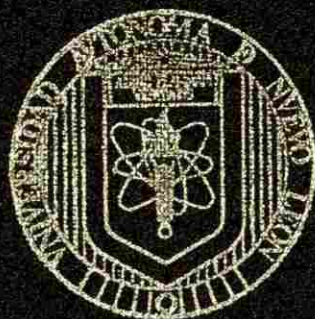


**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

FACULTAD DE AGRONOMIA

SUBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



MODELACION Y SIMULACION PARA EL DRENAJE  
DE TIERRAS, EN LA PLANICIE ALUVIAL  
DEL ESTADO DE TABASCO, MEXICO.

POR

WILDER CAMAHO CHIU

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS AGRICOLAS  
CON ESPECIALIDAD EN AGUA-SUELO

MARIN, N. L., MEXICO

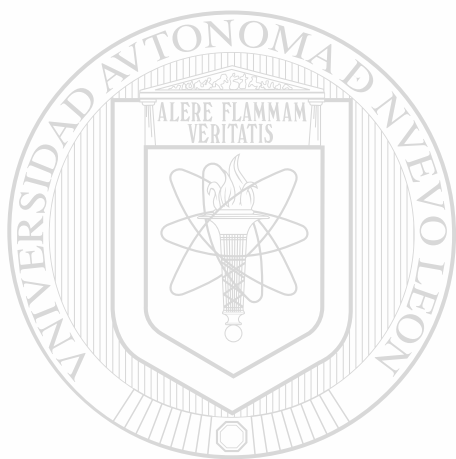
AGOSTO DE 2000

TD  
Z5071  
FA  
2000  
C3

MODELACION Y SIMULACION PARA EL DRENAJE  
DE TIERRAS, EN LA PLANICIE ALUVIAL  
DEL ESTADO DE TABASCO, MEXICO.  
W.C.G.H.



1020145420



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**MODELACION Y SIMULACION PARA EL DRENAJE  
DE TIERRAS EN LA PLANICIE ALUVIAL  
DEL ESTADO DE TABASCO MEXICO**

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

POR

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**WILDER CAMAHO CHU**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS AGRICOLAS  
CON ESPECIALIDAD EN AGUA-SUELO**

**MARIN N. L. MEXICO**

**AGOSTO DE 2000**

0151-17460

TB  
Z5071  
FA  
2000  
C3



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



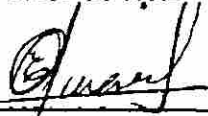
**FONDO  
TESIS**

**MODELACIÓN Y SIMULACIÓN PARA EL DRENAJE DE TIERRAS, EN LA  
PLANICIE ALUVIAL DEL ESTADO DE TABASCO, MÉXICO.**

**Aprobación de la Tesis**

---

**Dr. Cs. Juan Francisco Pissani Zúñiga**  
**Director de tesis**



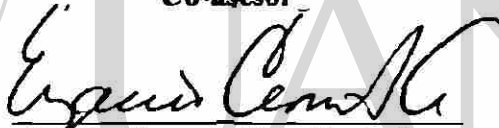
---

**Ph.D. Emilio Olivares Sáenz**  
**Co-asesor**



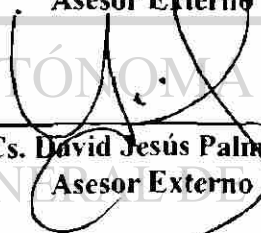
---

**Ph.D. Rigoberto E. Vázquez Alvarado**  
**Co-asesor**




---

**Dr. Cs. Eugenio Carrillo Avila**  
**Asesor Externo**



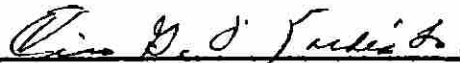
---

**Dr. Cs. David Jesús Palma López**  
**Asesor Externo**



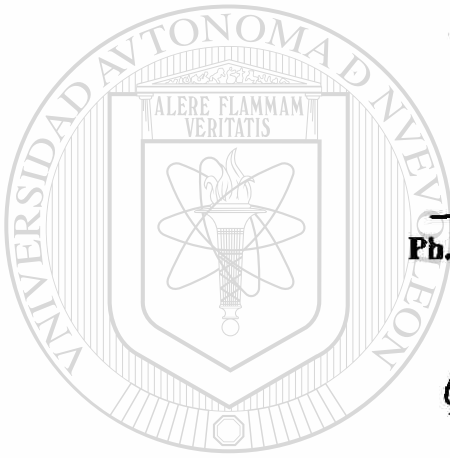
---

**Ph. D. Lorenzo Aceves Navarro**  
**Asesor Externo**



---

**Ph.D. Ciro G. S. Valdés Lozano**  
**Subdirector de Estudios de Postgrado  
de la Facultad de Agronomía**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## DEDICATORIA

### **A mi esposa e hijos**

Nydia Del Rivero B., Nydia Camacho y Wilder Alejandro Camacho, por su invaluable condescendencia y comprensión para conseguir esta meta, y que la presente les estimule hacia la superación académica en el futuro.

### **A mis padres**

Arturo Camacho Velázquez y Francisca Chiu Natarén, por brindarme el don de vivir y permitirme elegir el camino de la superación.

### **A mis hermanas (os) y sobrinas (os)**

Con amor fraternal

### **A los señores: Lustein López Camacho y Familia**

**Justina Torija y Familia**

**Julio César Chanona y Familia**

**Jaime S. Del Rivero y Familia**

Quienes en los diferentes peldaños de mi educación tuvieron participación activa en mi formación académica y humanitaria.

---

### **A mis familiares y amigos**

Por el cariño y la amistad que me han brindado en los momentos prósperos y adversos.

**A mis HH.:MM.: Agustín Velázquez Servín, Fausto Méndez Jiménez, Lustein López Camacho y Arturo Betancourt Enríquez.**

Por su invaluable apoyo, confianza e incitación para proseguir en el sendero de la superación personal, profesional y espiritual.

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Juan Francisco Pissani Zuñiga, por la dirección de este trabajo de tesis y por sus invaluable conocimientos vertidos en mi formación académica.

Al Dr. Emilio Olivares Sáenz, por su apreciada asesoría y aportes en la revisión del manuscrito, así como por permitirme entrar en el núcleo del más noble y sencillo de los sentimientos: la amistad.

Al Dr. Rigoberto Vázquez Alvarado, por su colaboración en la asesoría y revisión en el presente trabajo.

Al Dr. Eugenio Carrillo Avila, por el gran apoyo brindado en la fase de campo, enseñanzas teóricas, asesorías, revisión del documento final.

Al Dr. David Jesús Palma López por sus excelsas enseñanzas en campo, consejos, asesorías y revisión del documento. Sin menoscabar la incondicional amistad que nos une.

---

Al Dr. Lorenzo Aceves Navarro, por brindarme su confianza, apoyo logístico en la realización del trabajo de campo en el Campus Tabasco-CP, sus comentarios y sugerencias en el escrito de la tesis.

A los señores, Avimael de Dios García, Antonio Alvarado Méndez, Santiago Yzquierdo Arebalos, Floricel Ventura Ulloa, por su excelente y responsable participación en la fase de trabajo de campo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo en la beca-crédito para obtener el grado de Doctor en Ciencias.

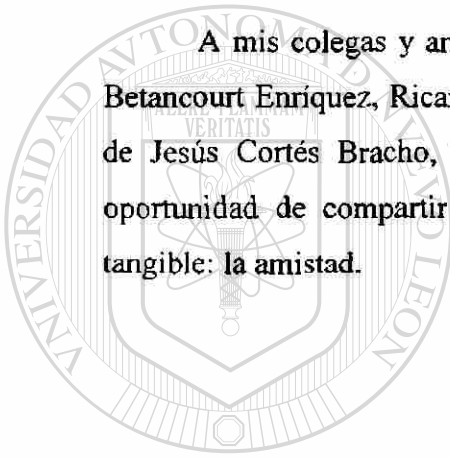


A la Universidad Autónoma de Nuevo León por la oportunidad de permitir mi ingreso al programa en donde el conocimiento nos conduce a lugares sin fronteras (Doctorado en Ciencias Agrícolas).

A la Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria (DGETA), por otorgar el permiso oficial para estudiar el programa doctoral.

A la Comisión Nacional del Agua. Delegación Tabasco, por las facilidades otorgadas en la consulta de estudios geofísicos e hidrológicos.

A mis colegas y amigos, Pablo Ruíz Beltrán, Manuel Vargas Gutiérrez, Arturo Betancourt Enríquez, Ricardo David Váldez Cepeda, José Luis Carlos Rimoldi, Javier de Jesús Cortés Bracho, Neftalí Gómez Ruiz y Mario Dena por obsequiarme la oportunidad de compartir y conocer que la verdadera riqueza está más allá de lo tangible: la amistad.



UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

### **Wilder Camacho Chiu**

Candidato al grado de Doctor en Ciencias Agrícolas con Especialidad en Agua-Suelo.

#### **Tesis:**

Modelación, verificación y simulación para el drenaje de tierras, en la Planicie Aluvial del Estado de Tabasco, México.

#### **Áreas de estudio:**

Agronomía (Drenaje Agrícola). Drenaje Subterráneo.

### **Biografía**

#### **Datos personales:**

Oriundo de Villaflores, Chiapas, Nacido el 1o. de Octubre de 1957. Hijo de los señores Francisca Chiu Natarén y Arturo Camacho Velázquez.

#### **Educación:**

- i). Egresado del Colegio Superior de Agricultura Tropical como Ingeniero Agrónomo con Especialidad en Agricultura Tropical, en Diciembre de 1980.
- ii). Egresado del Colegio Superior de Agricultura Tropical como Maestro en Ciencias con Especialidad en Suelos Tropicales, Abril de 1986.

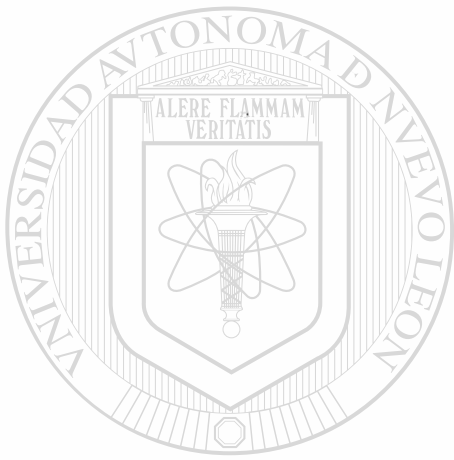
---

#### **Experiencia profesional:**

- i). Profesor Investigador del Colegio Superior de Agricultura Tropical. H. Cárdenas, Tabasco. 1980-1985.
- ii). Inspector e Investigador del ramo ecológico (Protección Ambiental) en la Superintendencia de Protección Ambiental, PEMEX. 1985-1991.
- iii). Profesor en el Subsistema de la Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria, Tabasco. 1991- 1998.

#### **Otros:**

- i). Publicaciones científicas en revistas de Agricultura Tropical y Memorias de Congresos Nacionales.



**“No enseñarle a un hombre que desea aprender,  
es desperdiciar un hombre  
Enseñarle a un hombre que no quiere aprender,  
es desperdiciar palabras  
un pueblo jamás debe desperdiciar hombres,  
ni palabras”**

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



# ÍNDICE

	Página
LISTA DE CUADROS.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	xv
SUMMARY.....	xvii
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Hipótesis.....	2
1.2. Objetivos.....	2
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>3</b>
2.1. Clima.....	6
2.1.1. Lluvia de diseño.....	6
2.2. Suelos.....	7
2.2.1. Conductividad hidráulica.....	10
2.2.2. Porosidad efectiva.....	13
2.2.3. Infiltración y percolación.....	16
2.3. Mecánica de flujo.....	17
2.3.1. Flujo preferencial.....	23
2.4. Modelación.....	24
2.4.1. Recesión.....	28
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
3.1. El procedimiento desarrollado comprendió las etapas siguientes.....	32
3.2. Primera etapa. Captura, depuración y análisis de las variables que definen patrones climatológicos, agrohidrológicos y edáficos de la Planicie Aluvial Tabasqueña (Región de la Chontalpa).....	32
3.2.1. Localización geográfica.....	32
3.2.2. Clima.....	33
3.2.3. Geología.....	34
3.2.4. Geomorfología.....	34
3.2.5. Fisiografía.....	34
3.2.6. Suelos.....	36
3.2.7. Hidrología.....	39
3.2.8. Variables evaluadas: climatológicas, agrohidrológicas y edáficas.....	39
3.2.8.1. Variables climatológicas: Promedio de lluvias diarias del mes más lluvioso, precipitación, evaporación media mensual y lluvia de diseño.....	39
3.2.8.1.1. Promedio de lluvias diarias del mes más lluvioso.....	39
3.2.8.1.2. Precipitación y evaporación media mensual.....	41
3.2.8.1.3. Lluvia de diseño.....	41
3.2.8.2. Variables agrohidrológicas: Profundidad del manto freático con respecto al nivel del terreno.....	42

3.2.8.3. Variables edáficas: Espesor de horizontes genéticos, % de arcilla, % limo, % arena, Ph, % materia orgánica, capacidad intercambio catiónico, calcio, magnesio, sodio, potasio, fósforo asimilable, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente y humedad aprovechable.....	43
3.3. Segunda etapa.- Medición y evaluación de las variables climatológicas, agrohidrológicas, edáficas y cultivos en el módulo de drenaje del campo experimental “El Trapecio”, Tabasco.....	43
3.3.1. Localización del campo experimental.....	43
3.3.2. Suelos.....	44
3.3.3. Localización y construcción del módulo de drenaje.....	47
3.3.3.1. Distribución de los tratamientos en el módulo de drenaje.....	47
3.3.4. Variables evaluadas: Climatológicas, agrohidrológicas, edáficas y cultivos.....	52
3.3.4.1. Variables climatológicas: Precipitación pluvial diaria, evaporación diaria, temperatura ambiental mínima, media y máxima diaria y temperatura del suelo a 0, 10, 20 y 50 cm.....	52
3.3.4.2. Variables agrohidrológicas y edáficas: Evaporación del suelo, percolación, escorrentía superficial, estrato impermeable, contenido de humedad del suelo, profundidad del manto freático en el punto medio entre drenes (carga hidráulica), descarga de drenes (coeficiente de drenaje), conductividad hidráulica, espacio poroso drenable y transmisividad.....	52
3.3.4.2.1. Evaporación del suelo.....	52
3.3.4.2.2. Percolación.....	52
3.3.4.2.3. Escorrentía superficial.....	53
3.3.4.2.4. Profundidad al estrato impermeable.....	53
3.3.4.2.5. Cambio en el almacenamiento de agua en el perfil del suelo en la zona no saturada.....	54
3.3.4.2.6. Profundidad del manto freático en el punto medio entre drenes (carga hidráulica).....	55
3.3.4.2.7. Descarga de drenes (coeficiente de drenaje).....	56
3.3.4.2.8. Conductividad hidráulica.....	56
3.3.4.2.9. Espacio poroso drenable.....	58
3.3.4.2.10. Transmisividad.....	59
3.3.4.3. Cultivos.....	59
3.3.4.3.1. Maíz ( <i>Zea mays</i> L.).....	59
3.3.4.3.2. Caña de azúcar ( <i>Saccharum officinarum</i> ).....	60
3.3.4.4. Balance de agua.....	60
3.4. Tercera etapa.....	62
3.4.1. Modelos.....	62
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	64
4.1. Primera etapa.....	64
4.1.1. Variables climatológicas.....	64
4.1.1.1. Promedio de lluvias diarias del mes más lluvioso.....	64
4.1.1.2. Precipitación y evaporación media mensual.....	66
4.1.1.3. Lluvia de diseño.....	68

4.1.2. Variables agrohidrológicas.....	68
4.1.2.1. Profundidad del manto freático con respecto al nivel del terreno.....	68
4.1.3. Variables edáficas.....	69
4.2. Segunda etapa.....	79
4.2.1. Variables climatológicas.....	79
4.2.2. Variables agrohidrológicas y edáficas.....	80
4.2.2.1. Evaporación del suelo.....	82
4.2.2.2. Percolación.....	82
4.2.2.3. Escorrentía superficial.....	83
4.2.2.4. Profundidad del estrato impermeable.....	83
4.2.2.5. Cambio en el almacenamiento de agua en el perfil del suelo en la zona no saturada.....	84
4.2.2.6. Relación entre la altura del manto freático (carga hidráulica) y la descarga de los drenes.....	86
4.2.2.6.1. Lote D-5 .....	86
4.2.2.6.2. Lote C-7.....	88
4.2.2.6.3. Lote D-6.....	90
4.2.2.6.4. Lote C-6.....	92
4.2.2.7. Conductividad hidráulica.....	93
4.2.2.7.1. Lote D-5.....	93
4.2.2.7.2. Lote C-7.....	96
4.2.2.7.3. Lote D-6.....	99
4.2.2.7.4. Lote C-6.....	100
4.2.2.8. Espacio poroso drenable.....	101
4.2.2.8.1. Lote D-5.....	102
4.2.2.8.2. Lote C-7.....	102
4.2.2.8.3. Lote D-6.....	103
4.2.2.8.4. Lote C-6.....	104
4.2.2.9. Transmisividad.....	104
4.2.3. Cultivos.....	106
4.2.3.1. Maíz (Zea mays L.).....	106
4.2.3.2. Caña de azúcar (Saccharum officinarum).....	106
4.2.4. Balance de agua.....	107
4.3. Tercera etapa.....	108
4.3.1. Modelos.....	108
4.3.1.1. Modelo de regresión lineal simple y múltiple para coeficiente de drenaje ...	108
4.3.1.2. Modelo lineal simple por efecto de espaciamiento sobre la fluctuación del manto freático.....	111
4.3.1.3. Modelos para carga hidráulica en el punto medio entre drenes.....	113
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>115</b>
<b>6. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>117</b>
<b>7. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>118</b>
<b>8. APENDICE.....</b>	<b>127</b>

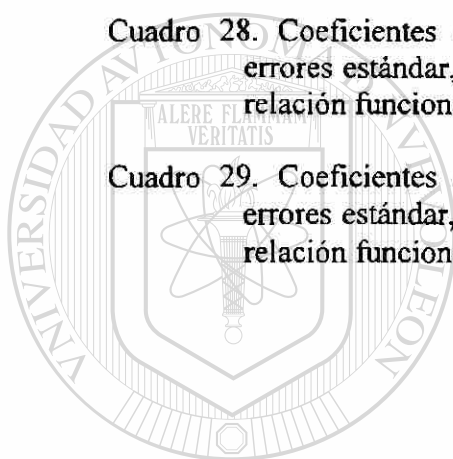
## LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Clasificación de los suelos de la Región de la Chontalpa en base a la leyenda FAO/UNESCO 1989.....	37
Cuadro 2. Promedio espacial de la lluvia. Mes de Septiembre. Método de las isoyetas y media aritmética para el Estado de Tabasco.....	65
Cuadro 3. Períodos de retorno y de lluvia de diseño para el Estado de Tabasco: Planicie Aluvial Tabasqueña (48.37 mm) y formación orográfica Sierra Madre de Chiapas (66.17 mm).....	69
Cuadro 4. Análisis estadístico de las variables edáficas de los 91 perfiles de suelos de la Planicie Aluvial de Tabasco.....	70
Cuadro 5. Matriz de coeficientes de correlación con datos estandarizados (Matriz R).....	72
Cuadro 6. Valores propios y proporción de la variación explicada por los cinco componentes principales a partir de la matriz de correlación.....	73
Cuadro 7. Coeficientes de correlación de los cinco componentes principales y las variables edáficas con el método de varianza máxima normalizada ( $r > 0.7$ ).....	74
Cuadro 8. Coeficientes vectoriales de los cinco componentes principales con el método de varianza máxima normalizada y utilizando la matriz de correlación.....	74
Cuadro 9. Estadísticas descriptivas de variables climatológicas del módulo de drenaje.....	79
Cuadro 10. Valores de conductividad hidráulica estimados con el método de la relación carga hidráulica en el punto medio entre drenes y descarga de drenes. Lote D-5.....	94
Cuadro 11. Valores de conductividad hidráulica estimados con el método de la relación carga hidráulica en el punto medio entre drenes y descarga de drenes. Lote C-7.....	97
Cuadro 12. Valores de conductividad hidráulica estimados con el método de la relación carga hidráulica en el punto medio entre drenes y descarga de drenes. Lote D-6.....	99

Cuadro 13. Valores de conductividad hidráulica estimados con el método de la relación carga hidráulica en el punto medio entre drenes y descarga de drenes. Lote C-6.....	100
Cuadro 14. Valores de espacio poroso drenable ( $\mu$ ) estimados con el método de la relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $\Delta h$ ) y la descarga de drenes (Dr). Lote D-5 (sin cultivo-Serie Libertad y Limón).....	102
Cuadro 15. Valores de espacio poroso drenable ( $\mu$ ) estimados con el método de la relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $\Delta h$ ) y la descarga de drenes (Dr). Lote C-7 (Cultivo maíz-Serie Limón).....	103
Cuadro 16. Valores de espacio poroso drenable ( $\mu$ ) estimados con el método de la relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $\Delta h$ ) y la descarga de drenes (Dr). Lote D-6 (Cultivos caña de azúcar y maíz-Serie Limón).....	103
Cuadro 17. Valores de espacio poroso drenable ( $\mu$ ) estimados con el método de la relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $\Delta h$ ) y la descarga de drenes (Dr). Lote C-6 (Cultivo caña-Serie Limón).....	104
Cuadro 18. Valores de transmisividad lote D-5.....	105
Cuadro 19. Valores de transmisividad lote C-7.....	105
Cuadro 20. Valores de transmisividad lote D-6.....	105
Cuadro 21. Valores de transmisividad del lote C-6.....	105
Cuadro 22. Estadísticas de producción del cultivo de maíz (Híbrido: A-775) en diferentes espaciamientos de drenes subterráneos en el módulo de drenaje. Región Chontalpa. Ciclo temporal 1996.....	106
Cuadro 23. Estadísticas de producción del cultivo de caña de azúcar (Híbrido: Mex 69-290) en diferentes espaciamientos de drenes subterráneos en el módulo de drenaje. Región Chontalpa. Rendimientos $t\ ha^{-1}$ .....	107
Cuadro 24. Balance parcial de agua en la fase de recesión sin cultivo, con espaciamiento 20 m. Lote D-5.....	107



