoténcatl-Río Frío con una superficie de 14,007 hectáreas y el módulo II por la Asociación Civil de Usuarios de San Lorenzo con una superficie de 10,600 hectáreas. En las Zonas de Riego de los módulos I y II uno de los aspectos de mayor importancia por su repercusión en la productividad son los niveles friáticos elevados y el ensalitramiento de los suelos; atribuidos a las diferentes condiciones climatológicas que se presentan, al origen de los suelos agrícolas y su manejo durante la preparación, establecimiento y desarrollo de los cultivos, así como a un deficiente manejo del agua a nivel parcelario y deficiente conservación y mantenimiento de la infraestructura hidroagrícola.

Lo anterior determina la importancia que representa el estudio y diagnóstico del problema de los mantos friáticos elevados y a los suelos afectados por el exceso de sales, como una necesidad de encontrar una solución adecuada para la prevención o rehabilitación de una forma más económica.

Objetivo

Este trabajo tiene como objetivo lo siguiente:

- Determinar las condiciones que prevalecen en el aspecto de drenaje subsuperficial de las Zonas de Riego de Xicoténcatl-Río Frío del módulo I y de San Lorenzo del módulo II, del Distrito de Riego 029 Xicoténcatl Tam.
- Estudiar las causas y los factores que causan los problemas de drenaje subsuperficial de las áreas referidas y plantear alternativas de solución más viables para mejorar las condiciones de drenaje del Distrito.

REVISION DE LITERATURA

Origen del Problema de Drenaje

En las zonas áridas y semiáridas, los drenes desalojan las aguas de lavado con alto contenido de sales y evitan el ensalitramiento de los suelos. En las zonas tropicales desalojan los excesos de agua producidas por las abundantes lluvias y por desbordamiento de arroyos y Ríos. En un régimen regularizado de humedad del suelo, el drenaje forma parte fundamental, sin embargo no todos los problemas de drenaje se resuelven con la construcción de drenaje en ocasiones la solución requiere de otra vía. Los problemas de empantanamiento se producen por encharcamiento y saturación de la capa arable, el cual se soluciona con una red de canales de desagüe cuando se produce por subinundación debida a altos niveles friáticos, ya sea por una alimentación de agua del subsuelo mayor que la capacidad de drenaje natural del suelo debida a lluvias intensas en las cercanías o dentro de la zona de estudio corrientes naturales que invaden dicha zona, filtraciones de los canales de riego, altos niveles en los drenes colectores por mala conservación y topografía desfavorable, baja permeabilidad de los suelos, altos niveles piezométricos de mantos confinados. No siempre será la construcción

de drenes, en ocasiones con reducir el flujo de la fuente de abastecimiento o eliminar un obstáculo en la salida del agua del subsuelo se remedia esta situación razón por la cual se requiere un estudio que permita analizar las causas que ocasiona los problemas de empantanamiento, los cuales deben seguir una metodología, como es la de detectar y caracterizar el problema, analizar las causas o factores del mismo, jerarquizar los factores, proyectar y realizar las medidas correctivas y evaluar periódicamente los resultados logrados para su ajuste. Para detectar y caracterizar el problema, por lo general se utilizan entre otras cosas los datos de estudios freaticométricos los cuales se obtienen mediante la instalación de una red de pozos de observación de tres a cuatro metros de profundidad y de cinco a 10 cm de diámetro, haciendo observaciones cuando menos en forma mensual, en forma simultánea y en el menor tiempo posible, Palacios (1979).

Luthin (1967) menciona que la aplicación excesiva del agua de riego parece ser una de las principales causas de los problemas de drenaje. Todo indica que en muchos casos con agua abundante y barata, los agricultores son pródigos en su uso y crean así sus propios problemas. Los métodos de riego superficial traen consigo existencia de cierta percolación del agua aplicada, abajo de la zona radicular de las plantas. Un estudio en el valle imperial California afirma que una cantidad importante de agua de riego se debe desperdiciar con una aplicación liberal, como un medio necesario para prevenir el aumento de la salinidad del suelo.

La infiltración del agua de los canales en algunos distritos de riego, puede equivaler hasta el 50 por ciento del agua total derivada al sistema. Los registros de 46 sistemas de riego en operación según U.S. Bureau of Reclamation (1952) indican que aproximadamente el 25 por ciento del agua que entra a los canales principales y laterales sin revestir, se pierde por infiltración antes de llegar a los campos de cultivo.

Withers y Vipond (1978) mencionan que para controlar el nivel freático el agua freática se retira del suelo mediante un sistema de zanjas abiertas regularmente espaciadas o con drenes de tubería permeables, en el terreno. En un terreno plano el nivel freático se encontrará más alto en su punto medio entre drenes. La profundidad y el espaciamiento de los drenes depende de la permeabilidad del suelo, el índice de suministro de agua drenable y el grado de protección que se requiere, medido por la profundidad mínima aceptable hasta el nivel freático o el índice mínimo aceptable de caída, después de un flujo repentino de entrada.

La profundidad y el espaciamiento se pueden modificar juntos para obtener un grado dado de protección; cuando mayor sea la profundidad del dren, tanto mayor podrá ser el espaciamiento. La profundidad de los drenes está limitada por el costo, la capacidad de las máquinas de drenaje y las características hidráulicas del sistema de eliminación.

Con frecuencia, los suelos arcillosos no tienen un nivel freático regular. El agua se retiene en fisuras, al interior de la arcilla y cualquier nivel freático

detectado puede ser puramente local y encicada o colgada. El drenaje interno de los suelos arcillosos con contenido de arcillas de más del 20 por ciento puede mejorarse por medio de la formación de ductos no revestidos al interior del suelo y el desmenuzamiento simultáneo de la tierra situada sobre el ducto. Este proceso se conoce como drenaje de toperas. Se forma una galería o topera mediante un arado el cual lleva unido en la parte inferior una reja topera con una guía ensanchador. La reja abre un ducto que ensancha y conforma la guía de tope. Esta herramienta se sostiene en una hoja de un espesor de 1.2 a 2.5 cm . Sobre el terreno, la hoja va fija a una vara larga y un patín y se arrastra al utilizarse; pero se puede elevar para el transporte, mediante la sujeción de tres puntos del tractor. Un arado topo, de zapa o de toperas forma un canal mediante una acción de levantamiento más que de compresión de la tierra. La superficie del terreno se levanta cuando la reja del arado pasa a través del suelo, formándose fisuras sobre la reja, a una distancia de 30 a 60 cm a cada lado. Deben hacerse los drenes de topera cuando el suelo esté suficientemente húmedo para moldearse sin fracturarse; pero no tan mojado que se reduzca el efecto del desmoronamiento. Si los drenes de topera tienen oportunidad de secarse antes de inundarse por primera vez, las probabilidades de duración son mayores. La profundidad de los canales de toperas se ve afectada por el nivel de los estratos adecuados, siendo la gama normal de 40 a 60 cm. En general los drenes profundos son más duraderos; pero los poco profundos resultan más eficientes.

La vida útil de los drenes de toperas bien formado puede ser de cinco a quince años; pero disminuye con rapidez cuando se hace pasar vehículos pesados sobre ellos, mientras el terreno esté húmedo.

Sistemas de Drenaje

ILRD (1978) menciona que un sistema de drenaje agrícola, es aquel que recibe exceso de agua directamente de la parcela y lo conduce al sistema de drenaje principal debe proporcionar una salida libre y segura para los drenes de las parcelas.

En un sistema de drenaje subsuperficial pueden distinguirse tres categorías de drenes: laterales, colectores y drenes principales. Los laterales denominados también drenes a nivel parcela, drenes de la finca o drenes de succión, sirven principalmente para evitar las fluctuaciones de la capa friática, aunque también pueden recoger el escurrimiento superficial. El agua de los colectores fluye, que conduce el agua al sistema principal de drenaje a través del cual es conducida a la salida del área. En el sistema de drenaje agrícola puede consistir de uno o de varios tipos de drenes; áreas abiertas o zanjas; drenes topo que son conductos subterráneos no revestidos; drenes enterrados, los cuales consisten en tubos de arcilla, hormigón o plásticos a cierta profundidad dentro del suelo.

Conductividad Hidráulica

SARH (1978) menciona que la conductividad hidráulica es probablemente la característica de los suelos más importante y difíciles de estimar adecuadamente. Son múltiples los problemas que no pueden ser resueltos satisfactoriamente si no se cuenta con este dato, en las cuestiones referidas a la de ingeniería de riego y drenaje de las tierras, especialmente como parámetro importante para el cálculo de la separación de los drenes. Señala que ha sido objeto de confusión los términos permeabilidad y conductividad hidráulica (K). La permeabilidad se refiere a la propiedad de los suelos y otros medios porosos de permitir el paso del agua su uso es generalmente en sentido cualitativo. La conductividad hidráulica es la velocidad de filtración que se presenta en un medio saturado, cuando el gradiente de energía es igual a la unidad, mientras que la permeabilidad es una propiedad que varía exclusivamente con el medio, la conductividad hidráulica depende tanto de las características del suelo como del fluido. Dentro de las características del medio en este caso el suelo, se tiene el área porosa, la distribución del tamaño de los poros y la sinuosidad; las características del fluido que afectan la conductividad son la densidad y la viscosidad del mismo, es decir varía en función de la salinidad y temperatura del suelo.

Gallichand et al . (1992) señala que la conductividad hidráulica es uno de los factores más importantes del control de la profundidad de el nivel freático en drenaje subsuperficial de terrenos agrícolas. El procedimiento más común

en el diseño para calcular el espaciamiento entre drenes, es utilizar un promedio de conductividades hidráulicas medidas dentro del área con problemas de drenaje. Sin embargo esta práctica no toma en cuenta la variabilidad de la conductividad hidráulica y se obtienen resultados poco confiables en grandes áreas en donde el nivel freático es muy superficial que en un diseño de drenaje en donde los niveles freáticos son más profundos. Áreas de niveles freáticos muy superficiales reducirá considerablemente la producción, mientras que niveles muy profundos un sistema requerirá innecesariamente de costosos sistemas de drenaje.

Bouwer (1969) utilizando simulación analógica eléctrica, mostró que la conductividad hidráulica efectiva (K_v) es mejor estimada por la media geométrica. La conductividad hidráulica es igual a la media geométrica. Para estimar la conductividad eléctrica efectiva por Kriging requiere de transformar la conductividad hidráulica medida para ser utilizada.

$$Y = \ln(K) \quad (1)$$

Donde K , es la conductividad hidráulica en m/ d

Utilizando un bloque cuadrado de igual lado para el espaciamiento entre drenes paralelos el block kriging producirá un acercamiento entre cada interpolación de las localizaciones intermedias un estimador (Y^*) y la estimación de la varianza (σ_{kv}^2) de la transformación logarítmica de la conductividad hidráulica efectiva (Y_v). El kriged estimador de la conductividad

hidráulica efectiva, (K_v) con controles de profundidad del nivel freático entre el espaciamiento medio entre dos drenes paralelos por lo tanto es:

$$K_v^* = \text{EXP}(Y_v^*) \quad (2)$$

Donde K_v^* , es el Kriged estimador de la conductividad hidráulica efectiva. Y_v^* , es la transformación logarítmica de la estimación de la conductividad efectiva Kriged.

La probabilidad de tener K_v menor o igual que un valor dado de:

K_v [$P(K_v < 0 = K_{vi})$] fundado desde Y_v^* y σ_{kv} de cada block en esta área como:

$$K_v [P(K_v < 0 = K_{vi})] = [\sum P (Z_v < 0 = Z_{vi})] / N \quad (3)$$

Donde K_{vi} es un valor dado de K_y ; N es el número total de bloques Kriged dentro del área; n representa el número de bloques; Z es la distribución normal variable con media 0 y varianza 1; Z_{in} es el valor de Z correspondiente para K_{vi} por bloque n.

$$Z_{in} = \frac{(Y_{vi} - Y_{vn})}{\sigma_{Kvn}} ; Y_{vi}, \text{ es el } \ln(K_{vi}) ; Y_{vn} = Y_v, \text{ valor por bloque n; } \sigma_{kvn}$$

igual a la desviación estándar estimada para el bloque nP ($Z_v < 0 = Z_{vi}$), el cual puede ser encontrada desde tablas estadísticas, usadas para determinar la densidad de la probabilidad de la conductividad hidráulica efectiva para un área dada. La función de probabilidad del nivel freático dentro de un área dada es calculada también de forma similar por arriba de K_y , mientras que para K_v la relación entre Y_v y K_v es simple logaritmo natural. Para el caso de la profundidad del nivel freático se debe usar una ecuación de drenaje, como la de Hooghoud:

$$L^2 = \frac{4K}{q}(2deh + h^2) \quad (4)$$

Donde L , es el espaciamiento entre drenes, m; K , es la conductividad hidráulica, m/d; q , es el coeficiente de drenaje, m/d; d_e , es la profundidad equivalente del agua por encima del centro del tubo a la mitad del espacio.

despejando K

$$K = \frac{L^2 q}{4(2deh + h^2)} \quad (5)$$

Entonces la profundidad del nivel freático (WTD) es igual a la profundidad del centro del tubo a la profundidad del dren (W) menos la elevación del nivel del agua por arriba del centro del tubo a un espacio medio (h), entonces se tiene:

$$h = W - \text{WTD} \quad (6)$$

Por lo tanto la probabilidad de tener WTD es menor o igual que a un valor

$$[P(\text{WTD} < 0 = \text{WTD}_i)] \text{ es: } [P(\text{WTD} < 0 = \text{WTD}_i)] = \frac{\sum_{i=1}^N P(Z \leq 0 = Z_{in})}{N} \quad (7)$$

Donde WTD_i , es el valor dado de WTD; Z es el valor de Z correspondiente al WTD por número de bloques $Z_{in} = \frac{(Y_{vi} - Y_{vn})}{\sigma K \sqrt{n}}$;

$$Y_{vi} = \frac{\ln(L^2 q)}{4(2deh + h^2)}$$

La semivariación experimental de la transformación logarítmica de las conductividades hidráulicas fue descrita mejor por el modelo exponencial.

$$Y^*(X) = 0.886 + 0.413 \left[1 - \text{Exp} \left(\frac{-X}{1.866} \right) \right] \quad (8)$$

Donde $Y^*(X)$, es la semivariación para el retraso X ; X , es la distancia entre puntos de conductividad hidráulica, km.

El diseño de un sistema de drenaje o subirrigación para dar una descripción de la proporción de la tasa de abatimiento o ascenso del nivel freático, requiere conocer las propiedades hidráulicas del suelo. Todos los métodos de espaciado de los drenes requiere del uso de la conductividad hidráulica (k) y del espacio poroso drenable .

Espacio Poroso Drenable

Gupta (1993) menciona que el espacio poroso drenable es tratado comúnmente como una constante aunque varía con la profundidad del nivel freático conocido. Haciendo estimaciones de campo apropiadas de este parámetro, la ecuación de Glover y Dumm fue integrada para desarrollar fórmulas que podrán tomar en cuenta cálculos del espacio poroso drenable utilizando en campo mediciones de cargas hidráulicas y descargas de drenaje. Los datos analizados revelan que el espacio poroso drenable en una estación aumentó linealmente con aumentos de profundidad hasta que el nivel freático fue bajado. En la otra estación el espacio poroso drenable no varió con

mediciones de cargas hidráulicas . Los resultados de la prueba en la primera estación revelan un mejor juego con datos obtenidos de la observaciones que con aumentos constantes del espacio poroso drenable.

De acuerdo a la ecuación de Glover-Dumm, Dumm la descarga de un sistema de drenaje puede ser calculado por la relación entre.

$$q = \frac{8.0Kdh_0}{S^2} \exp(-at) \quad (9)$$

Donde q , es el gasto drenado, m/día; K , es la conductividad hidráulica m/día. d , es la profundidad equivalente en relación a D que es la actual profundidad a la capa impermeable; h_0 , es la carga inicial, m; S , es el espaciamiento del dren paralelo, m; t , es el tiempo desde el momento de recarga, en días; a , es el factor de reacción dado por $\pi^2 K D/fS^2$, días; f , es el espacio poroso drenable en fracción.

La relación existente entre la carga inicial h_0 y la carga, h_t , en algún tiempo futuro es dada por la relación:

$$h_t = 1.17 h_0 \exp(-a t) \quad (10)$$

En la propuesta uno la descarga acumulativa, de la línea de drenaje puede ser calculada por integración de la ecuación (9), con respecto al tiempo, t , entre algún período de tiempo dado t_1 a t_2 cada vez que:

$$q(\text{int}) = \frac{8.0Kdh_0}{\pi^2 Kd} (\exp(-at_1) - \exp(-at_2)) \quad (11)$$

Donde $q(\text{int})$, Representa la descarga acumulativa por unidad de área drenable en la línea de drenaje.

En la práctica, cuando la descarga es manejada diariamente, $q(\text{int})$ puede ser determinada por la relación.

$$q(\text{int}) = \sum_{i=1}^n q_i \quad (12)$$

Incorporando (10) en (11) y simplificando:

$$f = \frac{q(\text{int})}{0.638(h_1 - h_2)} \quad (13)$$

Tal que h_1 y h_2 es la Carga Hidráulica en tiempo t_1 y t_2 , respectivamente puede ser también función que basada en la descarga acumulativa comenzando de tiempo $t = 0$ y algún tiempo t_1 , la relación es dada como.

$$f = \frac{q(\text{int})}{0.81h_0 - 0.638h_1} \quad (14)$$

La propuesta dos está basada en la velocidad de cambio del tipo de drenaje. Para utilizar esta técnica, la ecuación (1) es diferenciada con respecto al tiempo, t . Toda vez que

$$\frac{dq}{dt} = \frac{8.0Kdh_0(-a)}{S^2} \exp(-at) \quad (15)$$

En tiempo t_1 la ecuación (16) puede simplemente ser escrita como

$$a = (-) \frac{(dq / dt)}{q^1} \quad (16)$$

ó

$$f = \frac{\pi^2 Kd}{S^2} \frac{(q_1)}{(dq / dt)} \quad (17)$$

La ecuación (16) indica que el factor de reacción "a" puede ser obtenido por relación de descarga contra el dato de tiempo en un gráfico de papel aritmético tal que dq/dt y q_1 es leído en un instante de tiempo hecho " t_1 ". La velocidad de cambio de q , dq / dt , puede ser obtenido sacando una tangente de la curva en ese instante de tiempo. El signo negativo en Ecuación (16) será tomado con cuidado por el término dq/dt como disminución con aumento de tiempo. De este modo varios valores de espacio poroso drenable pueden ser evaluados de la misma curva $q - t$ en ecuación (17).

Rao et al . (1986) en un experimento de drenaje subsuperficial instalado para una área de 8 has en Mundlana en el distrito de Sonapat Haryana, India en sitios representativos de suelos salinos anegados de naturaleza aluvial, con textura ligeramente arenosa en la primer profundidad de 1.0 m y más abajo con textura ligeramente pesada. Los parámetros de diseño como la conductividad hidráulica y el espacio poroso drenable fueron calculados usando el método de agujero de barrena y la carta del espacio poroso drenable de la textura del

suelo respectivamente. Para el diseño propuesto, el promedio de la conductividad hidráulica para el perfil fue obtenido como 0.8 m/d , el espacio poroso drenable de 0.10, tres espaciamientos de drenaje 50 m, 67 m y 84 m puestos a una profundidad de 1.75 m bajo la superficie del terreno. La carga hidráulica de descarga del dren en un período de 10 días son observados en los tres espaciamientos.

En otro experimento similar puesto en Sampla en Rohtak distrito de Haryana India, en suelos aluviales y de textura ligeramente arenosa en los primeros 1.75 m., y entre 1.75 m y 3.0 m de profundidad de textura es ligeramente y arenosa. La conductividad hidráulica del límite superior es de 1.0 m/d , mientras que el límite inferior es de 7.5 m/d . El espacio poroso drenable es calculado siendo igual a 0.14, la carga hidráulica contra el tiempo y la descarga del dren contra datos del tiempo fueron calculados para los tres espaciamientos de 25, 50 y 75 m.

La ecuación usada más comúnmente para calcular el espacio poroso drenable es la de El-Mowelhi y Van Schilgaarde (1982) que está dada como:

$$f = \frac{q(\text{int})}{(h_1 - h_2)} \quad (18)$$

La diferencia en la ecuación (13), (14) y (18) es aparente. Mientras la ecuación (18) asume que el nivel freático baja uniformemente de h_1 a h_2 , la ecuación (13) y la ecuación (14) toman en cuenta la forma inicial y final del nivel freático. La constante en la ecuación (14) comparada con la ecuación (13)

difiere como consecuencia de el factor de forma del nivel freático en el inicio pudiendo ser diferente que la forma del nivel freático en tiempo t_1 o t_2 . En esta base se sugiere que la ecuación propuesta es más flexible y mejor sobre la ecuación existente porque la forma del nivel freático es importante hacia el interior dado.

La relación propuesta dada por la ecuación (17) requiere evaluaciones gráficas de velocidad de cambio del modo de drenar.

La desviación en el espacio drenable es también considerado cuando la ecuación (17) es usada para dos y seis días para calcular el espacio poroso drenable.

Para los sitios de Mundlana, también fue hecho un ejercicio para reestimar el diseño de espaciamiento con variación del espacio poroso drenable. El criterio de drenaje para esta propuesta requiere que el nivel freático este por abajo de 30 cm de la superficie del terreno en dos días.

El diseño de espaciamiento encontrado para 82 m comparado con el espaciamiento de diseño de 50 m, cuando esto fue asumido el espacio poroso drenable es constante. De este modo, podrá haber un 50 por ciento de incremento al diseñar el espaciamiento lateral. La variabilidad en el espacio poroso drenable es de gran importancia en el diseño de sistemas de drenaje subsuperficial. Así mejores espaciamientos en diseño de drenaje son necesarios al implementar proyectos de drenaje.

Aplicación del Kriging Universal

Román (1980) en una investigación sobre la elevación de los niveles freáticos del Distrito de Riego No. 14, Río Colorado, Baja California Norte y Sonora, en relación al problema que representa una baja disponibilidad de datos para su interpolación y representación gráfica por medio de planos utilizando la metodología desarrollada por Matheron sobre las variables regionalizadas que se consideran en la interpolación Kriging, pudo comprobar que el método Kriging Universal, se obtiene información altamente confiable de las elevaciones del nivel freático, tanto para valores calculados por interpolación como por extrapolación de la información obtenida mediante muestreo.

Al evaluar las estimaciones efectuadas con Kriging Universal, comparando los valores reales de la profundidad del nivel freático, contra los valores estimados en 100 localidades, verificó que la diferencia media fue de 2.16 por ciento con respecto al valor medio observado de la profundidad real (Z_{real}) y un coeficiente de variación de 5.64, lo cual confirma que el estimador Kriging es prácticamente insesgado.

En un plano de isolíneas, obtenido con los datos disponibles del muestreo contra, un plano obtenido con los datos estimados con la metodología Kriging Universal, que el trazo de las líneas de isovalores fueron de mejor calidad cuando se empleó el Kriging Universal, que cuando no se utilizó, agrega que la configuración de las isolíneas son un poco diferentes, sugiriendo que los

valores representados en el plano obtenido con el Kriging Universal son más confiables ya que para estimar cada uno de los valores se consideró hasta 16 puntos circundantes, y no solo tres puntos, que son los que definen un plano, y que a pesar de haberse considerado pocos datos para la estimación, se concluye que en base a los resultados obtenidos de las evaluaciones efectuadas, los datos son altamente confiables, recomendando el uso del Kriging Universal en estudios freaticométricos.

Cortés (1988) en un estudio sobre variabilidad espacial en variables geohidrológicas, demuestra que dentro de los métodos de estimación de valores en alguna posición dentro del espacio de exploración de la variable, el método Kriging proporciona un estimador insesgado si, la suma de las ponderaciones por las que se multiplican las observaciones medidas es igual a uno y de varianza mínima si esta es minimizada por un proceso de multiplicadores de Lagrange. Señala encontrar si existe la dependencia espacial entre las observaciones mediante el uso de semivariogramas estimados, y ajustar al mejor modelo teórico en función del coeficiente de correlación.

Si la dependencia espacial existe, utilizar la metodología Kriging para realizar estimaciones del valor de la variable en localidades no medidas. Por el contrario cuando no existe dependencia espacial entre las observaciones, lo cual corresponde a que el semivariograma estimado es constante para cualquier

distancia y que implicará que el coeficiente de correlación es constante, utilizar los métodos estadísticos.

Recomienda utilizar la metodología Kriging para todas aquellas variables que presentan una dependencia espacial, dado que la interpolación proporcionará valores insesgados y de varianza mínima.

Sistemas de Manejo de Agua

García y Strzepek (1994) describen un nuevo método para diseñar un sistema de riego y drenaje a pequeña escala en zonas áridas de riego. Este método permite que este diseño de drenaje pueda ajustarse a los calendarios de riego para solucionar los problemas de inundación y salinidad. Una combinación de sistemas de riego y drenaje, pueden ser muy complejas, para entender la ejecución de este gran término, el sistema combinado deberá ser a través de un modelo. El primer análisis corrido del modelo fue para determinar los efectos del diseño del sistema de drenaje con un manejo de riego adaptativo en lugar de dos sistemas independientes. Se usaron un set de cuatro simulaciones cada simulación, analizó cinco espaciamientos entre drenes 10 m, 20 m, 30 m y 40 m por cada simulación, fue analizado dos diferentes valores de conductividad hidráulica 0.20 y 0.30 m/d. Los resultados muestran que para una conductividad hidráulica de 0.20 m/d, el espaciamiento de 50 m produce el más bajo beneficio neto, esto resulta que el nivel del agua no baja lo suficientemente rápido para evitar la pérdida de cultivo. Para la

conductividad hidráulica de 0.3 m/d , el espaciamiento de 10 m genera los más bajos beneficios, la razón es que el costo de este sistema con este espaciamiento contrarresta los beneficios generados por el cultivo. Cuando se usan espaciamientos más grandes, los beneficios netos se incrementan, así como la conductividad hidráulica debido a que el nivel del agua baja rápidamente evitando afectar la zona radicular. Con una conductividad hidráulica de 0.3 m /d los beneficios netos generados por el espaciamiento de 20 a 50 m fueron muy similares.

Hanson y Fulton (1994) en un análisis sobre economía y métodos de reducción de drenaje a través de riegos improvisados, mencionan que la uniformidad del agua aplicada y sobreriego causan excesivo drenaje subsuperficial, de tal modo que las opciones disponibles para uniformizar la aplicación y la eficiencia incluyen, improvisar el manejo de agua de riego a partir de sistemas de riego ya existentes (horario de riego, tiempo de aplicación del agua de riego) mejoramiento de los sistemas de riego superficial ya existentes convertir a sistemas de riego a presión (aplicación de sistemas de baja energía LEPA, riego por goteo).

Las opciones para el aprovechamiento del agua por surco consideran que reducir la longitud del campo en 50 por ciento y los tiempos de riego por menos de 50 por ciento se puede reducir el drenaje subsuperficial por abajo del 50 por ciento, en particular para campos con longitud de menos de 400 m de largo.

Hanson (1989), demostró que reduciendo la longitud del campo de 720 m a 360 m incrementaba la distribución uniforme de 78 por ciento a 87 por ciento en un suelo arcilloso el drenaje subsuperficial disminuyó de 6.3 cm a 2.5 cm , para un suelo arenoso la distribución uniforme incrementó de 67 por ciento a cerca de un 85 por ciento por reducción de longitud de campo de 439 m a 220 m el drenaje subsuperficial decreció de 8.4 cm a 2.0 cm. También encontró un leve incremento en la distribución uniforme (78 por ciento a 84 por ciento), con un aumento en el gasto de 2.33 lps a 3.5 lps en el suelo arcilloso, el drenaje subsuperficial decrece de 6.3 cm a 3.6 cm, un incremento en el gasto en surcos en un suelo arenoso de 1.13 lps a 2.14 lps no tuvo efecto en la distribución uniforme y drenaje subsuperficial.

Westlands Water District (1991) señala en el riego a presión las evaluaciones en los campos han demostrado que estos sistemas tienen un máximo de distribución uniforme de 80 por ciento a 85 por ciento para velocidades del viento menos de 2.7 a 3.6 m/s, para boquillas de 3.2 mm y para velocidades del viento de menos de 1.8 a 3.6 m/s para boquillas de 1.8 mm.

Las comparaciones en el sistema de riego muestran que el drenaje subsuperficial puede ser reducido mejorando los sistemas de riego en surcos existentes o por la conversión a los sistemas de riego presurizados. El análisis muestra que los costos de adquisición para drenaje subsuperficial son muy altos que es necesario antes un sistema de riego mejorado, que es más redituable que el sistema de riego tradicional. Se ha reconocido que estos

resultados están basados en pocos años de datos, que en grandes términos de conducta pueden ser diferente, particularmente donde la salinidad permanente es un problema requiriendo un incremento en drenaje subsuperficial para riego por goteo. La viabilidad económica para los diferentes sistemas de riego pueden ser afectados por cambios en los patrones de cultivo.

Cárter et al . (1988) en un experimento establecido en Asunción Parish el cual se establecieron tres sistemas de manejo de agua en una superficie comercial de 7 hectáreas, para determinar si el nivel freático del agua puede ser manejado en una área de campo y si hay respuesta de la caña de azúcar al manejo del agua.

Los niveles freáticos de agua pueden tener un efecto adverso sobre la caña de azúcar en algún tiempo durante el año. La caña de azúcar es particularmente sensitiva a un alto nivel freático de agua durante el mes de invierno (estación de dormancia), alto SEW (Sumatoria de Excesos de agua) durante este tiempo puede afectar seriamente la producción.

Cada sistema consistió en establecer líneas de drenaje subsuperficial espaciadas a 15 metros , estas líneas de drenaje son conectadas a un colector de agua que tiene facilidades para remover agua por drenaje o añadir agua por subirrigación, la tierra adyacente a el lugar se utilizó como testigo.

La efectividad del nivel de control de agua estimada para medición del nivel freático entre drenes es calculado por SEW45 y comparando valores para el área drenada con los obtenidos en el registro.

SEW, es la suma de el producto de el tiempo y duración del nivel freático dentro de una distancia específica de la superficie del suelo. La distancia más usada comúnmente para calcular SEW es 30 cm, en este caso se usó para medir los excesos de agua SEW45.

La producción de azúcar indicó favorable respuesta al manejo del agua. Las parcelas manejadas con niveles freáticos produjeron 5.4 ton / ha más de caña y 874 kg /ha más de azúcar en 1984, que el obtenido en el testigo. Producciones diferentes en caña de azúcar fueron significantes en 89 y 94 por ciento de probabilidad, los cuales son atribuidos al drenaje subsuperficial.

Considerando los datos de tres años, las parcelas con manejo de agua produjeron un porcentaje anual de 9.8 ton / ha (15 por ciento) más caña y 3,851 (22 por ciento) más azúcar que lo realizado en el testigo.

MATERIALES Y METODOS

Reconocimiento del Area de Estudio

Localización Geográfica

El Distrito de Riego 029 Xicoténcatl, enclavado en la zona sur del estado de Tamaulipas, se caracteriza por ser una área en donde predomina en importancia el cultivo de la caña de azúcar, Sorgo, maíz, hortalizas y pastos teniendo una importancia económica vital para el desarrollo de los municipios de Xicoténcatl y Gómez Farías, Tam. (Se localiza en las dos márgenes del Río Guayalejo y margen izquierda del Río Frío, coordenadas geográficas de $22^{\circ} 55'$ de latitud norte y $98^{\circ} 40'$ de longitud oeste, la altura media es de 80 m.s.n.m y su topografía es relativamente plana.) Este se encuentra transferido a dos Asociaciones de Usuarios de Riego. A la Asociación civil de Usuarios del módulo I Xicoténcatl Río Frío, se transfirió el 15 de diciembre de 1993 y a la Asociación Civil de Usuarios del Módulo II San Lorenzo en el mes de enero de 1996. Estos dos módulos son los que se encargan de la operación, conservación y administración del Distrito de Riego, correspondiendo a la Comisión Nacional del Agua la administración de las obras de cabeza y la entrega del agua a los módulos en puntos de control definidos.

Características Generales del Distrito de Riego 029 Xicoténcatl

Infraestructura Hidroagrícola

Las principales fuentes de abastecimiento son el río Frío y el río Guayalejo. Las obras mediante las cuales se realizan los aprovechamientos son las presas derivadoras “El Nacimiento” y Poza Azul” del Río Frío, el conejo y “San Gabriel” del Río Guayalejo. Se cuenta además con la presa de almacenamiento “Lic. Emilio Portes Gil” la cual se alimenta del río Guayalejo a través de la derivadora San Gabriel y del canal del mismo nombre, el volumen de almacenamiento al Nivel de Aprovechamiento Máximo Extraordinario (NAME) es de 272 millones de m³, su capacidad total es de 230.78 millones de m³, capacidad útil de 177.78 millones de m³ y una capacidad de azolves de 53 millones de m³. En el Cuadro 3.1., se observa las características de las presas derivadoras del distrito.

Cuadro 3.1. Características de las presas derivadoras

Nombre	Río donde se ubica	Capacidad de obra de toma (m ³ /seg.)	Otros datos
Poza Azul (canal principal alto)	Frío	3	Ecurrimiento medio anual : 453.665 millones de m ³ Volumen anual aprovechable : 186.825 millones de m ³
Nacimiento (canal bajo)	Frío	4	
San Gabriel	Guayalejo	40	La presa San Gabriel se encuentra aguas arriba de “El Conejo” y los volúmenes de agua entregados dependen de esta última.
El conejo	Guayalejo	5	

Canales drenes y caminos

De las 24,607 hectáreas dominadas se cuenta con 417.96 kilómetros de canales, de los cuales 22.64 km (5.4 por ciento) pertenecen a la obra de cabeza y 395.32 km (94.6 por ciento) a la red menor.

Existen cinco canales principales: dos alimentadores de agua del Río Frío; canal principal "Alto" y canal principal "Bajo"; y del Río Guayalejo el canal principal "El Conejo"; dos se alimenta de la Presa de almacenamiento "Emilio Portes Gil"; el canal principal "Xicotécatl" y canal principal "San Lorenzo". La longitud es de 162.49 km de estos 13.9 por ciento pertenecen a la red mayor y 86.1 por ciento de la red menor. La mayor parte de la red mayor están sin revestimiento.

Drenes

Se cuenta con 306.27 km de drenes de los cuales 111.4 km son drenes principales (36.4 por ciento) y 194.87 km son secundarios (63.6 por ciento). El 35.1 por ciento de la red está clasificada en buenas condiciones, y el 64.9 por ciento de regulares a malas condiciones.

Caminos

Se encuentran 481.65 km de caminos, destacándose tres tipos: los de operación de acceso y de intercomunicación.

Volúmenes de Agua Utilizados para Uso Agrícola

Existe un incremento en los volúmenes de agua utilizados en los últimos cinco ciclos agrícolas, debido al incremento de la superficie de cultivo, la eficiencia de conducción (Cuadro 3.2)., se mantiene entre un 50 y 55 por ciento.

Cuadro 3.2. Volúmenes brutos, netos y eficiencias de conducción.

Ciclo agrícola	Volumen en millones de m ³		Eficiencia de conducción %
	Bruto	Neto	
1991 - 1992	81.947	45.281	55.3
1992 - 1993	188.640	94.464	50.1
1993 - 1994	176.727	96.133	54.4
1994 - 1995	197.880	105.814	53.5
1995 - 1996	300.156	162.956	54.3
Promedio	189.070	100.930	53.2

Cultivos

La superficie ocupada por los cultivos durante el ciclo agrícola de 1995 - 1996 se describe en el Cuadro 3.3., se observa como a través de los años la superficie de caña de azúcar se ha incrementando, producto de un mayor

apoyo en el crédito en las áreas de riego desplazando a los cultivos anuales de riego (soya, sorgo, maíz y frijol) y caña de temporal establecida fuera del Distrito.

Cuadro 3.3. Cultivos superficies, láminas, No. de riegos y volúmenes utilizados ciclo agrícola 1995-1996.

Cultivos	Superficie	Ciclo agrícola 1995 - 1996		No. de riegos	Volúmenes utilizado millares de m ³	
		Láminas (cm)				
		Neta	Bruta			
Ciclo O.I						
Cártamo	76	16.32	28.32	1.0	124	219
Maíz	40	15.50	29.00	1.0	62	116
Sorgo	368	27.17	50.87	1.6	1000	1872
Cebolla	131	118.47	210.23	9.5	1552	2754
Melón	65	59.54	106.46	4.8	387	692
Tomate	12	23.33	43.33	1.5	28	52
Calabaza	15	57.33	110.67	2.6	86	166
Chile	10	110.00	196.00	9	110	196
Subtotal	717	46.71	86.42	3.4	3349	6067
Ciclo P.V.						
Maíz	97	36.29	65.15	2.2	352	632
Sorgo	378	32.78	60.16	2.0	1239	2274
Frijol	97	44.95	78.35	3.1	436	760
Subtotal	572	35.44	64.09	2.2	2027	3666
Perennes						
Caña	15,458	97.27	179.09	3.9	150,364	276,830
Pastos	404	74.06	141.29	2.8	2,992	5,708
Cítricos	277	119.96	227.11	6.2	3,323	6,291
Papaya	19	54.21	96.32	2.8	103	183
Frutales	10	52.00	95.00	1.6	52	95
Subtotal	16,168	97.00	178.81	3.9	156,834	289,107
Segundos Cultivos						
Sandía	86	86.74	153.02	6.2	746	1,316
Total Cultivos	17,543	92.89	171.10	3.9	162,956	300,158
Uso Doméstico					4,018	7,812
Uso Industrial					8,581	16,548
Otros Usos					22,501	51,249
Total					198,058	375,765

Estudios de Apoyo

Estudio Topográfico

Los estudios realizados por Estudios Interdisciplinarios para el Desarrollo, S.C. (Eidesa) 1974 y planos topográficos del propio Distrito de Riego, demuestran la mayor altitud es de 125 m de acuerdo a las cotas de los planos de referencia localizados en la parte norte y este, en la parte media varía entre 60 y 80 m, la parte plana y baja hasta el Río Guayalejo alcanza una altitud que fluctúa entre 40 y 60 m.

El relieve es plano con áreas onduladas en la parte norte y este, con una pendiente media de uno a dos por ciento en dirección norte sur, encontrándose en la parte sur áreas planas con menor pendiente. La dirección del sistema de Drenaje es de Norte a sur siguiendo esta topografía del terreno.

Localización de los Pozos de Observación del Manto Freático.

La Construcción de los pozos de observación se realizó con personal del Distrito de Riego, se seleccionaron 153 sitios formando una malla regular con una equidistancia entre cada pozo construido de 1.5 km. De estos pozos de observación (Figura 3.1)., las perforaciones se efectuaron a profundidades que variaron de 5.0 m en los pozos marcados con los números 49, 89, 84, 106, 117 139, 146 con profundidades de 0.75 m 1.5 m en los pozos marcados con los

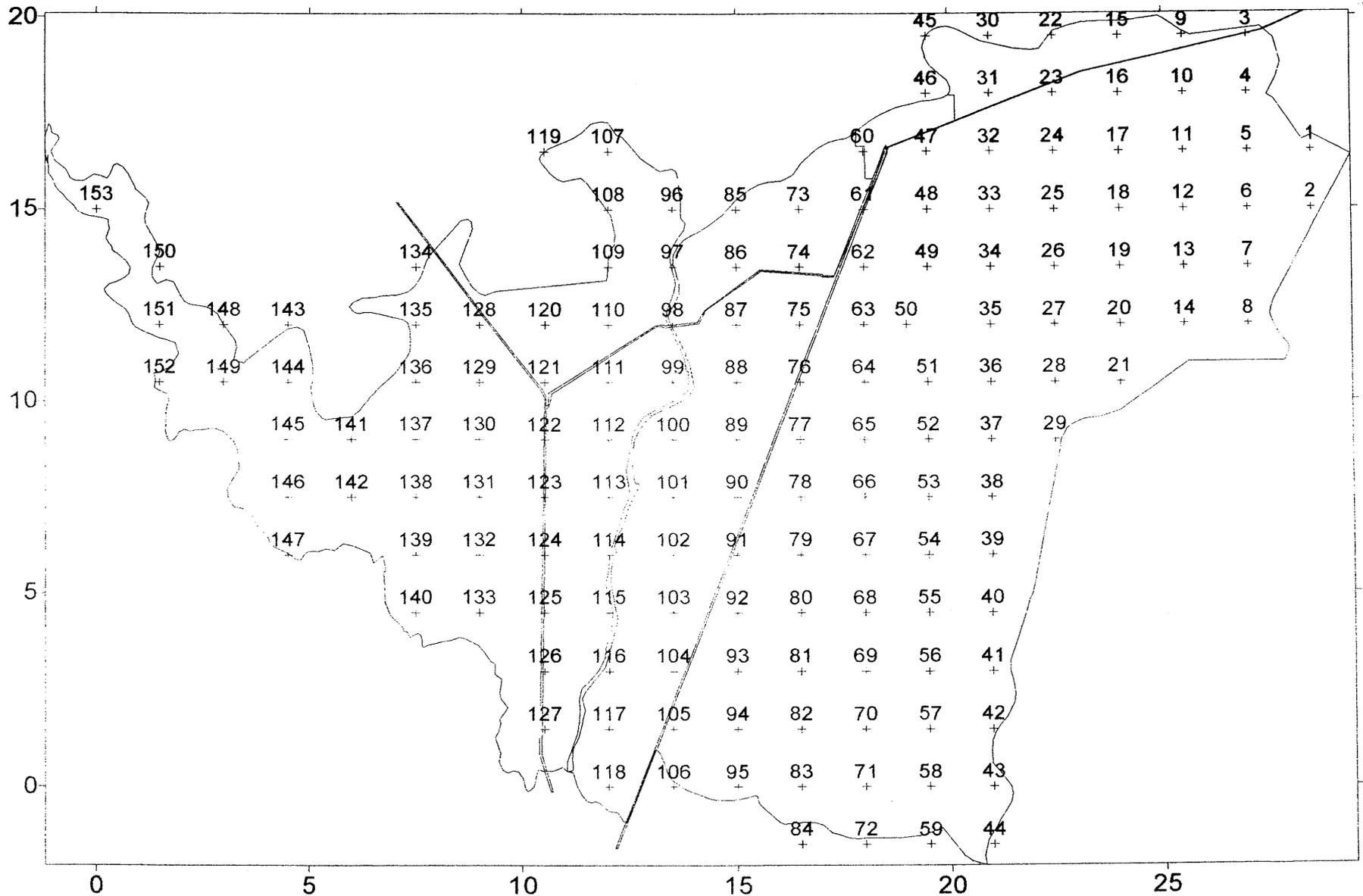


Figura 3.1. Localización de los pozos de observación del nivel freático.

números 4 y 11, 19, 20, 31, 38, 62, 67, 87, 93, 99, 100, 109, 111, 112, 113, 118, 120, 121, 123, 123,124,12.5,127,127,135,144,148,149 y 151. La máxima altura del brocal se encuentra a 106.3 y 106.4 m de a.s.n.m que corresponde al pozo No. 2 y 8 localizados en la zona Noreste del Distrito y la altura mínima de 57.83 m de a.s.n.m. del pozo No. 57 y 71 m de a.s.n.m.

Estudio Climático

El clima de la región según el sistema Koeppen, modificado por García (1973) está caracterizado por los índices Awo “ (w) (e), que corresponden al clima más seco de los cálidos subhúmedos con lluvias en verano con un cociente $P/T < 43.2$. El porcentaje de lluvia invernal es <5 de la anual, extremoso con una oscilación entre 7 y 14 °C.

La precipitación en esta región es originada por los vientos alisios provenientes den Noreste y son los causantes principales de las lluvias predominan de junio a octubre, así como por vientos huracanados o ciclónicos provenientes del caribe que provocan también las lluvias. Es en esta época en que se encuentra definido el período de lluvia, el 80 por ciento de la precipitación anual ocurre en estos meses. Esporádicamente se presentan lluvias en la época seca que puede deberse a humedad transportada por vientos alisios y precipitada por enfriamiento de los nortes que ocurre en estos meses. Durante la época de lluvias se presenta un período intraestival conocido

como canícula de aproximadamente 40 días y que se extiende del 14 de julio al 24 de agosto.

Durante el período comprendido de 1986 a 1995 en la estación climática de Xicoténcatl, el año más húmedo fue el de 1986 con precipitación total de 1195.48 mm con una evaporación total de 1670.13 mm. La temperatura media en el año fue de 24.35 °C. El año más seco en este período es el de 1989 con precipitación total de 680.26 mm y evaporación total de 991.83 mm la temperatura media anual fue de 25.85 °C la temperatura máxima diaria se registró el 28 de abril de 1991 con 44.5 °C. y la mínima diaria los días 21 y 25 de diciembre de 1989 con - 1.5 °C afectando seriamente al cultivo de la caña de azúcar , cultivos anuales y frutales .

La precipitación máxima diaria se presentó el 7 de agosto de 1989 con 251 mm, y una evaporación máxima diaria de 16.83 mm el 21 de junio de 1995. El promedio anual de días con lluvia es de 88, en todos los años la evaporación es mayor que la precipitación exceptuando el mes de septiembre.

Climograma de Gaussen

El Climograma elaborado para el período comprendido de 1986 a 1995 para la estación climatológica de Xicoténcatl Tamaulipas, sirvió para determinar los meses en donde se presenta la mayor distribución de la precipitación, así como para definir los meses más secos del año. En base a ello se seleccionó uno de

los meses más secos y más húmedo del año de menor precipitación y uno de los meses con menor y mayor precipitación del año más húmedo.

Estudio de Suelos

En base a la clasificación FAO/UNESCO, la SARH (1987) en un estudio de reconocimiento del Proyecto de Riego Río Frío en el municipio de Gómez Farías Tamaulipas, indica que en esta zona de riego se localizan cuatro unidades de suelo, distribuidas en 9,023 hectáreas. Los Vertisoles Pélicos (Vp) que ocupan el 81.1 por ciento de la superficie, el Regosol Calcárico asociado a Feozem Calcárico (Rc+Rc) con el 1.3 por ciento, la Asociación de Vertisol Pélico con Feozem Calcárico (Vp+Hc) con el 7.8 por ciento y el Fluvisol Eútrico (Je) con el 9.1 por ciento respectivamente.

Eidesa (1974) señala que para la Zona de Riego de San Lorenzo se localizan tres Unidades de Suelo, el Vertisol Pélico, Fluvisol Eútrico y Rendzinas (E). En datos estimados del plano de Estudio Agrológico Semidetallado de la Zona de Riego del Proyecto San Lorenzo, así como de la Integración de Unidades Suelos del Estado de Tamaulipas SARH (1982) y del plano de texturas del propio Distrito de Riego, en esta Zona el 85 por ciento de los suelos corresponde a los vertisoles pélicos, un 10 por ciento a los Fluvisoles Eútricos y un 5 por ciento a las Rendzinas dando un total de 10,434 hectáreas. Para la Zona de Riego de Xicoténcatl el 90 por ciento es de Vertisoles Pélicos y un 10 por ciento a Fluvisoles eútricos de un total de 5,150 hectáreas.

Vertisol Pélico

Suelos que se han formado in situ derivados a partir de margas y lutitas. Son profundos de más de 2.0 metros, de textura pesada con pendientes de 0 a 3 por ciento, poco desarrollados de color café grisáceo oscuro (10 YR 3/1 en húmedo). Por su textura arcillosa forma grietas en estado seco de más de 1.0 m de profundidad, permeabilidad muy lenta y drenaje interno pobre, sin pedregosidad en el perfil, de reacción alcalina y drenaje superficial lento. Los principales problemas de estos suelos es la dificultad para la labranza, permeabilidad muy lenta que ocasiona un drenaje interno muy pobre, como consecuencia de su textura muy arcillosa con un alto porcentaje de arcilla montmorillonítica.

Estos suelos que presentan erosión la cual se debe principalmente a la baja permeabilidad e infiltración a los escurrimientos de las áreas adyacentes. Estos suelos pueden presentar problemas de salinidad y sodicidad a diferentes profundidades en el perfil. Las series que se identifican con esta unidad de suelo en el distrito es el Faro, Margosa y Méndez, las cuales se diferencian por la textura y color de los horizontes inferiores. Se clasifican por el factor suelo y clima de segunda clase por el factor suelo bajo riego.

Fluvisol Eútrico

Se localizan en las márgenes del Río Guayalejo y al Noroeste de Xicotécatl son suelos profundos, generalmente de texturas franco arcillosas de color café

grisáceo (10 YR 5/2) en seco en sus horizontes superficiales, con pendientes menores del 2 por ciento estos suelos se han desarrollado a partir de materiales recientes (depósitos aluviales) su modo de formación a sido mediante el transporte fluvial y depositación de las corrientes señaladas, el perfil no presenta ningún desarrollo por lo que se trata de suelos recientes, son suelos profundos mayores de 2.0 metros. El drenaje interno es moderadamente bueno, no se presentan capas endurecidas ni cementadas, el perfil está libre de pedregosidad, el pH es ligeramente alcalino, tiene buen drenaje superficial y no hay evidencias de salinidad y/o sodicidad, no se observa erosión. Las series que dentro de esta unidad se encuentran el Sauzal y Guayalejo. Estos suelos no presentan ningún factor limitante, se consideran los mejores suelos se clasifican como de segunda clase por el factor clima en temporal y de segunda por el factor inundación, y de primera clase en riego.

Regosol Calcárico - Feozem Calcárico

Suelos poco profundos de menos de 50 cm, se localizan al norte de la Zona de Riego de Río Frío a la altura del poblado Plan de Guadalupe, están limitados por lutita, texturas franco arcillosas, de color café grisáceo y café oscuro.

Vertisol Pélico - Feozem Calcárico

Suelos poco profundos de menos de 60 cm, limitados por lutita, presenta abundante concentración de carbonatos de calcio, dominan las texturas arcillosas

de color café oscuro y café grisáceo. Se localizan en los primeros kilómetros del canal principal alto hasta el kilómetro 12+000 aproximadamente.

Rendzinas

Suelos desarrollados in situ sobre conglomerados de piedras y gravas cementadas por carbonato de calcio. Se localizan en pequeñas áreas al norte y sureste de Xicoténcatl, suelos de textura arcillosa de color café gris muy oscuro (10 YR 3/2) en sus horizontes superficiales, con buen drenaje, Ph ligeramente alcalino y una profundidad menor de 50 cm. La serie que se identifica con estos suelos es la reynosa. No se observa salinidad y/o sodicidad aparente y se clasifican como de sexta clase por el factor suelo, en el Distrito estos suelos están por arriba del nivel de operación del sistema de distribución.

Estudio Hidrológico

Lluvia Crítica.

Para llevar a cabo un proyecto de drenaje, es imprescindible contar con información referente a lluvia crítica o de diseño. Para calcular este valor se aplicaron los métodos : Frecuencia y Período de retorno de las precipitaciones y el de Relación Cuantía- Frecuencia, fórmula de Gumbel.

Frecuencia y Período de Retorno

Se elaboró un cuadro de frecuencias (Cuadro 4.2) el cual consta de nueve columnas. La columna número uno indica el número de orden, la columna dos agrupa a las lluvias registradas de acuerdo a su cantidad, se establecen intervalos de lluvia de cinco en cinco milímetros; en la columna tres se anota el número de observaciones, de esta forma se obtienen los valores de las tres primeras columnas. En la columna cuatro se calcula la frecuencia en que ocurre cada precipitación según la fórmula:

$$F_i = \frac{N_i}{\sum N_i} \quad (19)$$

En Proyectos de Drenaje es fundamental determinar la frecuencia F con que esta lluvia es igualada o superada. Es pues evidente que esa frecuencia es igual a la suma de las frecuencias con que ocurren lluvias iguales o mayores a la considerada, este valor obtenido se coloca en la columna cinco.

La frecuencia de las precipitaciones menores a la considerada, incluyendo los días sin lluvia constituye la columna seis, se obtiene restando a la unidad la columna cinco.

El período de retorno T es la inversa de la frecuencia, para calcular este periodo en días que corresponde a la columna siete se obtiene de acuerdo a:

$$T = \frac{1}{F} \quad (20)$$

Para obtener el período de retorno T en años que corresponde a la columna ocho dividimos la columna siete entre el número de años analizados.

El número de veces por año en que la lluvia supera a una precipitación determinada P_i columna nueve se calcula dividiendo el número de años observados entre la columna siete.

Relación Cantidad - Frecuencia. Fórmula de Gumbel.

La Gumbel es una distribución Log - Normal con asimetría constante. De las muchas fórmulas que existen Gumbel es una de estas y adopta la forma siguiente:

$$P = a + bX \quad (21)$$

$$X = -\ln[-\ln(1 - F')] \quad (22)$$

$$F' = 1 - (e)^{-\frac{a-p}{b}} \quad (23)$$

Donde P , es la cantidad de precipitación, mm; a, b , son parámetros característicos del área en estudio; F' , es la frecuencia con que es igualada o superada una lluvia; \ln , es el logaritmo natural.

Para la aplicación de esta fórmula, se inicia con el análisis de precipitaciones en orden creciente a partir de 45 mm, ya que las ecuaciones de Gumbel trabajan con valores mayores de 45 mm, valores menores tienden a cero y no se pueden interpretar, el período de retorno se calculó a partir de la división de la unidad entre la frecuencia para obtener tiempo de retorno en días,

ecuación (20) posteriormente se divide entre los 31 días del mes de julio, para obtenerlo en años dividiendo la unidad entre el resultado de multiplicar el tiempo de retorno por 31 días. El valor de X es obtenido logarítmicamente a partir de restarle a la unidad la frecuencia con que es igualada o superada una lluvia, este valor se utilizó para la obtención de la precipitación con la ecuación (21) la cual fue necesario calcularla para obtener la nueva frecuencia ecuación (23) que es la base para obtener los nuevos valores del período de retorno. Los parámetros a y b se determinaron mediante regresión lineal Cuadro 3.4., en el cual se ordenan las precipitaciones a partir de 45 mm hasta el intervalo de 140 mm.

Cuadro 3.4. Parámetros utilizados en regresión lineal para obtener los valores de a y b en la fórmula de Gumbel.

<i>P</i> en <i>mm</i>	$X = -\ln[-\ln(1 - F^n)]$
45	3.376
50	3.439
55	3.748
60	3.892
65	4.192
70	4.262
75	4.262
80	4.336
85	4.504
90	4.600
95	4.706
100	4.706
105	4.824
110	4.824
115	4.824
120	4.958
125	4.958

Cuadro 3.4. Continuación

<i>P</i> <i>en</i> <i>mm</i>	$X = -\ln[-\ln(1 - F^r)]$
130	5.113
135	5.519
140	5.519

Los valores obtenidos son:

$$a = - 124.7379 ; b = 47.9755 ; r = 0.97$$

Introduciendo estos valores de a y b en la ecuación (21) se obtiene la precipitación, de igual forma se introducen en la ecuación (23) para obtener la frecuencia. El período de retorno se obtiene con la ecuación (20).

Relación Precipitación-Escorrentía.