Cuadro 25. Coeficientes de regresión del modelo con sus respectivos errores estándar, valores de t, niveles de significancia y la relación funcional del modelo.....	108
Cuadro 26. Coeficientes de regresión $((\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3))$ , pruebas de t para los coeficientes de regresión, funcionalidad del modelo $(R^2_{aj})$ y características del análisis de varianza de los modelos lineal simple y múltiple donde intervienen como variables independientes: h, K y T y como variable dependiente, q.....	109
Cuadro 27. Coeficientes de regresión del modelo con sus respectivos errores estándar, valores de $t_{calculada}$ , niveles de significancia observados.....	111
Cuadro 28. Coeficientes de regresión del modelo con sus respectivos errores estándar, valores de $t_{calculada}$ , niveles de significancia y la relación funcional del modelo.....	113
Cuadro 29. Coeficientes de regresión del modelo con sus respectivos errores estándar, valores de $t_{calculada}$ , niveles de significancia y la relación funcional del modelo.....	114



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Esquema de un sistema de drenaje.....	19
Figura 2. Flujo de drenaje durante la transición del manto freático desde la forma estancada hasta la forma elíptica. Despreciando los cambios en el flujo de drenaje durante el período de transición (tiempo de recesión) resultado en errores en ambos en el flujo y el volumen drenado calculado (McCarthy y Skaggs, 1991).....	29
Figura 3. Cambios en el perfil del manto freático desde la forma estancada a una forma elíptica durante parte de inicio del evento de drenaje (McCarthy y Skaggs, 1991).....	29
Figura 4. Localización de la Región de la Chontalpa, Tabasco.....	33
Figura 5. Zonas fisiográficas del Estado de Tabasco (Palma y Cisneros, 1996)....	35
Figura 6. Plano de suelos de la Región de la Chontalpa en base a la leyenda FAO/UNESCO adaptado y modificado después de Palma y Cisneros, 1996.....	38
Figura 7. Plano hidrológico de la Región de la Chontalpa, Tabasco.....	40
Figura 8. Localización del campo experimental “El Trapecio”, Región de la Chontalpa.....	44
Figura 9. Mapa de series de suelos del campo experimental “El Trapecio” y localización del módulo de drenaje (adaptado después de Trujillo y Palma, 1988).....	45
Figura 10. Perfil representativo de la Serie Limón.....	46
Figura 11. Localización y distribución de los drenes. Lote C-6.....	49
Figura 12. Localización y distribución de los drenes. Lote C-7.....	49
Figura 13. Localización y distribución de los drenes. Lote D-5.....	51
Figura 14. Localización y distribución de los drenes. Lote D-6.....	51
Figura 15. Medición de la evaporación y percolación del agua en el suelo (Lote D-5).....	53

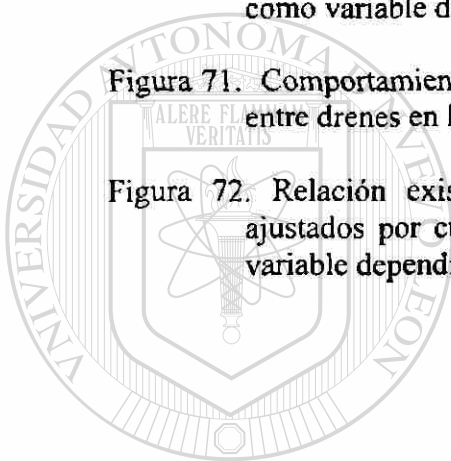
Figura 16. Parcela para la evaluación del escurrimiento superficial (Lote D-5)....	54
Figura 17. Muestreo de la humedad del suelo entre líneas de drenes.....	55
Figura 18. Medición de la profundidad del manto freático en los pozos de observación.....	55
Figura 19. Medición de la descarga de los drenes con el aforador de sensores.....	56
Figura 20. Dendograma de estaciones meteorológicas del Estado de Tabasco; basándose en distancias euclidianas como índice de similitud.....	65
Figura 21. Distribución espacial temporal de la lluvia promedio diaria del mes más lluvioso (Septiembre), para la Planicie Aluvial del Estado de Tabasco, México.....	66
Figura 22. Climograma de Gausсен. Estación meteorológica Samaria-Cunduacán (27039).....	67
Figura 23. Climograma de Gausсен. Estación meteorológica Teapa (27044).....	68
Figura 24. Mapa de isobatas del mes de septiembre. Planicie Aluvial Tabasqueña. ....	71
Figura 25. Distribución espacial del mapa de isobatas de la Planicie Aluvial Tabasqueña (vista tridimensional).....	71
Figura 26. Variación explicada por cada componente principal según el criterio de Cattell, a partir de la matriz de correlación con datos estandarizados.....	72
Figura 27. Distribución espacial de las variables edáficas en función del coeficiente de correlación entre el primer y segundo componente principal.....	76
Figura 28. Distribución espacial de las variables edáficas en función del coeficiente de correlación entre el primer y tercer componente principal.....	76
Figura 29. Distribución espacial de las variables edáficas en función del coeficiente de correlación entre el primer y cuarto componente principal.....	76

Figura 30. Distribución espacial de las variables edáficas en función del coeficiente de correlación entre el primer y quinto componente principal.....	76
Figura 31. Diagrama de puntos que muestra la distribución y tendencia de los suelos en base a valores propios entre el primer componente principal y las variables identificadas significativamente ( $r>0.7$ ) dentro del mismo.....	77
Figura 32. Diagrama de puntos que muestra la distribución y tendencia de los suelos en base a valores propios entre el segundo componente principal y las variables identificadas significativamente ( $r>0.7$ ) dentro del mismo.....	77
Figura 33. Dendograma de la clasificación de perfiles de suelos de la Planicie Aluvial Tabasqueña.....	78
Figura 34. Dendograma de variables geohídricas de los perfiles de suelos de la Planicie Aluvial de Tabasco.....	78
Figura 35. Relación entre la precipitación y evaporación durante el período de evaluación del módulo de drenaje (1o. de Octubre al 20 de Noviembre de 1996).....	79
Figura 36. Relación entre temperaturas máximas y mínimas durante el período de evaluación del módulo de drenaje (1o. de Octubre al 20 de Noviembre de 1996).....	80
Figura 37. Plano de isohypsas del módulo de drenaje.....	81
Figura 38. Plano de isobatas del módulo de drenaje.....	81 <sup>®</sup>
Figura 39. Relación entre la precipitación pluvial y evaporación del suelo en el espaciamiento de 20 m del lote D-5.1o. de Octubre al 30 de Noviembre de 1996.....	82
Figura 40. Relación entre la precipitación pluvial y percolación del suelo en el espaciamiento de 20 m del lote D-5.1o. de Octubre al 30 de Noviembre de 1996.....	83
Figura 41. Configuración espacial de la capa impermeable con respecto al nivel del suelo del módulo de drenaje.....	84
Figura 42. Comportamiento del contenido de humedad del suelo a una profundidad de 00-30 cm.....	85

Figura 43. Comportamiento del contenido de humedad del suelo a una profundidad de 30-60 cm.....	85
Figura 44. Comportamiento del contenido de humedad del suelo a una profundidad de 60-90 cm.....	85
Figura 45. Comportamiento del contenido de humedad del suelo a una profundidad de 90-120 cm.....	85
Figura 46. Hidrograma de la precipitación pluvial y la carga hidráulica en el punto medio entre drenes para los espaciamientos de 10, 20, 30, 40 y 50 m (Lote D-5). 1o. de Octubre al 20 de Noviembre de 1996.....	87
Figura 47. Hidrograma de la precipitación pluvial y los coeficientes de drenaje para los espaciamientos de 10, 20, 30, 40 y 50 m (Lote D-5). 1o de Octubre al 20 de Noviembre de 1996.....	87
Figura 48. Tiempo de recesión para los espaciamientos de 10, 20, 30, 40 y 50 m correspondientes a las condiciones de manejo del lote D-5 para un evento de lluvia de 75.5 mm.....	88
Figura 49. Hidrograma de la precipitación pluvial y la carga hidráulica en el punto medio entre drenes para los espaciamientos de 10, 20, 30, 35 y 50 m (Lote C-7). 1o. de Octubre al 20 de Noviembre de 1996.....	89
Figura 50. Hidrograma de la precipitación pluvial y los coeficientes de drenaje para los espaciamientos de 10, 20, 30, 35 y 50 m (Lote C-7). 1o de Octubre al 20 de Noviembre de 1996.....	89
Figura 51. Tiempo de recesión para los espaciamientos de 10, 20, 30, 35 y 50 m correspondientes a las condiciones de manejo del lote C-7 para un evento de lluvia de 75.5 mm.....	90
Figura 52. Hidrograma de la precipitación pluvial y la carga hidráulica en el punto medio entre drenes para los espaciamientos de 30 y 40 m (Lote D-6). 1o de Octubre al 20 de Noviembre de 1996.....	91
Figura 53. Hidrograma de la precipitación pluvial y los coeficientes de drenaje para los espaciamientos de 30 y 40 m (Lote D-6). 1o de Octubre al 20 de Noviembre de 1996.....	91
Figura 54. Tiempo de recesión para los espaciamientos de 30 y 40 m correspondientes a las condiciones de manejo del lote D-6 para un evento de lluvia de 75.5 mm.....	92

Figura 55. Relación entre precipitación pluvial, carga hidráulica en el punto medio entre drenes y coeficiente de drenaje para el espaciamiento de 30 m (Lote C-6). 1o de Octubre al 20 de Noviembre de 1996.....	92
Figura 56. Tiempo de recesión para los espaciamientos de 30 m correspondientes a las condiciones de manejo del lote C-6 para un evento de lluvia de 75.5 mm.....	93
Figura 57. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 10 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote D-5.....	95
Figura 58. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 20 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote D-5.....	95
Figura 59. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 30 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote D-5.....	95
Figura 60. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 40 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote D-5.....	95
Figura 61. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 50 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote D-5 .....	96
<hr/>	
Figura 62. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 10 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote C-7.....	97®
Figura 63. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 20 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote C-7.....	98
Figura 64. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 30 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote C-7.....	98
Figura 65. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 35 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote C-7.....	98
Figura 66. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 50 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote C-7.....	98

Figura 67. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 30 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote D-6.....	99
Figura 68. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 40 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote D-6.....	100
Figura 69. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 30 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote C-6.....	101
Figura 70. Relación existente entre los valores observados y predictivos ajustados por cuadrados mínimos utilizando coeficiente de drenaje como variable dependiente.....	110
Figura 71. Comportamiento de respuesta del manto freático en el punto medio entre drenes en los diferentes espaciamientos de drenes.....	112
Figura 72. Relación existente entre los valores observados y predictivos ajustados por cuadrados mínimos utilizando carga hidráulica como variable dependiente.....	114



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## APENDICE

	Página
Cuadro A1. Lluvia promedio diaria del mes de Septiembre para las 86 estaciones meteorológicas del Estado de Tabasco, México.....	127
Cuadro A2. Coeficientes de los modelos de regresión de segundo orden para las respuestas de coeficientes de drenaje en función de cargas hidráulicas en el punto medio entre drenes para los espaciamientos de 10, 20, 30, 40 y 50 m. Lote D-5.....	129
Cuadro A3. Análisis de varianza de la regresión entre el coeficiente de drenaje ( $\text{mm día}^{-1}$ ) y la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (cm), conductividad hidráulica ( $\text{m día}^{-1}$ ) y transmisividad ( $\text{m}^2 \text{ día}^{-1}$ ).....	129
Cuadro A4. Análisis de varianza de la regresión entre la carga hidráulica (cm) y el espaciamiento entre drenes subterráneos (m).....	129
Cuadro A5. Análisis de varianza tomándose como tratamientos los espaciamientos entre drenes subterráneos.....	130
Cuadro A6. Prueba de medias para la variable carga hidráulica en el punto medio entre drenes subterráneos.....	130
Cuadro A7. Análisis de varianza de la regresión entre carga hidráulica en el punto medio entre drenes y el coeficiente de drenaje, conductividad hidráulica, transmisividad, precipitación, evaporación, temperatura del suelo a 0, 10, 20 y 50 cm.....	130



## RESUMEN

**Wilder Camacho Chiu**

**Universidad Autónoma de Nuevo León**

**Facultad de Agronomía**

**Título del estudio:** Modelación y simulación para el drenaje de tierras agrícolas de la Planicie Aluvial del estado de Tabasco, México.

**Número de páginas:** 130

**Candidato para la obtención del grado de Doctor en Ciencias Agrícolas con la Especialidad en Agua-Suelo.**

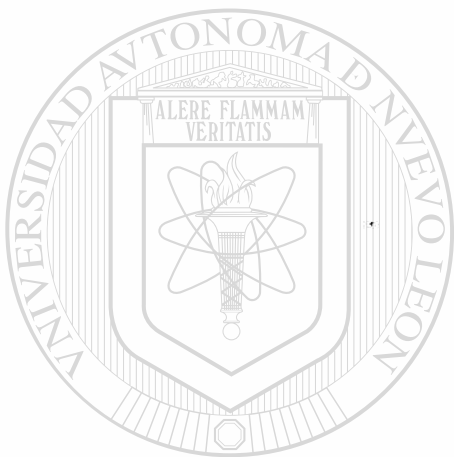
**Áreas de estudio:** Drenaje subterráneo para la agricultura (caracterización de la mecánica de fluidos en medios porosos; Suelos de la Planicie Aluvial de Tabasco, México). Agronomía, (Manejo de agua para la producción agrícola).

**Propósitos y Métodos de estudio:** En diversas áreas agrícolas el drenaje natural es suficiente para la producción de cultivos, sin embargo, el drenaje artificial es requerido en zonas con problemas de exceso de humedad para obtener mayores rendimientos, como es el caso de la Planicie Aluvial que abarca aproximadamente 358,184 ha de la Región Chontalpa del Estado de Tabasco, México, cuyas características climatológicas, geomorfológicas y edáficas conforman un sistema cuyos componentes específicos son de suma importancia para diseñar y operar sistemas de control de humedad. El aumento en el desarrollo y aplicación de modelos de simulación dirigidos a la agricultura, se ha convertido en una herramienta importante para la investigación y cuantificación de la productividad de los cultivos y el impacto de las prácticas relacionadas con ellos sobre el medio ambiente. La utilización de herramientas estadísticas determinísticas permiten el desarrollo de modelos matemáticos para drenaje de tierras agrícolas, lo cual, favorece una mayor comprensión del comportamiento del sistema durante los períodos críticos de drenaje. El propósito principal del presente estudio fue: Caracterizar las variables que definen patrones climatológicos, agrohidrológicos y edáficos de la Planicie Aluvial Tabasqueña; así como evaluar la mecánica de fluidos en el módulo de drenaje subterráneo de 60 ha del campo experimental "El Trapecio" y predecir con modelos matemáticos las respuestas del comportamiento del agua (manto freático) en función de variables agrohidrológicas que intervienen en la mecánica de flujos en suelos tropicales. Los datos climatológicos fueron analizados de toda la red de estaciones meteorológicas de Tabasco (92), de las cuáles se seleccionaron 86 por presentar representatividad en forma objetiva; los requisitos de longitud u homogeneidad de la serie climática. Para el análisis del factor edáfico se compiló información de estudios de suelos realizados en el estado de Tabasco; se aplicó análisis multivariado por el método de componentes principales para seleccionar las variables que mayor explicación estadística presentan a la variabilidad total; además se realizó la clasificación geohídrica con técnicas multivariadas por el método conglomerado. La evaluación de estados de flujo en el módulo de drenaje se realizó tomando datos diarios durante 270 días de variables agrohidrológicas: carga hidráulica en el punto medio entre drenes, coeficiente de drenaje, conductividad hidráulica, espacio poroso drenable, transmisividad, contenido de humedad, evaporación del suelo, percolación y escorrentía superficial; esto permitió modelar el balance hídrico diario; las variables fueron analizadas en forma conjunta para seleccionar aquellas que estadísticamente fueran representativas en el funcionamiento del drenaje subterráneo. Se utilizó el análisis de regresión lineal múltiple y simple para modelar el sistema de manejo de fluidos hídricos.

**Contribuciones y Conclusiones:** El promedio de lluvias diarias encontrado del mes más lluvioso para Tabasco es de 12.09 mm; el dendograma de las estaciones meteorológicas del estado formaron dos grupos: Uno dentro de la Planicie Aluvial y otro en las estribaciones de la Sierra Madre de Chiapas. La dirección del flujo de agua en el subsuelo es sur-norte, así lo demostró la distribución espacial del manto freático. Las variables edáficas que mayor explicación dan al proceso de flujos hídricos de los suelos tropicales

fueron: Contenido de arcilla, capacidad de intercambio catiónico, capacidad de campo y punto de marchitez permanente. Durante el periodo de recesión las condiciones de flujo del área de estudio, se asemejan a las de flujo estabilizado o permanente y la relación descarga-carga hidráulica se ajusta a la ecuación de Hooghoudt para el cálculo de la conductividad hidráulica. En la serie de suelos Limón la conductividad hidráulica presentó valores desde 0.013 hasta 1.732 m día<sup>-1</sup>, el espacio poroso drenable de 0.65 a 1.52% y para el coeficiente de drenaje de 12.0 hasta 15.87 mm día<sup>-1</sup>. En el análisis del balance de agua se encontró que el 54.97% es percolado a los estratos del perfil del suelo, de este el 41.43% de la precipitación fue desalojado por los drenes subterráneos, un 13.54% se descarga a los colectores abiertos por infiltración horizontal y recarga al acuífero profundo; el 15.3% se pierde por evaporación del suelo y el 29.73% por escurrimiento superficial. La variación del coeficiente de drenaje en función de la conductividad hidráulica, transmisividad y carga hidráulica fue lineal y positiva presentándose los cambios más sensibles para conductividad hidráulica.

FIRMA DEL ASESOR PRINCIPAL: \_\_\_\_\_  
DR. JUAN FRANCISCO PISSANI ZUÑIGA



UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## ABSTRACT

Wilder Camacho Chiu

Autonomous University of Nuevo Leon (Universidad Autónoma de Nuevo León)

Faculty of Agronomy

Title: Simulation Model of the drainage of Agricultural lands in the Alluvial Plan of the state of Tabasco, México.

Number of pages: 130

Candidate for the degree of Doctor in Agricultural Science with a Specialization in Water-Soil.

Area of Study: Underground Drainage for Agriculture (characterization of fluid dynamics in porous substances: Soil of the Alluvial Plain of Tabasco, Mexico). Agronomy (Water management in Agricultural Production).

Goals and Methods of the Project: In many areas natural drainage is sufficient for crop production. However, artificial drainage is necessary in problem areas which suffer from excess humidity in order to obtain better yields. One such area is the Alluvial Plain, with an area of approximately 358,184 hectares. It is found in the Chontalpa Region of the state of Mexico, and its climatological, geomorphological, and soil characteristics make up a system whose components are extremely important for the design and operation of humidity control systems. The increase in the design and use of simulation models for agriculture has become an important tool for the research and quantification of crop productivity and the impact of it on the environment.

The use of specific statistical tools allows for the design of mathematical models of drainage in agricultural lands, which favors a better understanding of the behavior of the system during critical drainage periods. The main objective of this study was: To characterize the variables which define climatological, agro hydrological and soil patterns of the Alluvial Plains of Tabasco, as well as evaluate fluid dynamics in underground drainage module 60 of "El Trapecio" experimental farm and predict using mathematical models in relation to agro hydrological variables which play a role in fluid dynamics in tropical soils. Climatological data was analyzed in all of the weather stations of Tabasco (92), and 86 were selected because they were representative with respect to the longitudinal requirements or homogeneity of the climatic series. With respect to the soil variable, information was gathered from soil studies carried out in the state of Tabasco. A multivariable analysis was used because of the method of main components to select the variables which best explained total variability. A geohidric classification was done using multivariable techniques. The evaluation of flows in the drainage module was carried out using daily statistics during 270 days of varying agro hydrological variables: hydraulic load at the midpoint between drains, drainage coefficient, hydraulic conductivity, drainable porous space, transmissibility, humidity content, evaporation, surface seepage and escorrentia. This allowed for the creation of a model of the daily hydric balance. The variables were analyzed in order to select those which were statistically representative of the working of underground drainage. A multiple and simple linear regression analysis was used in order to model the management of the hydric fluids.

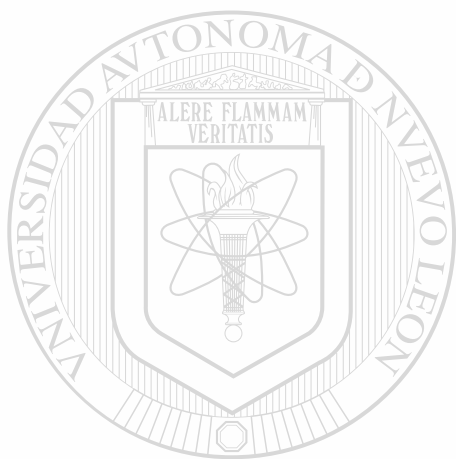
Conclusions and Contributions: The average daily rainfall observed in Tabasco's rainiest month was 12:09 mm; the dendogram of the water stations of the state fell into two groups: one in the Alluvial Plain and another in the counterforts of the Sierra Madre of Chiapas. The direction of water flow in the subsoil is south to north, shown by the spatial distribution in the freatic layer. The soil variables which best explain the hidric flow of tropical soils were: clay content, cationic interchange capacity, field capacity and the permanent fading point. During the recession period, the conditions of flow in the study area, resemble to steady or permanent flow and the relation between hydraulic discharge-charge to adjust Hooghoudt equation for to calculate the hydraulic conductivity. In the soil series Limon hydraulic conductivity had values ranging from 0.013 up to 1.732 m daily, drainable porous space had values of 0.65 to 1.52% and the drainage coefficient ranged from 12.0 up to 15.87 mm daily-1. In the water balance analysis 54.97% was found to percolate to the side layers of the soil. Of this 41.43% of precipitation was removed by underground drains, 13.54% went to the open water conducts by means of horizontal filtering and discharges to the deep aquifer, 15.3% was lost through evaporation and 29.73% by surface run off. The

variation of drainage coefficient in function of hydraulic conductivity, transmissibility and hydraulic charge was lineal and positive; hydraulic conductivity was more sensible at changes.

SIGNATURE OF THESIS DIRECTOR

---

DR. JUAN FRANCISCO PISSANI ZUÑIGA



UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 1. INTRODUCCIÓN

En diversas áreas agrícolas el drenaje natural es suficiente para la producción de cultivos, sin embargo, el drenaje artificial es requerido en zonas con problemas de exceso de humedad para obtener mayores rendimientos, como es el caso de la Planicie Aluvial que abarca aproximadamente 358.184 ha de la Región Chontalpa del Estado de Tabasco, México, cuyas características climatológicas, geomorfológicas y edáficas conforman un sistema cuyos componentes específicos son de suma importancia para diseñar y operar sistemas de control de humedad. Skaggs (1991a) hace mención que la importancia relativa de los componentes del manejo de agua varía con el clima, así, en regiones húmedas un sistema de drenaje bien diseñado puede ser crítico para algunos años, mientras que en otros tendrá efectos benéficos. De esta manera, los métodos para diseñar y evaluar los multicomponentes de un sistema de manejo de agua deberán permitir a quienes lo elaboran, identificar las secuencias de las condiciones climáticas y edáficas que son críticas para la producción de cultivos. Las necesidades del drenaje subsuperficial no son fácilmente identificadas, parámetros cualitativos como apariencia del cultivo, falta de color del follaje, retraso en el desarrollo del cultivo y bajos rendimientos, son comúnmente usados para indicar las necesidades del drenaje subsuperficial (Carter *et al.*, 1986).

En un sistema de control de humedad, un drenaje conveniente puede incluir la utilización de un manto freático ya existente o creado a propósito para la producción de cultivos, donde la profundidad óptima del manto freático será distinta para los diferentes climas, suelos y cultivos (Benz *et al.*, 1985).

Sabbahg *et al.* (1993) consideran que el aumento en el desarrollo y aplicación de modelos de simulación dirigidos a la agricultura, se ha convertido en una herramienta importante para la investigación y cuantificación de la productividad de los cultivos y el impacto de las prácticas relacionadas con ellos sobre el medio ambiente. La utilización de herramientas estadísticas determinísticas permiten el desarrollo de modelos matemáticos para drenaje de tierras agrícolas, lo cual, favorece una mayor comprensión del comportamiento del sistema durante los períodos críticos de drenaje. Entre los diferentes tipos de modelos existentes, los modelos estadísticos-matemáticos son los más comúnmente utilizados por la ciencia. Este tipo de herramienta estadística determinística,

permite desarrollar condiciones técnico-científicas para la toma de decisiones o estrategias a realizar en la escala de investigación básica o de investigación aplicada en que se desee desarrollar el comportamiento del sistema y traer consigo mismo una reducción en costo y tiempo para que las condiciones simuladas sean lo más real posible al utilizar como componentes del sistema, aquellas que puedan ser de fácil acceso para modelar o validar modelos con grado de sensibilidad confiable (National Soil Erosion-Soil Productivity Research Planning Committee, 1981).

### **1.1. Hipótesis**

La modelación imita, con adecuado grado de precisión y confiabilidad, las condiciones reales de un sistema de drenaje por lo tanto en tierras agrícolas de la Planicie Aluvial de Tabasco, se puede determinar la precisión de los drenajes.

### **1.2. Objetivos**

- a) Determinar parámetros de drenaje para tierras agrícolas en la Planicie Aluvial (Región de la Chontalpa) del Estado de Tabasco.
- b) Modelación, verificación y simulación para la investigación y manejo del drenaje de las tierras agrícolas en la Planicie Aluvial Tabasqueña.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

Lluvias excesivas sobre suelos pobremente drenados usualmente dan como resultado muy altos valores de manto freático o inundación temporal. Retrasos en la siembra, pobre emergencia de plantas y reducida eficiencia en las operaciones agrícolas, son problemas que resultan del humedecimiento excesivo en el suelo. En resumen, la pobre aireación del suelo puede reducir el crecimiento del cultivo; por lo tanto, pérdidas substanciales en la producción debida al inadecuado drenaje de agua en el suelo pueden ocurrir (Kanwar *et al.*, 1988).

El grado de susceptibilidad de daños a cultivos por condiciones excesivas de humedad en el suelo es dependiente de las especies de plantas y etapas de desarrollo, condiciones de altura del manto freático durante la estación de crecimiento, duración y tiempo de inundación, así como temperaturas del suelo y aire. La variación considerable para tolerar excesos de agua existe entre y dentro de especies de plantas (Ahmad y Kanwar, 1991). Las especies de plantas que producen raíces adventicias más rápidamente sufren un daño mínimo y tienen los mejores índices de recuperación después de una inundación o estrés por exceso de agua en el suelo. Algunos experimentos sobre la respuesta de cultivos con inundación controlada han indicado que los daños más grandes a plantas y la reducción en el rendimiento son con períodos largos de inundación. Este efecto adverso de largos períodos de inundación puede ser debido a la prolongada deficiencia de oxígeno en la zona radicular (Mukhtar *et al.*, 1990).

Las raíces necesitan oxígeno para respirar y para otras actividades metabólicas, absorben agua y nutrientes disueltos en el suelo y producen anhídrido carbónico, que debe ser intercambiado por oxígeno de la atmósfera. Las condiciones excesivas de humedad en el suelo inhiben el intercambio de oxígeno y de bióxido de carbono en el suelo con el de la atmósfera, resultando una deficiencia de oxígeno. Esto subsecuentemente inhibe la respiración de raíces y el volumen total de las mismas, también como agua y el transporte de nutrientes por las raíces de las plantas. El estrés de la planta puede ocurrir en forma de tóxicos de algunos productos bioquímicos acumulados alrededor de las raíces de las plantas, deficiencias nutrimentales (el más notable el nitrógeno) y la deficiencia de

oxígeno. Mientras el mecanismo de daños no es conocido, la conclusión general es que la anaerobiosis o estrés de oxígeno es el problema fundamental.

Este proceso de aireación que tiene lugar por difusión y flujo de masa de aire requiere un espacio poroso abierto en el suelo. Para que las raíces se desarrollen bien, el agua, el aire y los nutrientes deben estar disponibles simultáneamente. En la zona radicular los intersticios entre las partículas del suelo (espacio poroso) ocupan del 40 al 60% del volumen total del suelo. Las partes subterráneas de las plantas, raíces, estolones, etc., la microflora y fauna del suelo crecen y se desarrollan en esos intersticios. Si el espacio poroso está ocupado principalmente con agua durante un largo período de tiempo, se dice que el suelo está saturado. El anegamiento de los suelos es una condición desfavorable para la mayoría de las cosechas, puesto que da lugar a una deficiencia de oxígeno (Van De Goor, 1978).

El tiempo que duran los excesos de humedad en el suelo sobre el estado fenológico de la planta durante su etapa vegetativa, tiene un papel importante en la reducción del rendimiento y el grado de daño en las plantas. La inundación en la etapa de pregerminación puede reducir significativamente la emergencia. La mayoría de los estudios concluyen que el mayor daño a los cultivos y la reducción en el rendimiento ocurren cuando los suelos están excesivamente húmedos durante las etapas tempranas del crecimiento de la planta (Kanwar *et al.*, 1988).

El drenaje artificial es una necesidad para algunas áreas de producción. Sin drenaje artificial las plantaciones y operaciones de cosecha se retrasan por lo que en años húmedos las condiciones de crecimiento pobre pueden conducir a reducir la producción o pérdida total de los cultivos. Es necesario un mejor manejo en el sistema de agua para conocer si la capacidad de producción de suelos agrícolas puede ser optimizada. Por lo tanto, el diseño de sistemas de manejo de agua, tal como el drenaje subsuperficial en regiones húmedas es importante para la determinación de los medios más eficientes de producción agrícola (Sanoja *et al.*, 1990).

El propósito primario de los sistemas de manejo de agua en la agricultura es el de incrementar la eficiencia y fiabilidad de la producción. Los daños a la planta son una resultante del inadecuado manejo de agua, específicamente del manto freático alto o saturación de agua en las raíces, puede ocurrir en muchas formas como la reducción de



raíces y elongación de brotes, muerte en raíces, clorosis, marchitamiento, floración y fructificación reducida e incremento en la susceptibilidad de enfermedades y pesticidas, todos reducen el rendimiento (Evans *et al.*, 1991). En el diseño de sistemas de drenaje para la agricultura, es importante conocer los requerimientos de drenaje de los cultivos.

En estudios con maíz y caña de azúcar sobre suelos franco-arcillosos en Louisiana, Carter *et al.* (1986) encontraron que los rendimientos de materia seca para maíz forrajero fueron menores en áreas no drenadas comparado con áreas drenadas (3.64 y 13.1 t ha<sup>-1</sup> respectivamente), con estos datos demostraron la severidad del problema del manto freático elevado y el efecto del drenaje subsuperficial en la reducción del problema. Para el cultivo de caña, los rendimientos de azúcar en áreas con drenaje subsuperficial fueron de 10,000 Kg ha<sup>-1</sup>, mientras que en áreas no drenadas se obtuvieron rendimientos de 8,625 Kg ha<sup>-1</sup>; los incrementos encontrados fueron atribuibles al efecto del drenaje subterráneo en un 33% comparado con áreas no drenadas.

En investigaciones sobre caña de azúcar Camp y Carter (1983) trabajando con diferentes espaciamientos (0, 6.1, 12.2 y 24.4 m) entre drenes subterráneos, encontraron significancia estadística entre los rendimientos de caña de azúcar durante tres ciclos de cultivo por efecto de drenaje, obteniendo rendimientos hasta de 86.3 t ha<sup>-1</sup> y 66.2 t ha<sup>-1</sup> con drenaje y sin drenaje respectivamente; así, como diferencias en rendimiento entre ciclos de cultivo.

Carter y Camp (1994) investigando las respuestas en rendimiento del cultivo de caña de azúcar durante 11 años, en función de los espaciamientos de drenes subterráneos (0, 14, 28 y 42 m) encontraron que los rendimientos de producción de azúcar en los espaciamientos de 14 y 28 m fueron similares (6,041 y 6,029 Kg ha<sup>-1</sup>), siendo 21% mayor el rendimiento que en áreas no drenadas. El espaciamiento entre drenes de 42 m produjo 5,788 Kg ha<sup>-1</sup> un 16% más que en áreas no drenadas y el 4% menos que los rendimientos obtenidos en los espaciamientos de 14 y 28 m.

## 2.1. Clima

El conocimiento de los recursos climáticos y de las condiciones ambientales esperadas, proporciona guías para las decisiones estratégicas en la planeación y operación de sistemas de producción agrícola (Campos, 1995). En muchas partes del mundo, el clima es el factor con mayor influencia para que la agricultura sea económicamente rentable, así como otras actividades de ingeniería que actúan en la producción agrícola. La hidrología de una región depende en primer lugar, de su clima, lo cual, deriva la necesidad de conocer los procesos meteorológicos que lo determinan (Roldán, 1994).

### 2.1.1. Lluvia de diseño

Uno de los primeros pasos que deben realizarse en muchos proyectos de diseño hidrológico como es el diseño de sistemas de drenaje de tierras agrícolas, es la determinación del evento o eventos de lluvia que deben usarse para los cálculos matemáticos del diseño hidráulico del sistema de drenaje. El mecanismo comúnmente utilizado es tomar la decisión de la tormenta o lluvia de diseño que involucre la relación entre la intensidad o lámina de lluvia, la duración y las frecuencias apropiadas para diseñar la estructura hidráulica en el sitio espacial en que será ubicado. Usualmente, la lluvia de diseño actúa como componente de entrada al sistema de drenaje agrícola y está definido como un valor de precipitación en un punto en el cual se especifique el patrón espacial de la lluvia (Chow *et al.*, 1994); la selección del nivel de probabilidad apropiado para el diseño se puede expresar como el riesgo que se considera aceptable y depende de condiciones económicas y políticas (Linsley *et al.*, 1994). En el diseño de un sistema de control de humedad, se utiliza un patrón de precipitación definido, denominado lluvia de diseño, puede estar basado en la información histórica de precipitación en un lugar específico o bien construirse utilizando características generales de la precipitación regional.

Los procesos hidrológicos evolucionan en el espacio y tiempo, de tal forma, que es parcialmente predecible o determinístico y otra parte aleatorio, un proceso de este tipo se conoce como proceso Estocástico. Este tipo de tratamiento es apropiado para observaciones de eventos hidrológicos como la lluvia diaria, mensual o anual (Chow *et al.*, 1994). Para

que el análisis probabilístico produzca resultados útiles, debe utilizarse datos significativos, adecuados y precisos; son significativos si están estrechamente relacionados con el problema, adecuados si la serie tiempo es suficientemente grande para la fiabilidad de las probabilidades y la precisión es referida a la homogeneidad de los datos puntuales (Linsley *et al.*, 1994). Los sistemas de producción agrícola son afectados algunas veces por eventos meteorológicos, tales como tormentas severas, inundaciones por desbordamientos de ríos, sequías, heladas, etc., la magnitud de un evento esta inversamente relacionada con su frecuencia de ocurrencia, es decir, eventos muy severos ocurren con menor frecuencia que eventos más moderados.

## 2.2. Suelos

En los inicios del presente siglo, los científicos dedicados a la ciencia del suelo ya tenían la concepción de la existencia de la variabilidad que presentan espacial y temporalmente los suelos; sin embargo, es hasta la década de los 60's y 70's, cuando se dio inicio al estudio de la variabilidad edáfica en forma sistemática (Webster, 1985).

La necesidad de tomar en cuenta la variabilidad espacial cuando se requiere modelar procesos que ocurren dentro del suelo y sus relaciones con el medio ambiente, es hoy en día más claro; sin embargo, es necesario tener en cuenta, que el fenómeno de variabilidad del suelo para su estudio ha sido categorizado por muchos métodos y técnicas estadísticas como son: clasificación y taxonomía numérica, geoestadística, análisis multivariado, teoría fractales y de caos.

Actualmente, está claro que la estimación de la varianza de las propiedades edáficas tiene pequeño significado si es expresado en términos de tamaño y tipo de unidad espacial para los cuales fueron estimados. La expresión de variabilidad debe ser relacionada a unidades espaciales georeferenciadas, de tal forma, que se pueden distinguir las propiedades del suelo con y sin relevancia práctica y hacer notar que existe la imperiosa necesidad de estimar la estructura de la covarianza espacial y temporal de la calidad de los suelos en función de efectos de variables multivariadas a partir de estudios de características simples (Burrough *et al.*, 1994).

Muchos estudios sobre la variabilidad han sido realizados dentro del contexto pedológico, en donde las descripciones del suelo están basados en los horizontes genéticos. Sin embargo, las aplicaciones prácticas y funcionales de estudiar la variabilidad del suelo por causas del manejo que se les da son complejas, ya que involucran una serie de procesos que incluyen muchas variables al mismo tiempo; es por esto, que las funciones de distribución entre las propiedades del suelo y la productividad agrícola presenta gran variabilidad espacial por ser un cuerpo tridimensional distribuido estocásticamente en el espacio (Webster y Burgess, 1980; Webster y Olivier, 1992). Esto conlleva a sustentar que por este efecto los diversos sistemas de clasificación de los suelos tengan que soportar parámetros estadísticos de dispersión con rangos grandes para las categorías más altas, mientras que las categorías más bajas tienden a uniformizar su variabilidad; las escalas de observaciones y la densidad de muestreo también proporcionan variabilidad en las agrupaciones clasificatorias de suelos (Trangmar *et al.*, 1985). Los parámetros hídricos del suelo son los que más coeficientes de variación presentan por su dinamismo de flujo dentro del mismo, reportándose valores hasta del 320 %. Rao *et al.* (1979) encontraron que los contenidos de humedad del suelo a diferentes tensiones presentan distribuciones normales y que el conocimiento de estas distribuciones ayudan a caracterizar la variabilidad de cualquier parámetro hídrico del suelo. Cristóbal (1993) trabajando con suelos tropicales clasificados como Vertisoles donde se encuentran solamente dos horizontes genéticos, obtuvo para capacidad de campo y punto de marchitamiento coeficientes de variación de 4.09 % y 5.65 %, respectivamente.

La caracterización de los suelos de acuerdo a su capacidad de retención de humedad es uno de los estudios básicos que se deben realizar para la determinación de parámetros que intervienen en los procesos del drenaje de tierras agrícolas; para lo cual, se calculan las curvas de retención de humedad para cada estrato de suelo y finalmente estimar la porosidad drenable, también llamada rendimiento específico del agua (Skaggs, 1980). Armstrong *et al.* (1980) han observado que en algunas áreas, la mayoría de los esquemas de drenaje son instalados con un diseño común sin tomar en cuenta la amplia variación de tipos de suelos presentes, según los procesos de formación que en él hayan intervenido y parece inevitable que en estos suelos los resultados de drenaje sean muy variables; encontraron que la porosidad de drenaje estimada en condiciones conocidas del suelo varía

significativamente con el ciclo de cultivo, particularmente cuando la arcilla se hincha y se contrae con el humedecimiento.

Las técnicas multivariadas son herramientas estadísticas que ayudan a cuantificar la variabilidad del suelo, rendimiento de cultivo y las relaciones que existen entre ambos (suelo-cultivo). Investigaciones han demostrado que el uso de análisis multivariado como son los análisis por componentes principales, correlación canónica, discriminantes, conglomerado y regresión lineal múltiple, permiten definir que variables proveen de mayor información en la variabilidad espacial y temporal del suelo, así como el grado de influencia de cada variable (Goovaerts, 1994; Webster, 1985; Voltz y Goulard, 1994).

Ovalles y Collins (1988) trabajando con 151 pedones y 20 propiedades físicas y químicas del suelo ubicados en el noroeste de Florida encontraron que la arena fina y capacidad de intercambio catiónico fueron las propiedades más importantes del suelo por poseer mayores valores absolutos dentro de los ejes de componentes principales, seguidos por la saturación de bases y arena muy fina como segundo componente principal. Cuanalo y Webster (1970) determinaron que aquellos datos seleccionados por componentes principales pueden ser usados para realizar clasificación numérica y decidir el agrupamiento de suelos por características cuantitativas y cualitativas.

Dobermann (1994) concluyó que el análisis por componentes principales de doce variables edáficas y nueve variables fenológicas del cultivo de arroz, sirvió para relacionar propiedades de suelo y respuesta de dicho cultivo en tierras húmedas de Rusia. Fueron seis los componentes principales representados, de los cuales, el primero aportó el 25% de la variación total y fue inherente a la fertilidad potencial del suelo por las variables representativas: espesor del horizonte, contenido de arcilla, potasio, carbonatos, materia orgánica y pH. El segundo componente, fue caracterizado como localización de salinidad por las variables: contenido de carbonatos, nitratos, altura de planta y crecimiento de malezas. El tercer componente denominado preparación de suelo, fue caracterizado por la propiedad de microrelieve y crecimiento de malezas. Ritzi *et al.* (1993) aplicaron técnicas multivariadas por componentes principales para estimar la variabilidad espacial temporal de atributos físicos y químicos en 56 localidades (acuiferos) en el Estado de Ohio y encontraron que el cloro, sodio, calcio, magnesio, pH, conductividad hidráulica y alcalinidad actúan como factor principal en las características hidrogeoquímicas de los

acuíferos de esa zona aportando un 60% de la varianza espacial; mientras, que el segundo componente explicó el 26% con las variables: nitrato, alcalinidad, fierro, cromo y conductividad eléctrica.

Edmonds *et al.* (1985) determinaron que los valores propios y sus coeficientes vectoriales que formaron los componentes principales de la matriz de varianza-covarianza, derivados de datos estandarizados de 40 variables que incluyeron datos morfológicos, químicos, físicos y mineralógicos de la Planicie Costera de Virginia, USA; fueron utilizados para el ordenamiento sistemático por técnicas multivariadas y análisis conglomerado, utilizando distancia euclidiana como índice de similitud; de tal manera, que el arreglo multidimensional por índice de similitud formó grupos relativamente uniformes y se compararon con la clasificación según la nomenclatura de taxonomía de suelos de USA. El análisis por componentes principales y la subsecuente agrupación por conglomerados, los suelos se fusionaron en dos grupos mineralógicos a un índice de similitud de 2.11 para la categoría de familia: kaoliniticos y oxidíticos. La comparación de estos métodos de clasificación dieron resultados semejantes, por lo que el análisis multivariado definió los suelos con similitud genética.