Para estimar el escurrimiento superficial se utilizó el método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos partiendo de la lámina total precipitada y características de la cuenca se estima, el volumen de escurrimiento producido por una tormenta. La relación entre precipitación, escurrimiento, retención e infiltración en cualquier tiempo durante una tormenta se puede expresar como:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P} \quad (24)$$

Donde F , es la lámina infiltrada; S , es la lámina retenida en la cuenca; Q es la lámina de escurrimiento; y P , es la lámina precipitada o escurrimiento máximo potencial.

La retención es igual a la diferencia entre la precipitación total y el escurrimiento registrado y las siguientes relaciones son aplicables:

$$P_e = P - I_a \quad (25)$$

$$F = P_e - Q \quad (26)$$

Donde P , es lámina total precipitada; P_e , es precipitación excesiva; I_a , es la abstracción inicial; F , es la lámina infiltrada; Q , es el volumen escurrido.

Sustituyendo estas relaciones en la ecuación (24) y resolviendo para Q :

$$P_e - \frac{Q}{S} = \frac{Q}{P} - I_a \quad (27)$$

$$(P - I_a) - \frac{Q}{S} = \frac{Q}{P} - I_a \quad (28)$$

$$(P - I_a)^2 - Q(P - I_a) = QS \quad (29)$$

$$QS + Q(P - I_a) = (P - I_a)^2 \quad (30)$$

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a)} + S \quad (31)$$

Donde Q , es el Volumen de escurrimiento, cm; S , es el Volumen retenido en la cuenca; I_a , son las abstracciones iniciales, cm.

El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos recomienda a las abstracciones iniciales, expresarlas como una función de la retención de la cuenca en donde:

$$I_a = 0.2S \quad (32)$$

Sustituyendo en la ecuación (26) se obtiene una expresión para la estimación del volumen de escurrimiento a partir de la lámina total precipitada y las características de la cuenca expresadas en su capacidad de retención:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P - 0.8S)} \quad (33)$$

Donde Q , es el Volumen de escurrimiento, cm; P , es la lámina total precipitada, cm; S , es la retención de la cuenca, cm.

El valor de S , se expresa por medio de índices de cuenca o curvas numéricas W , que son función de factores como el tipo de suelo, tipo y condición de la vegetación presente, y las condiciones de humedad antecedentes a la ocurrencia de la precipitación, mediante la relación empírica siguiente:

$$S = \frac{2500}{W} - 25 \quad (34)$$

Donde S , indica la retención de la cuenca, cm; W , es el índice de cuenca en cm.

Valores altos de ($W = 100$) del índice de la cuenca indican una retención baja, y como consecuencia un alto potencial de escurrimiento.

Para determinar el índice de cuenca se asignó al suelo de la cuenca uno de los cuatro grupos de suelo de acuerdo a su potencial de escurrimiento. Este potencial es función de la clase textural del suelo y de la profundidad de éste. Los grupos son descritos por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos.

En la determinación de la humedad antecedente real, se consideran tres niveles de humedad antecedente sobre la base de la lámina precipitada acumulada en los cinco días previos a la ocurrencia de la precipitación (Cuadro 3.5).

Cuadro 3.5. Condición de la humedad antecedente (C.H.A) en función de la lámina precipitada acumulada.

Condición de humedad antecedente (C.H.A)	Precipitación acumulada (mm)
I	< 12.5
II	12.5 - 37.0
III	> 37.0

Corrección del valor del índice de cuenca para la condición de humedad antecedente real.

Para condiciones de humedad antecedente I y II se pueden obtener de las siguientes relaciones:

$$W_I = 2.166 + 0.169 W_{II} + 7.66 (10)^{-3} W_{II}^2 \quad (35)$$

$$W_{III} = 6.931 + 1.596 W_{II} - 6.73 (10)^{-3} W_{II}^2 \quad (36)$$

Donde W_I , es el índice de cuenca para condición seca; W_{II} es el índice de cuenca para condición media; W_{III} , es el índice de cuenca para condición húmeda.

Coefficiente de Escurrimiento.

En el criterio de diseño el principal problema es la magnitud de la lluvia por lo que en este caso, es necesario establecer la relación entre dicha magnitud y las pérdidas. Según el criterio del método de conservación de suelos de los Estados Unidos, la relación entre el coeficiente de escurrimiento y la altura de precipitación total de una tormenta se expresa de la forma:

$$C_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P^2 + 0.8SP)} \quad (37)$$

Donde C_e , representa el coeficiente de escurrimiento; P , la altura de la precipitación; S , es el valor de retención de la cuenca.

Utilizando la ecuación (37) se calcula el coeficiente de escurrimiento.

Elección de la lluvia crítica

En la selección de lluvia crítica y se consideran dos tipos: la que se emplea para cálculo del drenaje subterráneo y para la esorrentía.

Para el drenaje subterráneo se elige como lluvia crítica la que es igualada o superada cinco veces al año. Este procedimiento no considera las precipitaciones que ocurren en días consecutivos que pueden dar origen a elevaciones del nivel freático superiores a la que origina la considerada como lluvia crítica. Sin embargo este método es bastante utilizado. Para la esorrentía como norma general se considera como lluvia crítica la que se presenta con un período de retorno de 10 años.

Coeficiente de Drenaje

Luque et al . (1991) lo relacionan el coeficiente de drenaje, con el exceso de precipitación expresado como la cantidad de agua en caudal continuo o en lámina que desaloja un suelo en determinada área y en unidad de tiempo.

La eliminación del exceso de agua se lleva a cabo de manera superficial como excedente del escurrimiento mediante desague superficial y a nivel

subsuperficial eliminando los excedentes freáticos o “recarga” cuyo efecto es el abatimiento del freático.

Cálculo del coeficiente de drenaje.

El cálculo La lámina infiltrada y lámina escurrida se efectuó con las ecuaciones:

$$L_i = Pp (1 - C_e) \quad (38)$$

Donde L_i , es la lámina infiltrada, cm; Pp , es precipitación, mm; C_e , es el coeficiente de escurrimiento.

$$L_e = Pp * C_e \quad (39)$$

Donde: L_e , es lámina escurrida, cm; Pp , precipitación, mm; C_e , es el coeficiente de escurrimiento.

Obtenidos los valores de L_i y L_e se calcula el coeficiente de drenaje de la forma siguiente:

$$C_d = \frac{L_i * A}{t} \quad (40)$$

Donde C_d , es el coeficiente de drenaje, m/d; L_i , lámina infiltrada, m; A , es el área, m²; t, es el tiempo, 86400 seg.

Estudios Específicos de Drenaje

Estudios del Manto Freático

Las lecturas mensuales de los pozos de observación (1993 a 1995), se concentraron en hoja de cálculo, para procesarlos por medio del programa Winsurf, utilizando en su interpolación el método del Krigage generando los planos de Isobatas, Isohipsas, mínimos niveles freáticos e incrementos, de esta serie de planos se obtuvo la información siguiente.

Isobatas

Localización y cuantificación de la superficie afectada por cada rango del nivel freático en diferentes períodos del año.

Localización de los sitios cuya afectación permanece constante, la cual permite decidir la prioridad que se debe dar a cada superficie.

Identificación de las áreas cuya aportación se debe a los riegos y a las lluvias.

Verificación del efecto de los trabajos que se realizan en desazolve y limpieza del sistema de conducción y drenaje, instalación de estructuras de estructuras de control y medición en la red de distribución, revestimiento

de canales y regaderas interparcelarias y manejo de agua a nivel parcela.

Isohipsas

Zonas con diferentes valores de gradiente hidráulico

Posibles zonas de carga por lluvia, riegos o causas motivadas por flujos de estratos profundos.

Valor relativo de la conductividad hidráulica de cada área.

Interpretación de la Influencia de los ríos y corrientes superficiales tomando en consideración que las curvas de las isohipsas con la concavidad hacia aguas abajo indica que la corriente actúa como dren y curvas con concavidad hacia aguas arriba actúa cargando el acuífero.

Isohipsas Mínimas

Los niveles freáticos de cada lugar cuando estos reciben las menores aportaciones.

Aproximación a la condición de un régimen permanente.

Dirección y recorridos más probables de las fluctuaciones de las aguas freáticas futuras, por lo que representa gran importancia para el diseño del drenaje interceptor y de alivio, tanto de tipo general como parcelario.

Líneas de Corriente

El trazo de las líneas perpendiculares a distancias aproximadamente constante a las equipotenciales definen líneas de corriente que muestran la tendencia del movimiento de las aguas freáticas.

La unión de éstas líneas de corriente definen centros de acumulación o sumideros en zonas donde el nivel freático está siendo drenado, las salidas y difusión de ellas corresponden a lugares de alta alimentación de los niveles freáticos.

Su utilidad es necesario para diseñar la dirección de los drenes interceptores que tendrán que ser proyectados perpendicularmente a las líneas de corriente.

Incrementos del Manto Freático

Complementa el plano de líneas de corriente precisa la localización recomendable para los drenes.

Indica la dirección más conveniente para interceptar los desplazamientos de agua, sobreponiendo los planos de isohipsas de cada mes al de

mínimos niveles freáticos, de esta forma se pueden localizar los promontorios de agua así como la forma en que se difunden.

Define las causas que originan los promontorios, en relación a que algunos que se desvanecen vuelven a aparecer en otros lados teniendo su origen en sobrerriegos o en filtraciones de canales cuya operación es deficiente al operar con diferentes tirantes en el período de riego.

Indica la existencia de domos que se manifiestan de forma más o menos similar por varios meses consecutivos, lo que se debe a filtraciones de una fuente que opera de manera permanente.

Desplazamientos laterales de las aguas freáticas se van delineando con la secuencia gráfica, de esta forma se verifica si los drenes del anteproyecto están correctamente localizados y si son suficientes para evitar o disminuir sensiblemente los flujos laterales hacia zonas de concentración.

Constituye un complemento del plano de líneas de corriente, ya que precisa la localización que deben tener los drenes y la dirección más correcta para interceptar los desplazamientos de agua.

Gráfica Areas Tiempo

Las superficies afectadas por diferentes niveles freáticos durante el año obtenidos de los planos de isobatas, se representa por medio de una gráfica.

Para definir las posibles causas que ocasionan la afectación es preciso compararla con otra gráfica que representa los volúmenes extraídos para riego y las precipitaciones ocurridas durante el mismo lapso de tiempo, la gráfica nos permite obtener.

La variación mensual del área afectada de cada rango de nivel freático.

Los meses más críticos en donde se presentan los niveles freáticos más cercanos a la superficie del suelo y su duración.

Interacción de los niveles freáticos altos, con los meses de mayor extracción del agua para riego de las fuentes de almacenamiento.

Influencia de la precipitación en la variación de la profundidad del freático.

Define la principal fuente de alimentación del nivel freático.

La incidencia de los bombeos en el abatimiento del nivel freático en los meses de mayor o menor extracción.

Estrato Impermeable

Se levantó un plano con las profundidades del estrato impermeable en el área de estudio, se define las áreas que presentan estratos que actúan como obstáculos al libre movimiento del agua en forma vertical y horizontal, la cual favorece que se acumule el exceso de agua sobre todo el suelo. El estrato impermeable es el aquel estrato cuyas propiedades transmisoras de agua son

desfavorables, que solo fluyen a través de el tanto vertical como horizontalmente cantidades de agua despreciables, considerándose impermeable aquel estrato cuya conductividad hidráulica es menor al 10 por ciento de la conductividad hidráulica calculada en el estrato superior.

Estudio de la Conductividad Hidráulica

El cálculo de este parámetro se realizó por el método del agujero de barrena o Auger Hole, Van Beers (1983) en campo durante el mes de junio de 1996. Para ello se escogieron seis sitios representativos de la superficie del Distrito de Riego perforándose seis pozos utilizando barrena tipo holandesa de 10.5 cm de diámetro con extensión de 3.0 m, las lecturas se tomaron 24 horas después de la perforación. La Conductividad Hidráulica K se calculó tomando en consideración que se trata de un suelo homogéneo e isotrópico aplicando las ecuaciones de Ernst:

$$\text{Si } S = 0 ; K = \frac{(3600)(r^2)}{(H + 10r)\left(\frac{2-h}{H}\right)h} * \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (41)$$

$$\text{Si } S \geq \frac{H}{2} ; K = \frac{(4000)(r^2)}{(H + 20r)\left(2 - \frac{h}{H}\right)h} * \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (42)$$

Donde K , es la conductividad hidráulica, m/d; Δh es igual a la diferencia de $h_0 - h_n$, condición de que $\Delta h \leq \frac{h_0}{4}$, cm; Δt , es el tiempo transcurrido desde

h_0 hasta h_n , seg; C , es el factor de geometría del pozo en función de H , h , r , S y h es igual a $\frac{h_0 + h_n}{2}$; r , es el radio del pozo, cm ; t , es el tiempo, seg; S , es la distancia vertical de la plantilla del pozo barrenado al hidroapoyo. H , r , h , Δt están dados en centímetros para obtener K en; m / d.

Las ecuaciones se pueden simplificar con la siguiente relación:

$$K = C \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (43)$$

Donde C , es el factor de geometría del pozo y es función de H , h , r , S

Estudios del Espacio Poroso Drenable

La Porosidad drenable (μ) se obtuvo de la siguiente expresión:

$$\mu = \varepsilon - Cc \quad (44)$$

Donde ε representa la porosidad total; Cc es la capacidad de campo

Cuando no existen datos suficientes, el valor de la porosidad drenable se

obtiene de la forma $\mu = \sqrt{K}$.

La porosidad total Narro (1994) la define con la ecuación:

$$E = \frac{V_p}{V_t} = 1 - \frac{D_a}{D_s} = e + \theta \quad (45)$$

Donde: E , representa la porosidad total; V_p , es el volumen de poros V_t ; D_a es la densidad aparente; D_s , es la densidad del suelo; e , es el contenido

volumétrico de aire; θ , es el volumen de agua contenido en una unidad de volumen de suelo.

Pizarro (1985) la señala de la forma:

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_t} = \left[1 - \frac{D_a}{D_r} \right] \quad (46)$$

$$\text{En por ciento } \varepsilon = 100 \left[1 - \frac{D_a}{D_r} \right] \quad (47)$$

Donde D_r , es la densidad real

La importancia de la Porosidad drenable en los cálculos de drenaje, se puede expresar señalando que si a un suelo que se encuentra a capacidad de campo, se le agrega un volumen V_a de agua, el volumen de suelo que se

satura está dado como $s = \frac{V_a}{\mu}$. Es práctico, en lugar de volúmenes utilizar

alturas de agua. Así a un suelo a capacidad de campo infiltra una altura R de agua, el nivel freático tiene una elevación de h dada por:

$$h = \frac{R}{\mu} \quad (48)$$

Espaciamiento entre Drenes

Régimen permanente

Las fórmulas que se aplican suponen que el manto freático se encuentra estable, la cantidad de agua que lo alimenta es igual a la que se elimina por los drenes.

Los criterios de drenaje se expresan en función de:

Caudal a eliminar

Profundidad a que se estabiliza el manto freático

Régimen variable

Se establecen dos criterios en términos dinámicos:

Criterio para época de lluvia

Criterio para época de riego

Criterio para Época de Lluvia . En época de lluvias, el nivel freático sufre una serie de oscilaciones, con respecto a la cantidad de precipitación. El criterio de drenaje en este caso permite que como consecuencia de las precipitaciones, el nivel freático se eleve hasta una profundidad “p” medida desde la superficie del

terreno , con una frecuencia de “N” veces por año. La frecuencia que más se utiliza es la de $N = 5$ veces por año , siendo muy discutida su aplicación. En el Cuadro 3.6., se observa los valores de “p” para criterio de para época de lluvia.

Cuadro 3.6. Valores de “p” criterio época de lluvia (Tomado de Pizarro, 1985).

Días después de la lluvia	p: profundidad del nivel freático (m)		
	Clase A pastos y hortalizas	Clase B Cultivos extensivos	Clase C Frutales
0	0.30	0.50	0.90
1	0.50	0.80	1.10
2	0.70	1.0	1.20
3	0.80	1.10	1.30

Criterio para época de Riego . Al aplicar un riego, casi toda el agua es retenida por el suelo elevando su humedad hasta la capacidad de campo. El exceso inevitable eleva el nivel freático hasta alcanzar en algunos casos la superficie del terreno. El criterio considera que “N” días después de que se aplica un riego, el nivel freático habrá descendido a una profundidad “p” . El valor que se utiliza es de $N = 3$ días, aunque en algunos casos es preferible utilizar valores de $N = 4$ o $N = 2$ días cuando el cultivo es muy sensible al exceso de humedad. Para obtener “p” es recomendable obtenerlo considerando la profundidad del 80 por ciento de las raíces. En el Cuadro 3.7., se dan los valores de “p” para criterio de época de riego..

Cuadro 3.7.. Valores de "p" para N = 3 y N = 4 días, criterio época de riego (Tomado de Pizarro, 1985)

Cultivos	p (m)
Pastos (1)	
Suelos de textura fina	0.70
Suelos arenosos	0.50
Hortalizas	0.50 - 0.80
Cultivos Extensivos	0.90 - 1.20
Frutales	1.20 - 1.50
_____ ¹ para N = 4 días	

Ecuaciones para Régimen Permanente.

La ecuación de Hooghoudt, supone que el flujo no es solamente horizontal agrega que alrededor de los drenes existe flujo radial:

$$L^2 = \frac{8k_2hd}{R} + \frac{4K_1h^2}{R} \quad (49)$$

Donde L es el espaciamiento entre drenes, m; R es la percolación, m/d; K_1 es conductividad hidráulica del estrato situado sobre los drenes; m/d; K_2 es conductividad hidráulica del estrato situado bajo los drenes; m/d; h es la altura del nivel freático en su punto medio, respecto al nivel de los drenes; m; este valor se calcula como diferencia entre la profundidad de los drenes H y la profundidad óptima del nivel freático $h = H - p$; d es el espesor o estrato equivalente de Hooghoudt, depende de L, D y r donde r representa el radio de los drenes.

Hooghoudt asume que las líneas de flujo son horizontales hasta llegar a una región $0.7D$ del dren, a partir de esta zona adoptan una forma radial, entre menor va siendo la distancia, la concentración de flujo es mayor aumentando la resistencia al movimiento.

Esta mayor resistencia al flujo es equiparada por Hooghoudt a una disminución del espesor “ D ” del estrato a través del cual se mueve el agua. La diferencia expresa la restricción del flujo que significa la existencia de flujo radial en la proximidad de los drenes, “ d ” se puede calcular por la fórmula:

$$d = \frac{L}{8(R_h + R_r)} \quad (50)$$

$$R_h = \frac{L - 1.4D}{8DL} \quad (51)$$

$$R_r = \left(\frac{1}{\alpha}\right) \ln\left(\frac{0.7D}{r}\right) \quad (52)$$

Hooghoudt , preparó un extenso juego de tablas dando valores a d , espesor del “estrato equivalente” según los valores de D_0 , L y r , las tablas las cita Pizarro (1985) están marcadas con el No. 3 y muestra estos valores denominando a h_0 en lo que en la misma tabla aparece como D . La Figura 3.2., presenta los parámetros utilizados en la fórmula de Hooghoudt.

Para el caso de zanjas abiertos Figura 3.3., el espesor equivalente de Hooghoudt “ d ” , se asemeja el dren que tenga el mismo perímetro mojado, es decir que cumpla la relación :

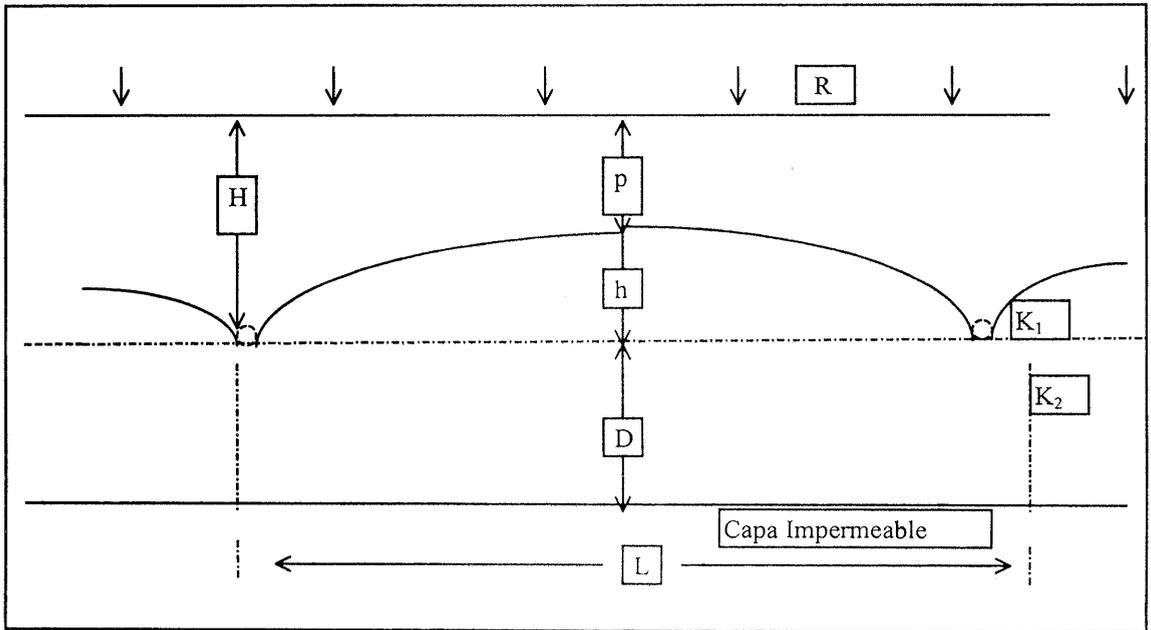


Figura 3.2. Parámetros utilizados en la fórmula de Hooghoudt

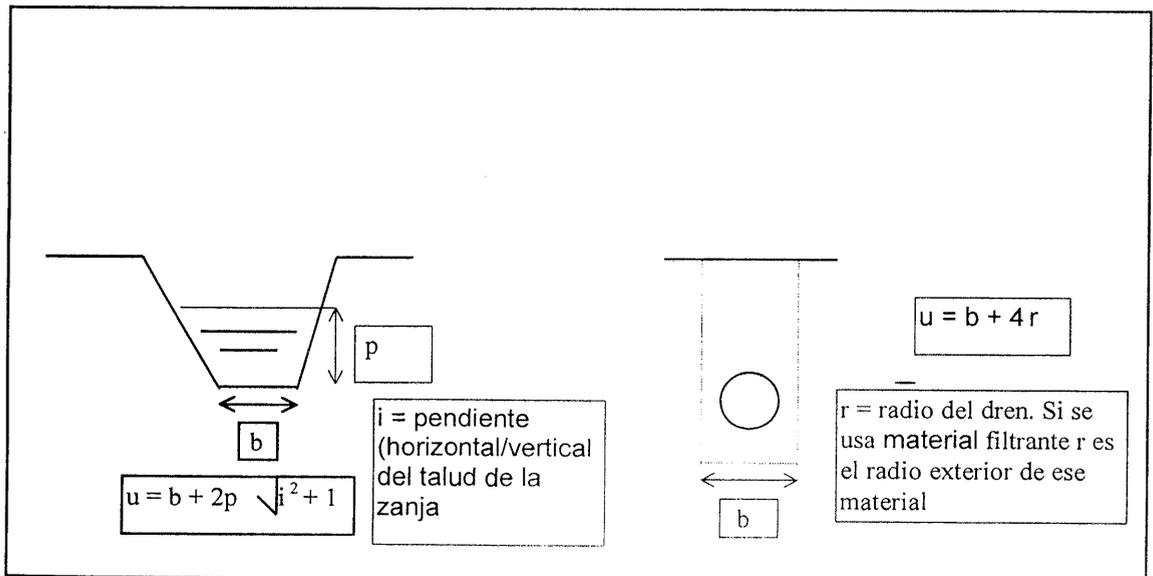


Figura 3.3. Valor del perímetro mojado del dren "u" dependiendo de si se trata de zanja abierta o tubería enterrada.

$$u = b + 2n\sqrt{i^2 + 1} = h + 4r \quad (53)$$

Donde r es el radio exterior del tubo

Espaciamiento entre drenes utilizando la fórmula de Hooghoudt.

El sumando $\frac{8k_2hd}{R}$ representa el movimiento del agua por debajo de los drenes y $\frac{4K_1h^2}{R}$, al movimiento por encima de los drenes. La ecuación (49), se puede escribir de la forma:

$$R = \frac{8K_2hd}{L^2} + \frac{4K_1h^2}{L^2} \quad (54)$$

esta se descompone en dos componentes $\frac{8K_2hd}{L^2}$ que representa el gasto transportado por debajo de los drenes y $\frac{4K_1h^2}{L^2}$ gasto transportado por encima de los drenes. Al aplicar la fórmula se pueden presentar varios casos, para el caso de este estudio se utilizó la fórmula (55) la cual se utiliza cuando existe un solo estrato por encima de la capa impermeable Figura 3.4., en este caso $K_1 = K_2$ entonces:

$$L^2 = \frac{4Kh}{R}(2d + h) \quad (55)$$

Espaciamiento entre Drenes aplicando la fórmula de Ernst.

Considera tres componentes en el flujo: el vertical, el horizontal, y uno radial. Figura 3.5., la fórmula aplicada para el suelo homogéneo constituido por un solo estrato donde $\alpha = 1$ es la siguiente:

$$h = R \frac{D_v}{K} + R \frac{L^2}{8KD_1} + R \frac{L}{\pi K} \ln \frac{D_r}{u} \quad (56)$$

$$D_1 = D_r + \frac{h}{2} \quad (57)$$

Como máximo $D_r = L/4$

Donde K , es la conductividad hidráulica, m/d; R , es la percolación, m/d; D_v es el espesor del estrato donde se efectuó el movimiento vertical, m; D_r , es el espesor del estrato donde se realiza el movimiento radial, m; u , es el perímetro mojado del dren, m; $D_r = h$. Las fórmulas (56) y (57) fueron aplicadas para este caso en donde el suelo es homogéneo y está constituido por un solo estrato como se presenta en la (Figura 3.6).