### **2.2.1. Conductividad hidráulica**

Para comprender los procesos de drenaje agrícola, es necesario conocer las funciones de cada componente (variable) que actúa en dicho proceso, por lo que existen ecuaciones matemáticas que describen el flujo de agua hacia los drenes interceptores según sea el régimen de flujo permanente o variable. Estas ecuaciones que rigen la mecánica de fluidos en medios porosos con diferentes regímenes de flujo demuestran que las variables funcionales para la determinación de la velocidad del agua que avanza hacia los drenes en cualquier punto son: Conductividad hidráulica y gradiente hidráulico.

Conceptualizando la conductividad hidráulica de un suelo como el valor numérico que expresa la permeabilidad y que es igual al factor de proporcionalidad  $K$  de la ecuación de Darcy; y que además es una expresión de la velocidad efectiva de una corriente en función del gradiente hidráulico, de las propiedades del suelo y de las propiedades del agua, para el transporte de ésta; se tiene que:

$$V = Ki \quad (1)$$

donde :

V = velocidad efectiva de la corriente (m seg<sup>-1</sup>).

K = factor, (m seg<sup>-1</sup>).

i = gradiente hidráulico.

El término de velocidad efectiva de la corriente, es la velocidad respecto a la superficie total del material poroso (no sólo de la superficie vacía); puede definirse como la cantidad de flujo por unidad de tiempo, dividida entre la superficie total del medio poroso que produce esa cantidad de flujo. Bajo este concepto y a partir de la ecuación de la continuidad, se tiene:

$$Q = A V \quad (2)$$

$$V = Q / A$$

$$V = Q / Ap$$

donde:

V = velocidad efectiva (m seg<sup>-1</sup>).

Q = descarga de drenes por unidad de superficie (m<sup>3</sup> seg<sup>-1</sup>).

Ap = área efectiva.

A = área.

p = porosidad. (Dieleman, 1978; Linsley *et al.*, 1994).

El manejo del agua para optimizar la producción de cultivos es dependiente de las propiedades del suelo que afectan la habilidad del suelo para transmitir agua y sales. Investigaciones recientes, han reportado variabilidad en la conductividad hidráulica de suelos medidos en campo, para áreas que han sido clasificadas por pedólogos como un mismo tipo de suelo. Aunque, el mecanismo no ha sido identificado, es probable que el efecto físico-químico de las sales solubles sobre la matriz del suelo y los efectos mecánicos texturales son parcialmente responsables de la variabilidad.

Las sales solubles aplicadas en forma de fertilizantes, así como las sales nativas del suelo y los efectos físico-químicos de extracción de la matriz del suelo son el resultado en la alteración de la habilidad del suelo para conducir agua.

El efecto de las sales del suelo sobre la conductividad hidráulica depende de la concentración y composición de la solución del suelo y de la naturaleza de la arcilla del suelo. Se reconoce también que la actividad biológica en el suelo y la geometría del material poroso por efecto del hinchamiento y dispersión de la arcilla, controlan la conductividad hidráulica de los suelos.

Los procesos de hinchazón (expansión) y dispersión son particularmente dependientes de la interacción entre la mineralogía de arcilla, concentración y composición de la solución del suelo.

La relación entre la composición catiónica expresado en términos de relación de adsorción de sodio (RAS) y la concentración total de electrolitos expresada como conductividad eléctrica (CE) determina la reducción en la efectividad del flujo de agua en el suelo.

El fenómeno que describe la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica y el arreglo estructural del suelo es afectado por la variabilidad de factores químicos, físico-mecánicos y otros factores (Bresler *et al.*, 1984).

Determinar el valor representativo de la conductividad hidráulica saturada involucra una serie de cambios que incluyen: la variabilidad en los puntos de muestreo en suelos no homogéneos contra el tiempo, labores culturales y costos de métodos más extensivos; las estimaciones de valores únicos que representen totalmente el perfil del suelo contra los valores estimados para muchos estratos; pruebas y conveniencias contra pruebas de conducción bajo condiciones óptimas de campo (Dorsey *et al.*, 1990).

La conductividad hidráulica saturada es un parámetro sensible para muchos modelos hidrológicos, drenaje y contaminación de suelos. Muchos métodos han sido desarrollados para medir la conductividad hidráulica *in situ*. Esos métodos incluyen anillos infiltrómetros, el método del agujero, el de la carga constante y permeámetros. La precisión de la conductividad hidráulica estimada, determinada por los diferentes métodos depende del grado, en el cual, el flujo es alcanzado y sobre la habilidad de cada método para dirigir



los contrastes teóricos y prácticos involucrados en la representación del sistema físico con las condiciones diferenciales parciales seleccionadas (Gupta *et al.*, 1993).

La conductividad hidráulica no saturada, es una medida de la habilidad en la determinación de la infiltración, prácticas de riego, diseño de drenaje, escurrimiento superficial, recarga del agua subterránea y otros procesos hidrológicos. La medición de la conductividad hidráulica en el campo es costosa y lleva tiempo. Adicionalmente los suelos presentan gran variabilidad en sus propiedades hidráulicas especialmente en su conductividad hidráulica, esta variabilidad implica que se deben realizar gran cantidad de mediciones en campo para caracterizar ese parámetro. En base a lo anterior se han generado modelos simples que estiman la conductividad hidráulica en función de otras propiedades físicas y químicas del suelo, tales como: Distribución de tamaño de partículas, densidad aparente, porosidad efectiva y contenido de carbón (Jabro, 1992).

### 2.2.2. Porosidad efectiva

La capacidad de acumulación de agua en el suelo, es decir, la cantidad de humedad que puede almacenar un suelo, depende del volumen de poros y de la profundidad a la que se encuentre el manto freático. El coeficiente de almacenaje  $\mu$ , llamado porosidad efectiva o espacio de poros drenable, es una medida del cambio del nivel freático bajo ciertas condiciones dadas de recarga y descarga. Se utilizan dos definiciones del coeficiente de acumulación según la profundidad del manto freático:

$$a) \mu = \frac{\text{Cambio en la cantidad de agua freática acumulada } (\Delta S_{gw})}{\text{Cambio en el nivel del agua freática } (\Delta h)} \quad (3)$$

Esta se aplica a suelos en los que el agua freática existe a una profundidad tal que las fluctuaciones del contenido de humedad de las capas superiores se transmiten al agua freática solamente transcurridos ciertos períodos de tiempo largos con una amplitud reducida.

$$b) \mu = \frac{\text{Cambio en la capacidad de acumulación}}{\text{Cambio en el nivel del agua freática}} = \frac{\text{Cambio en la cantidad de humedad } (\Delta S_m)}{\text{Cambio en el nivel del agua freática } (\Delta h)} \quad (4)$$

Esta se aplica a suelos en los que el agua freática existe a una profundidad relativamente superficial, por lo que las fluctuaciones de humedad en el perfil del suelo o en la zona radicular se refleja en los cambios en el nivel freático (Van Der Meer y Messemaeckers, 1978).

Espacio poroso drenable se define también como la proporción de volumen total que se llena de aire bajo una tensión determinada de humedad (pF). La porosidad de aireación se toma generalmente como la suma de los poros grandes drenados por una tensión no superior a 100 cm de agua. Generalmente si la porosidad de aireación asciende a un 10 o 15 % en volumen o más a una curva de retención de humedad (pF) de 2.0, la aireación es satisfactoria para el crecimiento de las plantas (Stakman, 1978).

Un cambio en la cantidad de agua almacenada se refleja en un ascenso o descenso del nivel del manto freático ( $\Delta h$ ). Uno de los factores que tienen influencia en el cambio del nivel freático es la porosidad efectiva ( $\mu$ ) de la zona del suelo en que tienen lugar dichas fluctuaciones. Desde que Boussinesq en 1903, indicó que el modelo teórico de conducción de calor en sólidos es aplicable para resolver problemas de flujo de agua en régimen variable en suelo saturado; este por analogía, ha sido ampliamente utilizado en hidrología:

$$KD \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) = \mu \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (5)$$

donde:

$h$  = nivel piezométrico del agua en el suelo en flujo horizontal del agua (m).

$x, y$  = coordenadas horizontales (m).

$t$  = tiempo (días).

$K$  = conductividad hidráulica del acuífero homogéneo ( $m \text{ día}^{-1}$ ).

$D$  = espesor del acuífero (m).

$KD$  = transmisividad del acuífero ( $m^2 \text{ día}^{-1}$ ).

$R$  = recarga efectiva a través del límite superior del área considerada ( $m \text{ día}^{-1}$ ).

$\mu$  = porosidad efectiva ( $m \text{ m}^{-1}$ ).

De esta ecuación diferencial se deduce que la porosidad efectiva viene definida por la relación entre el cambio en la cantidad de agua almacenada durante un cierto período de tiempo y el cambio correspondiente del nivel piezométrico, es decir:

$$\mu = \frac{\Delta S_{grw}}{\partial h / \partial t} \quad (6)$$

A veces, se define la porosidad efectiva como el porcentaje del volumen total de suelo ocupado por el último volumen eliminado o añadido al almacenamiento en un acuífero libre, por unidad horizontal de área del acuífero y por unidad de descenso o ascenso del manto freático. El cambio en la cantidad de agua almacenada durante un período dado de tiempo y por unidad horizontal de área es dado por la fórmula:

$$\Delta S_{grw} = \mu \Delta h \quad (7)$$

Las lecturas frecuentes del nivel del agua tomadas en una red de pozos de observación representativa del área en estudio pueden emplearse para trazar los hidrogramas de los que se puede determinar el valor de  $\Delta h$  para un período de tiempo dado.

La ecuación anterior sugiere que de igual forma que la conductividad hidráulica, la porosidad efectiva es una constante hidrológica; esto no es totalmente cierto, en primer lugar porque un descenso del manto freático no va acompañado por drenaje gravitacional instantáneo de los poros del suelo; la cantidad de agua drenada del suelo aumenta aunque a una velocidad decreciente, conforme aumenta el tiempo de drenaje, por ello, la porosidad efectiva aumenta al aumentar el tiempo del drenaje. En segundo lugar, la porosidad efectiva cambia conforme cambia la profundidad del manto freático, un cambio en el nivel del manto freático lleva consigo un cambio en el contenido de la humedad del perfil completo del suelo, tanto en la zona donde tiene lugar la fluctuación del manto freático como por encima de ella.

La porosidad efectiva puede conocerse a partir de las características de humedad del suelo y de la cantidad conocida de agua eliminada o aportada al almacenamiento y el

correspondiente cambio en la elevación del manto freático, si el manto freático desciende, parte del agua queda retenida por las partículas del suelo; si el manto freático asciende debido a la lluvia, puede quedar aire atrapado en los intersticios que se van llenando con agua. Por ello, la porosidad efectiva cuando asciende el manto freático es por lo general, inferior que cuando desciende dicho manto freático. La porosidad efectiva varía con el tamaño de las partículas y la deposición de los sedimentos. Se dan los valores más bajos para la arcilla y materiales arcillosos (< 0.5 a 5%) y los más altos para la arena gruesa (20 a 35%) (Kessler y Raad, 1978).

### 2.2.3. Infiltración y percolación

La infiltración es el paso del agua a través de la superficie del suelo hacia el interior de la tierra. Aun cuando existe una diferencia con la percolación, que es el movimiento del agua dentro del suelo, los dos fenómenos están relacionados íntimamente, puesto que la infiltración no puede continuar libremente, sino, cuando la percolación ha removido el agua de las capas superiores del suelo (Linsley *et al.*, 1994).

Se puede definir a la percolación como la cantidad de agua que pasa por unidad de sección transversal y por unidad de tiempo a una determinada profundidad de la masa del suelo (Kessler y Raad, 1978). El agua de lluvia llega a formar parte del agua subterránea por infiltración y percolación de corrientes y lagos. La percolación directa es el proceso más efectivo en la recarga del agua subterránea donde los suelos son altamente permeables o donde el manto freático está cerca de la superficie del terreno.

Las pérdidas de agua en el campo incluyen pérdidas superficiales y por percolación. Estas últimas varían considerablemente dependiendo del tipo de suelo, grado de nivelación, etc. La velocidad del movimiento de agua en el suelo está gobernado por las fuerzas de gravedad o capilaridad y por la permeabilidad del suelo. El término permeabilidad del suelo se emplea en sentido cuantitativamente general y significa la facilidad con que el suelo conduce o transporta agua. Para definirla se debe distinguir entre:

- La velocidad de entrada de agua en la superficie del suelo, que determina la relación entre la absorción y la escorrentía superficial.

- La velocidad de percolación subsuperficial, que determina el drenaje interno del perfil del suelo y la conductividad hidráulica que es el factor de proporcionalidad de la ley de Darcy.

Las velocidades de entrada por la superficie y de percolación indican las permeabilidades verticales en condiciones de no-saturación. La entrada superficial de agua (o velocidad de infiltración) se refiere específicamente a la entrada de agua por la superficie del suelo, mientras que la velocidad de percolación está relacionada con el movimiento de agua a través del suelo.

En sitios donde la precipitación anual es relativamente baja y el manto freático está a cientos de metros bajo la superficie, se puede esperar poca o nula recarga. En estas áreas, el agua de irrigación puede producir alguna recarga, pero la infiltración del agua de los ríos a través de las gravas permeables será posiblemente la mayor fuente de recarga. Los ríos que contribuyen al agua subterránea se denominan corrientes efluentes. Dichas corrientes se secan con frecuencia durante sequías prolongadas, cuando la percolación absorbe todo el caudal disponible, comportándose así, como corrientes intermitentes. Las corrientes de agua casi nunca son afluentes en toda su longitud. A veces el canal cruza estratos de diferente permeabilidad donde ocurren las mayores pérdidas por percolación en tramos cortos de alta permeabilidad. Con frecuencia se encuentran áreas de considerable percolación en las corrientes que cruzan estratos de grava procedentes de abanicos aluviales.

### 2.3. Mecánica de flujo

Los ingenieros o diseñadores todavía dependen de los métodos de flujo estabilizado, así, como la fórmula de Hooghoudt para diseñar sistemas de drenes subterráneos. Sin embargo, las condiciones de flujo estabilizado son raramente encontradas en campo. Como resultado, los modelos basados en la ecuación de Boussinesq son usados para resolver el problema del valor límite-inicial del drenaje para diseño de flujo no estabilizado en donde las asunciones de Dupuit-Forchheimer son aplicadas.

Los diseñadores frecuentemente aplican la ecuación de Hooghoudt para la distribución de sistemas de drenaje en suelos homogéneos. La ecuación básica está dada como:

$$S^2 = \frac{4K(2dh + h^2)}{R} \quad (8)$$

donde:

S = espaciamiento de drenes (m).

K = conductividad hidráulica saturada (m día<sup>-1</sup>).

R = coeficiente de drenaje (m día<sup>-1</sup>).

h = carga hidráulica en el punto medio de drenes (m).

d = profundidad equivalente al estrato impermeable (m) (Perret *et al.*, 1997).

El concepto de profundidad equivalente (d) no es correcto para las pérdidas de carga ocurrida en el flujo a la entrada del agua en los drenes. Este proceso puede ser no importante para muchas situaciones de drenaje. Sin embargo, es importante en situaciones como:

- a) Cuando el dren está en o muy cercano al estrato impermeable.
- b) Para subirrigación cuando el flujo lateral arriba del dren puede tomar una porción significativa del flujo total.

Los parámetros de la ecuación (8) son mostrados en la Figura 1, los cuales representan el esquema de un sistema de drenaje subterráneo. Si asumimos que la mayor parte del flujo toma lugar abajo de los drenes, la primera ecuación puede ser simplificada como:

$$S^2 = \frac{8Khd}{R} \quad (9)$$

Considerando h como la variable dependiente, obtenemos:

$$h = \frac{S^2}{8Kd} \quad (10)$$

El valor de la altura del manto freático ( $h$ ) es usado como un indicador del funcionamiento del sistema de drenaje. El valor requerido de  $h$  depende de las condiciones locales, así como el manejo del suelo y requerimientos de agua por los cultivos, y son usualmente determinados de investigaciones. En situaciones prácticas existe una incertidumbre acerca de los parámetros de  $K$ ,  $d$ ,  $R$  y los resultados de esa variabilidad dan también una incertidumbre sobre el funcionamiento en el sistema de drenaje.

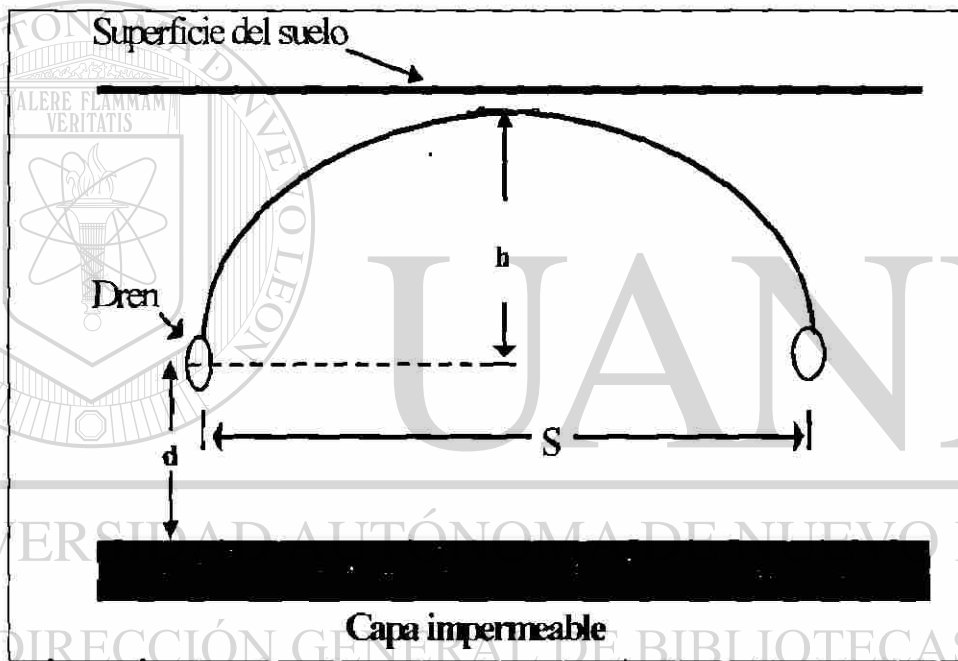


Figura 1. Esquema de un sistema de drenaje.

Las condiciones hidrológicas del flujo estabilizado son raramente encontradas bajo condiciones de campo. Para resolver el caso de drenaje subsuperficial cuando el flujo es transitorio o no estabilizado, la ecuación de Boussinesq es generalmente usada, la cual está basada en las leyes de continuidad de Darcy y asunciones de Dupuit-Forchheimer. Dicha ecuación no toma en consideración el flujo en la zona saturada. Puede ser expresada como:

$$f \frac{\partial h}{\partial t} = K \frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + e \quad (11)$$

donde:

$f$  = espacio poroso drenable ( $m \text{ m}^{-1}$ ).

$h$  = altura del manto freático arriba de la capa impermeable (m).

$K$  = conductividad hidráulica ( $m \text{ día}^{-1}$ ).

$x$  = distancia horizontal (m).

$t$  = tiempo (días).

$e$  = índice de infiltración vertical dentro de la zona saturada.

La ecuación anterior no es lineal, pero puede resolverse por métodos de diferencia finita o elementos finitos para condiciones de drenaje o subirrigación (Moody, 1966; Skaggs y Tang, 1979). Van Schilfgarde (1974) presenta la solución analítica para la ecuación de Boussinesq como:

$$t = \frac{fS^2}{9Kd} \text{Ln} \left[ \frac{m_1(2d + m_2)}{m_2(2d + m_1)} \right] \quad (12)$$

donde:

$t$  = tiempo tomado por la recesión del manto freático desde la altura inicial ( $m_1$ ) a la altura nueva ( $m_2$ ), (días).

$f$  = porosidad drenable.

$K$  = conductividad hidráulica saturada ( $m \text{ día}^{-1}$ ).

$d$  = profundidad equivalente a la capa impermeable (m).

$S$  = espaciamiento de drenes (m).

Como ejemplo (Skaggs, 1991b), para las condiciones límites de flujo transitorio en subirrigación o drenaje, puede ser escrita como:

$$h = h_1, \quad 0 \leq x \leq L/2, \quad t = 0$$



$$\begin{aligned}
 h &= h_0, & x &= 0, & t &> 0 \\
 \frac{\partial h}{\partial x} &= 0, & x &= L/2, & t &\geq 0
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

De las leyes de la mecánica se puede aprender a describir el movimiento de fluidos, esto requiere de las relaciones cinemáticas, dinámicas y termodinámicas, la primera de ellas está relacionada con el estado de conservación de la materia, la segunda debe ser derivada del balance de momentos, la tercera toma la forma de una ecuación de estado. Para el flujo viscoso de fluidos a través de medios porosos, la teoría clásica conduce hacia la ecuación de Navier-Stokes.

Las relaciones entre el balance de momentos y relaciones dinámicas derivadas de observaciones experimentales dieron originalmente con las leyes de Darcy para condiciones de flujo unidimensional a través de arena, y que puede ser generalizada como:

$$q = -K\Delta h \tag{14}$$

donde:

$q$  = índice de flujo ( $\text{m}^2 \text{ día}^{-1}$ ).

$h$  = carga hidráulica (m).

$K$  = conductividad hidráulica ( $\text{m día}^{-1}$ ).

Podría notarse que el índice de flujo, se refiere frecuentemente como una velocidad de descarga que representa el índice de descarga por unidad de área, en contraste hacia la velocidad actual del fluido a través de los poros.