Ecuaciones para Régimen Variable

Espaciamiento entre Drenes utilizando la Fórmula de Glover - Dumm

Cuando se aplica un riego, una parte del agua es retenida en la zona radicular, otra se infiltra a mayor profundidad, si esta agua alcanza la capa

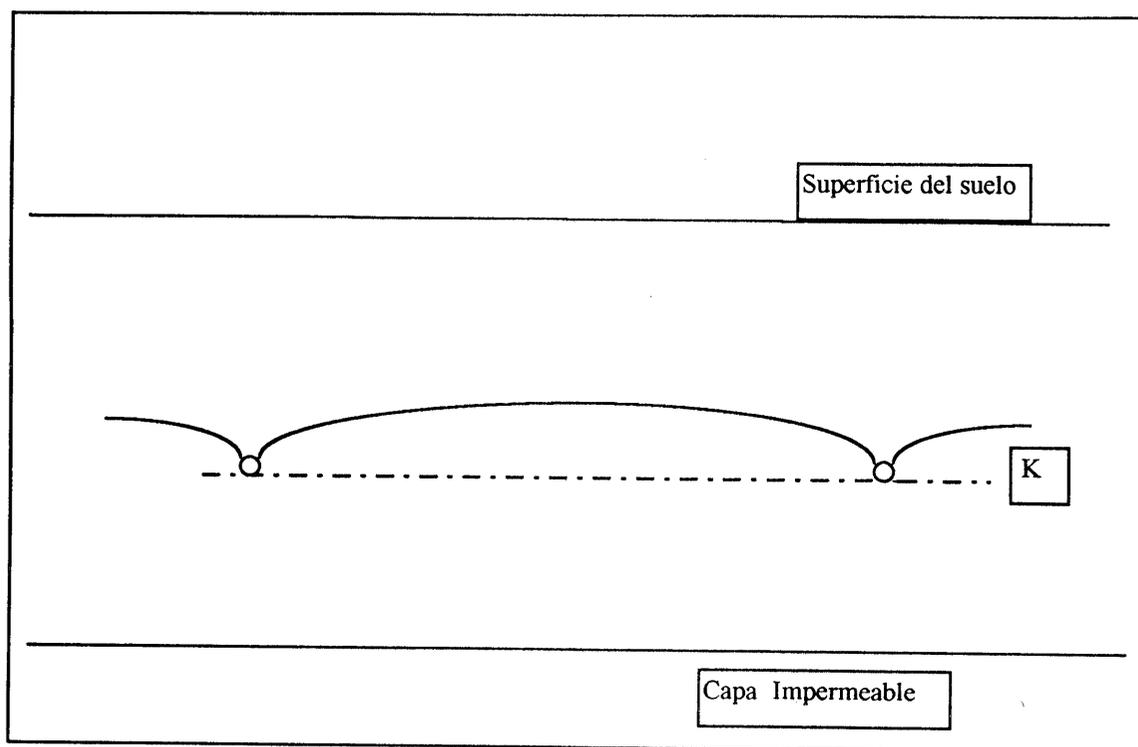


Figura 3.4. Presencia de un estrato por encima de la capa impermeable

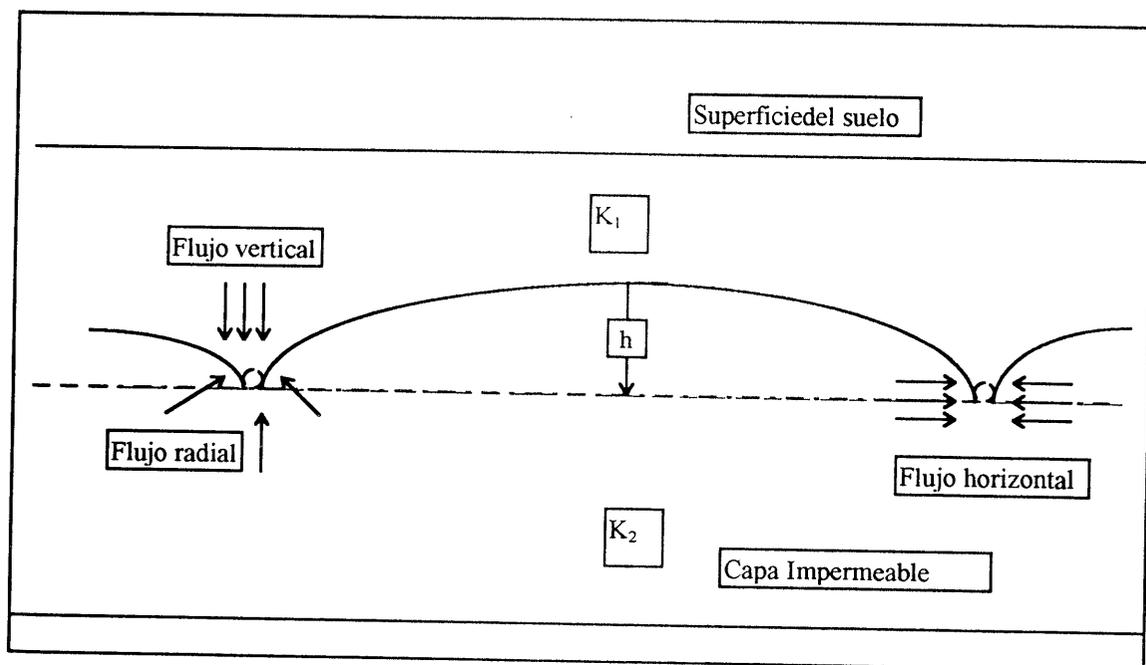


Figura 3.5. Representación del flujo de acuerdo a Ernst

freática ocasiona una elevación de su nivel. Cuando se realizan riegos en varios intervalos, la elevación del mantol freático, puede ser no perjudicial, el perjuicio viene cuando los distintos riegos de una temporada pueden elevar el mantol freático. En este caso, el sistema de drenaje debe trabajar bajando el nivel freático cumpliendo con el criterio de drenaje establecido (Figura 3.7).

$$h_t = 1.16 h_0 e^{-n2\alpha t} \quad (58)$$

en la que:

$$\alpha = \quad (59)$$

Donde h_0 es la altura inicial sobre el nivel de los drenes, m; h_t es altura sobre el nivel de los drenes en el transcurso de un tiempo t , m; t es el tiempo transcurrido desde que comenzó el descenso del nivel freático, días; KD es transmisibilidad; $m^2 / \text{día}$; μ es la porosidad drenable; L es el espaciamiento entre drenes; m.

Cuando el valor de $\alpha \tau > 0.2$, el valor que corresponde a $n = 3$ en la fórmula general es despreciable, quedando esta fórmula:

$$h_t = 1.16 h_0 e^{-\alpha \tau} \quad (60)$$

Sustituyendo α en la formula (60) por su valor en (59), se llega a la fórmula de Glover - Dumm:

$$h_t = \pi^2 \cdot \quad (61)$$

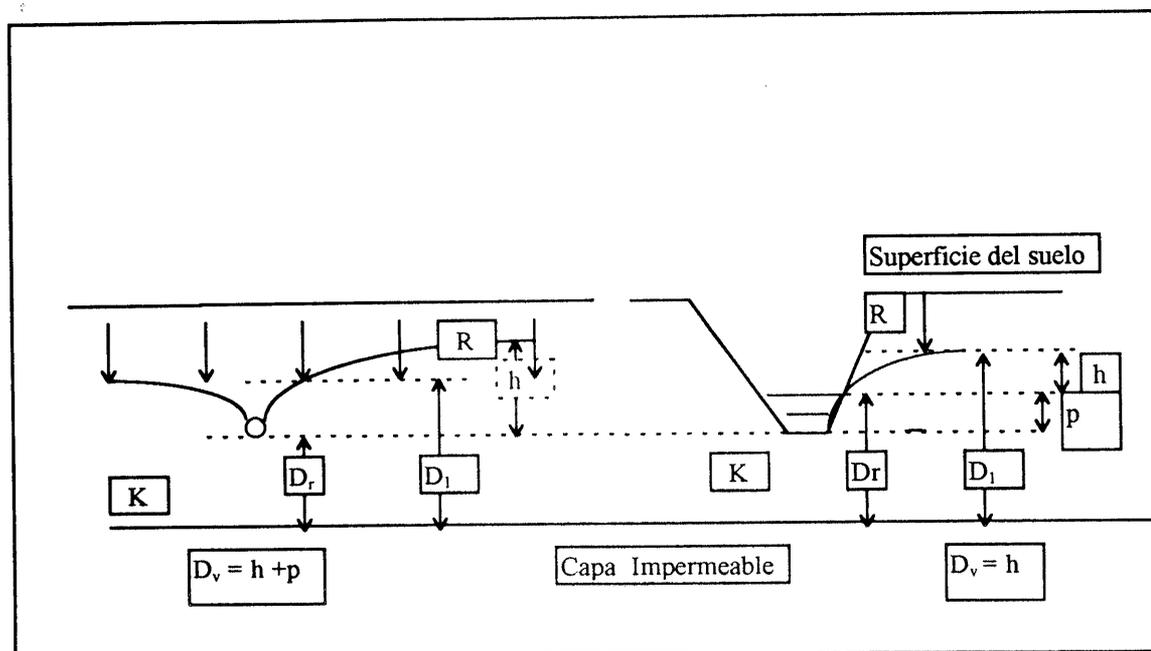


Figura 3.6. Suelo homogéneo constituido por un solo estrato

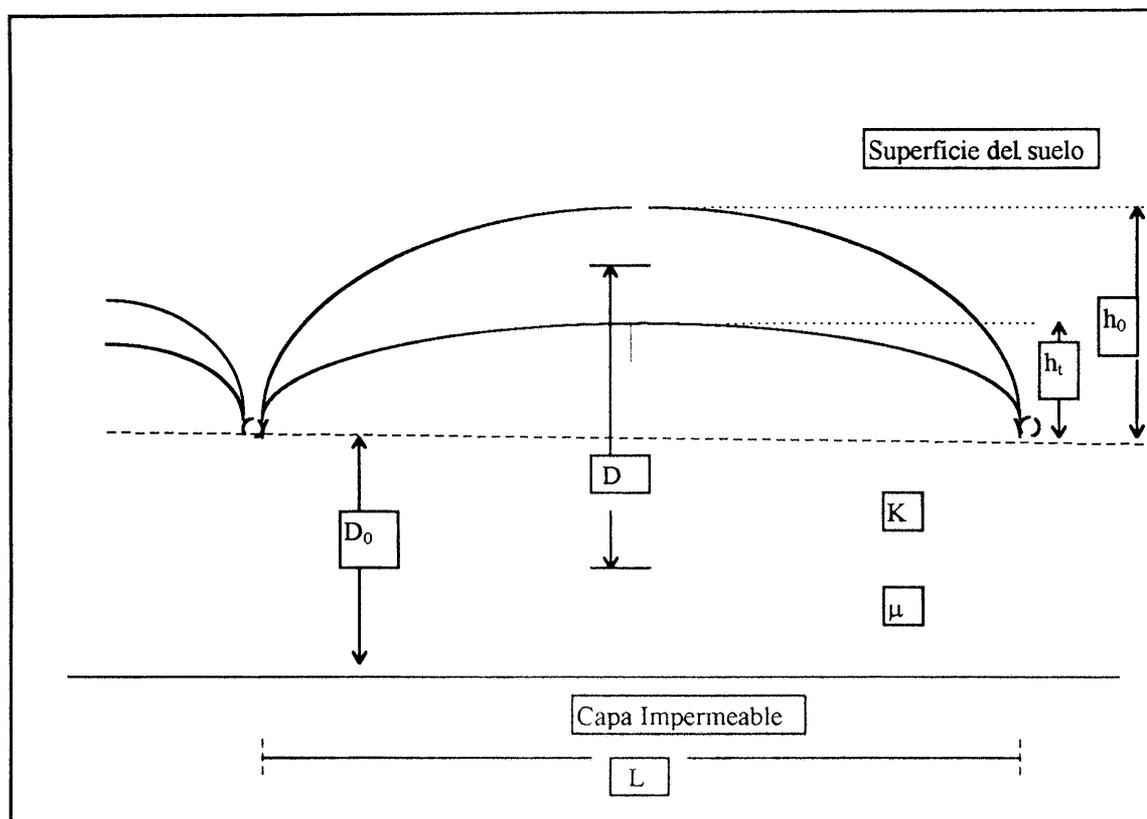


Figura 3.7. Parámetros utilizados en la fórmula de Glover - Dumm

Valor de "D"

$$D = D_1 + D_2 \quad (62)$$

Donde: D_2 es el espesor equivalente de Hooghoudt; D_1 es la altura media sobre los drenes del nivel freático en su movimiento de h_0 a h_t .

Con fines prácticos el valor de $D_1 = \frac{h_0 + h_t}{2}$, cuando el valor de D_1 es pequeño en comparación con D_2 , se desprecia D_1 y se considera $D = D_2$.

El espaciamiento L debe ser tal que después de un riego el nivel freático desciende desde h_0 hasta h_t en t días.

Para drenes muy cerca de la capa impermeable cuando $D_0 = \leq 0.1 h_0$, la fórmula (61) se simplifica :

$$L^2 = \frac{4.5Kh_0h_t}{\mu(h_0 - h_t)} \quad (63)$$

El cálculo se inicia dando un espaciamiento considerando que al iniciar el período de riegos, el mantol freático es horizontal y está al nivel de los drenes, el primer riego ocasiona una elevación de R/μ del manto freático, con lo que la altura de ésta sobre el nivel de los drenes será: $h_0 = \frac{R}{\mu}$

Pasado "N" días antes del segundo riego el nivel freático habrá bajado a una altura h_n que se calcula por la fórmula de Glover - Dumm. En el segundo riego el nivel freático se eleva nuevamente a una altura R/μ la nueva altura h_0 será de $h_0 = h_n + \frac{R}{\mu}$.

De esta manera el nivel freático oscila, elevándose R/μ con cada riego y descendiendo en el período entre riegos, debido a que cada vez es mayor la altura h respecto a los drenes. El proceso continúa hasta que se alcanza el equilibrio. En el Cuadro 3.8., se manifiesta el criterio de drenaje para calcular el espaciamiento entre drenes debido a una recarga debido a lluvia.

Cuadro 3.8. Criterio de drenaje clase B. Cultivos extensivos (Tomado de Pizarro 1985).

Días después de la lluvia	profundidad freática p (m)	$h = 1.5 - p$
0	0.50	1.00
1	0.80	0.70
2	1.00	0.50
3	1.10	0.40

Espaciamiento entre Drenes utilizando la fórmula de Kraijenhoff Van de Leur Maasland.

La altura h del nivel freático debido a una recarga constante de valor p es dada por la fórmula:

$$h = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{p}{\mu} j \sum_{n=1,3,5..}^{n=\infty} \frac{1}{n^3} (e^{n^2 \frac{b}{j}} - 1) e^{-n^2 \frac{t}{j}} \quad (64)$$

$$\text{Siendo } j = \frac{1}{\pi^2} \cdot \frac{\mu L^2}{KD} \quad (65)$$

Donde μ es la porosidad drenable; j el coeficiente de almacenamiento, T ; KD representa la trasmisibilidad, L^2/T ; b la duración de la percolación, T ; t es el tiempo contado desde el inicio de la percolación; T ; j se mide en días, y resume todas las características del suelo e instalación de drenaje que afecta el movimiento del agua.

D , interviene en el coeficiente de almacenamiento j , significa lo mismo que en carga instantánea calculándose de la misma forma.

b , se mide en días, si se trata de una lluvia de 6 horas, $b = 0.25$ días, en nuestro caso se presenta una lluvia de 24 horas, $b = 1$ días.

t , se mide en días. La diferencia $(t - b)$ es el tiempo transcurrido después del final de la lluvia.

La fórmula (64) permite conocer la altura h , en un tiempo $(t - b)$ después de la lluvia. Si se hace $t = b$, se obtiene la máxima altura h alcanzada por el manto freático.

$$t = b$$

$$h = p \cdot \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{j}{\mu} \left[1 - \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=1, -3, 5, \dots}^{\infty} \frac{1}{n^3} e^{-n^2 \frac{b}{j}} \right] \quad (66)$$

Esta fórmula permite calcular el espaciamiento entre drenes y el funcionamiento de un sistema de drenaje ya instalado.

Al desarrollar el cálculo de las ecuaciones (64) y (69) se irán dando valores a "n" hasta que el valor de la última serie difiera de la anterior en un valor menor de 1.0 por ciento. Cuando esto sucede se termina el cálculo y el espaciamiento obtenido es el correcto.

RESULTADOS Y DISCUSION

Temperatura y Precipitación

La temperatura y la precipitación tienen una influencia muy marcada en los ciclos agrícolas de los cultivos. En el período de 1986 a 1995 la temperatura máxima extrema en la estación climatológica de Xicoténcatl Tam., fue de 44.5 grados centígrado en el mes de abril de 1991 y una mínima extrema de -1.5 grados centígrados en diciembre de 1989. La precipitación máxima diaria se presentó el 8 de agosto de 1989 con 251 mm. El año con mayor precipitación es el de 1986 con una precipitación de 1195.48 mm. El año más seco fue el de 1989 con una precipitación anual de 680.26 mm. Como lo demuestra la Figura 4.1., existe un período de baja precipitación, de octubre al mes de mayo. Las máximas temperaturas están asociadas a una menor precipitación, incremento en la demanda de agua para uso agrícola, observándose una elevación de los niveles freáticos. En los meses de junio a septiembre se concentra el 80 por ciento de la precipitación dando lugar a problemas de drenaje subsuperficial.

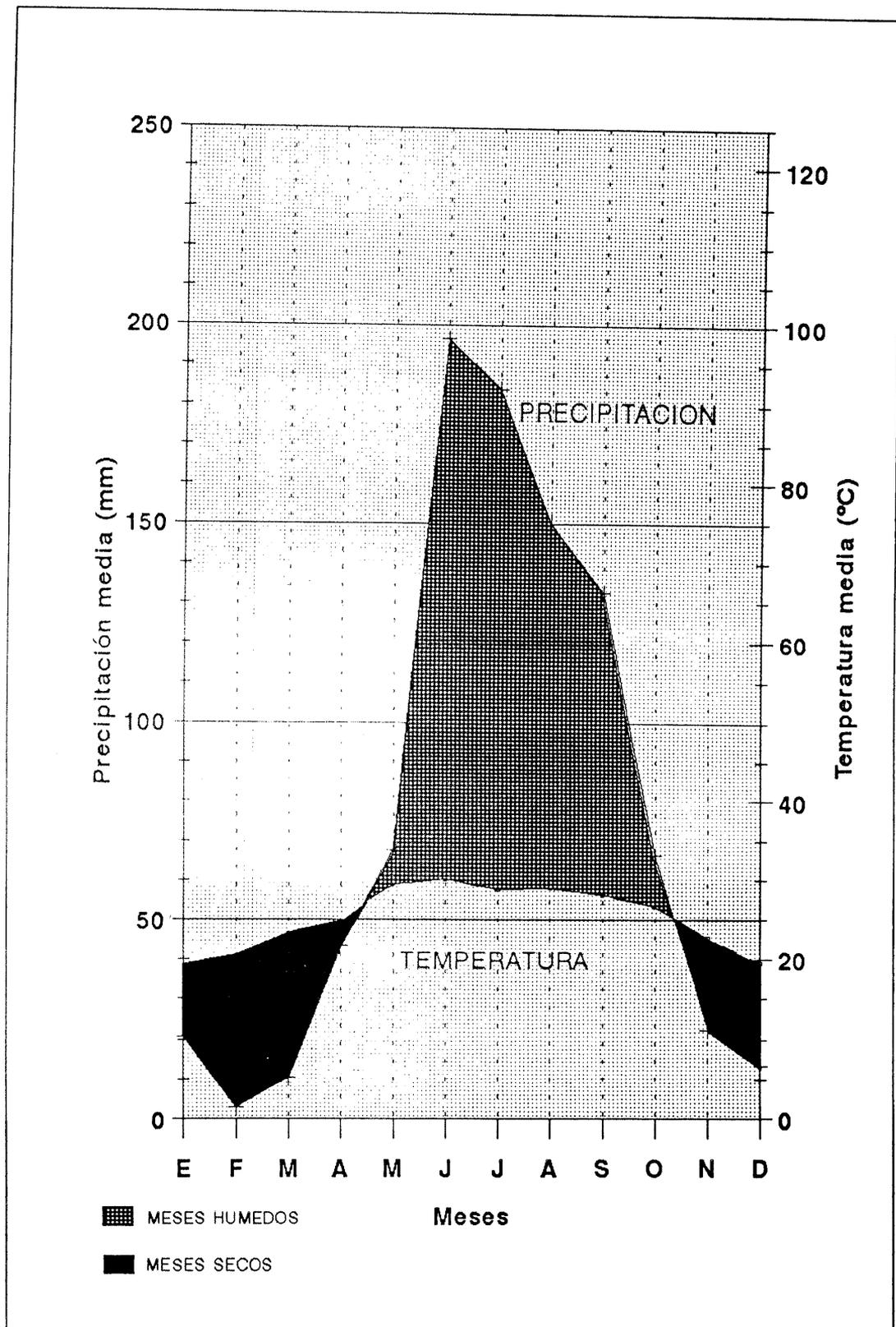


Figura 4.1. Climograma de gaussen periodo 1986-1995 estación climatológica Xicoténcatl Tam.

Suelos

Los suelos que ocupan el 80 por ciento de la superficie de riego son los vertisoles pélicos Cuadro 4.1, estos suelos son de permeabilidad muy lenta drenaje interno pobre, por lo que suelen saturarse de agua fácilmente, por su origen presentan problemas de salinidad, requieren de un buen manejo del agua y de un sistema de drenaje que trabaje eficientemente durante todo el año para mantener la salinidad y los niveles freáticos fuera del alcance la zona radicular del cultivo.

Cuadro 4.1. Distribución de las Unidades de Suelo

Unidades de Suelo	Superficie (has)	%
Vertisol Pélico	19,685	80.00
Fluvisol Eútrico	2941	11.97
Rendzinas	1043	4.23
Asociación Regosol Calcárico-Feozem Eútrico	117	0.47
Asociación Vertisol Pélico-Feozem Calcárico	821	3.33
Total	24,607	100.00

Lluvia Crítica

El valor de precipitación que es igualado o superado cinco veces al año Cuadro 4.2., corresponde a una lluvia de 10 a 15 mm, este valor para lluvia crítica es muy bajo en relación a las lluvias que se presentan para el mes de julio, suceden en días consecutivos Cuadro 4.3., y superan esta precipitación. Para tener un dato más cercano a la realidad resultó más adecuado tomar un período de retorno de ocho años obtenidos por los métodos de Frecuencia y Período de retorno y método de Relación Cuantía Fórmula de Gumbel.

Para la lluvia de 135 y 140 mm, registrada dos veces ($N_i = 2$) en 961 días ($\sum N_i = 961$); aplicando la ecuación (1) se obtuvo la frecuencia

$$F_{29} = \frac{2}{961} = 0.0020$$

El valor de 0.0004 corresponde a la frecuencia, con que es igualada o superada la precipitación, columna 5 del Cuadro 4.2.

La frecuencia de las precipitaciones inferiores F_{29} columna 6

$$(6) = 1 - 0.0040 = 0.9952.$$

Al aplicar la ecuación (3) se obtiene el período de retorno para F_{29} pudiendo ser igual o superior este resultado lo podemos observar en el Cuadro 4.2., columna 7 fila 29.

$$T = \frac{1}{(5)} = 250$$

Cuadro 4.2. Frecuencia y periodo de retorno de las precipitaciones del día 1º al 31 de julio de 1965 a 1996 en la estación climatológica de Xicoténcatl Tam.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
i	$a_i < p_i < b_i$	N_i	$F_i = \frac{N_i}{\sum N_i}$	$F_i = \frac{M_i}{\sum N_i}$	$1 - (s)$	$\frac{1}{(s)}$	$\frac{7}{(31)}$	$\frac{31}{(7)}$
1	0	598	0.622	0.999	0.000	1.000	0.032	31.00
2	0 - 5	157	0.163	0.377	0.622	2.653	0.086	11.68
3	5 - 10	63	0.066	0.214	0.789	4.684	0.151	6.62
4	10 - 15	30	0.031	0.148	0.851	6.757	0.218	4.59
5	15 - 20	31	0.032	0.117	0.882	8.562	0.276	3.62
6	20 - 25	20	0.021	0.085	0.915	11.820	0.381	2.62
7	25 - 30	17	0.018	0.064	0.936	15.720	0.507	1.97
8	30 - 35	6	0.006	0.046	0.953	21.739	0.701	1.43
9	35 - 40	6	0.006	0.040	0.959	25.126	0.811	1.23
10	40 - 45	2	0.002	0.034	0.966	29.762	0.960	1.04
11	45 - 50	8	0.008	0.032	0.968	31.646	1.021	0.98
12	50 - 55	3	0.003	0.023	0.976	42.918	1.384	0.72
13	55 - 60	5	0.005	0.020	0.979	49.505	1.597	0.63
14	60 - 65	1	0.001	0.015	0.984	66.667	2.151	0.47
15	65 - 70	0	0.000	0.014	0.985	71.429	2.304	0.43
16	70 - 75	1	0.001	0.014	0.985	71.429	2.304	0.43
17	75 - 80	2	0.002	0.013	0.986	76.923	2.481	0.40
18	80 - 85	1	0.001	0.011	0.986	90.909	2.933	0.34
19	85 - 90	1	0.001	0.010	0.989	100.000	3.226	0.31
20	90 - 95	0	0.000	0.009	0.990	111.111	3.584	0.28
21	95 - 100	1	0.001	0.009	0.990	111.111	3.584	0.28
22	100 - 105	0	0.000	0.008	0.991	125.000	4.032	0.25
23	105 - 110	0	0.000	0.008	0.991	125.000	4.032	0.25
24	110 - 115	1	0.001	0.008	0.991	125.000	4.032	0.25
25	115 - 120	0	0.000	0.007	0.992	142.857	4.608	0.22
26	120 - 125	1	0.001	0.007	0.992	142.857	4.608	0.22
27	125 - 130	2	0.002	0.006	0.993	166.667	5.376	0.19
28	130 - 135	0	0.000	0.004	0.995	250.000	8.065	0.12
29	135 - 140	2	0.002	0.004	0.995	250.000	8.065	0.12
30	145 - 150	0	0.000	0.002	0.997	500.000	16.129	0.06
31	210 - 215	1	0.001	0.002	0.997	500.000	16.129	0.06
32	255 - 260	1	0.001	0.001	0.998	1000.00	32.258	0.03
33	265 - 270	0	0.000	0.000	0.992	0.000	0.000	0.00

961 días

Donde 1, es número de orden; 2, es el intervalo de precipitación, mm; 3, es el número de observaciones; 4, es la frecuencia de la precipitación, mm; 5, es la

frecuencia con que es igualada o superada la precipitación; 6, es la frecuencia de las precipitaciones inferiores a P_i ; 7, el período de retorno, días ; 8, el período de retorno, años; 9, el número de veces por año en que la lluvia supera a P_i ; M_i , suma del número de observaciones de las precipitaciones de orden igual o superior a (i) ; ΣN_i , es 961 días.

Cuadro 4.3. Lluvias diarias (mm) registradas en los meses de julio de 1965 a julio de 1996.

Días	años					
	1965	1970	1974	1986	1990	1996
1	0.00	0.00	0.00	3.00	Inap	29.00
2	0.10	Inap.	3.00	0.00	48.00	0.00
3	0.00	0.00	13.50	20.00	1.90	0.00
4	27.50	0.00	9.30	0.00	0.00	0.00
5	42.20	Inap. ¹	21.50	0.00	7.70	0.00
6	46.50	0.00	9.50	0.00	26.00	8.50
7	20.50	0.00	29.00	0.00	0.00	0.00
8	Inap.	0.00	0.00	23.00	12.70	0.00
9	0.00	0.00	0.00	13.00	23.80	0.00
10	0.10	Inap.	4.60	Inap	Inap	0.00
11	1.80	0.00	0.00	Inap	56.30	0.00
12	0.00	0.00	59.00	3.50	3.80	0.00
13	0.00	0.00	5.70	30.00	0.00	0.00
14	0.00	Inap.	9.00	17.50	0.30	0.00

Cuadro 4.3. Continuación

Días	años					
15	1.10	0.20	0.00	25.50	0.00	0.00
16	10.40	39.50	0.00	7.00	Inap	Inap
17	0.00	129.00	0.00	Inap	0.00	1.50
18	0.00	12.00	0.00	2.00	28.00	0.00
19	0.00	0.00	8.00	0.00	12.00	2.00
20	0.00	0.00	0.00	27.50	0.00	0.00
21	Inap.	0.00	0.00	0.00	13.00	0.00
22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
24	0.10	0.00	0.00	0.00	5.50	0.00
25	0.00	2.00	4.00	0.00	0.00	7.00
26	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00
27	24.10	0.00	0.00	0.00	1.60	0.00
28	Inap.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50
31	Inap.	0.00	1.20	0.00	0.00	0.00

¹ Inapreciable.

Período de retorno T en años; columna 7= 250 días

$$\text{Columna 8} = \frac{(7)}{31} = 8.06$$

El Numero de veces por año en que la lluvia supera a P_i

$$\text{Columna 9} = \frac{31}{(7)} = 0.12$$

La frecuencia con que ocurrió la precipitación de $135 < P_i \leq 140$ mm., con número de orden $i = 29$ al ocurrir esta precipitación 2 veces ($N_{29} = 2$) y

aplicando la ecuación (19) se comprueba que $F_{29} = \frac{2}{961} = 0.002$.

La frecuencia con que esta lluvia es igualada o superada como se observa en los Cuadro 4.2. y 4.4., es dada por:

$$F_{29} + F_{30} + F_{31} + F_{32} + F_{33} = 0.004$$

La frecuencia de las precipitaciones inferiores a 135 mm

$$1 - 0.004 = 0.995$$

El período de retorno de una lluvia igual o superior a P_{29} se obtiene de:

$$\frac{1}{0.004} = 250 \text{ días. Esto significa que cada 250 días ocurre una lluvia igual o}$$

superior a P_{29} .

El período en años es dado como:

$$\frac{250}{31} = 8.06 \text{ años en 31 años.}$$

El número veces por año que esta lluvia es igualada se obtuvo: $\frac{31}{250} = 0.124$

veces.

Cuadro 4.4. Suma de las frecuencias en que una lluvia de 135 a 140 mm es igualada o superada.

Precipitación mm	Frecuencia
135 - 140	0.0020
145 - 150	0.0000
210 - 215	0.001
255 - 260	0.001
265 - 270	0.000
Total F	= 0.004

La lluvia crítica de 140 mm Cuadro 4.5., es obtenida utilizando la ecuación (21).

$$P = -124.7379 + 47.9755 * 5.519 = 140 \text{ mm}$$

La Frecuencia de esta Lluvia se obtiene aplicando la ecuación (23)

$$F' = 1 - (e)^{-e^{\frac{-124.7379 - 140}{47.9755}}}$$

$$F' = 0.004$$

Para el período de retorno la ecuación (20)

$$T = \frac{1}{0.004} = 250 \text{ días} ; \frac{250}{31} = 8.064 \text{ años}$$

La Lluvia crítica obtenida por los métodos de Frecuencia y Período de retorno de las precipitaciones y el de Relación Cuantía Fórmula de Gumbel es de 140 mm tomando en consideración un período de retorno de 8 años.

Cuadro 4.5. Relación cuantía frecuencia fórmula de Gumbel durante el periodo comprendido del día 1° al 31 de julio en los años de 1965 a 1996 en la estación climatológica de Xicoténcatl Tam.

P en mm	Periodo de retorno Tr	$F'' = \frac{1}{(Tr * 31)}$	$X = -\ln[-\ln(1 - F'')]$	$P = -124.74 + 47.97X$	Frecuencia $F = 1 - (e)^{-\frac{X-P}{\sigma}}$	Periodo de retorno $Tr = \frac{1}{F(\text{días})}$	Tr Tiempo de retorno en años
45	0.960	0.0336	3.376	37.24	0.034	29.77	0.96
50	1.021	0.0116	3.439	40.23	0.032	31.66	1.02
55	1.384	0.0233	3.748	55.05	0.023	42.92	1.38
60	1.597	0.0202	3.892	61.98	0.020	49.53	1.60
65	2.151	0.0150	4.192	76.38	0.015	66.67	2.15
70	2.304	0.0140	4.262	79.72	0.014	71.94	2.32
75	2.304	0.0130	4.262	79.72	0.014	71.43	2.30
80	2.481	0.0110	4.336	83.30	0.013	76.98	2.48
85	2.933	0.0100	4.504	91.36	0.011	90.99	2.94
90	3.226	0.0090	4.600	95.96	0.010	101.01	3.26
95	3.584	0.0090	4.706	101.04	0.009	112.36	3.62
100	3.584	0.0090	4.706	101.04	0.009	111.11	3.58
105	4.032	0.0080	4.824	106.71	0.008	125.00	4.03
110	4.032	0.0080	4.824	106.71	0.008	125.00	4.03
115	4.032	0.0080	4.824	106.71	0.008	125.00	4.03
120	4.608	0.0070	4.958	113.14	0.007	142.86	4.61
125	4.608	0.0070	4.958	113.14	0.007	142.86	4.61
130	5.376	0.0060	5.113	120.56	0.006	166.67	5.38
135	8.065	0.0040	5.519	140.06	0.004	250.00	8.06
140	8.065	0.0040	5.519	140.06	0.004	250.00	8.06
150	16.129	0.0020	6.214	173.36	0.002	500.00	16.13
215	16.129	0.0020	6.214	173.36	0.002	500.00	16.13
260	32.258	0.0010	6.907	206.64	0.001	1000.00	32.26

Volumen de Escurrimiento

El método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos clasifica al suelo del Distrito de Riego 029 Xicoténcatl Tam., dentro del grupo D;

Caracterización Buena como cultivo predominante de caña de azúcar, índice de cuenca para condición de humedad antecedente media $W_{II} = 87$.

La precipitación acumulada para el día 6 de julio del año de 1965 es mayor de 37 mm, Cuadro 4.3., entonces la condición de humedad antecedente es III por lo que se requiere realizar una corrección para tener el valor real de W_{III} en lugar de $W_{II} = 87$. La corrección se realizó utilizando la ecuación (36)

$$W_{III} = 6.931 + 1.596 W_{II} - 6.73 (10)^{-3} W_{II}^2$$

$$W_{III} = 6.931 + 1.596 (87) - 6.73 (10)^{-3} (87)^2$$

$$W_{III} = 94.84$$

Usando (34) para determinar el valor de retención de la cuenca.

$$S = \frac{2500}{94.84} - 25; S = 1.36 \text{ cm}$$

Con la ecuación (33) se estimó el volumen de escurrimiento .

$$Q = \frac{(4.65 \text{ cm} - 0.2 * 1.36)^2}{(4.65 - 0.8 * 1.36)}$$

$$Q = 3.34 \text{ cm}$$

El Cuadro 4.6., muestra para los años que comprende el estudio de 1991 a 1995 los volúmenes de escurrimiento obtenidos por el método del Servicio de Conservación de Suelos es variable conforme se presenta la precipitación. Para

el año de 1993 con una precipitación de 5 cm el volumen de escurrimiento es de 3.67 cm, para 1995 con precipitación de 3.15 cm el volumen de escurrimiento es de 0.94 cm. Conforme el valor de precipitación máxima disminuye el volumen de escurrimiento se comporta de manera similar.

Cuadro 4.6. Volúmenes de escurrimiento por el método del Servicio de Conservación de Suelo de los Estados Unidos.

Año	Días de julio	Precipitación cm	C.H.A. mm	W	Valor de W	Retención de la Cuenca S cm	Volumen de Escurrimiento Q cm.
1965	6	4.65	69.80	III	94.84	1.36	3.34
1966	18	2.06	1.40	I	74.84	8.40	0.02
1967	18	0.60	0.40	I	74.84	8.40	0.00
1968	26	5.45	19.00	II	87.00	3.74	2.62
1969	7	1.65	16.90	II	87.00	3.74	0.18
1970	16	12.90	39.70	III	94.84	1.36	11.40
1971	2	1.47	0.00	I	74.84	8.40	0.00
1972	22	9.94	44.70	III	94.84	1.36	8.48
1973	3	5.83	5.00	I	74.84	8.40	1.37
1974	12	5.90	33.60	II	87.00	3.74	2.99
1975	13	11.30	25.00	II	87.00	3.74	7.79
1976	11	26.00	133.00	III	94.84	1.36	24.44
1977	12	0.95	0.00	I	74.84	8.40	0.00
1978	28	7.65	31.60	II	87.00	3.74	4.48

Cuadro 4.6. Continuación

Año	Días de julio	Precipitación cm	C.H.A. mm	W	Valor de W	Retención de la Cuenca S cm	Volumen de Escurrimiento Q cm.
1979	28	5.60	8.00	I	74.84	8.40	1.25
1980	31	0.48	0.50	I	74.84	8.40	0.00
1981	7	4.75	0.00	I	74.84	8.40	0.82
1982	2	1.80	0.00	I	74.84	8.40	0.00
1983	14	6.30	32.50	II	87.00	3.74	3.32
1984	31	5.00	0.00	I	74.84	8.40	0.94
1986	20	2.75	34.50	II	87.00	3.74	0.70
1987	9	12.30	36.30	II	87.00	3.74	8.73
1988	4	2.50	22.50	II	87.00	3.74	0.56
1989	13	1.85	15.00	II	87.00	3.74	0.25
1990	11	5.63	62.50	III	94.84	1.36	4.27
1991	7	8.40	36.00	II	87.00	3.74	5.14
1992	20	12.90	93.50	III	94.84	1.36	11.40
1993	7	5.00	66.00	III	94.84	1.36	3.67
1994	14	3.65	5.00	I	74.84	8.40	0.37
1995	7	3.15	24.00	II	87.00	3.74	0.94
1996	1	2.90	0.00	I	74.84	8.40	0.15

Coeficiente de Escurrimiento

Con la ecuación (37) obtuvieron los valores que aparecen en el Cuadro 4.7., se aprecia como varía en los años del coeficiente de escurrimiento conforme varía el valor de retención de la cuenca. Esto se debe a la condición de humedad antecedente que prevalece en el suelo cinco días antes de que ocurra la precipitación máxima. Para el año de 1992 con una precipitación de 12.90 cm con retención de la cuenca (S) de 1.36 cm el coeficiente de escurrimiento es 0.88. En cambio para 1995 con precipitación de 3.15 cm retención de la cuenca (S) de 3.74 cm el coeficiente de escurrimiento es de 0.30. Por lo tanto el coeficiente de escurrimiento será diferente cada año.

Coeficiente de Drenaje

Para la lluvia crítica de 1.4, cm; coeficiente de escurrimiento promedio 0.41 tomada del Cuadro 4.6., utilizando la ecuación (38) se obtiene la lámina infiltrada.

$$L_i = 1.4 (1 - 0.41) = 0.826 \text{ cm}$$

Con los mismos valores de lluvia crítica y el promedio del C_e utilizando la ecuación (39) se obtiene la lámina escurrida.

$$L_e = 1.4 * 0.41 = 0.57 \text{ cm}$$

Cuadro 4.7. Coeficiente de escurrimiento para el mes de julio por el método del Servicio de Conservación de Suelos de 1965 a 1996.

Año	Día	Precipitación cm	Retención de la cuenca S cm	Coeficiente de escurrimiento
1965	6	4.65	1.36	0.72
1966	18	2.06	8.40	0.01
1967	18	0.60	8.40	0.27
1968	26	5.45	3.74	0.48
1969	7	1.65	3.74	0.11
1970	16	12.90	1.36	0.88
1971	2	1.47	8.40	0.00
1972	22	9.94	1.36	0.85
1973	3	5.83	8.40	0.24
1974	12	5.90	3.74	0.51
1975	13	11.30	3.74	0.69
1976	11	26.00	1.36	0.94
1977	12	0.95	8.40	0.07
1978	28	7.65	3.74	0.59
1979	28	5.60	8.40	0.22
1980	31	0.48	8.40	0.42
1981	7	4.75	8.40	0.17
1982	2	1.80	8.40	0.00
1983	14	6.30	3.74	0.53
1984	31	5.00	8.40	0.19
1986	20	2.75	3.74	0.25
1987	9	12.30	3.74	0.71
1988	4	2.50	3.74	0.22
1989	13	1.85	3.74	0.14
1990	11	5.63	1.36	0.76
1991	7	8.40	3.74	0.61
1992	20	12.90	1.36	0.88
1993	7	5.00	1.36	0.73
1994	14	3.65	8.40	0.10
1995	7	3.15	3.74	0.30
1996	1	2.90	8.40	0.05
			Promedio	0.41

Utilizando la ecuación (40) obtenemos el coeficiente de drenaje

$$\begin{aligned}
 C_d &= 0.00826 * 10,000 / 86,400 = 0.00096 \text{ m}^3 / \text{seg} \\
 &= 0.00826 \text{ m} / \text{día} \\
 &= 0.96 \text{ lts} / \text{seg} / \text{ha}
 \end{aligned}$$

En el Cuadro 4.8., se presenta la lámina infiltrada para la precipitación máxima registrada acontecida el día 11 de julio de 1976, siendo de 26.0 cm, en este se registró la mayor precipitación de 101.87 cm los últimos 31 años.

$$L_i = 26 (1 - 0.94) = 1.56 \text{ cm}$$

$$L_e = 26 * 0.94 = 24.44 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} C_d &= 0.0156 * 10,000 / 86400 = 0.0018 \text{ m}^3 / \text{seg} \\ &= 0.0156 \text{ m} / \text{día} \\ &= 1.8 \text{ lts} / \text{seg} / \text{ha} \end{aligned}$$

De igual forma en el Cuadro 4.8., se observa una lámina infiltrada para una precipitación máxima 2.9 cm registrada el día 1 del mes de julio de 1996 año en donde se presentó la menor precipitación 5.05 cm en el mes, en los últimos 12 años.

$$L_i = 2.9 (1 - 0.05) = 2.75 \text{ cm}$$

$$L_e = 2.9 * 0.05 = 0.15 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} C_d &= 0.0275 * 10,000 / 86400 = 0.0032 \text{ m}^3 / \text{seg} = 0.0275 \text{ m} / \text{día} \\ &= 3.2 \text{ lts} / \text{seg} / \text{ha} \end{aligned}$$

Coeficiente de drenaje en función de la eficiencia de riego.

$$\text{Lámina bruta } (L_b) = 0.33 \text{ cm}$$

$$\text{Lámina neta } (L_n) = 0.18 \text{ cm}$$

Eficiencia 0.54

Expresados en volumen:

$$L_b = 3300 \text{ m}^3 / \text{ha} / \text{mes}$$

$$L_n = 1800 \text{ m}^3 / \text{ha} / \text{mes}$$

Cuadro 4.8. Lámina infiltrada y lámina escurrida para precipitaciones máximas registradas en diferentes días del mes de julio en 31 años.

Año	Días de julio	precipitación mm	coeficiente de escurrimiento	lámina infiltrada cm	lámina escurrida
1965	6	4.65	0.72	1.31	3.34
1966	18	2.06	0.01	2.04	0.02
1967	18	0.60	0.27	0.44	0.16
1968	26	5.45	0.48	2.83	2.62
1969	7	1.65	0.11	1.47	0.18
1970	16	12.90	0.88	1.50	11.40
1971	2	1.47	0.00	1.46	0.01
1972	22	9.94	0.85	1.46	8.48
1973	3	5.83	0.24	4.46	1.37
1974	12	5.90	0.51	2.91	2.99
1975	13	11.30	0.69	3.51	7.79
1976	11	26.00	0.94	1.56	24.44
1977	12	0.95	0.07	0.88	0.07
1978	28	7.65	0.59	3.17	4.48
1979	28	5.60	0.22	4.35	1.25
1980	31	0.48	0.42	0.28	0.20
1981	7	4.75	0.17	3.93	0.82
1982	2	1.80	0.00	1.80	0.00
1983	14	6.30	0.53	2.98	3.32
1984	31	5.00	0.19	4.06	0.94
1986	20	2.75	0.25	2.05	0.70
1987	9	12.30	0.71	3.57	8.73
1988	4	2.50	0.22	1.94	0.56
1989	13	1.85	0.14	1.60	0.25
1990	11	5.63	0.76	1.36	4.27
1991	7	8.40	0.61	3.26	5.14
1992	20	12.90	0.88	1.50	11.40
1993	7	5.00	0.73	1.33	3.67
1994	14	3.65	0.10	3.28	0.37
1995	7	3.15	0.30	2.21	0.94
1996	1	2.90	0.05	2.75	0.15

Referidos a gasto continuo:

$$L_b = 3\,300\,000 \text{ litros} / 2\,678\,000 \text{ seg} = 1.232 \text{ l / s / ha}$$

$$L_n = 1\,800\,000 \text{ litros} / 2\,678\,000 \text{ seg} = 0.672 \text{ l / s / ha}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Pérdida o excedente susceptible de drenarse} &= L_b - L_n \\
 &= 1.232 \text{ l/s /ha} - 0.672 \text{ l/s/ha} \\
 &= 0.560 \text{ l/s/ha} \\
 &= 48.384 \text{ m}^3 / \text{ha} / \text{día} \\
 &= 0.00484 \text{ m} / \text{día}
 \end{aligned}$$

Coefficiente de Drenaje en Riego

$$C_d = 0.00484 \text{ m} / \text{día} = 0.0006 \text{ m}^3 / \text{seg} = 0.56 \text{ l} / \text{seg} / \text{ha}.$$

Comparando los valores obtenidos en el Cuadro 4.8., se observa que durante el mes de julio del año en donde se registró la mayor cantidad de precipitación corresponde al año de 1976, la lámina escurrida 24.44 cm es mucho mayor que la lámina infiltrada 1.56, debido a que el coeficiente de escurrimiento es muy elevado 0.94, en cambio para el año de 1996, en donde se registra la menor precipitación en los últimos 12 años, la lámina infiltrada 2.75 cm, es mayor que la lámina escurrida 0.15 cm, debido a que el coeficiente de escurrimiento es muy bajo 0.05. Como consecuencia podemos inferir que la lámina infiltrada y escurrida depende del coeficiente de escurrimiento, del suelo y de la cantidad de precipitación. En el Cuadro 4.8., el coeficiente de drenaje es mayor 2.55 lts/seg/ha para 1995 mes de julio más seco con un coeficiente de escurrimiento de 0.30; para 1993 mes de julio más húmedo el coeficiente de drenaje de 1.54 lts/seg/ha y un coeficiente de escurrimiento de 0.73.

El Cuadro 4.9., en riego el coeficiente de drenaje obtenido de 0.56 lts/ha/seg., es menor al obtenido para lluvia, esto es debido a que la lámina aplicada en

riego se infiltra en el mismo suelo, en cambio con una lluvia una parte se infiltra y otra se drena de manera superficial.

Manto Freático

En las Figuras 4.2, 4.3., 4.4., 4.5., y Cuadro 4.10., para los meses de enero de 1993 y 1995 el área afectada por rangos del nivel freático de 0.0 m a 1.0 m es de 2,902 y 5,215 hectáreas para el mes de enero, lo cual representa el 11.8 y 21.2 por ciento; para el mes de julio es de 3,899 y 3,626 hectáreas que representa el 15.8 y 14.73 por ciento. Para los meses de enero para un rango del nivel freático de 1.0 a 1.5 m la superficie aumenta considerablemente a 8,527 hectáreas que representa el 34.65 por ciento, para julio del mismo año se incrementa a 10,987 hectáreas que es el 44.6 por ciento los porcentajes referenciados a la superficie total del Distrito. Al comparar los Cuadros 4.10., y 4.11., la superficie afectada en el mes de enero de 1993, se debe a riego, lluvia registrada en el mes fue de 3.5 mm con una humedad antecedente del mes de diciembre de 1992 de 3.5 mm de forma similar para el año de 1995 en el cual la precipitación registrada fue de 19.3 mm con una humedad antecedente de 1.0 mm del mes de diciembre de 1994. Para el mes de julio de 1993 la precipitación registrada es de 147.0 mm con una humedad antecedente del mes de junio de 469.0 mm y para el año de 1995 la precipitación es de 120.5 mm con una humedad antecedente del mes de junio de 26.0 mm., por lo que para este mes la afectación se debe a lluvia valores mostrados en el Cuadro 4.10.

La Figura 4.6., demuestra que el año con mayor superficie afectada en el mes de enero y julio es 1991, para enero 7,489 hectáreas y julio con 13,909 hectáreas, el Cuadro 4.10 y Figura 4.6., muestran al mes de julio como el mes en donde se registra la mayor afectación en todos los años debido a precipitación y el mes de enero debido a riego.

Cuadro 4.9. Variación de los coeficientes de drenaje en relación a la lámina precipitada y coeficiente de escurrimiento.

Año	Precipitación cm	Coeficiente de escurrimiento	Lámina Infiltrada cm	Lámina escurrida cm	Coeficiente de drenaje lts/seg/ha
1976	26.0	0.94	1.56	24.44	1.8
1993	5.0	0.73	1.33	3.67	1.54
1995	3.15	0.30	2.21	0.94	2.55
1996	2.9	0.05	2.75	0.15	3.2
Lluvia crítica	14.0	0.41	8.26	1.74	1.0
	Riego	Lb=0.33 cm ; Ln = 0.18 cm ; Ef = 54 %			0.56

Cuadro 4.10. Superficies afectadas por niveles freáticos año más húmedo 1993 y más seco 1995 durante los años 1991 a 1995.

Profundidad del nivel freático (m)	Año más húmedo 1993		Año más seco 1995		Año con mayor superficie afectada 1991	
	enero	julio	enero	julio	enero	julio
0.00 - 1.00	2,743	3,899	3,915	3,626	7,489	13,909
1.00 - 1.50	8,527	10,989	9,068	5,508	6,419	4,101
Promedio	5,635	7,444	6,491.5	4,567	6,954	9,005

Las Figuras 4.7., 4.8., 4.9., 4.10., 4.11 y 4.12., indican que existe una influencia de los canales en la recarga de los niveles freáticos, dentro de los principales aportadores se encuentra el principal San Lorenzo, el canal principal Alto. Existen áreas donde se observa a las hisohipsas muy juntas existiendo un fuerte gradiente hidráulico, con altas velocidades de corriente, al igual se observan áreas donde las hisohipsas están separadas, indicando gradientes bajos con velocidades de corriente menor. La dirección de las líneas de corriente normalmente tienen el mismo comportamiento, su dirección es de norte a sur, con similar recorrido al sistema de drenaje del Distrito de Riego.

La localización de áreas donde se observa variaciones del nivel freático se puede ver en las Figuras 4.13., y 4.14., los promontorios de agua se difunden de norte a sur siguiendo la topografía del terreno. Al comparar el mes de enero y julio se observa una mayor variación para el año de 1995, y es en este año donde se aprecian mayores incrementos que enero, debido a una mayor demanda de riego en mayo y junio cuyas precipitaciones fueron de 54.7 y 26 mm respectivamente Cuadro 4.11.