Para sistemas de flujo saturado y homogéneo las leyes de Darcy conducen a la ecuación de Laplace. Entonces esta ecuación es invariante en tiempo y su aplicación a problemas de flujo no estabilizado requiere que la variable tiempo sea introducida por ciertas condiciones límite. Otra ecuación que ha sido ampliamente aplicada a problemas de flujo transitorio esta basada en la teoría Dupuit-Forchheimer.

En estudios del movimiento del agua freática, incluyendo los del flujo de drenaje, se considera el manto freático como una superficie de agua libre. Una superficie de agua libre

es una superficie en contacto y en equilibrio con la atmósfera, por lo tanto, una línea de corriente bajo esta condición está a presión atmosférica. Los problemas de flujo en una superficie libre son difíciles de resolver a causa de las condiciones de límite, que no son lineales. Un análisis de tales problemas está basado en las ecuaciones de Darcy y Laplace las cuales conducen a soluciones complejas.

Por analogía, el flujo en canales abiertos, se supone que el tipo de flujo en superficie libre es principalmente unidimensional, en donde, las líneas de corriente son casi paralelas entre sí y las superficies equipotenciales son casi planas y perpendiculares al flujo principal, por lo tanto, también son casi paralelas. Este método de solución fue desarrollado por Dupuit en donde supuso lo siguiente:

- Cuando existen pequeñas inclinaciones de la superficie libre en un sistema de flujo, las líneas de corriente pueden tomarse como si fuesen horizontales en cualquier sección vertical.
- La velocidad del flujo es proporcional a la pendiente de la superficie libre de agua, pero es independiente de la profundidad del flujo (Dieleman y De Ridder, 1978; Van Schilfgaarde, 1974).

Muchos modelos hidrológicos que describen la infiltración y el movimiento del agua en el suelo están basados en la asunción simplificada de condiciones de suelo homogéneo e isotrópico. El movimiento del agua bajo esas condiciones puede ser descrito por la derivación de las leyes de Darcy. Sin embargo, es reconocido que el flujo uniforme a través del suelo raramente existe. Muchos trabajos de investigación muestran que los macroporos continuos verticalmente (cambios formados por raíces de plantas, animales del suelo, rompimiento del suelo o estructura del suelo) pueden tener una influencia significativa sobre la infiltración y drenaje, especialmente la estructura de suelo (Everts y Kanwar, 1990).

La descripción del transporte de agua en una estructura de suelo, es considerar al suelo como un sistema dual poroso con las asunciones que el movimiento de agua ocurre uniformemente a través de los poros pequeños y más rápidamente a través de macroporos. La dificultad que se presenta es establecer las condiciones de límite para cada sistema de flujo (Van Genuchten y Wierenga, 1976).

### 2.3.1. Flujo preferencial

Los poros grandes continuos que contribuyen al flujo preferencial son aleatorios en tamaño y localización y afectan el movimiento de agua dentro del perfil del suelo. El movimiento del agua en la red de los poros está gobernado por las propiedades de transmisión del poro y la absorción lateral de la matriz de suelo. El movimiento vertical de agua bajo condiciones saturadas puede ser descrita por la ley de Poiseuille:

$$Q_p = \frac{\pi \rho g}{8 \mu} r^4 \quad (15)$$

donde:

$Q_p$  = volumen de flujo ( $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ ).

$\rho$  = densidad del agua ( $\text{g cm}^{-3}$ ).

$g$  = aceleración debida a la gravedad ( $\text{cm s}^{-2}$ ).

$\mu$  = viscosidad dinámica [ $\text{g (cm s)}^{-1}$ ].

$r$  = radio del poro (cm).

El movimiento del agua en las paredes del poro se asume que se infiltra lateralmente dentro de la matriz del suelo (Workman y Skaggs, 1990).

Los principios básicos entre los sistemas de drenaje y subirrigación es mantener el agua en el suelo en la zona radicular del cultivo por efecto del manejo del manto freático. El manto freático es más bajo durante el funcionamiento como drenaje por proveer más condiciones de flujo y reducción de masa radicular causada por saturación o inundación de la zona radicular. Durante el proceso de subirrigación el manto freático es empujado para mantener un adecuado nivel de humedad en la zona radicular del cultivo. La acción capilar del suelo y difusión del agua proveniente del manto freático provee una condición no saturada en los estratos del suelo para el crecimiento de raíces (Shirmohammadi *et al.*, 1991).

El flujo preferencial a través de los macroporos ha sido reconocido como un mecanismo potencial para la rapidez hidrológica de transporte de solutos en suelos

saturados y no saturados. El modelaje del flujo preferencial requiere de cuantificación de las propiedades del suelo, distribución de macroporos y variabilidad espacial de macroporos (Everts y Kanwar, 1990).

## 2.4. Modelación

Sabbagh *et al.* (1991) consideran que el aumento en el desarrollo y aplicación de modelos de simulación dirigidos a la agricultura, se ha convertido en una herramienta importante para la investigación y cuantificación de la productividad de los cultivos y el impacto de las prácticas relacionadas con ellos sobre el medio ambiente. Así, se tiene que en la actualidad se han generado algunos modelos de simulación para drenajes de tierras agrícolas, pero la mayoría de ellos no satisfacen completamente las necesidades técnicas para realizar transferencia de tecnologías entre regiones fisiográficas con problemas de drenaje. En un sistema de control de humedad, un drenaje conveniente puede incluir la utilización de un manto freático ya existente o creado a propósito para la producción de cultivos.

La modelación de sistemas de producción agrícola, ha tenido progresos considerables durante las cuatro décadas pasadas. Recientemente, investigadores de todo el mundo, han estado aplicando éstas herramientas para estudiar diversos problemas en sistemas agrícolas y sus múltiples componentes que en ellos intervienen: manejo y conservación de suelos, irrigación, drenaje, manejo de pesticidas, prácticas de cosecha, uso y planeación del suelo, secuencia de rotación de cultivos y predicción en la producción de campo. En contraste con éstos progresos, los modelos para componentes de sistemas de producción agrícola han tenido limitaciones porque no han podido incluir todos los factores que ocurren en el proceso, por lo que es necesario utilizar datos reales y empíricos que requieren procesos de validación, calibración, verificación y ensayos de campo para ser aplicados en lugares específicos (Jones *et al.*, 1987). Mediante el desarrollo de modelos de simulación para drenaje de tierras agrícolas, se favorece una mayor comprensión del aspecto físico de las áreas con problemas de exceso de humedad, por lo que es importante poder predecir con cierta precisión y confiabilidad, parámetros de control de humedad: espaciamiento entre drenes, profundidad de drenes, volumen de agua a drenar, tiempo de

drenado, elevaciones del manto freático, porosidad efectiva, conductividad hidráulica y contenido de humedad del suelo en tiempo y espacio (Skaggs, 1981). Los métodos propuestos para la descripción de los procesos de drenaje, han evolucionado mediante soluciones específicas para cada región o a través del desarrollo de modelos de simulación, en lo general; el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norte América (1972), estableció como posibles técnicas de estudio a problemas de drenaje los siguientes métodos:

**a) Análisis matemáticos**

Esta técnica ilustra soluciones analíticas para problemas de drenaje superficial y subsuperficial con espaciamientos iguales y por encima de un estrato impermeable del perfil de suelo. Ecuaciones fundamentales como la de Darcy, la de continuidad o la fusión de ambas conocida como ecuación de Laplace, son el punto de partida para la mayoría de los análisis matemáticos.

**b) Métodos de relajación**

Es un análisis numérico, cuya instrumentación es sencilla pero poderosa, sin embargo, su empleo es poco utilizado por lo tedioso; consiste básicamente en la aplicación por tanteo de la ecuación de Laplace a puntos situados en un plano que cruza el sistema de flujo o corriente. Tienen que conocerse las condiciones de contorno, se orienta convenientemente sobre el plano, una rejilla cuadrículada y se asignan valores al potencial a lo largo de los contornos de acuerdo a las condiciones del lugar. En cada punto de intersección de la rejilla se asignan valores numéricos arbitrarios o calculados; estos números se ajustan hasta que el valor de cada punto de la rejilla es igual a la media aritmética de los 4 valores de los puntos contiguos; con este procedimiento pueden tomarse en cuenta la estratificación del suelo, las condiciones anisotrópicas y otras variables. Se aplica a teorías de flujo horizontal, radial o combinadas, así como para estado de flujo permanente y no permanente (Van Schilfgaarde *et al.*, 1983).

### c) Analogías eléctricas

Si la ecuación de Laplace denota el diferencial para la distribución del potencial eléctrico en los conductores; por consiguiente, las pruebas del modelo eléctrico de la corriente del agua subterránea pueden basarse en analogía entre la ley de Darcy y la de Ohm. Representando de esta manera en un plano de la región de la corriente en los cuales se anotan los potenciales medidos con voltímetros.

### d) Modelos

Muchos modelos han sido desarrollados en los últimos 40 años para determinar profundidad y espaciamiento de drenes. Esos modelos o ecuaciones de diseño, han sido derivados para ambas condiciones de flujo: estabilizado y transitorio (Van Schilfgaarde, 1974), mientras que otros están basados sobre la teoría de flujo potencial, la mayoría a menudo usa ecuaciones con las asunciones de Dupuit-Forchheimer. Ejemplos del uso de éste estado son las ecuaciones de Hooghoudt y Donnan (Ernst, 1979). Las ecuaciones para condiciones transitorias incluyen las desarrolladas por Glover (Van Schilfgaarde *et al.*, 1983). Ambas condiciones del estado del flujo relacionan la respuesta del manto freático en función del espaciamiento de drenes y parámetros edáficos como conductividad hidráulica, porosidad efectiva y profundidad del perfil del suelo, esas relaciones han sido incorporadas en modelos de simulación para cuantificar las relaciones entre flujo de drenaje o subirrigación y elevación del manto freático (Skaggs, 1991b). El uso de ecuaciones basadas en las asunciones de Dupuit-Forchheimer requieren de correcciones por la convergencia del agua cercana al dren (Ernst, 1979), esto normalmente acompaña una reducción en el diseño de la profundidad entre drenes y profundidad equivalente (Van Schilfgaarde, 1974).

Sabbagh *et al.* (1993) consideran que el aumento en el desarrollo y aplicación de modelos de simulación dirigidos a la agricultura, se ha convertido en una herramienta importante para la investigación y cuantificación de la productividad de los cultivos y el impacto de las prácticas relacionadas con ellos sobre el medio ambiente. Así, se tiene que en la actualidad se han generado algunos modelos de simulación para drenajes de tierras agrícolas, pero la gran mayoría de ellos no satisfacen completamente las necesidades

técnicas para realizar transferencia de tecnologías entre regiones fisiográficas con problemas de drenaje. Modelos como DRAINMOD (Drainage Model), DRAINAGE (Drainage), FWTMOD (Fluctuating Water Table Model), EPIC-WT (Erosion Productivity Impact Calculator- Water Table), WEPP (Water Erosion Prediction Project), CREAM (Chemical loss, Runoff and Erosion From Agricultural Management Systems), GLEAMS-WT (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management System-Water Table), ADAPT (Agricultural Drainage and Pesticide Transport) y otros, han estado validándose en diversas partes del mundo, con resultados positivos en algunos casos. Es de considerar que uno de los modelos de simulación para sistemas de drenaje agrícola actualmente más validado es el DRAINMOD, y que se ha estado comparando resultados con respecto a otros modelos; Skaggs (1981) trabajó con este modelo en áreas experimentales del Norte de Ohio y encontró que las predicciones y mediciones del flujo en los drenes tuvieron pequeñas desviaciones. El modelo DRAINAGE fue comparado con DRAINMOD en la predicción de las fluctuaciones del manto freático y aún cuando el DRAINMOD tuvo predicciones más acertadas que el DRAINAGE, los 2 subestimaron dicha variable (Kanwar y Sanoja, 1988). ADAPT es un modelo diseñado para el manejo del transporte del agua y de pesticidas, Chung *et al.* (1992), combinó este modelo con DRAINMOD y encontró que ADAPT puede ser usado para diseñar sistemas de manejo de mantos freáticos y que no requiere de calibración extensiva. En el sur de Florida, Rogers (1985) validó y calibró el modelo DRAINMOD para predecir salidas de agua en los drenes lo cual encontró resultados satisfactorios. Así mismo se han encontrado que los rendimientos del cultivo de maíz se han incrementado hasta un 63% cuando se tiene drenaje subsuperficial en suelos limosos a espaciamientos entre 24 m y 27 m entre drenes (Skaggs, 1982). Experimentos llevados a cabo durante 4 años por Sanoja *et al.* (1990) trabajando con suelos limosos en dos campos experimentales de Iowa, estimaron que las desviaciones de las elevaciones del manto freático y flujo en los drenes subterráneos fueron del orden de 15 y 0.065 cm día<sup>-1</sup>, respectivamente. Madramootoo (1990) trabajando con suelos arcillosos y manejando el modelo DRAINMOD encontró que con espaciamientos de 15 m se obtienen rendimientos adecuados. Análisis de datos de 7 años de observación del campo experimental de Louisiana fueron usados para comparar los modelos de simulación de drenaje: EPIC-WT y DRAINMOD; coeficientes de correlación y regresión fueron estimados para las variables:

Fluctuación del manto freático, volúmenes para drenaje superficial y subsuperficial. No hubo diferencias significativas en la predicción de éstas con ambos modelos (Sabbagh *et al.*, 1993).

Aún, cuando existen muchos modelos, se deben tener criterios para seleccionar, validar, simular, y en caso necesario poder predecir con cierta confiabilidad los efectos del proceso de un sistema. Pankratz (1983), categoriza los requisitos que debe reunir un modelo confiable para definir el criterio de selección del modelo: a) Utilizar la mínima cantidad de componentes para explicar el proceso y el comportamiento del sistema en estudio. b) Satisfacer ciertas abstracciones matemáticas como proceso del modelaje. c) Presentar coeficientes paramétricos confiables. d) Con datos experimentales deberá satisfacer un análisis estadístico. e) Predecir satisfactoriamente la causa-efecto del sistema. f) Deben ser económicos.

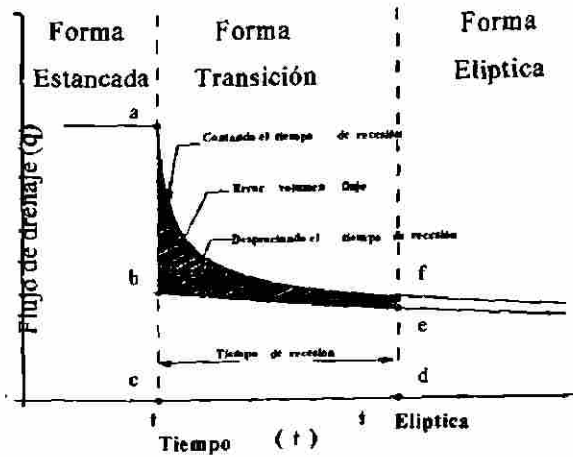
#### 2.4.1. Recesión

En los modelos de manejo de agua previamente citados, la transición de condiciones de superficies estancadas para un manto freático elíptico es generalmente no dirigido y se asume tácitamente que ocurre instantáneamente, resultando en un cambio abrupto en el índice de drenaje ( $q$ ). Este cambio abrupto en el índice de drenaje para la transición es representado en la Figura 2 por segmentos de línea *abe*.

En realidad, los cambios de la forma del manto freático gradualmente en tiempo son ilustrados en la Figura 3 (McCarthy y Skaggs, 1991). Durante este periodo de transición, el flujo del drenaje disminuye continuamente como lo muestra el segmento de línea *af* en la Figura 2.

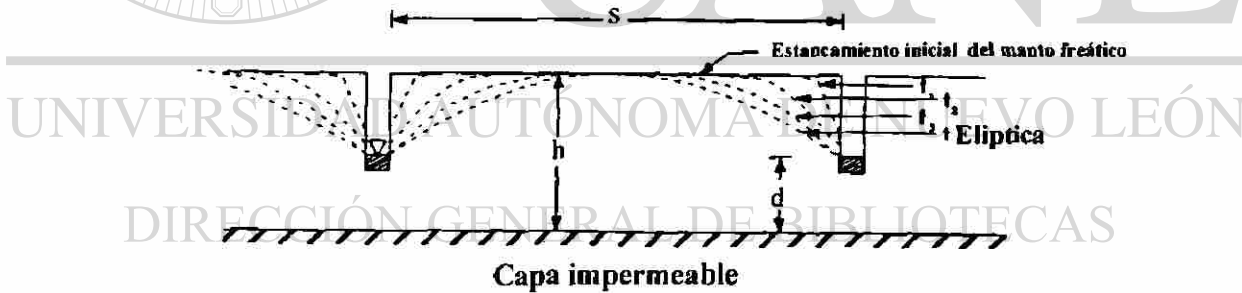
El periodo de tiempo que inicia en el punto medio hacia la caída es referido como "Tiempo de Recesión". El agua adherida como banco de almacenamiento es liberada durante el tiempo de recesión y gráficamente esta representada en la Figura 2 por el área *abcdf*.





**Figura 2.** Flujo de drenaje durante la transición del manto freático desde la forma estancada hasta la forma elíptica. Despreciando los cambios en el flujo de drenaje durante el periodo de transición (tiempo de recesión) resultó en errores en ambos en el flujo y el volumen drenado calculado. (McCarthy y Skaggs, 1991).

La Figura 3 ilustra el área seccional a través del perfil del suelo del cual el agua podría ser descargada en el cambio de un manto freático elíptico estancado. El agua descargada de esta área puede ser llamada "Banco de Almacenamiento". Bajo condiciones de no-*evapotranspiración* (ET) un manto freático elíptico no estancado existe cuando el manto freático en la parte media de drenes empieza el receso.



**Figura 3.** Cambios en el perfil del manto freático desde la forma estancada a una forma elíptica durante parte de inicio del evento de drenaje. (McCarthy y Skaggs, 1991).

Los efectos del tiempo de recesión y banco de almacenamiento tiende a incrementar significativamente conforme el espaciamiento entre drenes se agranda. Las condiciones de superficie estancada rara vez ocurren para espaciamientos de drenes estrechamente cerrados y cuando el estancamiento en la superficie ocurre, el tiempo de recesión es corto, así, los errores causados por descuido en el tiempo de recesión son a menudo

insignificantes. El tiempo de recesión para mantos freáticos inicialmente horizontales pueden ser obtenidos de soluciones numéricas presentadas por Skaggs y Tang (1979) como:

$$t_1 = 0.015 \frac{fS^2}{Kh_0} \quad (16)$$

donde:

$f$  = porosidad drenable ( $m\ m^{-1}$ ).

$h_0$  = elevación inicial del manto freático (m).

$K$  = conductividad hidráulica ( $m\ h^{-1}$ ).

$S$  = espaciamiento de drenes (m).

$t_1$  = tiempo de recesión (h).

Entonces, para dos espaciamientos de drenes diferentes en el mismo suelo, los tiempos de recesión están relacionados como sigue (McCarthy, 1990):

$$\frac{t_{1_1}}{t_{1_2}} = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (17)$$

La relación entre volúmenes para bancos de almacenamiento para los dos espaciamientos entre drenes puede ser expresado como (McCarthy, 1990):

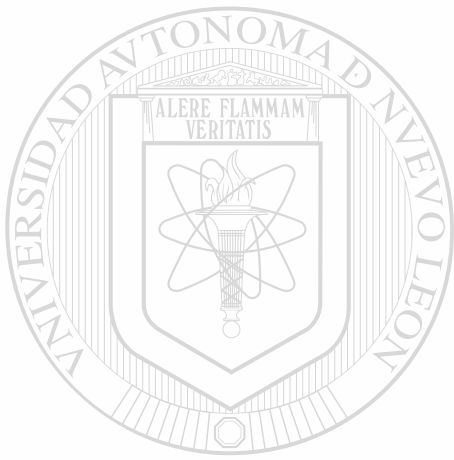
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{S_1}{S_2} \quad (18)$$

donde:

$V$  = banco de almacenamiento del perfil del suelo ( $m^3$ ).

Para aplicaciones de cultivos agrícolas en campo, los espaciamientos de drenes relativamente juntos, el tiempo de recesión y el banco de almacenamiento puede ser

generalmente descuidado. En situaciones de espaciamientos de drenes anchos tal como en tierras forestales con drenaje, esos componentes de drenaje necesitan ser cuantificados para precisar la superficie hidrológica simulada (McCarthy y Skaggs, 1991).



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. El procedimiento desarrollado comprendió las etapas siguientes:

**Primera etapa.-** Captura, depuración y análisis de las variables que definen patrones climatológicos, agrohidrológicos y edáficos de la Planicie Aluvial Tabasqueña (Región de la Chontalpa).

**Segunda etapa.-** Medición y evaluación de las variables climatológicas, agrohidrológicas, edáficas y cultivos en el módulo de drenaje del campo experimental “El Trapecio”, Tabasco.

**Tercera etapa.-** Generar modelos de predicción para espaciamiento entre drenes subterráneos, carga hidráulica y coeficiente de drenaje.

**3.2. Primera etapa.-** Captura, depuración y análisis de las variables que definen patrones climatológicos, agrohidrológicos y edáficos de la Planicie Aluvial Tabasqueña (Región de la Chontalpa)

#### 3.2.1. Localización geográfica

La Región de la Chontalpa se ubica en la parte occidental de la Planicie Aluvial Tabasqueña, en la Cuenca del Río Grijalva. Geográficamente se encuentra entre los paralelos 17° 22' y 18° 25' de latitud norte y entre los meridianos 93° 39' y 94° 06' de longitud oeste; con una altitud que varía de 0 a 50 msnm. Al norte limita con el Golfo de México, al sur con el Estado de Chiapas, al este con la Región Centro y al oeste el Estado de Veracruz. La superficie aproximada de dicha región es de 780,290 ha que representa el 31.50% del Estado de Tabasco y agrupa los municipios de Huimanguillo (1), Cárdenas (2), Nacajuca (3), Jalpa (4), Comalcalco (5), Cunduacán (6) y Paraíso (7) (Figura 4).

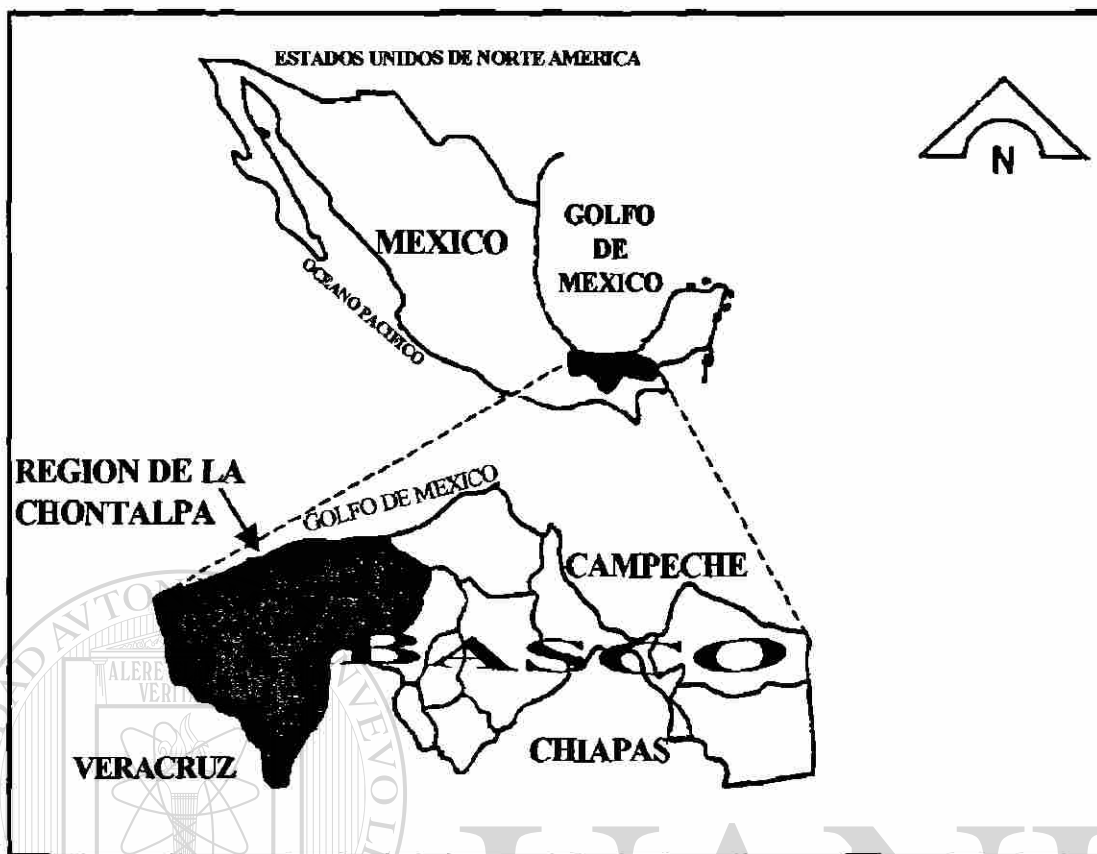


Figura 4. Localización de la Región de la Chontalpa, Tabasco.

### 3.2.2. Clima

En el área de estudio predomina el clima Am (f) w'' (i') g, según la carta climática de Köppen modificada por García (1976).

- Am Cálido-húmedo con lluvias en verano, precipitación del mes más seco menor de 60 mm.
- (f) El % de lluvias invernales fluctúa en el rango de 5 a 10.2 con respecto a la precipitación anual.
- w'' Estación seca marcada en invierno y otra corta en verano (canícula).
- (i') Con poca oscilación anual de las temperaturas medias mensuales entre 5 y 7 °C.
- g Mes más caliente se presenta antes del solsticio de verano y de la temporada lluviosa.

La temperatura media anual de 26.7 °C, precipitación media anual de 2400 mm; la humedad relativa del aire fluctúa entre 68 y 98%; evaporación media anual de 1214 mm; vientos procedentes del norte, noreste y este con velocidades de 100 Km h<sup>-1</sup>.

### 3.2.3. Geología

En la porción sureste de la República Mexicana, el marco tectónico regional está representado por los elementos: Placa de Norteamérica, Placa del Caribe, Placa de Cocos, Zona de Subducción y Falla de Montaguapolo chic. Dentro de este contexto geológico se encuentran las unidades tectónicas: Plataforma de Yucatán, Cuenca Salina del Istmo, Cuenca Macuspana-Campeche, Anticlinorium Sierra Madre, Sinclínorium Central de Chiapas, Macizo Sierra Madre del Sur, Macizo de San Andrés Tuxtla y Zona Metamórfica del Istmo. La Planicie Aluvial del Estado de Tabasco se ubica dentro de la Cuenca Salina del Istmo (CNA 1991).

### 3.2.4. Geomorfología

Geomorfológicamente, la provincia geológica de la Cuenca Salina del Istmo presenta dos grandes geoformas: La Planicie Aluvial y los Lomeríos o Terrazas Aluviales del Pleistoceno. La primera está caracterizada por extensas llanuras de inundación con poca o nula pendiente, formada por depósitos de ríos en diferentes medios (lacustres, palustres y litoral); en la segunda topoforma, la erosión hídrica ha provocado que estas Terrazas Aluviales se disecten y formen una serie de lomeríos de baja altura.

### 3.2.5. Fisiografía

Fisiográficamente, la Planicie Aluvial Tabasqueña se localiza en la provincia fisiográfica XIII denominada Llanura Costera del Golfo Sur; Subprovincia Llanura y Pantanos Tabasqueños la cual comprende el 95.57% de la superficie del Estado de Tabasco. Está constituida por una topografía plana de poco gradiente hacia el mar. Hacia

el sur, la fisiografía está formada por extensos lomeríos con alturas máximas de 50 msnm, los cuáles desaparecen bruscamente para dar lugar a la parte frontal de la Sierra Madre de Chiapas, en cuyas montañas (altitudes de 200 a 2500 msnm) nacen las principales corrientes fluviales que surcan la Planicie Aluvial de Tabasco.

West *et al.* (1976) estudiaron y clasificaron al Estado de Tabasco en cuatro regiones fisiográficas según el paisaje o geoforma presente: 1) Plegamientos de Rocas Sedimentarias, 2) Terrazas Aluviales del Pleistoceno, 3) Planicie Aluvial del Reciente y 4) Bordos de Playas. Palma y Cisneros (1996) regionalizaron en siete zonas fisiográficas de acuerdo a diferentes ambientes agrícolas, utilizando el método de zonificación fisiográfico para generar cartografía: 1) Zona de la Sierra, 2) Zona Calcárea, 3) Zona de Lomeríos, 4) Llanura Aluvial, 5) Vega de Río, 6) Llanura de Inundación y 7) Zona de Costa (Figura 5).

Las principales zonas fisiográficas que abarcan a la Región de la Chontalpa son las siguientes: Llanura de Inundación (241,470 ha), Llanura Aluvial (116,714 ha), y Lomeríos (188,192 ha).

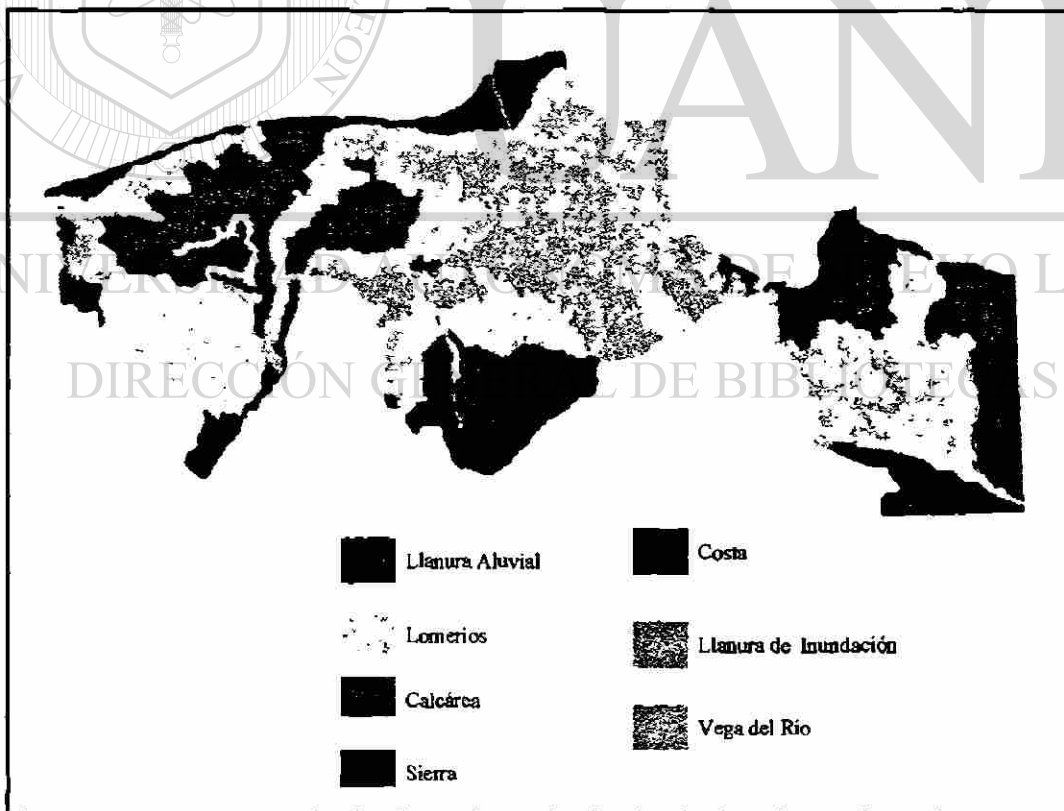


Figura 5. Zonas fisiográficas del Estado de Tabasco (Palma y Cisneros, 1996).

### 3.2.6. Suelos

Según West *et al.* (1976); el proceso de formación de los suelos de la región, tiene por origen la erosión, acarreo y sedimentación de materiales procedentes de la cuenca alta del Río Grijalva, al pasar por la Sierra Central, Norte de Chiapas, por las Terrazas del Pleistoceno y del Reciente localizadas al sur de Tabasco. En base a la clasificación taxonómica de los suelos de Tabasco (Palma y Cisneros, 1996) y de acuerdo a la leyenda corregida de los suelos del mundo (FAO, 1989), en la Región de la Chontalpa se determinaron 11 unidades y 19 subunidades de suelos, que se presentan en el Cuadro 1 y Figura 6. La unidad de suelo que predomina son los Vertisoles (VR) y dentro de esta unidad se detectó una subunidad que se denomina Vertisol éutrico (VRe), los cuales abarcan aproximadamente una superficie de 263,650 ha que representan el 33.79% de la superficie total de la Región de la Chontalpa (780,290 ha). Fisiográficamente dichos suelos se localizan en planicies con ligera inclinación, Sin embargo, los Vertisoles localizados en la sierra presentan relieves ondulados con pendientes mayores del 15%. El material parental esta constituido en la mayor parte de los casos por sedimentos aluviales recientes. Los Vertisoles ubicados en los extremos sur y este del Estado de Tabasco se originan directamente a partir de rocas sedimentarias de terciarios, principalmente calizas y lutitas.

Los Vertisoles son suelos de alta fertilidad natural, cuya profundidad varía de 60 a más de 200 cm de textura arcillosa del tipo montmorillonítica, el coeficiente de expansión de esta arcilla es del 22%, pH desde ligeramente ácido hasta ligeramente neutro y normalmente presentan solamente horizontes A y C que se diferencian por el grado de agregación. Tienen un porcentaje de saturación de bases del 50% o más, al menos entre 20 y 50 cm de profundidad; no presentan horizonte cálcico o gypico. Los Vertisoles peli-éutricos (VRep) son la misma subunidad de suelo, subdividida a tercer nivel por la presencia de chromas menores que 1.5, es decir se trata de suelos más oscuros que los Vertisoles éutricos. Las características principales de los Vertisoles de estas áreas son los procesos de expansión y contracción provocando que en los primeros 80 cm de profundidad sufra un fenómeno de inversión de suelo, por lo que los primeros horizontes se encuentran muy mezclados. Los principales factores de demérito de estos suelos están ligados a sus características físicas ( gran cantidad de arcillas expandibles,

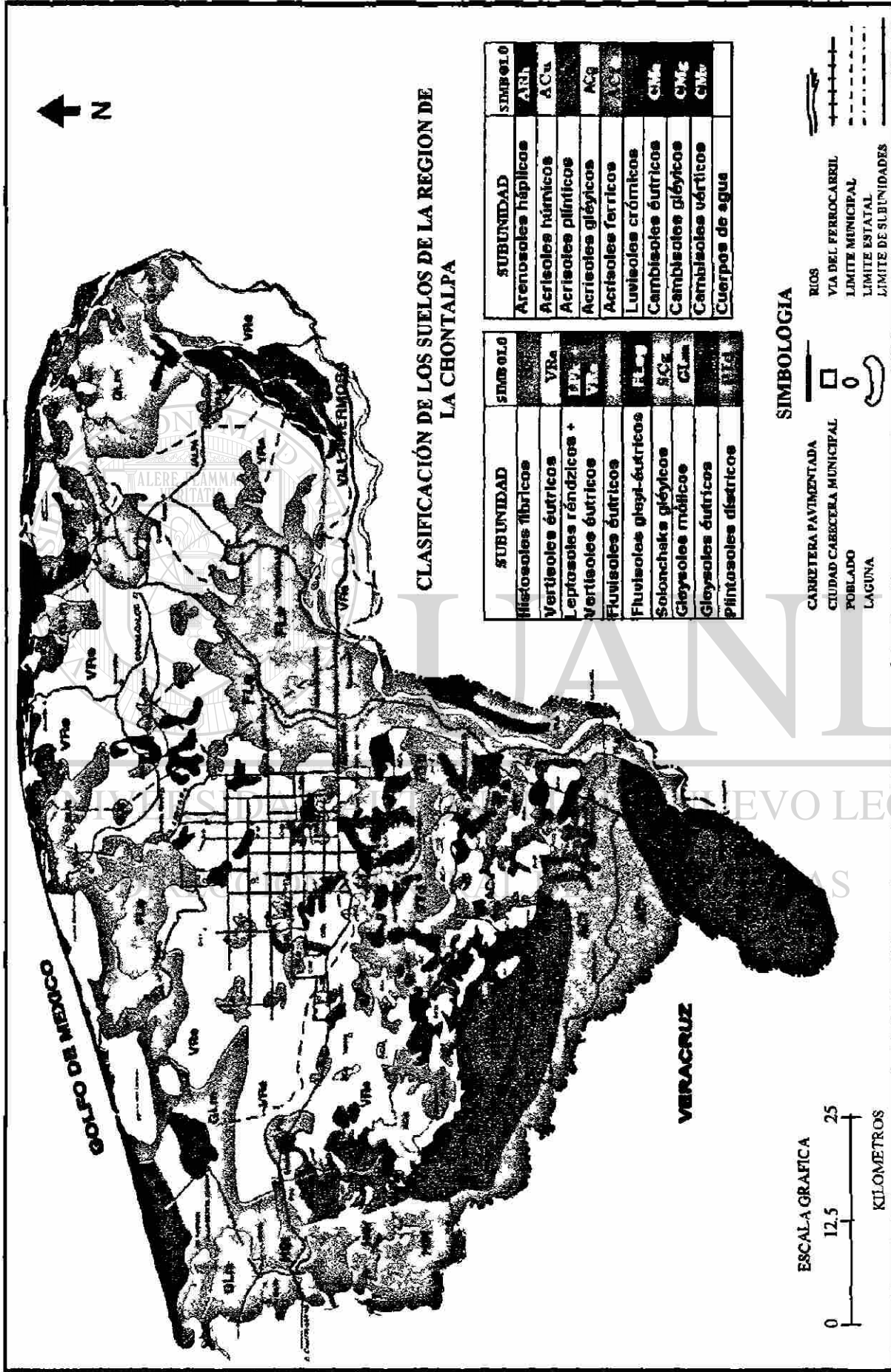


permeabilidad lenta, drenaje deficiente, manto freático elevado) y en algunos a su topografía más que a las de fertilidad. El uso actual de estos suelos, principalmente es: Caña de azúcar, cacao, praderas extensivas, arroz y maíz.

En el Estado de Tabasco los Vertisoles se localizan en los municipios siguientes: Huimanguillo, Cárdenas, Cunduacán, Comalcalco, Jalpa de Méndez, Nacajuca, Teapa, Tacotalpa, Jalapa, Macuspana, Jonuta, Balancán y Tenosique, abarcando una superficie de 492,502.2 ha que representa el 19.9% de la superficie total del estado.

**Cuadro 1.** Clasificación de los suelos de la Región de la Chontalpa en base a la leyenda FAO, 1989.

UNIDAD	SUBUNIDAD	SIMBOLO	SUPERFICIE (hectáreas)	PORCENTAJE (%)
Histosoles (HS) (27,100 ha)	Histosoles fibricos		27,100	3.47
Luvisoles (LV) (15,240 ha)	Luvisoles crómicos		15,240	1.95
Acrisoles (AC) (114,282 ha)	Acrisoles ferricos		41,650	5.34
	Acrisoles gléyicos		4,947	0.63
	Acrisoles húmicos		8,575	1.10
	Acrisoles plinticos		59,110	7.58
Fluvisoles (FL) (123,282 ha)	Fluvisoles éutricos		109,645	14.05
	Fluvisoles gleyi-éutricos		13,633	1.75
Cambisoles (CM) (9,838 ha)	Cambisoles vérticos		4,640	0.60
	Cambisoles éutricos		2,725	0.35
	Cambisoles gléyicos		2,473	0.32
Gleysoles (GL) (89,854 ha)	Gleysoles éutricos		7,870	1.0
	Gleysoles mólicos		81,984	10.51
Solonchaks (SC) (24,730 ha)	Solonchaks gléyicos		24,730	3.17
Plintosoles (PT) (28,370 ha)	Plintosoles dístricos		28,370	3.64
Arenosoles (AR) (15,133 ha)	Arenosoles háplicos		15,133	1.94
Vertisoles (VR) (263,650 ha)	Vertisoles éutricos		263,650	33.79
Leptosoles réndzicos + Vertisoles éutricos			24,625	3.15
Cuerpos de agua			44,190	5.66
<b>TOTAL</b>			<b>780,290</b>	<b>100.00</b>



**FIGURA 6.** Plano de suelos de la región de la Chontalpa en base a la leyenda FAO-UNESCO (adaptado y modificado después de Palma y Cisneros, 1996).

### 3.2.7. Hidrología

Las principales cuencas hidrológicas en la región son: Río Grijalva–Villahermosa que abarca el 41.45% de la superficie del Estado, Río Usumacinta con un 29.24%, Río Tonalá, Lagunas del Carmen y Machona el 24.78%; y la Laguna de Términos el 4.53%.

La Región de la Chontalpa se localiza entre los ríos Grijalva y Tonalá al este y oeste respectivamente (Figura 7). Los principales ríos que cruzan o bordean el área del Plan Chontalpa son: Santa Ana que corre hacia el noroeste y desemboca en la Laguna Machona, los ríos Naranjeño y su afluente San Felipe desembocan en la Laguna del Carmen, el río Zanapa recibe las aguas del río Coatajapán y de la Laguna del Rosario descargando en el río Tonalá. Estos ríos reciben las aguas del sistema de drenaje del Plan Chontalpa.

Los acuíferos principales de la región están constituidos en las siguientes unidades litológicas: Aluvial Reciente de muy poco espesor y las formaciones del Mioceno (Terciario), esta última llega a alcanzar espesor hasta de 1500 m; sin embargo, hasta los 690 m es ocupado por acuíferos de agua dulce, en tanto que a mayor profundidad se manifiesta presencia de aguas salobres o saladas.

El flujo general del agua subterránea es en dirección sur-norte, descargando finalmente en el Golfo de México. La recarga de los acuíferos profundos provienen del sur, desde las estribaciones de la Sierra Madre de Chiapas, teniendo ligeras desviaciones en su trayectoria general, inducidas por su naturaleza geológica y por sobre-explotación local de los acuíferos en sitios concentrados de pozos petroleros (PEMEX, 1979).

### 3.2.8. Variables evaluadas: Climatológicas, agrohidrologías y edáficas

**3.2.8.1. Variables climatológicas:** Promedio de lluvias diarias del mes más lluvioso, precipitación y evaporación media mensual y lluvia de diseño.