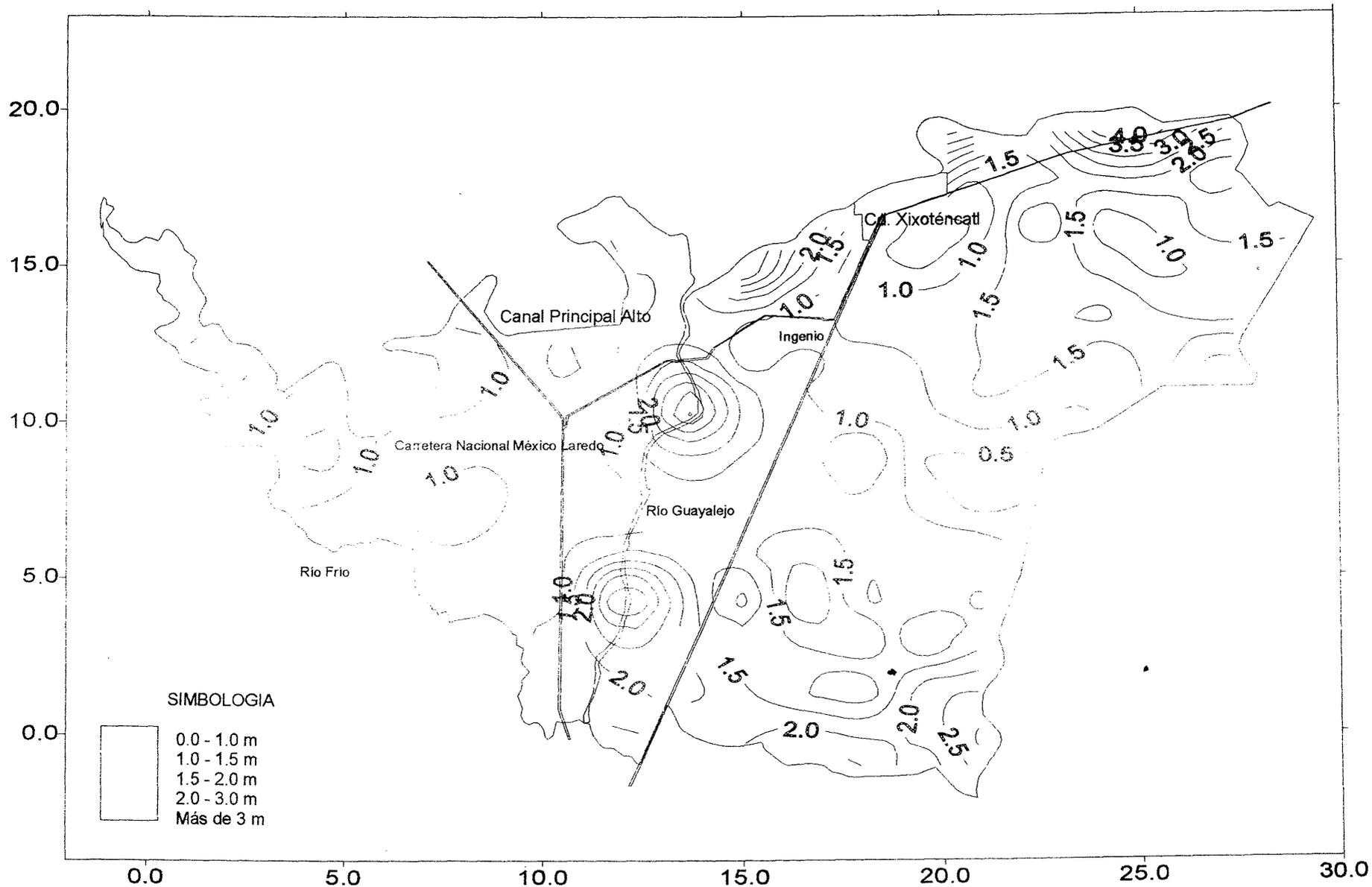


Figura 4.2. Isobatas de enero de 1993

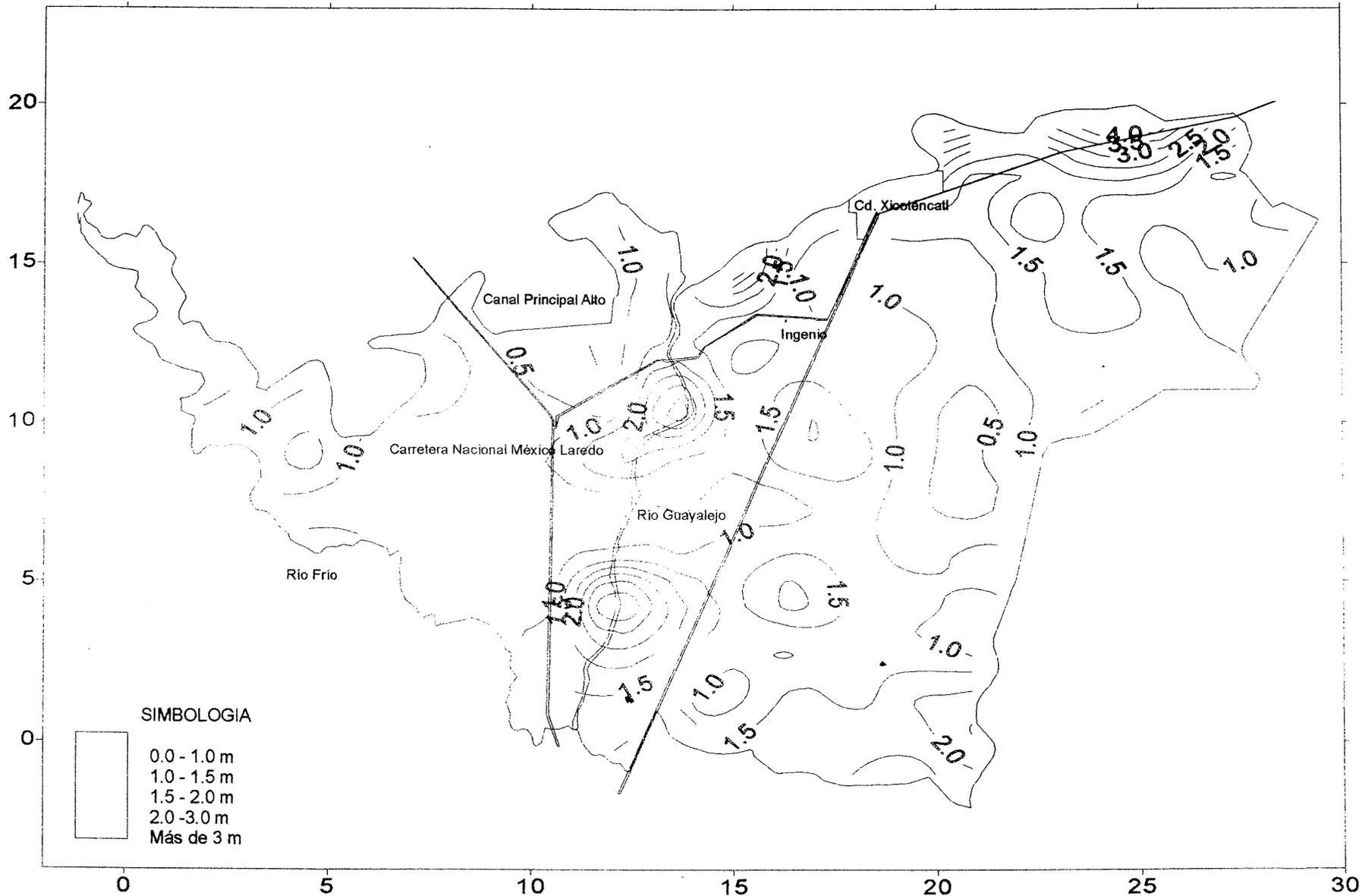


Figura 4.3. Isobatas de julio de 1993

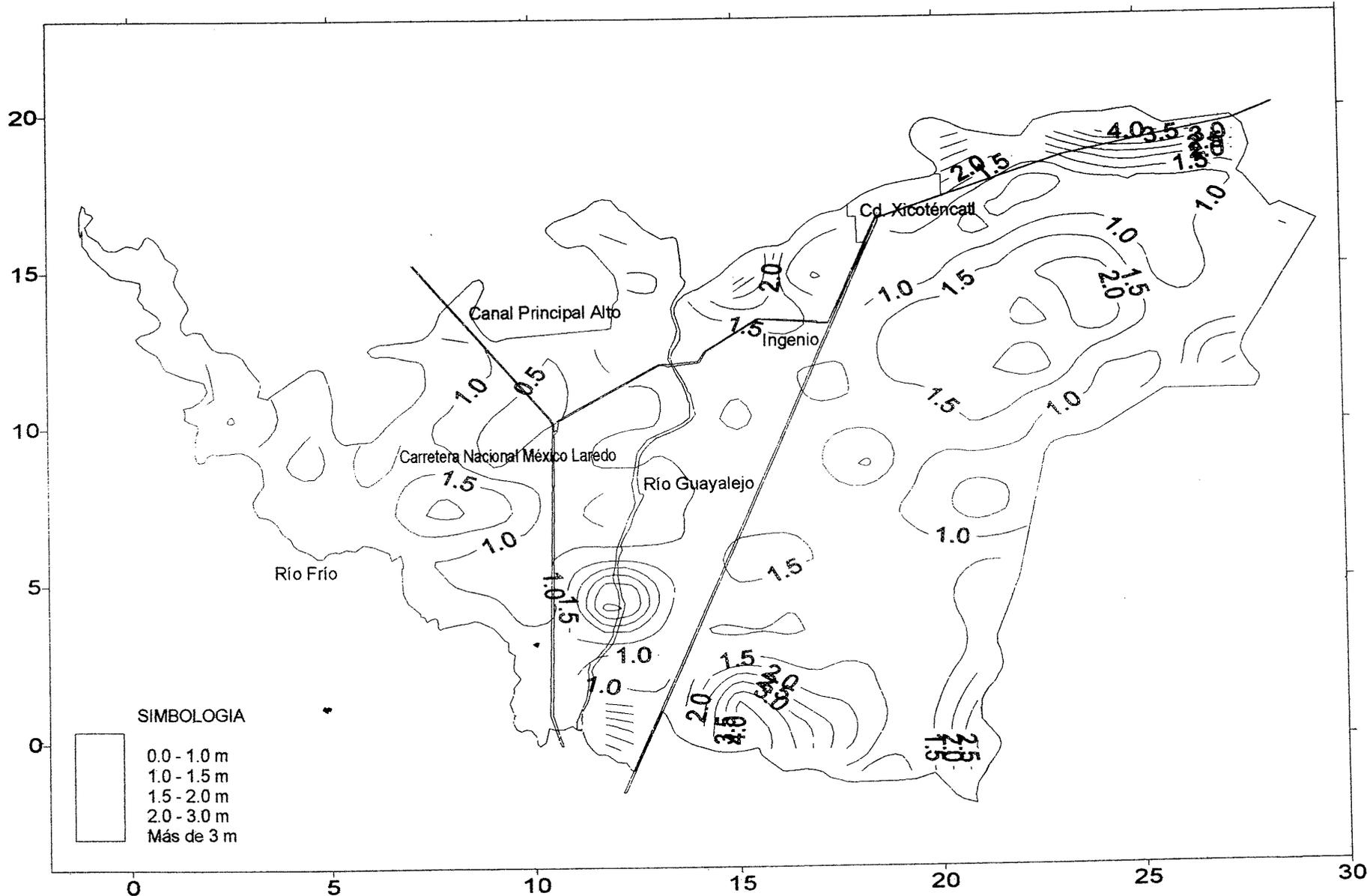


Figura 4.4. Isobatas de enero de 1995

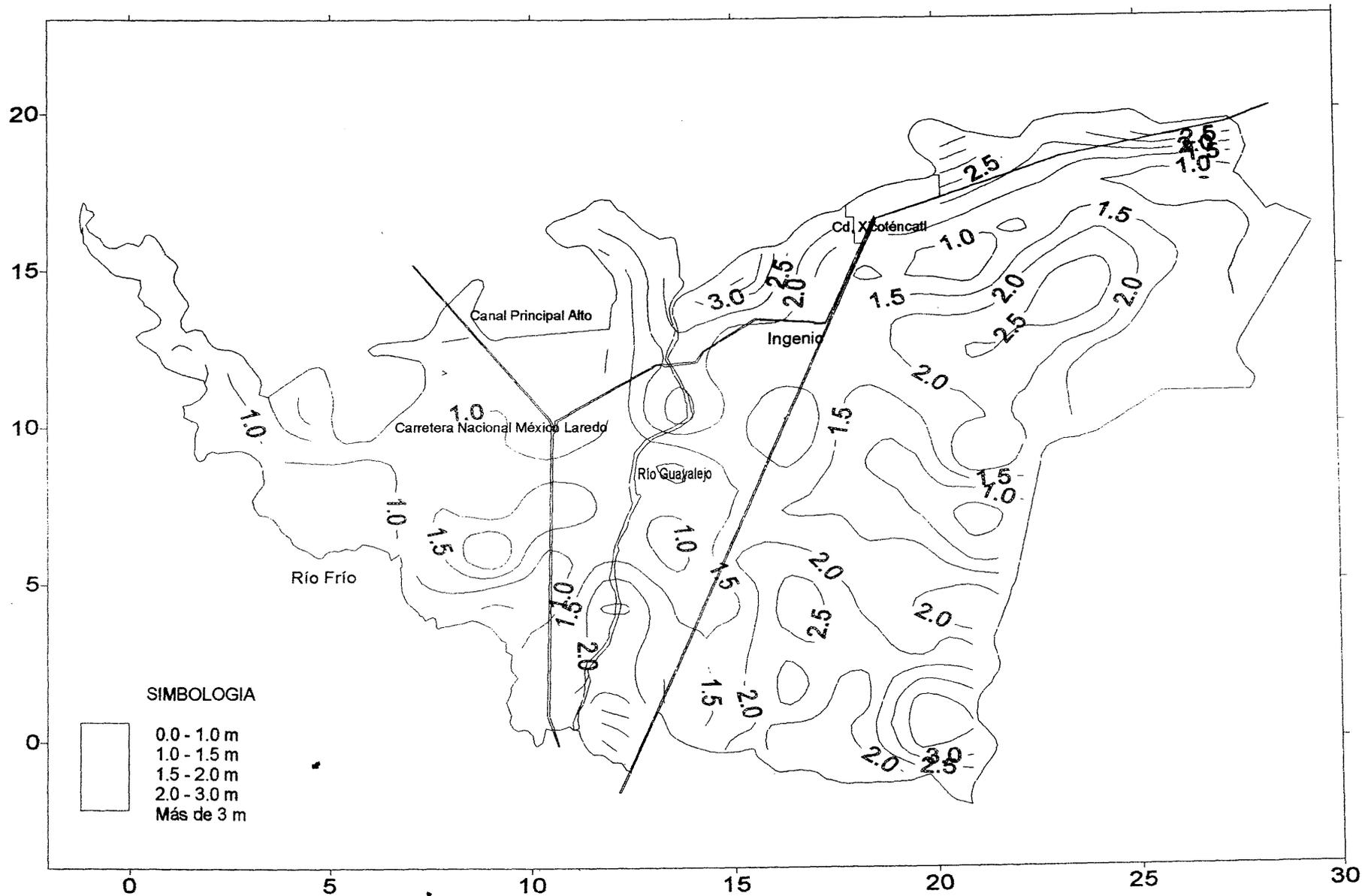


Figura 4.5. Isobatas de julio de 1995

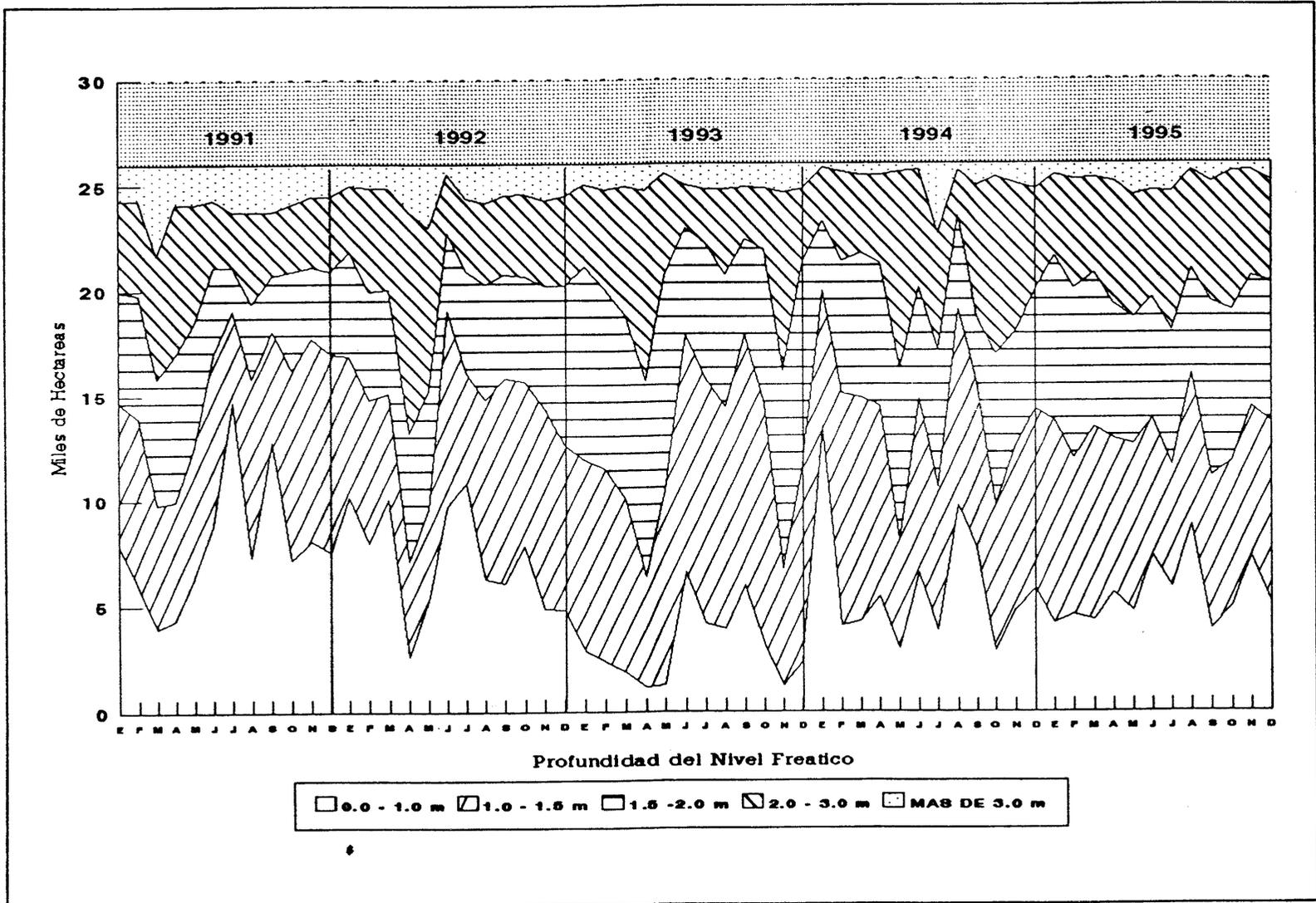


Figura 4. 6. Grafica areas tiempo 1991-1995.