#### 3.2.8.1.1 Promedio de lluvias diarias del mes más lluvioso

La red de estaciones meteorológicas del Estado de Tabasco tiene un total de 92 estaciones de las cuales se seleccionaron 86 por tener representatividad en forma objetiva satisfaciendo los requisitos de longitud y homogeneidad de la serie climática. Para el

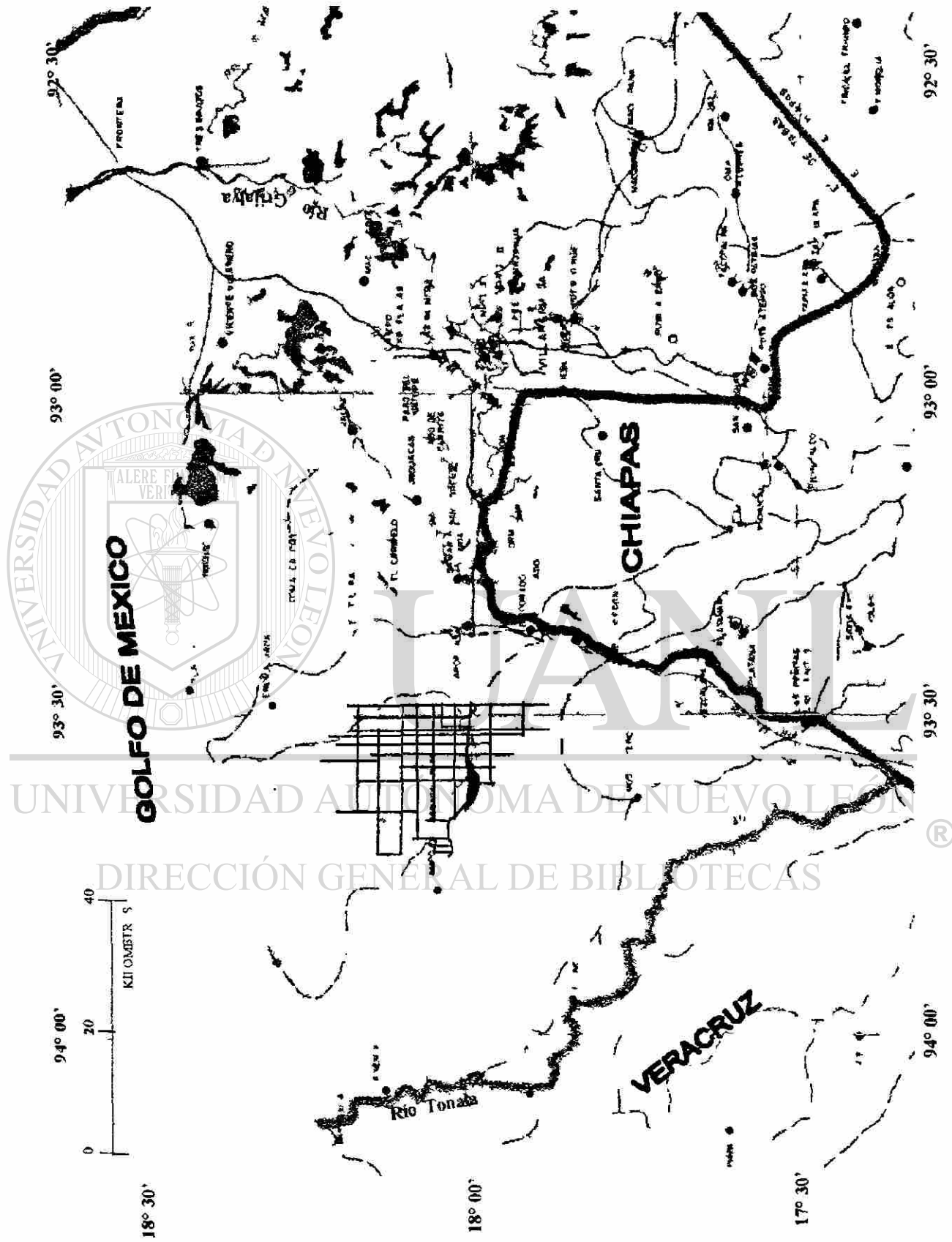


Figura 7. Plano hidrológico de la Región de la Chontalpa, Tabasco.

promedio de lluvias del mes más lluvioso se realizaron análisis de distribuciones de probabilidad mediante el método de momentos, la bondad de ajuste fue probada con ji-cuadrada, con el programa computacional “Frecuen” realizado para este fin, planteándose para la prueba la hipótesis siguiente: La distribución de probabilidad propuesta ajusta adecuadamente las observaciones. Fue calculado el promedio de lluvias diarias del mes más lluvioso por los métodos de isoyetas y media aritmética. Se aplicó la técnica de ordenación o agrupamiento a las estaciones meteorológicas, según la característica de distribución espacial y variabilidad de lluvias diarias del mes más lluvioso, utilizando análisis multivariado por el método conglomerado; tomándose distancias euclidianas como: índice de distancia métrica o de similitud (Jhonson y Wichern, 1988). Técnicas de interpolación Kriging fueron utilizadas para definir la configuración espacial temporal de la lluvia promedio diaria del mes más lluvioso; se utilizó el programa de computación Surfer.

#### **3.2.8.1.2. Precipitación y evaporación media mensual**

Estas variables se evaluaron en las 86 estaciones meteorológicas, permitiendo relacionarlas a través del tiempo. Para la determinación del período crítico de exceso de lluvia, se construyeron climogramas de Gausen para dos estaciones representativas: una de la Planicie Aluvial Tabasqueña y otra de la región orográfica de la Sierra de Chiapas. Se analizaron los datos con el paquete computacional “Sistema de Información para Caracterizaciones Agroclimáticas” (SICA) (Medina y Ruiz, 1992).

#### **3.2.8.1.3. Lluvia de diseño**

Las decisiones estratégicas en la planeación y operación de sistemas de producción agrícola conlleva a definir el valor de precipitación que involucra la relación entre la intensidad, duración y frecuencia. Para la variable lluvia de diseño se tomaron los valores promedios de lluvias diarias del mes más lluvioso en las cuales se definió el valor de precipitación que involucra la relación entre intensidad, duración y frecuencia. Utilizándose el parámetro anteriormente calculado se efectuó un análisis de frecuencias para distribuciones de probabilidad de lluvia puntual y distribución de probabilidad espacial, lo

que permitió relacionar lámina, duración, frecuencia y lluvia de diseño, según metodología propuesta por Chow et al. (1994), se utilizó el programa computacional “Retorno” creado para analizar frecuencias para distribuciones de probabilidad de lluvia y calcular periodos de retorno en días y años. Este valor de precipitación fue definido con la selección del nivel de probabilidad que expresa el riesgo que se considera aceptable para el sistema hidráulico de un sistema de drenaje. Se digitalizaron mapas con láminas de lluvias esperadas para la Planicie Aluvial y se regionalizó según el valor obtenido por el modelo:

$$LLD\tilde{N}O = X + K_t \hat{S} \quad (19)$$

donde:

$$K_t = \left[ 0.5772 + l_n \left( l_n \frac{T}{T-1} \right) \right] \quad (20)$$

donde:

LLDÑO = lluvia de diseño.

$\bar{X}$  = media poblacional.

$K_t$  = factor de corrección.

$\hat{S}$  = desviación estándar.

$l_n$  = logaritmo natural.

$T$  tiempo de retorno en años.

### 3.2.8.2. Variables agrohidrológicas: Profundidad del manto freático con respecto al nivel del terreno.

Tomando como base la topografía y el período crítico de excesos de lluvias, se localizó la distribución espacial de 998 pozos de observación del manto freático, con los cuáles se desarrollaron mapas, trazando las líneas que unen puntos de igual cota y de profundidad del manto freático. El análisis de los datos de campo de las elevaciones del terreno y el nivel freático, permitieron desarrollar mapas digitalizados de isobatas, los

cuáles definieron la configuración de la superficie freática, dirección e intensidad del flujo subsuperficial. Para la estimación de la distribución espacial del manto freático se realizó con el método de interpolación Kriging.

**3.2.8.3. Variables edáficas:** Espesor de horizontes genéticos, % de arcilla, % limo, % arena, pH, % de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, calcio, magnesio, sodio, potasio, fósforo asimilable, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente y humedad aprovechable.

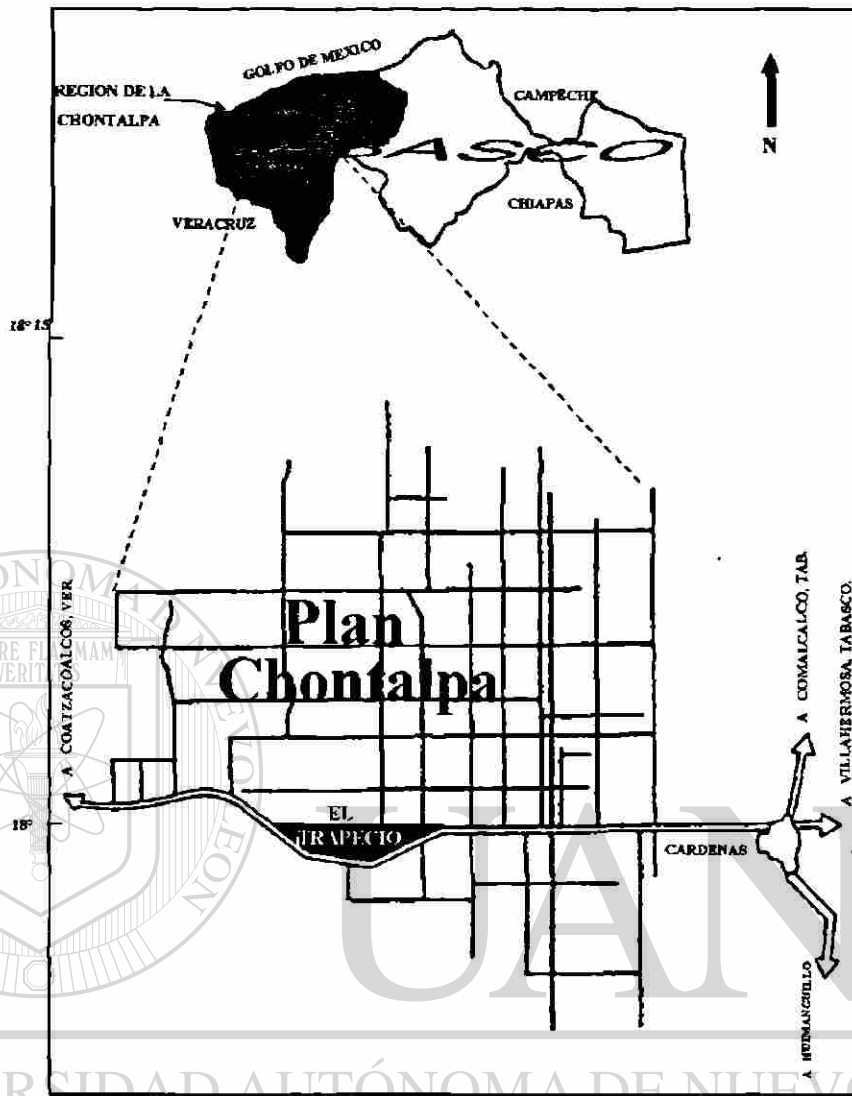
Se compiló información de estudios de suelos realizados en el Estado de Tabasco (CETENAL, 1976; Dirección de Agrología, 1972; Subdirección de Agrología, 1978; 1980; SARH, 1972a; 1972b; 1976a; 1976b; 1976c; 1979; 1980a; 1980b; 1981a; 1981b; 1981c; 1982a; 1982b; 1984a; 1984b; 1987a; 1987b) estructurándose una base de datos integrada por 91 perfiles de suelos con sus respectivas características físicas y químicas por horizonte genético de diagnóstico. Se aplicó un análisis multivariado por el método de componentes principales para seleccionar las variables que mayor explicación estadística ( $r > 0.7$ ) dan a la variabilidad total. Con los datos originales se realizó la clasificación geohídrica con técnicas multivariadas por el método conglomerado y coeficientes de correlación de Pearson como índice de distancia métrica.

---

### **3.3. Segunda etapa.- Medición y evaluación de las variables climatológicas, agrohidrológicas, edáficas y cultivos en el módulo de drenaje del campo experimental “El Trapecio”, Tabasco**

#### **3.3.1. Localización del campo experimental**

El campo experimental “El Trapecio”, perteneciente al CEICADES (Centro de Enseñanza, Capacitación e Investigación para el Desarrollo Agropecuario, Forestal y Acuícola del Sureste), está ubicado en la Región Chontalpa y es un área representativa de la Planicie Aluvial del Estado de Tabasco; localizada en los 17° 49' 03" de latitud norte y 93° 23' 03" de longitud oeste y a 11 msnm (Figura 8).

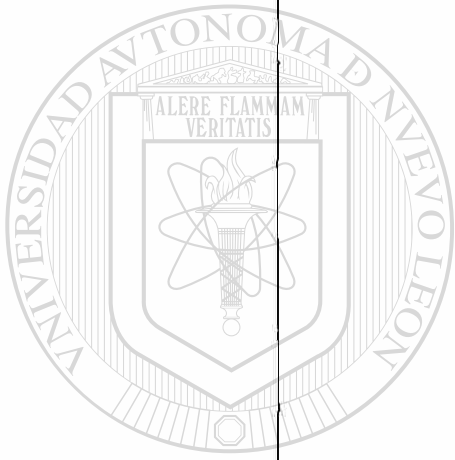


**Figura 8.** Localización del campo experimental “El Trapecio”,  
Región de la Chontalpa.

### 3.3.2. Suelos

El campo “El Trapecio” presenta 5 series de suelos (Figura 9) localizándose el 79% de la superficie del módulo de drenaje en la Serie Limón y el 21% en la Serie Libertad.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

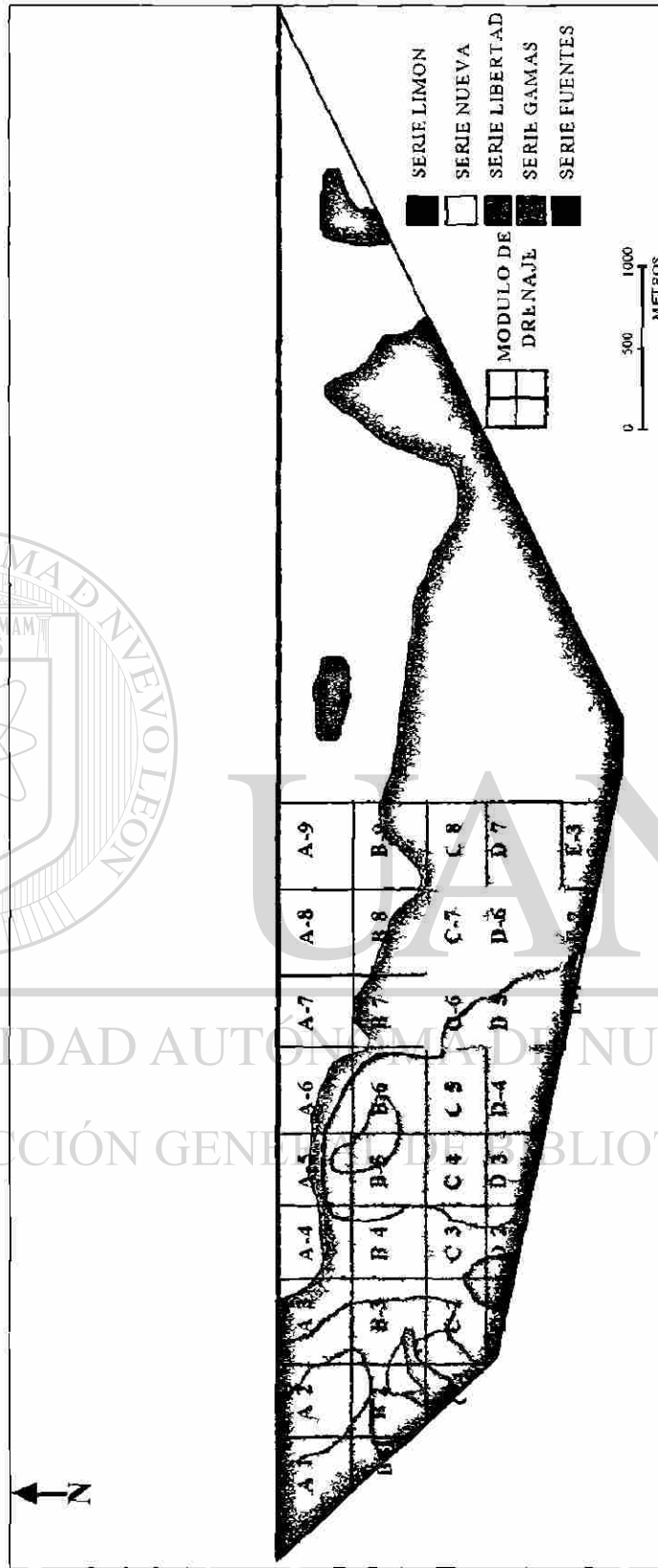


Figura 9. Mapa de series de suelos del campo experimental "El Trapecio" y localización del módulo de drenaje (Adaptado después de Trujillo y Palma 1988).

Los suelos de la Serie Limón son de formación aluvial y se han originado por el acarreo y depósito de materiales con productos sedimentarios y graníticos provenientes de las formaciones geológicas ocurridas en el Pleistoceno y el Reciente, entre sus componentes más importantes están las lutitas y margas que contienen materiales arcillosos con porcentajes variables de material cementante. Los suelos son de textura arcillosa del tipo montmorillonítica. Según la clasificación taxonómica de suelos en base a la leyenda corregida de los suelos del mundo (FAO, 1989), pertenecen a la subunidad de los Vertisoles éútricos.

En la Figura 10 se presenta un perfil representativo de la Serie Limón. Los suelos de la Serie Libertad son de origen aluvial del Reciente, profundos y generalmente presentan horizontes A1, C y IIC. Son de textura franco-arcillosa en los primeros estratos y cambia a texturas medias a partir de los 50 cm, de color pardo-amarillento, café grisáceo con motas amarillentas. Su estructura es de gránulos a bloques angulares o subangulares, su consistencia es de plástica a muy plástica con abundantes poros finos y medianos. El pH varía de ligeramente ácido a ligeramente alcalino. El drenaje interno de este suelo es de moderado a lento.

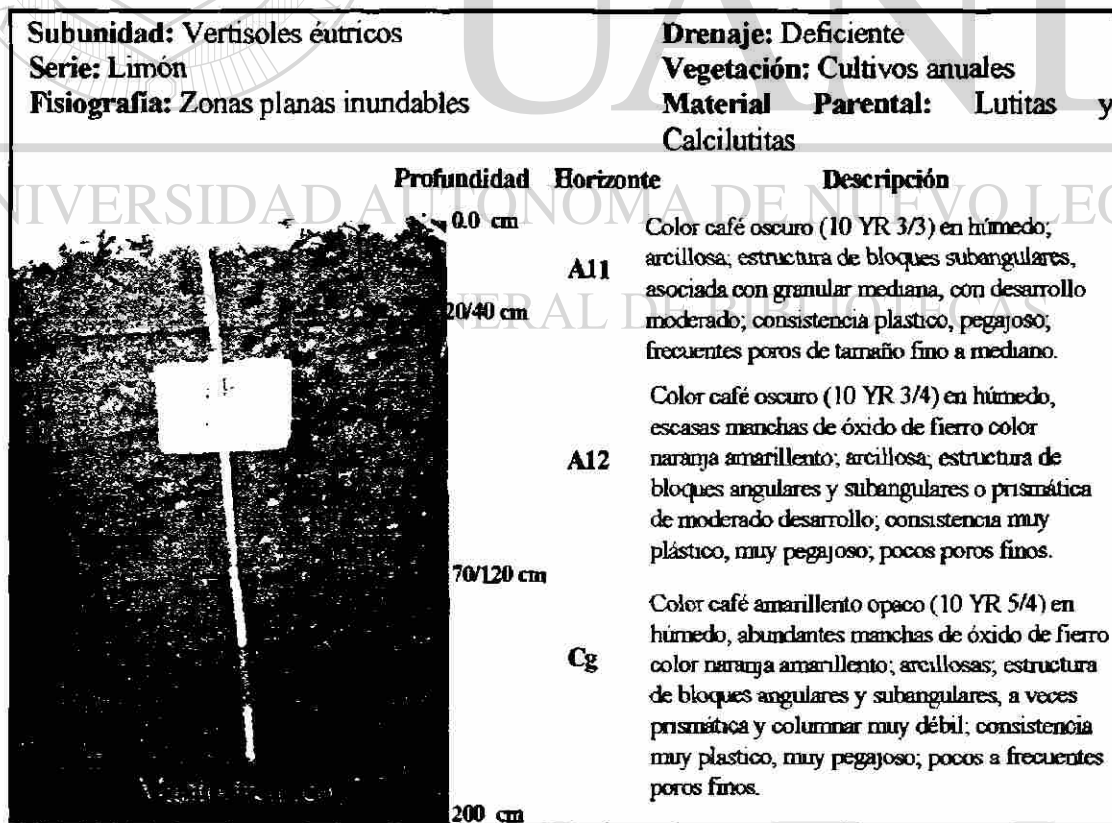


Figura 10. Perfil representativo de la Serie Limón.

### 3.3.3. Localización y construcción del módulo de drenaje

El campo experimental “El Trapecio” comprende una superficie de 1200 ha de las cuáles 60 ha corresponden al módulo de drenaje subsuperficial localizado en los lotes C-6, C-7, D-5, y D-6, cuyas dimensiones son de 450 m de largo y 350 m de ancho con una superficie de 15 ha por lote (Figura 9). En cada lote se ubicó una serie de drenes entubados de 10 cm de diámetro, la tubería es de cloruro de polivinilo (PVC) corrugada y perforada, utilizando poliéster como filtro; con espaciamientos de 10, 20, 30, 40 y 50 m. La profundidad promedio de los drenes varió según el relieve del suelo entre 1.1 y 1.4 m, y la pendiente entre 0.01 a 0.02 %. Cada espaciamiento (tratamiento) está conectado a un colector de tubería de plástico corrugada sin perforar de 20 cm de diámetro que descarga a una estructura de control (aforador) que permite medir los volúmenes de agua por tratamiento en tiempo y espacio a considerar. Cada tratamiento tiene 3 repeticiones. Una modificación realizada al espaciamiento de 30 m (tratamiento), fue la utilización de filtro a los drenes interceptores, utilizándose arena y grava para ensayar su comportamiento sobre la captación y remoción de los excesos de agua. Las estructuras de control son básicamente una construcción cuadrada de concreto con dimensiones de 1.2 m de lado y 1.7 m de profundidad con respecto al nivel del suelo; ésta recibe el caudal del colector de cada serie de interceptores (tratamientos) y además cuenta con la salida final hacia el colector abierto (dren abierto). El diseño principal de la estructura de control tiene una pared intermedia entre la entrada de agua y la salida hacia el colector tipo abierto; esta pared intermedia cuenta con 3 compuertas a diferente altura; que permiten las operaciones de controlar el nivel freático (CEICADES, 1993).