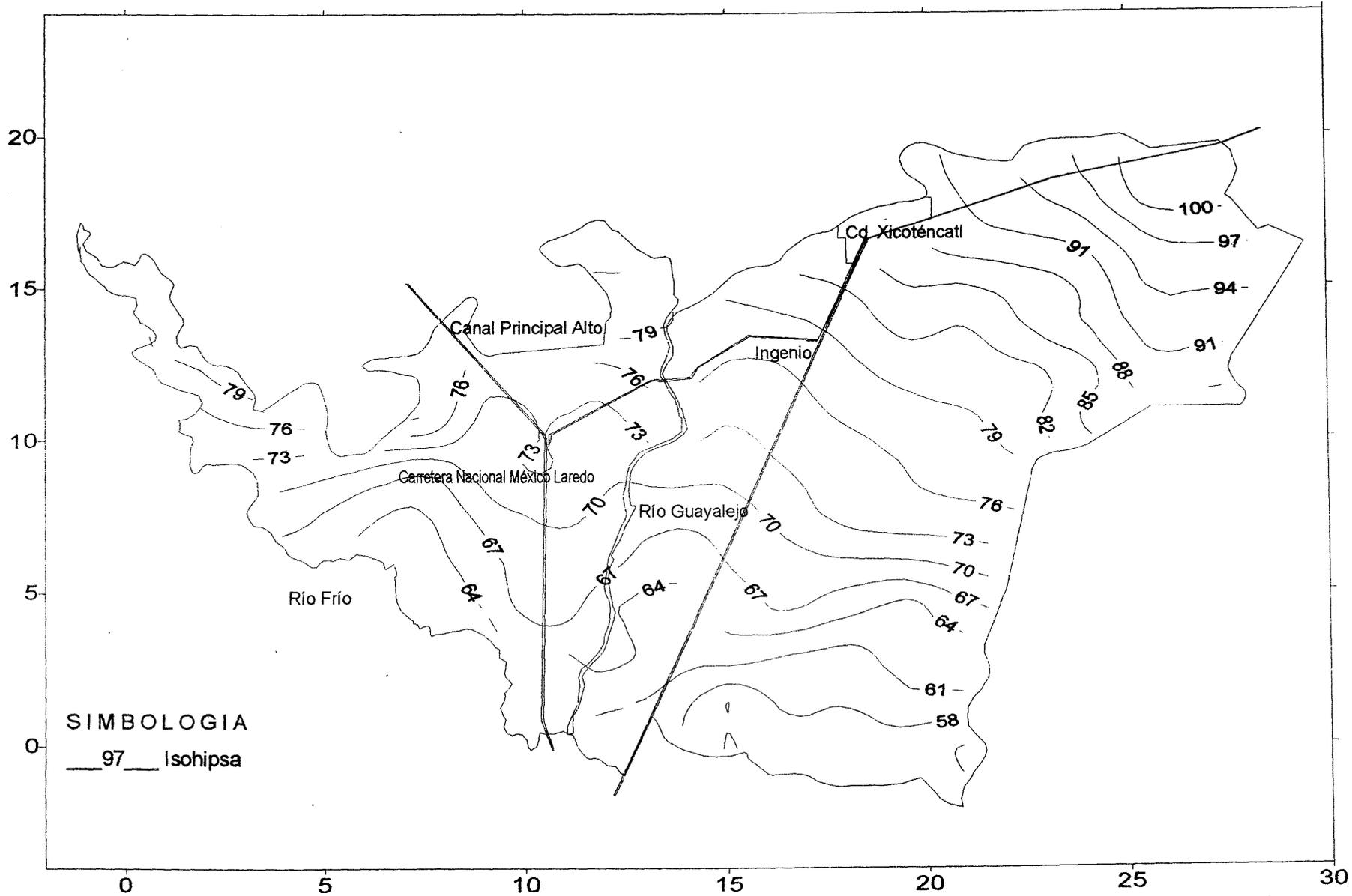


Figura 4.7 Isohinsas de enero de 1993

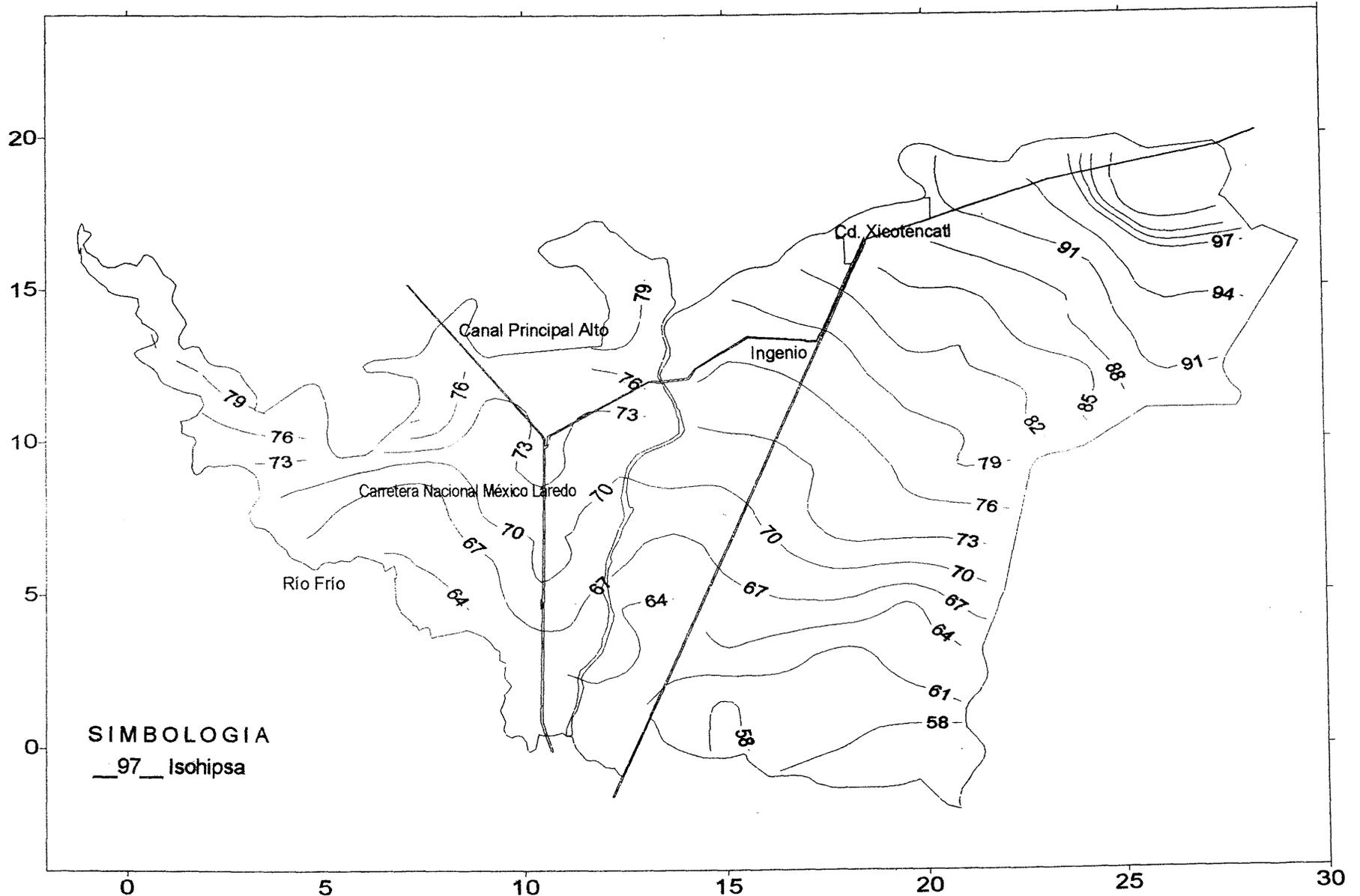


Figura 4.8. Isohipsas de julio de 1993

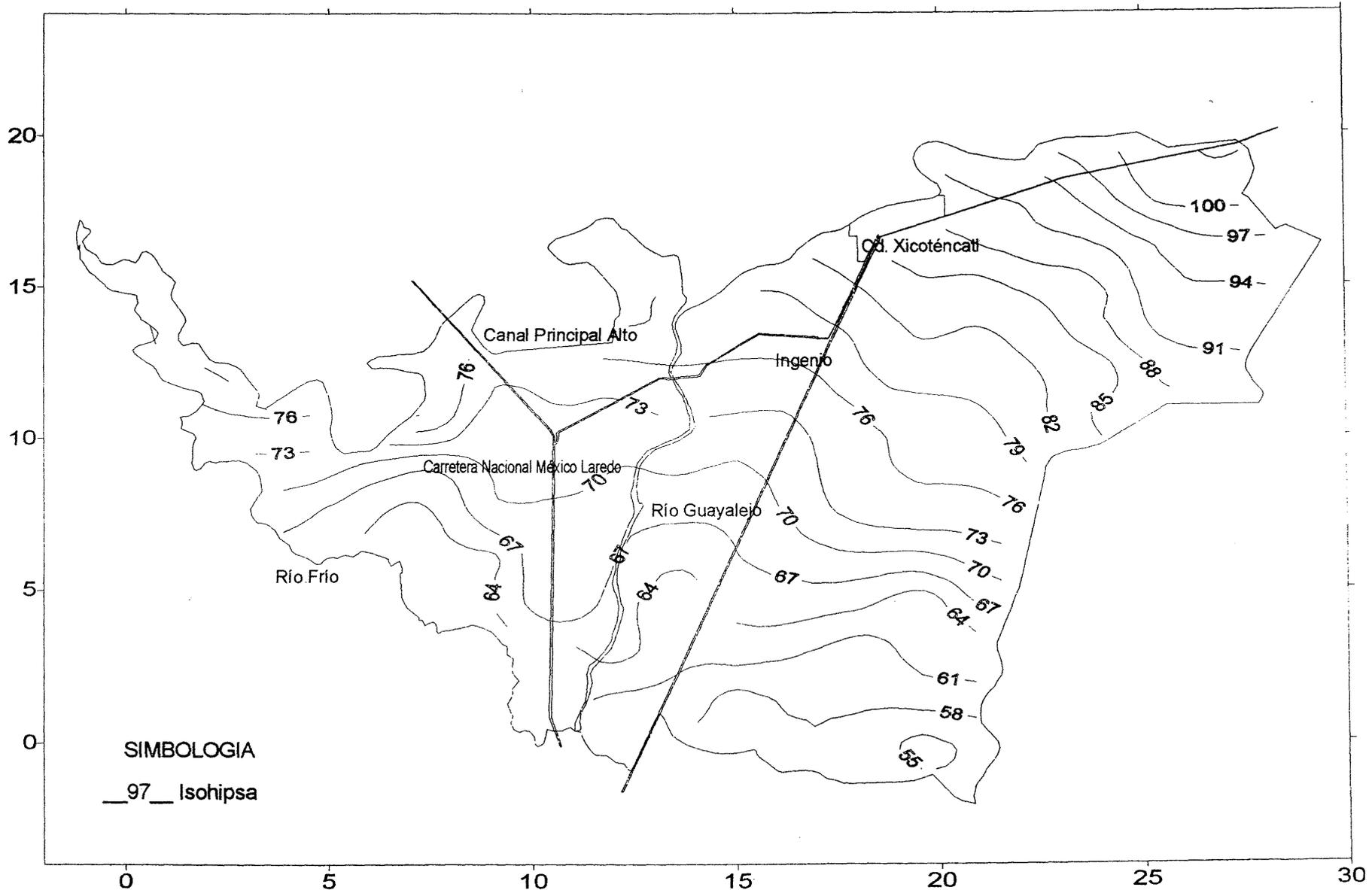


Figura 4.9. Isohipsas de enero de 1995

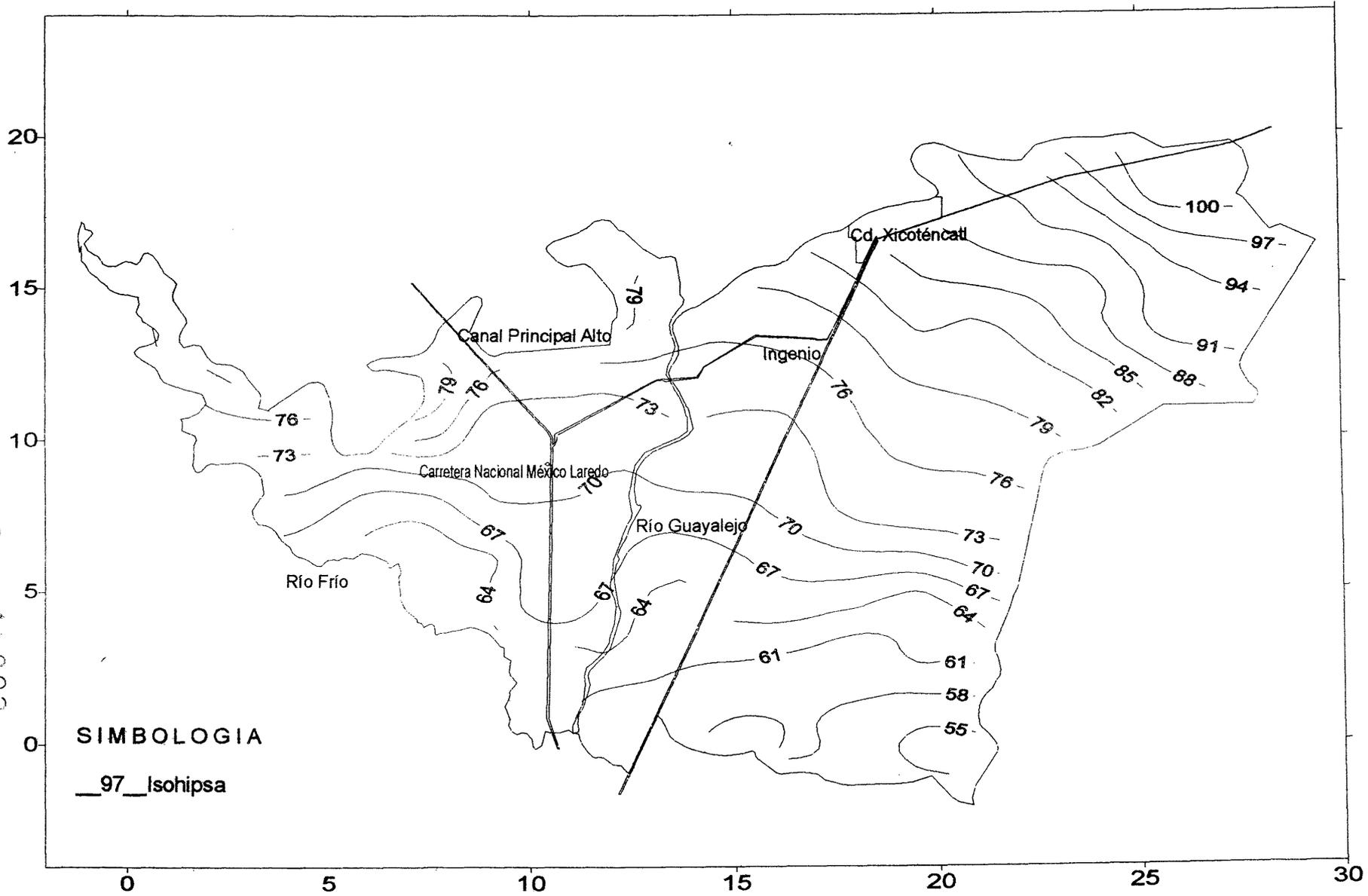


Figura 4.10. Isohipsas de julio de 1995

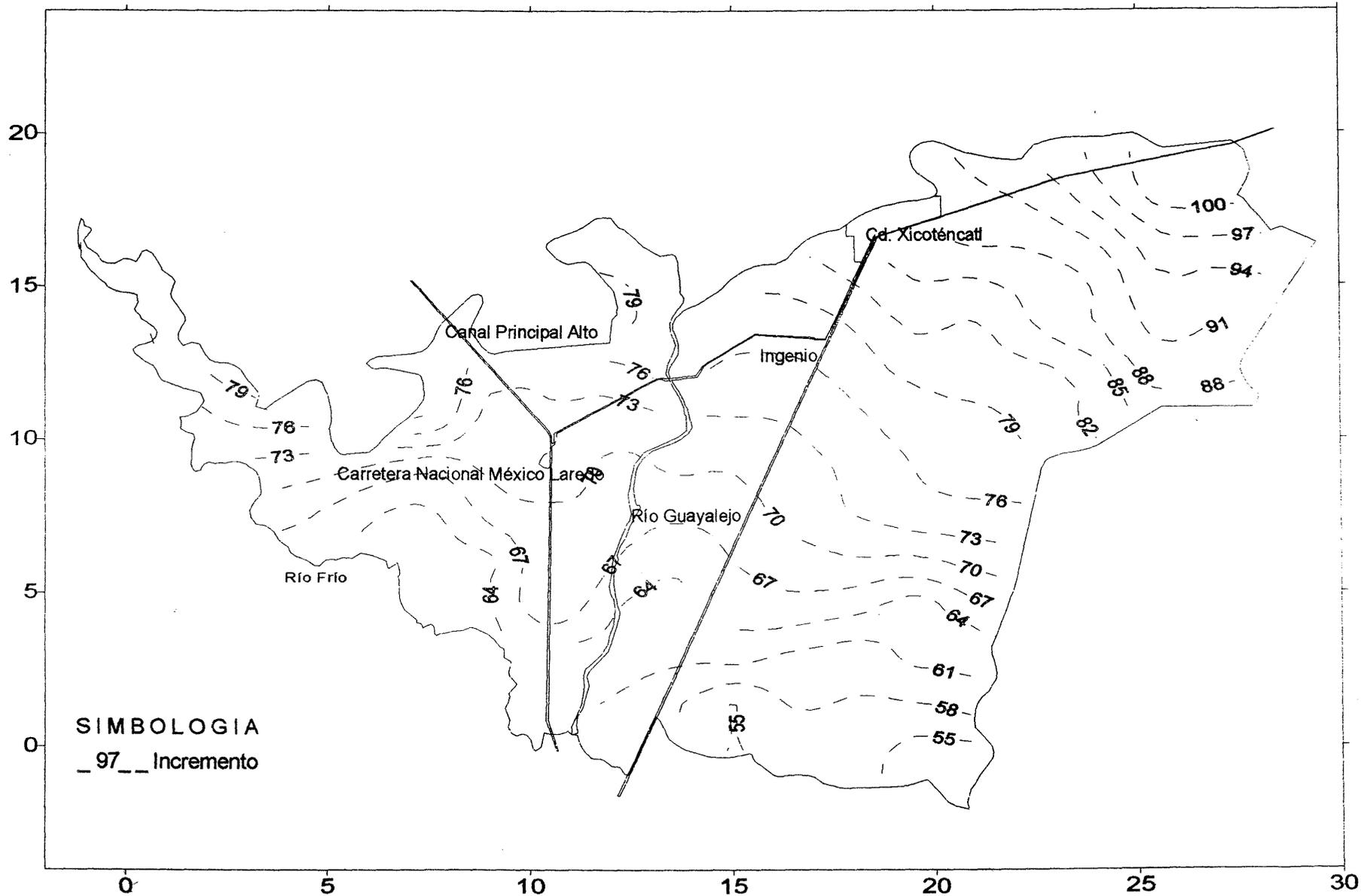


Figura 4.11. Isohipsas mínimas de 1993

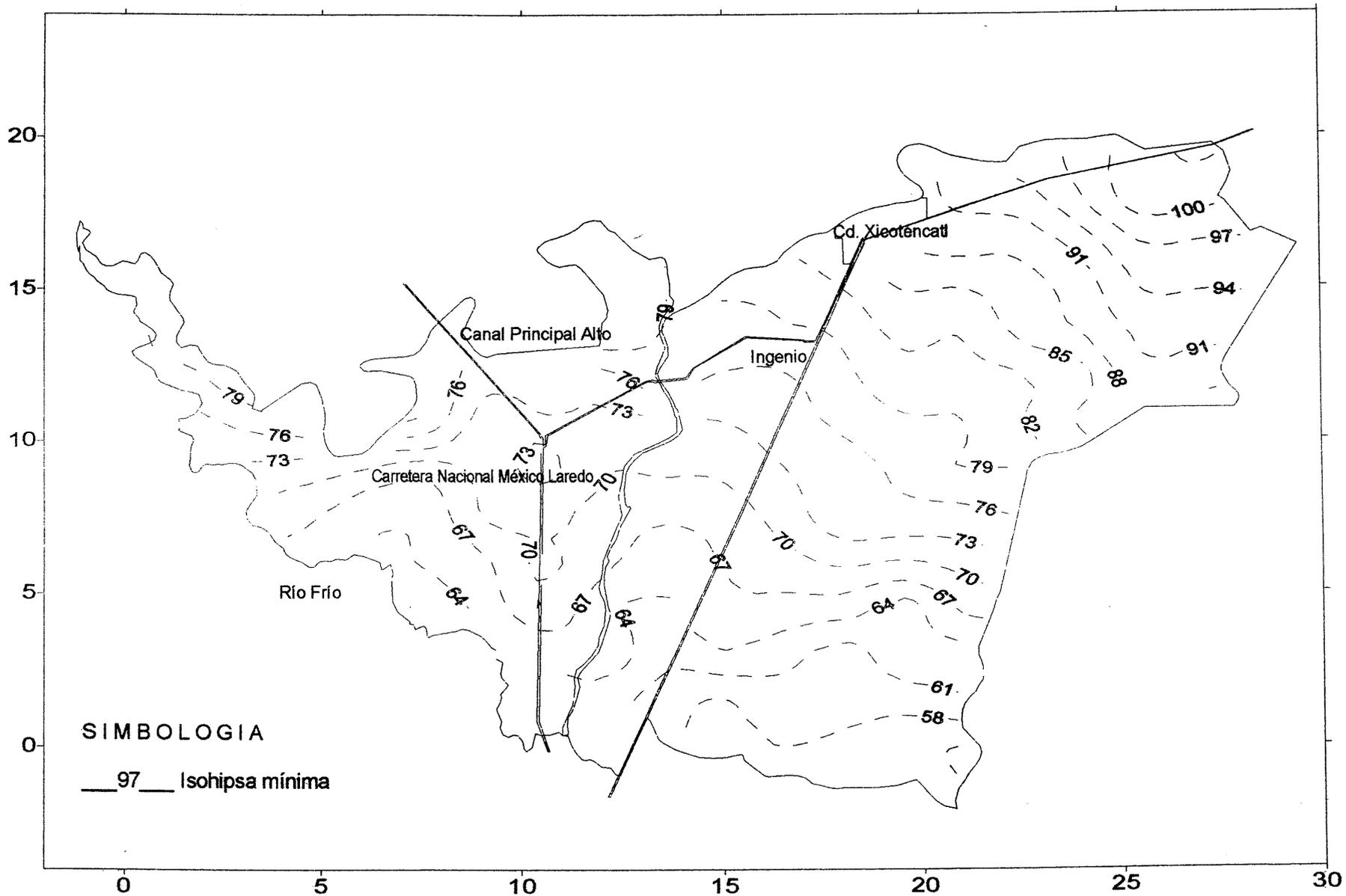


Figura 4.12. Isohipsas mínimas de 1995

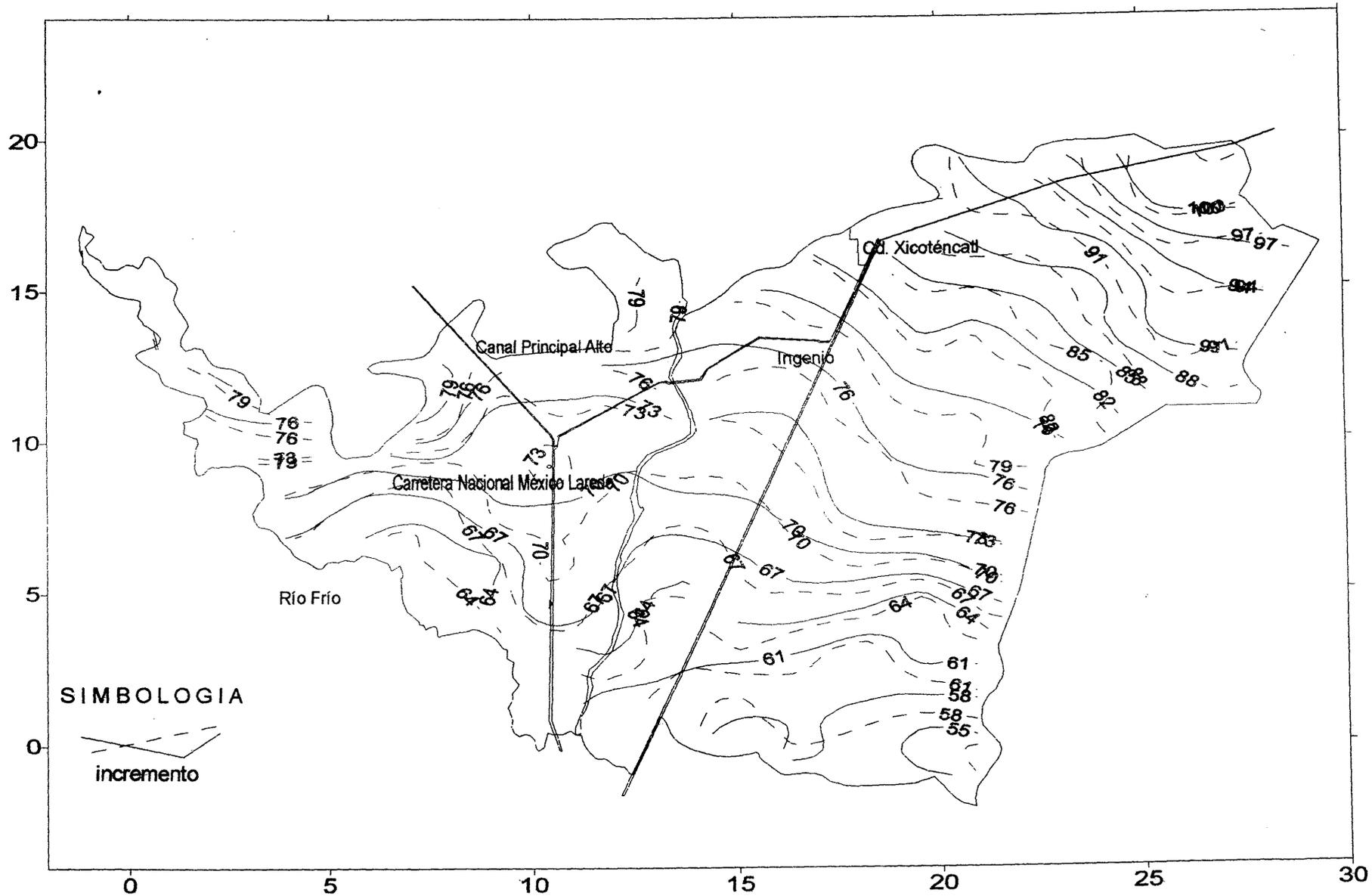


Figura 4.14. Incrementos de julio de 1995

Cuadro 4.11. Precipitaciones mensuales registradas en la estación Xicoténcatl Tam., durante los años 1991 a 1995

Meses	Precipitación (mm)					Promedio
	1991	1992	1993	1994	1995	
Enero	9.60	77.50	3.50	152.00	19.30	52.38
Febrero	5.10	8.50	2.00	0.00	7.00	4.52
Marzo	0.66	13.50	19.50	44.00	4.50	16.43
Abril	25.00	102.50	16.50	37.50	7.00	36.3
Mayo	80.80	161.00	121.50	21.20	54.70	87.84
Junio	122.7	84.00	469.00	467.50	26.00	233.84
Julio	255.00	343.50	147.00	54.50	120.50	184.10
Agosto	74.0	97.50	70.00	309.0	164.50	143.00
Septiembre	178.5	38.00	338.00	163.60	93.60	162.34
Octubre	51.00	87.50	5.50	89.00	9.00	48.40
Noviembre	39.50	18.50	21.50	6.00	45.50	26.20
Diciembre	22.60	3.50	26.00	1.00	27.00	16.02
Total	864.46	1035.50	1240	1345.30	578.60	84.28

Capa Impermeable

La Figura 4.15., muestra que la mayor parte del Distrito se localizan suelos con una capa impermeable a mas de 3.0 m solo una parte localizada entre el canal principal alto y bajo en la Zona de Riego de Río Frío se encuentra por abajo de los 2.0 m dicha capa.

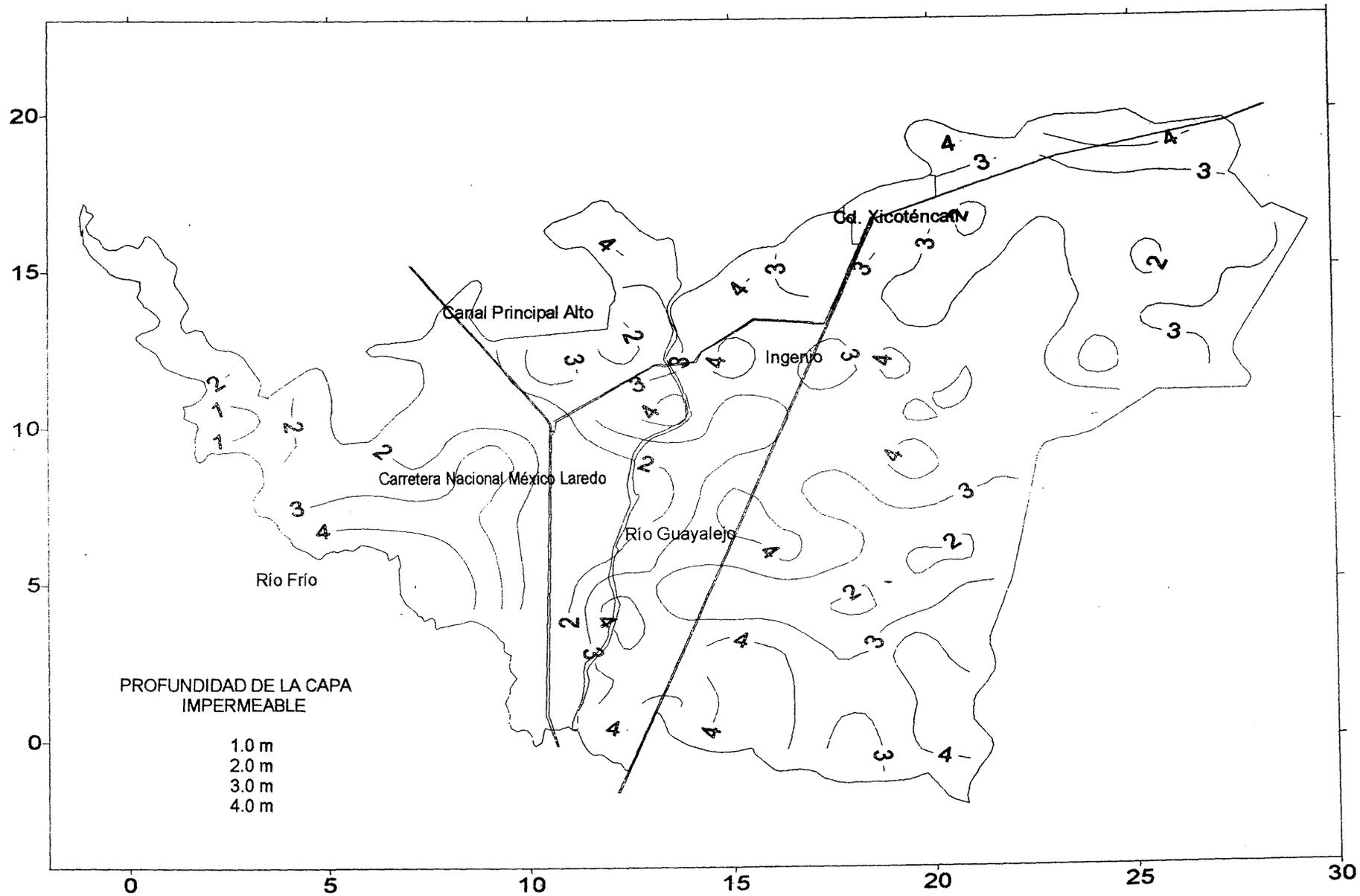


Figura 4.15. Profundidad de la capa impermeable

Conductividad Hidráulica

Características del pozo barrenado: $r = 5.25 \text{ cm}$; $H = 50.5 \text{ cm}$; $S \geq \frac{H}{2}$

Llevando los valores de las características del pozo barrenado y los que se muestran en el Cuadro 4.12., en la ecuación (42) obtenemos la conductividad hidráulica

Cuadro 4.12. Valores obtenidos en campo para determinar la conductividad hidráulica.

Observaciones	h	Tiempo en segundos
1	39	0
2	38	4
3	37	9
4	36	15
5	35	21
6	34	28

$$K = \frac{110,250}{7,247.85} * \frac{5}{28} = 2.72m / d$$

Siguiendo este mismo procedimiento y considerando que el suelo es isotrópico y homogéneo, se calcularón las conductividades hidráulicas de todos los sitios barrenados, que fueran representativos de la mayor parte de los suelos, los resultados que se presentan en el Cuadro 4.13.

Cuadro 4.13. Valores de conductividad hidráulica obtenidos para diferentes puntos y texturas del suelo.

Sitio	Zona de Riego	Textura del Suelo	S	K (m/d)
El barrote	Xicoténcatl	Franco Arcillosa	$S \geq \frac{H}{2}$	3.078
Ejido Xicoténcatl 1	Xicoténcatl	Limo arcillosa	$S \geq \frac{H}{2}$	2.720
Ejido Xicoteéncatl 2	Xicoténcatl	Limo arcillosa	$S \geq \frac{H}{2}$	1.66
Ejido el Azúcar	San Lorenzo	Arcillosa	$S \geq \frac{H}{2}$	0.87
Ejido Fraternidad Campesina	San Lorenzo	Arcillosa	$S \geq \frac{H}{2}$	0.608
Ejido Fraternidad Campesina	San Lorenzo	Arcillosa	S = 0	0.328
Ejido el Azteca	San Lorenzo	Arcillosa	$S \geq \frac{H}{2}$	0.397
El Zamay	Río Frío	Arcillosa	S = 0	0.097

Porosidad Total y Porosidad Drenable

Localización : Zona de riego de Xicoténcatl Tam.

Serie de Suelo : El Sausal

Textura : Arcillo limosa

Densidad Aparente (D_a) = 1.21 gr/cm³

Densidad Real (D_r) = 2.60 gr/cm³

Capacidad de Campo (C.c) = 33.7 por ciento

Punto de Marchitez (P.m) = 18.3 por ciento

Agua útil = C.c. - P.m. = 12.14 por ciento

$$\varepsilon = 100 \left[1 - \frac{1.21}{2.60} \right] = 54$$

$$\mu = 54 - 33.7 = 20.3 \text{ por ciento} = 0.20$$

Suponiendo que las series de suelo del Cuadro 4.14., se encuentran a capacidad de campo y se presenta una lluvia de 140 mm, llevando este valor a la ecuación (38) se obtiene que infiltra 82.6 mm en el suelo. Entonces el nivel freático en cada terreno sufrirá diferentes elevaciones de acuerdo a su porosidad drenable.

Cuadro 4.14. Porosidad total, porosidad drenable, altura del nivel freático con lluvia de 14.0 cm para los diferentes sitios de perforación.

Serie de suelo	Textura	Porosidad total (ε)	Porosidad drenable (μ)	Precipitación registrada cm	$h = \frac{R}{\mu}$
Margosa	Arcillosa	0.52	0.12	14.0	68.83 cm
Guayalejo	Franco arcilloso	0.53	0.19	140	43.47 cm
El Sausal	Arcillo limoso	0.54	0.20	14.0	41.33 cm

Suponiendo que las series de suelo del Cuadro 4.14., se encuentran a capacidad de campo y se presenta una lluvia de 140 mm, llevando este valor a la ecuación (38) se obtiene que infiltra 82.6 mm en el suelo. Entonces el nivel freático en cada terreno sufrirá diferentes elevaciones de acuerdo a su porosidad drenable.

Espaciamiento entre Drenes en Régimen Permanente

Se aplicaron las fórmulas para régimen variable y régimen permanente con criterio para época de lluvia como para riego, en un suelo perteneciente a la Unidad de suelo Fluvisol Eútrico, serie el Sauzal de textura limo arcillosa con caña de azúcar establecida, localizado en la porción noroeste del Distrito de Riego, correspondiente al módulo I.

Fórmula de Hooghoudt

Criterio de drenaje para época de lluvia (Cuadro 4.15)

Cuadro 4.15. Parámetros utilizados en fórmula de Hooghoudt para obtener la separación entre drenes para época de lluvia.

K (m/d)	R (m/d)	H (m)	p (m)	h = H - p (m)	d = 1.25 de tablas de Hooghoudt		
					r	D	L
2.72	0.00826	1.5	1.1	0.40	0.1 m	1.4 m	40 m

$$L^2 = \frac{4Kh}{R}(2d + h) = \frac{(4)[2.72](0.4)}{0.00826} (2)(1.25) + 0.4 = 1528$$

Este criterio indica que al tercer día el nivel freático estará a una profundidad de 0.40 m por encima del sistema de drenaje el valor calculado de $1528 \cong 1600$ que corresponde a L^2 por lo tanto el espaciamento calculado $L = 40$ m.

Criterio de Drenaje para Época de Riego (Cuadro 4.16)

Se asume un intervalo de riego de 40 días para el cultivo de caña de azúcar, promedio, que los usuarios realizan entre un riego y otro riego.

$$C_d = L_b - L_n = 0.33 \text{ m} - 0.18 \text{ m} = 0.15 \text{ m}$$

$$C_d = \frac{0.15 \text{ m}}{40 \text{ días}} = 0.00375 \text{ m/d}$$

Cuadro 4.16. Parámetros utilizados en fórmula de Hooghoudt para obtener la separación entre drenes para época de riego.

K (m/d)	R (m/d)	H (m)	p (m)	h = H - p (m)	d = 1.36 de tablas de Hooghoudt		
					R	D	L
2.72	0.00375	1.5	1.1	0.40	0.1 m	1.4 m	60 m

$$L^2 = \frac{4Kh}{R}(2d + h) = \frac{(4)(2.72)(0.4)}{0.00375} (2)(1.36) + 0.4 = 3621$$

El criterio de drenaje para época de riego indica que al tercer día el nivel freático estará a una profundidad de 0.40 m por encima del sistema de drenaje calculado así: el valor calculado de 3621 \cong 3600 que corresponde a L^2 por lo que el espaciamiento de $L = 60$ m.

Fórmula de Ernst

Criterio de Drenaje para Época de Lluvia (Cuadro 4.17.)

Cuadro 4.17. Parámetros utilizados en fórmula de Ernst para obtener la separación entre drenes para época de lluvia.

K (m/d)	R (m/d)	H (m)	p (m)	h = H - p (m)	D ₁ (m)	D _r (m)	b (m)	u (m)	L (m)
2.72	0.00826	1.5	1.1	0.40	1.60	1.4	0.30	0.70	47

Para obtener el factor "u" se utiliza la ecuación (53)

$$u = 0.30 + 4 * 0.1 = 0.70m$$

$$D_1 = 1.4 + \frac{0.4}{2} = 1.6m$$

$$D_v = h$$

$$h = 0.00826 \frac{0.40}{2.72} + 0.00826 \frac{47^2}{8(2.72 * 1.6)} + 0.00826 \frac{47}{(3.14 * 2.72)} \ln \frac{1.4}{0.7} = 0.40m$$

La altura calculada es igual a la permisible, que es de $h = 0.40$ m por lo tanto la distancia buscada de $L = 47$ m.

Criterio de Drenaje para Época de Riego (Cuadro 4.18).

Cuadro 4.18. Parámetros utilizados en fórmula de Ernst para obtener la separación entre drenes para época de riego.

K (m/d)	R (m/d)	H (m)	p (m)	h = H - p (m)	D ₁ (m)	D _r (m)	b (m)	u (m)	L (m)
2.72	0.00375	1.5	1.1	0.40	1.60	1.4	0.30	0.70	71

Para obtener los valores de "u" y D₁ el procedimiento es similar al calculado para época de lluvia.

$$h = 0.00375 \frac{0.40}{2.72} + 0.00375 \frac{71^2}{8(2.72 * 1.6)} + 0.00375 \frac{71}{(3.14 * 2.72)} \ln \frac{1.4}{0.7} = 0.40m$$

La altura calculada $h = 0.40$ es igual a la altura buscada $h = 0.40$, por lo que el el espaciamiento de $L = 71$ m.

Espaciamiento entre Drenes para Régimen Variable

Fórmula de Glover-Dumm

Criterio de Drenaje Epoca de Lluvia (Cuadro 4.19)

Datos : $K = 2.72$ m/d; $\mu = 0.20$; $R = 0.00826$ m/d ; $h_3 = 0.0413$;

Obtención de h_o , D y α

$$h_o = \frac{R}{\mu} = \frac{0.00826}{0.20} = 0.0413 \text{ m}$$

Cuadro 4.19. Parámetros utilizados en fórmula de Glover y Dumm para obtener la separación entre drenes para época de lluvia.

K (m/d)	R (m/d)	H (m)	p (m)	h = H - p (m)	D ₁ (m)	D ₂ (m)	D (m)	u (m)	L (m)
2.72	0.00826	1.5	1.1	0.40	0.4065	1.34	1.746	0.70	57

$$D = D_1 + D_2$$

$D_2 = 1.34$ ($L = 57\text{m}$; $r = 0.1\text{m}$; $D = 1.4$) tabla de Hooghoud

D_1 se calcula como la media entre h_o y el valor límite de h_3 días

$$D_1 = \frac{h_o + h_3}{2} = \frac{0.413 - 0.40}{2} = 0.4065$$

$$\alpha = \frac{\pi^2 KD}{\mu L^2} = \frac{(3.14)^2 (2.72)(1.746)}{(0.20)(57)^2} = 0.072 ;$$

$\alpha \tau = (0.072) (3 \text{ días}) = 0.216$ como $0.216 > 0.2$ se utiliza la fórmula 1.16

$h_o e^{-\alpha \tau}$

$$h_t = 1.16 (0.143) e^{-0.216} = 0.39 \text{ m}$$

Como se muestra al tercer día el nivel freático se mantiene 1 cm por debajo del máximo admisible (0.40 m). Por lo tanto el espaciamiento $L = 57 \text{ m}$.

Criterio de Drenaje Epoca de Riego (Cuadro 4.20).

Datos: $K = 2.72 \text{ m/d}$; $\mu = 0.20$; $h_{3 \text{ días}} = 0.40$; $L_b = 0.33$; $L_n = 0.18$

Obtención de R , h_o , D y α

$$R = L_b - L_n = 0.33 - 0.18 = 0.15$$

Los 0.33 m de lámina bruta aplicados 0.18 de lámina neta son retenidos por el suelo, quedando a disposición de las plantas y 0.15 se infiltran hacia el nivel freático ocasionando un incremento.

$$h_0 = \frac{R}{\mu} = \frac{0.15}{0.20} = 0.75 \text{ m}$$

Cuadro 4.20. Parámetros utilizados en fórmula de Glover y Dumm para obtener la separación entre drenes para época de riego.

K (m/d)	R (m/d)	H (m)	p (m)	h = H - p (m)	D ₁ (m)	D ₂ (m)	D (m)	u (m)	L (m)
2.72	0.15	1.5	1.1	0.40	0.375	1.173	1.548	0.70	27

$$D = D_1 + D_2$$

$D_2 = 1.173$ ($L = 27\text{m}$; $r = 0.1\text{m}$; $D = 1.4$) tabla de Hooghoud

D_1 es la altura media sobre los drenes del nivel freático, y se obtiene:

$$D_1 = \frac{h_0 + 0}{2} = \frac{0.75 + 0}{2} = 0.375$$

$$D = D_1 + D_2 = 0.375 + 1.173 = 1.548$$

$$\alpha = \frac{\pi^2 KD}{\mu L^2} = \frac{(3.14)^2 (2.72)(1.548)}{0.20(27)^2} = 0.285$$

$\alpha \tau = (0.285) (40 \text{ días}) = 11.4$ como $11.4 > 0.2$ se utiliza la fórmula (8.16), que es más simple.

Primer Riego

Altura despues del riego = 0.75 m

$$h_{40 \text{ días}} = 1.16 (h_0) e^{-11.4} = 1.16 (h_0) 1.12^{-05} = 1.3^{-05} (h_0) = 1.3^{-05} (0.75)$$

$$h_{40 \text{ días}} = 9.75^{-06}$$

Segundo Riego

Altura antes de aplicar el segundo riego = 9.75^{-06}

El riego ocasiona que el nivel freático se eleve 0.75 m, sumada a la altura que tenía antes de aplicar el segundo riego queda $9.75^{-06} + 0.75 = 0.750009$ m; 40 días más tarde habrá descendido a:

$$h_{40 \text{ días}} = 1.16 (h_0) e^{-11.4} = 1.3^{-05} (0.750009) = 9.75^{-06}$$

Tercer Riego

Altura antes de aplicar el tercer riego = 9.75^{-06}

El riego ocasiona que el nivel freático se eleve 0.75 m (Cuadro 4.21). sumada a la altura que tenía antes de aplicar el tercer riego queda $9.75^{-06} + 0.75 = 0.750009$ m; 40 días más tarde habrá descendido a:

$$h_{40 \text{ días}} = 1.16 (h_0) e^{-11.4} = 1.3^{-05} (0.750009) = 9.75^{-06}$$

Cuadro 4.21. Estabilización del Nivel freático al aplicar el riego

Altura del nivel freático (h)	Número de riegos		
	1	2	3
antes de riego	0.00	9.75^{-06}	9.75^{-06}
después de riego	0.75	0.750009	0.750009

Una vez que alcanza el equilibrio en el tercer riego, como se observa en el cuadro 8.2, se calcula la altura freática que corresponde a 3 días después del riego, la cual es la que interesa en el criterio de drenaje.

$$t = 3 \text{ días}$$

$\alpha \tau = (0.285) (3 \text{ días}) = -0.855$ como $0.855 > 0.2$ se puede seguir aplicando la fórmula (8.16).

$$h_{3 \text{ días}} = 1.16 (h_0) e^{-0.855} = 1.16 (0.750009) (0.425) = 0.37 \text{ m}$$

La altura del nivel freático tres días después del riego es de 0.37 m, aproximadamente igual a la admisible 0.40 m. Por lo tanto el espaciamiento es 27 m.

Fórmula de Kraijenhoff Van de Leur-Maasland

Datos: Lluvia crítica 0.14 m en 24 horas = 0.14 m/d criterio de drenaje para época de lluvia.

$$K = 2.72 \text{ m/d}; \mu = 0.20$$

Cálculo de D, y j

$$D = D_1 + D_2$$

$D_2 = 1.22$ ($L = 32$; $r = 0.1$; $D = 1.4$) obtenido de tablas de Hooghoud

$$D_1 = \frac{1.00 + 0}{2} = 0.50$$

$$D = 0.50 + 1.22 = 1.72$$

$$j = \frac{1}{(3.14)^2} \cdot \frac{(0.20)(32)^2}{(2.72)(1.72)} = 4.439$$

Altura después de iniciar la lluvia

$$h = p \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{j}{\mu} \left[1 - \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=1, -3, 5, \dots}^{\infty} \frac{1}{n^3} e^{-n^2 \frac{j}{j}} \right]$$

p (precipitación) = 0.14 m/d

Duración de la lluvia = 24 horas = 1 día

$$h_0 = 0.14 \frac{(3.14)^2}{8} \cdot \frac{4.439}{0.20} \left[1 - \frac{32}{(3.14)^3} \sum \frac{1}{n^3} e^{-n^2 \frac{1}{4.439}} \right]$$

$$n = 1; \sum \frac{1}{(1)^3} (e^{-0.225}) = 0.798 ; \left[1 - \frac{32}{(3.14)^3} \right] = [1 - 1.034 * 0.798] = 0.175$$

$$n = 1, -3; \sum = \frac{1}{(1)^3} (e^{-0.225}) - \frac{1}{(3)^3} (e^{(-9)(0.225)}) = 0.798 - 4.889^{-03} = 0.793$$

$$[1 - \frac{32}{(3.14)^3} \Sigma] = [1 - 1.034 \cdot 0.793] = 0.180$$

Se calculan dos términos de la Σ ya que la diferencia entre los dos valores (0.180 y 0.175) es de menos del 1 por ciento; se toma el de $n = -3$; [] = 0.18

$$h_0 = 3.828(0.18) = 0.69m$$

Altura un día después de la lluvia

$$h = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{p}{\mu} j \sum_{n=1, -3, 5, \dots}^{n=\infty} \frac{1}{n^3} (e^{n^2 \frac{b}{j}} - 1) e^{-n^2 \frac{t}{j}}$$

$t = 2$ (tiempo en días desde inicio de lluvia)

$$h_1 = \frac{4}{3.14} \cdot \frac{0.14}{0.20} \cdot 4.439 \sum \frac{1}{n^3} (e^{n^2 \frac{1}{4.439}} - 1) e^{-n^2 \frac{2}{4.439}}$$

$$n = 1; \sum (e^{0.225} - 1)(e^{-0.4506}) = 0.161$$

$$n = 1, -3; \sum \frac{1}{(1)^3} (e^{0.225} - 1)(e^{-4.506}) - \sum \frac{1}{(3)^3} (e^{2.025} - 1)(e^{-4.055}) = 0.161 - 4.22^{-03} = 0.157$$

$$h_1 = 3.959 \cdot \Sigma = 3.959 \cdot 0.157 = 0.62m$$

Altura dos días después de la lluvia

$t = 3$ (tiempo en días desde inicio de lluvia)

$$h_2 = \frac{4}{3.14} \cdot \frac{0.14}{0.20} \cdot 4.439 \sum \frac{1}{n^3} \left(e^{n^2 \frac{1}{4.439}} - 1 \right) e^{-n^2 \frac{3}{4.439}}$$

$$n = 1; \sum \frac{1}{(1)^3} \left(e^{0.225} - 1 \right) \left(e^{-0.676} \right) = 0.128$$

$$n = 1; \sum \frac{1}{(1)^3} \left(e^{0.225} - 1 \right) \left(e^{-0.676} \right) - \sum \frac{1}{(3)^3} \left(e^{2.025} - 1 \right) \left(e^{-6.084} \right) = 0.128 - 5.518^{-04} = 0.127$$

$$h_2 = 4.439 \cdot 0.127 = 0.56m$$

Altura tres días después de la lluvia

$t = 4$ (tiempo en días después de la lluvia)

$$h_3 = \frac{4}{3.14} \cdot \frac{0.14}{.20} \cdot 4.439 \sum \frac{1}{(n)^3} \left(e^{n^2 \frac{1}{4.439}} \right) e^{-n^2 \frac{4}{4.439}}$$

$$n = 1; \sum \frac{1}{(1)^3} \left(e^{0.225} - 1 \right) \left(e^{-0.901} \right) = 0.1023$$

$$n = 1; -3 \sum \frac{1}{(1)^3} \left(e^{0.225} - 1 \right) \left(e^{-0.901} \right) -$$

$$\sum \frac{1}{(3)^3} \left(e^{2.025} - 1 \right) \left(e^{-8.109} \right) = 0.1023 - 7.326^{-09} = 0.10233$$

$$h_3 = 3.959 \cdot 0.10233 = 0.40m$$

En Cuadro 4.22., explica como después de que se presenta una precipitación existe una recarga inmediata del manto freático, y como este decrece presentando diferentes alturas del primer día transcurrido al tercer día y después del primer día al tercer día de inicio de la lluvia, con la separación de drenes calculada, con ello se cumple el criterio de drenaje considerado para la aplicación de este método.

Cuadro 4.22. Variación de las alturas de los niveles freáticos en días considerando una separación entre drenes de 34 m.

Días después del inicio de la lluvia	Días transcurridos	Cultivos extensivos p (m)	$h = 1.5 - p$	h (m)
0	1	0.50	1.00	0.69
1	2	0.80	0.70	0.62
2	3	1.00	0.50	0.56
3	4	1.10	0.40	0.40

En el Cuadro 4.23., se observan que las separaciones entre drenes son diferentes para cada método las de régimen permanente se aproximan en el resultado obtenido en su separación para época de lluvia como para época de riego, en cambio las de régimen variable la fórmula de Glover y Dumm es más estricta para época de riego con un espaciamiento menor al obtenido por Hooghoudt y Ernst, para época de lluvia es muy estricta la fórmula de Krainjenhoff Van de Leur-Maaslan. Es recomendable desde este punto de vista utilizar estas dos ecuaciones para el cálculo de la separación entre drenes. Considerados.

Cuadro 4.23. Separación entre drenes para régimen permanente y régimen variable.

Método	Régimen	Separación entre drenes (m)	
		época de lluvia	época de riego
Hooghoudt	Permanente	40	60
Ernst	Permanente	47	71
Glover Dumm	Variable	57	27
Krainjenhoff Van de Leur-Massland	Variable	32	

CONCLUSIONES

- La lluvia de diseño para el área de influencia de la estación climatológica de Xicoténcatl Tam., dentro del Distrito de Riego 029 Xicoténcatl, es de 140 mm considerando un período de retorno de ocho años.
- El coeficiente de escurrimiento para el mes de julio del año más húmedo, 1993 es 0.73; para el año más seco, 1995 es 0.30; Para lluvia de diseño de 0.88 y el Promedio de 1965 a 1996 es 0.41.
- El coeficiente de drenaje para lluvia de diseño de 140 mm es de 0.00826 m/d. Para riego con una lámina bruta de 33 cm y una eficiencia de 54 por ciento es de 0.00484 m/d.
- La suelos con mayor conductividad hidráulica de 2.72 y 3.078 m/d son los conocidos como barrote, localizados en la Unidad de suelo de los Fluvisoles éutricos los cuales ocupan el 12 por ciento de la superficie del Distrito. Conductividades hidráulicas que van de 0.097 m/d a 1.66 m/d, se obtuvieron de la unidad de suelo clasificada como Vertisol pélico que ocupa el 80 por ciento de la superficie de Distrito de Riego.

- Los suelos de textura arcillosos como los Vertisoles pélicos son los que sufren una recarga mayor en el nivel freático después de una lluvia o un riego.
- El período más crítico de drenaje subsuperficial es durante los meses de junio a septiembre debido a lluvias y de enero a mayo debido a un incremento en el volumen de agua utilizado para el riego.
- El promedio de superficies afectadas por niveles freáticos de 0.0 a 1.0 m durante el período de 1991 a 1995 es de 5,603 hectáreas y de 1.0 a 1.5 m con 7,301 hectáreas. Los meses con mayor superficie afectada con niveles freáticos de 0.0 a 1.0 m es julio con 7,938 hectáreas debido a lluvia y enero con 7,303 hectáreas a riego, representando ambas superficies el 32.26 por ciento y el 29.67 por ciento respectivamente.
- Las direcciones de la líneas de flujo se desplazan de norte a sur del Distrito de Riego , la parte norte tiene un gradiente hidráulico que va de 0.0057 m, la noreste de 0.0022 m, el centro de 0.00159 a 0.001m. llegando hasta 0.0001 m. Al sur de 0.0036 a 0.0044 m.

- Las fuentes de recarga del nivel freático que actúan de manera permanente son los canales principales San Lorenzo, Xicoténcatl, el Conejo y Alto.
- Los métodos que más se ajustan a las condiciones de la región para el cálculo del espaciamiento entre drenes, son los de régimen variable para época de riego Glover-Dumm y para lluvia Kraijenhoff Van de Leur-Maasland, con un promedio de espaciamiento de 30.0 m

RECOMENDACIONES

- Existe un incremento en los volúmenes de agua para uso agrícola de 81.947 millones de metros cúbicos para el ciclo agrícola de 1991-1992 a 300.156 millones de metros cúbicos para el ciclo agrícola 1995-1996, manteniendo su eficiencia del 53.2 por ciento. Es necesario establecer un tope en el patrón de cultivos, evitando incrementar la superficie sobre todo en los cultivos que más demandan agua como la Caña de Azúcar, en el ciclo 1995-1996 alcanzó el 88 por ciento de la superficie establecida.
- El balance hidrológico dentro de la planeación de un sistema de manejo de agua es de suma importancia, es recomendable considerar además de la lámina de lluvia, la intensidad de ésta, automatizando su registro así como el de las fluctuaciones del manto freático.
- Efectuar aforos secuenciados en los tramos de los canales, en donde las líneas de corriente nos indican que existe aportación de manera permanente a los mantos freáticos, para determinar los lugares con más alta infiltración para impermeabilizar estos.

- Uniformizar la aplicación y la eficiencia del riego a partir de los sistemas de riego existentes, como tiempo de aplicación del riego en base a dotación volumétrica; convertir los sistemas de riego superficial a sistemas de riego a presión que utilicen baja energía como el riego por goteo; reducción de la longitud de los surcos y aumentar el gasto en estos.
- Mejorar el mantenimiento y conservación de los drenes colectores de tipo abierto en donde descargan los excedentes del riego y de lluvia debido a que por problemas de azolve y maleza acuática no funcionan eficientemente, ocasionando una subida rápida del manto freático, en muchos casos por encima del nivel terreno afectando al cultivo.
- Localización de sitios basados en los planos del estrato impermeable y líneas de corriente, para localizar sitios para la construcción de drenaje que intercepte las líneas de corriente que se desplazan de norte a sur del Distrito de Riego.
- Instalación de drenaje parcelario subterráneo, calculando el espaciamiento entre drenes con conductividades hidráulicas y espacio poroso drenable obtenidos a nivel superficie de proyecto.
- Complementar los estudios de drenaje con los de salinidad analizada y Calidad del agua.

- El financiamiento para realizar estudios proyectos y obras, se puede obtener de los programas Hidroagrícolas en el marco de Alianza para el Campo estos programas contemplan apoyos Federales del 50 por ciento para la Rehabilitación y Modernización de los Distritos de Riego en revestimiento de canales, construcción y modernización de estructuras de control y medición, tubería de conducción para recuperar volúmenes de agua. En Desarrollo parcelario (PRODEP) tendiente a recuperar suelos con problemas de salinidad y drenaje disminuir las pérdidas de conducción a nivel parcelario los apoyos son para la elaboración de estudios diseños y proyectos ejecutivos con aportación Federal del 100 por ciento, para adquisición de materiales para revestimiento de regaderas interparcelarias, tubería para instalar drenaje subterráneo y maquinaria para nivelación de tierras y obra civil, el Gobierno Federal aporta en forma inicial el 100 por ciento de la inversión, pagadero el 50 por ciento en 12 años

RESUMEN

La fuente de ingresos más importante para los municipios de Xicoténcatl y Gomez Farías, Tam., lo representa el cultivo de la caña de azúcar bajo condiciones de riego. Es de suma importancia cuidar el uso y manejo del suelo y el agua, para mantener y mejorar la productividad de las tierras.

El estudio del clima demuestra que durante el año, se presentan dos períodos opuestos, el que pertenece a los meses más secos caracterizados por un déficit de agua en los escurrimientos y una mayor demanda, y los meses en donde ocurre la mayor precipitación con excedentes de esta. En ambos períodos se presentan problemas de drenaje subsuperficial.

Los estudios de freaticimetría, demuestran la existencia del 32.25 por ciento de superficie total del Distrito, que es afectada seriamente por mantos freáticos subsuperficiales. Las fuentes permanentes de recarga del manto freático, son los canales principales San Lorenzo, Xicoténcatl, el Conejo y Alto. Las líneas de corriente se desplazan del norte al sur del Distrito de Riego.

El 80 por ciento de los suelos tienen una conductividad hidráulica lenta que va de 0.097 a 1.66 m/d con potencial para salinizarse, por lo que las labores de conservación y mantenimiento del sistema de drenaje a cielo abierto debe mejorarse. Además de construir drenaje interceptor y drenaje a nivel parcelario.

Los métodos que mejor se ajustaron a las condiciones de la región para el cálculo del espaciamiento entre drenes paralelos, a nivel parcelario, son los de régimen variable, Glover-Dumm para riego y de Krainjenhoff Van de Leur Maasland para lluvia. Para los proyectos de drenaje se consideró una lluvia de diseño de 140 mm para un período de retorno de ocho años..

LITERATURA CITADA

- Bower, H. 1969. Planning and interpreting soil permeability measurements. *J. Irrigation Drainage Division. ASCE.* 95 (3): 395-402. United States of America.
- Cámara D., O.A. 1994. Impacto de la agricultura bajo riego sobre la calidad del agua : caso Valle del Yaqui Sonora. *Ingeniería Hidráulica en México.* Vol. IX. No.3. II Época Septiembre-Diciembre. pp 57-71.
- Carter, C.E., J.L. Fouss and V. McDaniel. 1988. Water management increases sugarcane yields. *Transactions ASAE.* Vol. 31(2): 503-507. United States of America.
- Cortés, B.J. 1988. Variabilidad espacial en variables geohidrológicas. Tesis Maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo Coah. México. 115 p.
- El-Mowelhi, N.M. and J. V. Schilfgaarde. 1982. Computation of soil hydrological constant from field drainage experiment in some soil of Egypt. *Transactions ASAE.* Vol.25(3-4): 984-986. United States of America.
- Estudios Interdisciplinarios para el Desarrollo, S.C. (Eidesa). 1974. Estudio agrológico semidetallado del proyecto San Lorenzo, Tam. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México. p. 106-201.
- Gallichand, J., S.O. Prasher, S.O. and D. Marcotte. 1992. Kriging including uncertainty conductivity into drainage design. *J. of Irrigation and Drainage Engineering.* Vol.118 No.5 . September/October, p. 667-681. United States of America.
- García, L. and K. Strzepek. 1994. Design of agricultural drainage with adaptive irrigation management. *J. of Irrigation and Drainage Engineering.* Vol. 120 (1-3): 179-192. United States of America.
- García, R. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koeppen. México. 251 p.

- Gupta, S.K. 1993. Field estimation of drainable pore space and application in drainage design. Head, Division of Drainage and Management Central Soil Salinity Research Institute, Karnal-Haryana India.
- Hanson, B.R. (1989). Drainage reduction potential of furrow irrigation. California Agr. 43(1). p. 6-8. United States of America.
- Hanson, B.R., and A. E. Fulton. 1994. Methods and economics of drainage reduction through improved irrigation. J. Of Irrigation and Drainage Engineering. Vol.120. No. 2. March/April. P. 308-321. United States Of America.
- International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRD). 1978. Principios y aplicaciones del drenaje. Diseño y manejo de sistemas de drenaje. Vol. 4. p. 80-141. Netherlands
- Luque, J.A., J.L. Vázquez. R. y Luque. L. 1991. Drenaje de tierras agrícolas y desague de áreas inundables. Emisferio Sur. Buenos Aires Argentina . 526 p.
- Luthin, N.J. 1967. Drenaje de tierras agrícolas. Limusa. México.675 p.
- Mora, M. A. 1995. Problemática del agua en Tamaulipas. 26 Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Victoria, Tamaulipas. México.
- Narro, F.E. 1994. Física de Suelos con Enfoque Agrícola. Trillas. México. 195 p.
- Palacios. V.E. 1979. Manual de operación de Distritos de Riego. UACH. Chapingo México.
- Pizarro, F. 1985. Drenaje Agrícola y recuperación de suelos salinos. 2a. ed. Agrícola Española. Madrid, España. 526 p.
- Rao, K.V.G.K., O.P. Singh, P.S. Kumbhare, S.K. Kamra, and I.P. Abrol. 1986. Drainage investigations for salinity control in Haryana. Central Soil Salinity Research Institute, Karnal India. Bull. No. 10. 95 p.
- Román, C.J. 1980. Aplicación de la metodología Kriging universal en la elaboración de planos del nivel freático. Tesis Maestría. Colegio de Postgraduados. Chapingo. Méxiico. 187 p.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1978. Métodos para estimar la conductividad hidráulica "K". Memorándum técnico No. 373. México. 107 p.

1982. Dirección General de Conservación del Suelo y Agua. Integración de Unidades de suelo del estado de Tamaulipas. México. 107 p.

1987. Estudio de reconocimiento del proyecto de riego Río Frío. México. 55 p.

Skaggs, R. W. 1976. Determination of the hydraulic conductivity-drainable porosity ratio from water table measurement. Transactions ASAE Vol. 19 (1-3) : 73-80. United States of America.

Van Beers, W. J. F. (1983). The auger hole method. International Institute of Land Reclamation and Improvement. Bull. No. 1. Wageningen, The Netherlands.

Westlands Water District. (1991). Sprinkler management. Fresno California.

Witers, B. And S. Vipond. 1978. El riego diseño y práctica. Diana. México. 350 p.

APENDICE A

SUPERFICIES AFECTADAS POR DIFERENTES RANGOS DEL
MANTO FREÁTICO 1991-1995

Cuadro A.1. Superficies afectadas por diferentes rangos del manto freático durante los años de 1991 a 1995.

Años	Meses	Superficies (ha) afectadas por diferentes rangos de nivel freático (m)				
		0.0 - 1.0	1.0 - 1.5	1.5 - 2.0	2.0 - 3.0	más de 3.0
1991	Enero	7,489	6,420	4,992	4,101	1,605
	Febrero	5,526	7,664	5,526	4,278	1,613
	Marzo	3,743	5,525	5,703	5,525	4,381
	Abril	4,099	5,346	6,594	6,772	1,796
	Mayo	6,060	5,881	5,525	5,346	10,692
	Junio	8,376	7,663	3,921	3,030	1,617
	Julio	13,902	4,099	1,960	2,495	2,138
	Agosto	6,951	8,020	3,386	4,099	2,151
	Septiembre	12,120	4,990	2,495	2,852	2,138
	Octubre	6,772	8,554	4,455	3,030	1,796
	Noviembre	7,663	9,089	3,207	3,208	1,425
	Diciembre	7,129	8,911	3,743	3,386	1,425
Total		89,830	82,162	51,507	48,122	32,777
1992	Enero	9,636	6,340	4,663	3,007	961
	Febrero	7,574	6,398	4,901	4,635	1,099
	Marzo	9,509	4,761	4,701	4,578	1,058
	Abril	2,470	4,296	5,716	1,005	2,120
	Mayo	4,960	4,123	5,325	7,366	2,833
	Junio	9,210	8,812	3,516	2,627	442
	Julio	10,239	4,950	4,612	3,235	1,571
	Agosto	5,953	8,053	5,206	3,631	1,764
	Septiembre	5,734	9,191	4,734	3,556	1,392
	Octubre	7,434	7,349	4,772	3,664	1,388
	Noviembre	4,607	8,946	5,581	3,802	1,668
	Diciembre	4,542	7,378	7,217	4,020	1,450
Total		81,850	80,597	60,944	45,126	15,746
1993	Enero	2,741	8,523	8,713	3,713	917
	Febrero	2,253	8,615	8,125	4,433	1,181
	Marzo	1,761	7,760	8,319	5,724	1,043
	Abril	1,065	4,947	8,779	8,574	1,228
	Mayo	1,199	8,684	9,645	4,624	455
	Junio	6,207	10,725	4,754	1,924	997
	Julio	3,913	10,984	6,095	2,424	1,191
	Agosto	3,700	989	5,978	3,833	1,197
	Septiembre	5,664	11,244	4,287	2,344	1,068
	Octubre	3,013	10,725	6,998	2,746	1,125
	Noviembre	1,151	5,204	8,902	8,027	1,323
	Diciembre	2,168	8,734	9,237	3,317	1,151
Total		34,835	97,134	89,832	51,683	12,886

Cuadro A.1. Continuación

Años	Meses	Superficies (ha) afectadas por diferentes rangos de nivel freático (m)				
		0.0 - 1.0	1.0 - 1.5	1.5 - 2.0	2.0 - 3.0	más de 3.0
1994	Enero	12,752	6,109	3,138	2,399	209
	Febrero	3,799	10,430	5,975	3,977	426
	Marzo	4,025	10,012	6,497	3,531	542
	Abril	5,108	8,531	6,506	3,923	539
	Mayo	2,757	4,828	7,725	8,896	401
	Junio	6,162	7,810	5,066	5,245	324
	Julio	3,572	6,420	6,187	5,246	3,169
	Agosto	9,168	8,824	4,249	1,997	369
	Septiembre	7,201	7,467	2,986	5,941	1,012
	Octubre	2,669	6,574	6,779	7,946	639
	Noviembre	4,477	7,407	5,133	6,656	934
	Diciembre	5,432	8,065	5,408	4,516	1,186
	Total	67,122	92,477	65,649	60,273	9,850
1995	Enero	3,897	9,064	7,448	3,663	532
	Febrero	4,303	6,993	7,654	4,890	767
	Marzo	4,081	8,618	6,946	4,288	674
	Abril	5,238	6,919	6,074	5,545	831
	Mayo	4,447	7,497	5,673	5,540	1,450
	Junio	6,945	6,152	5,433	4,789	1,288
	Julio	5,476	5,505	6,079	6,241	1,306
	Agosto	8,292	6,791	4,723	4,415	366
	Septiembre	3,625	6,848	7,855	5,411	868
	Octubre	4,638	6,535	6,815	6,207	412
	Noviembre	6,871	6,727	5,903	4,765	341
	Diciembre	4,767	8,136	6,352	4,536	816
	Total	62,590	85,785	76,955	60,290	9,651