#### 3.3.3.1. Distribución de los tratamientos en el módulo de drenaje

Los cuatro lotes (C-6, C-7, D-5, y D-6) en que fueron divididas las 60 ha del módulo de drenaje tienen la distribución siguiente:

**Lote C-6.-** Se localiza en la parte noroccidental del módulo de drenaje, el 65% (9.75 ha) de su superficie se encuentra en la serie de suelos Limón y el 35% (5.25 ha) en la serie

Libertad (Figura 9). Cuenta con cuatro líneas de drenes interceptores (Figura 11), distribuidas de la siguiente forma:

- a) 4 líneas con espaciamiento de 30 m entre línea (Cultivo: Caña de azúcar).

La longitud de las líneas de drenes interceptores es de 150 m cada una, dando un total de 600 m; la tubería es corrugada. Cuenta con un total de 90 m de colectores de 20 cm de diámetro. Tiene una estructura de control. En particular en este tratamiento las zanjas de los drenes interceptores fueron rellenadas con arena como una variante para observar el efecto de filtro.

**Lote C-7.-** Se localiza en la parte nororiental del módulo, y el 100% de su superficie se localiza dentro de la serie Limón (Figura 9), cuenta con 15 líneas de drenes interceptores de 200 m de longitud en la parte oriental y 8 líneas de 225 m de longitud en la parte occidental (Figura 12), distribuidas de la siguiente forma:

- a) 5 líneas con espaciamiento de 10 m entre línea (Cultivo: Maíz).
- b) 5 líneas con espaciamiento de 20 m entre línea (Cultivo: Maíz).
- c) 5 líneas con espaciamiento de 35 m entre línea (Cultivo: Maíz).
- d) 4 líneas con espaciamiento de 30 m entre línea (Cultivo: Maíz).
- e) 4 líneas con espaciamiento de 50 m entre línea (Cultivo: Maíz).

Se cuenta con un total de 580 m de colectores para los diferentes espaciamientos de drenaje, incluyendo 80 m para atravesar el camino localizado en la parte occidental del lote, ya que los drenes de esta porción descargan hacia el colector abierto localizado entre los lotes C-6 y C-7. Se usó tubería corrugada sin ranurar y sin filtro y de 20 cm de diámetro. El lote cuenta además con 5 estructuras de control, una para las repeticiones de cada espaciamiento.

**Lote D-5.-** Se localiza en la parte suroccidental del módulo, el 73% (11 ha) de su superficie se encuentra en la serie de suelos Libertad y el 27% (4 ha) en la serie Limón (Figura 9); los

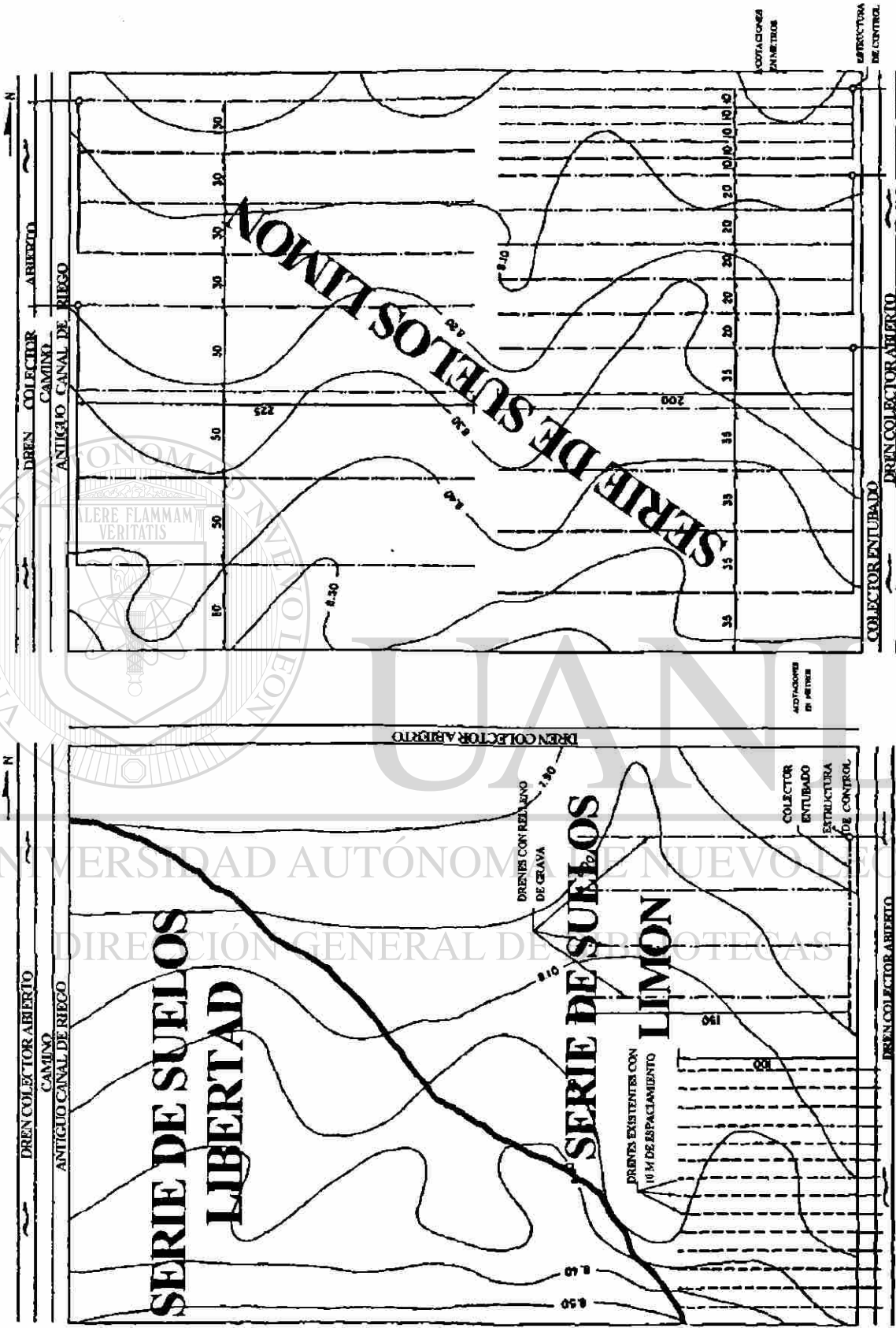


Figura 11. Localización y distribución de los drenes. Lote C-6

Figura 12. Localización y distribución de los drenes. Lote C-7

espaciamientos y repeticiones de 10, 20, y 40 m se localizan en la parte oriental del módulo y los de 30 y 50 m en la parte occidental del mismo (Figura 13). Este lote cuenta con un total de 19 líneas de drenes interceptores, distribuidas de la siguiente forma:

- a) 4 líneas con espaciamiento de 10 m entre línea (Sin cultivo).
- b) 4 líneas con espaciamiento de 20 m entre línea (Sin cultivo).
- c) 3 líneas con espaciamiento de 30 m entre línea (Sin cultivo).
- d) 4 líneas con espaciamiento de 40 m entre línea (Sin cultivo).
- e) 4 líneas con espaciamiento de 50 m entre línea (Sin cultivo).

La longitud de las líneas de drenes interceptores es de 200 m cada una, el diámetro de la tubería es de 10 cm, siendo tubería corrugada ranurada y con filtro de poliéster. Se cuenta con un total de 490 m de colectores para los diferentes espaciamientos de drenaje, incluyendo 70 m de colectores utilizados para atravesar el camino de la parte occidental del lote. Se usó tubería corrugada sin ranurar, sin filtro y de 20 cm de diámetro. El lote cuenta además con 5 estructuras de control, una para las repeticiones de cada espaciamiento.

**Lote D-6.-** Se localiza en la parte suroriental del módulo de drenaje, y el 100% de su superficie se encuentra en la serie de suelos Limón (Figura 9). Tiene en total 7 líneas de drenes interceptores (Figura 14), distribuidas de la siguiente forma:

- a) 3 líneas con espaciamiento de 40 m entre línea (Cultivo: Caña de azúcar).
- b) 4 líneas con espaciamiento de 30 m entre línea (Cultivo: Maíz).

La longitud de las líneas de drenes interceptores es de 250 m cada una, el diámetro de la tubería es de 10 cm de plástico corrugada, ranurada y con filtro de poliéster. Se cuenta con un total de 170 m de drenes colectores de tubería corrugada sin ranurar y sin filtro de 20 cm de diámetro. El lote cuenta además con 2 estructuras de control, una para las repeticiones de cada espaciamiento.

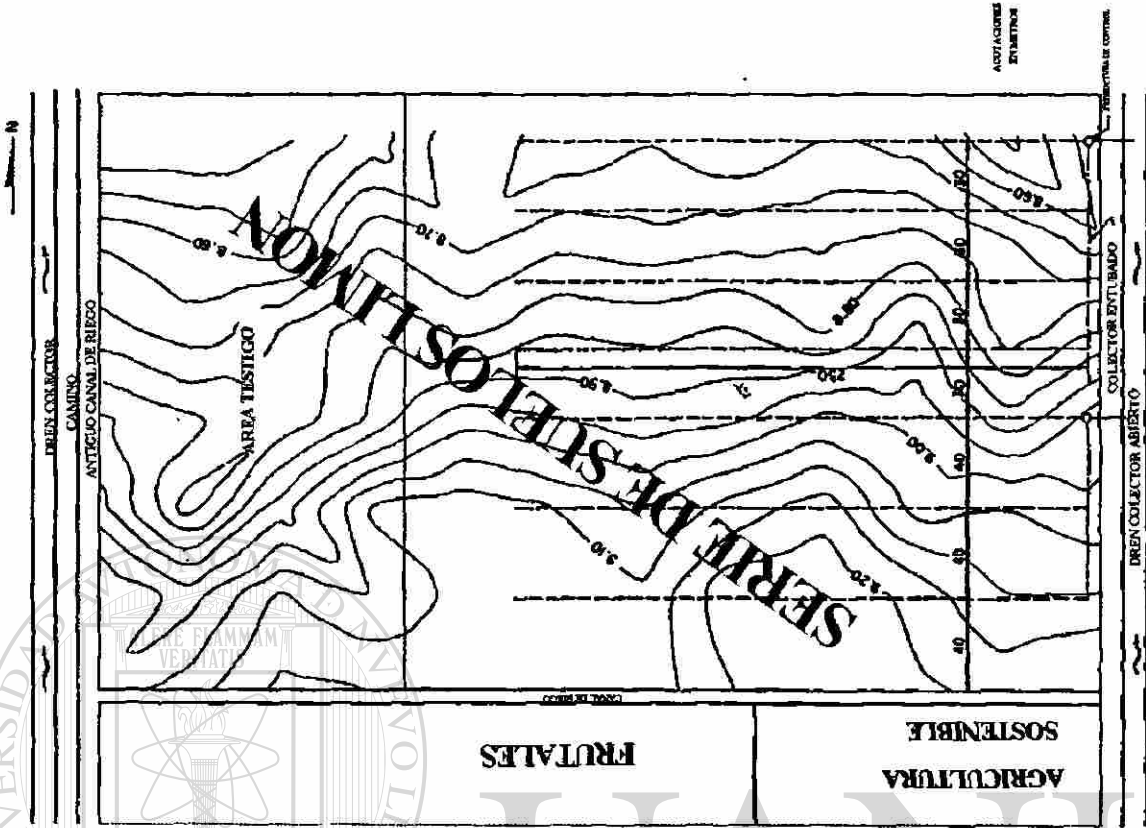


Figura 13. Localización y distribución de los drenes. Lote D-5

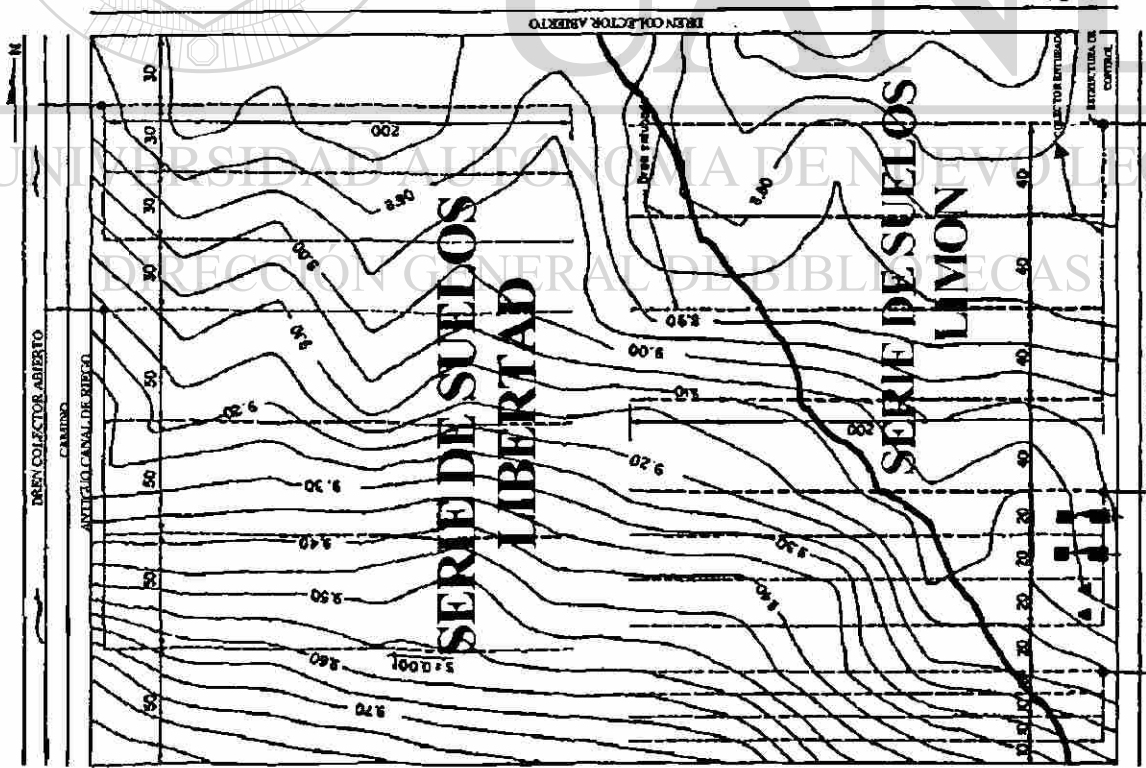


Figura 14. Localización y distribución de los drenes. Lote D-6

### **3.3.4. Variables evaluadas: Climatológicas, agrohidrológicas, edáficas y cultivos**

**3.3.4.1. Variables climatológicas:** Precipitación pluvial diaria, evaporación diaria, temperatura ambiental mínima, media y máxima diaria y temperatura del suelo a 0,10,20 y 50 cm.

Los datos de las variables climatológicas fueron tomados de la estación meteorológica que se encuentra ubicada a 300 m del módulo de drenaje subterráneo, dentro del campo experimental “El Trapecio”. Estas variables fueron analizadas en forma conjunta con las variables agrohidrológicas para seleccionar aquellas que estadísticamente fueran representativas del funcionamiento del sistema de drenaje subterráneo. Se utilizó el análisis de regresión múltiple y simple para modelar el sistema de manejo de fluidos hídricos.

**3.3.4.2. Variables agrohidrológicas y edáficas:** Evaporación del suelo, percolación, escorrentía superficial, estrato impermeable, cambio en el almacenamiento de agua en el perfil del suelo en la zona no-saturada, profundidad del manto freático en el punto medio entre drenes (carga hidráulica), descarga de drenes (coeficiente de drenaje), conductividad hidráulica, espacio poroso drenable, y transmisividad.

#### **3.3.4.2.1. Evaporación del suelo**

Esta variable se evaluó diariamente mediante dos lisímetros de pesada instalados en el espaciamiento de 20 m entre líneas de drenes del lote D-5 (Figuras 13 y 15). Su construcción es de lámina galvanizada cuyas dimensiones son 25.2 x 25.2 x 50 cm. Se analizaron como datos de entrada al modelo de balance hídrico.

#### **3.3.4.2.2. Percolación**

Se midió el volumen de agua percolada que se encontraba en los depósitos de drenaje de los lisímetros instalados en el espaciamiento de 20 m entre líneas de drenes



del lote D-5 (Figuras 13 y 15). Los datos de recarga al manto freático fueron analizados como entrada al modelo de balance hídrico.



**Figura 15.** Medición de la evaporación y percolación del agua en el suelo (Lote D-5).

#### **3.3.4.2.3. Escorrentía superficial**

En el espaciamiento de 20 m entre líneas de drenes en el Lote D-5, se acondicionaron dos parcelas con áreas de captación de 9 y 36 m<sup>2</sup> respectivamente (Figuras 13 y 16), delimitándose con bordos, para evitar de esta manera la entrada de escorrentía superficial de áreas aledañas y además se controló la salida. El flujo de cada área de captación se condujo a un depósito con capacidad de un metro cúbico, cada depósito tenía una llave que permitió la medición del agua escurrida almacenada y la evacuación de dichos depósitos. Se analizó como dato de entrada para el modelo del balance hídrico.

#### **3.3.4.2.4. Profundidad al estrato impermeable**

La profundidad permeable que determina el espesor del acuífero libre fue estimado en 31 sitios de muestreo dentro del módulo de drenaje. Esta distancia comprendió de la superficie del suelo hasta la profundidad en que se encontró el estrato endurecido o

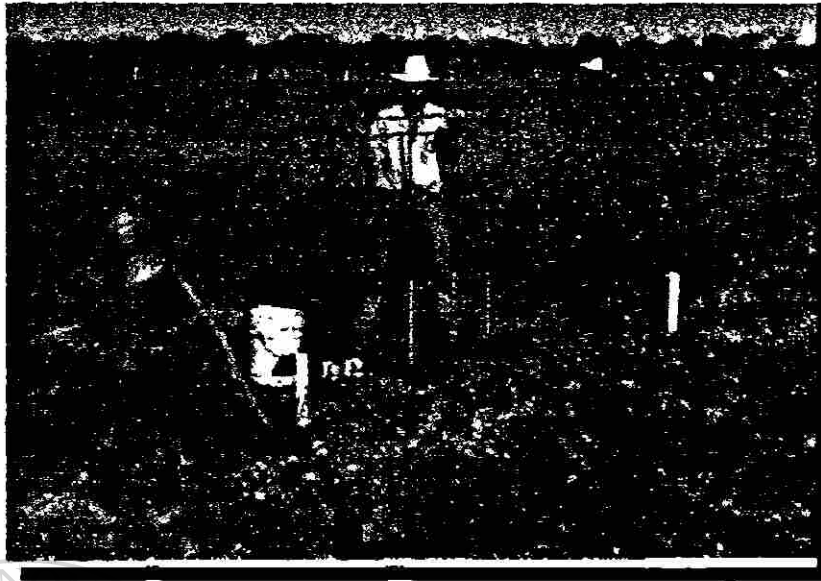
semipermeable. El análisis con técnicas de interpolación Kriging permitió definir la configuración espacial del acuífero por debajo del nivel de los drenes.



**Figura 16.** Parcela para la evaluación del escurrimiento superficial (lote D-5).

#### **3.3.4.2.5. Cambio en el almacenamiento de agua en el perfil del suelo en la zona no saturada**

El contenido de humedad del suelo se determinó por el método gravimétrico; se tomaron muestras a diferentes profundidades del perfil del suelo (0-30, 30-60, 60-90 y 90-120 cm); el sitio de muestreo se realizó a la mitad de la distancia de los espaciamientos entre drenes en el módulo de drenaje (Figura 17); la frecuencia en la toma de muestras se efectuó cada semana.



**Figura 17.** Muestreo de la humedad del suelo entre líneas de drenes.

#### **3.3.4.2.6. Profundidad del manto freático en el punto medio entre drenes (carga hidráulica)**

Para llevar a cabo la evaluación de esta variable se instalaron 108 pozos de observación en toda el área de drenaje subterráneo, ubicando 5 pozos por espaciamiento con sus respectivas repeticiones. La profundidad del manto freático fue medida en dichos pozos de observación con sonda acústica y cinta métrica (Figura 18).



**Figura 18.** Medición de la profundidad del manto freático en los pozos de observación.

La fluctuación del manto freático fue estudiada a través del tiempo y espacio. Las cargas hidráulicas de los diferentes espaciamentos del sistema de drenaje se analizaron con hidrogramas y análisis de regresión múltiple en función de otros factores hidrológicos para cada espaciamento.

#### 3.3.4.2.7. Descarga de drenes (coeficiente de drenaje)

La variable descarga de drenes se evaluó utilizando tres instrumentos de medición: a) Aforos con cubos de volumen conocido y cronómetro, b) Registradores de descarga (automáticos y sensores) instalados a la salida de los drenes (Figura 19) y c) Vertedores rectangulares. El flujo del agua subterránea en el sistema de drenaje fue evaluado con un análisis de hidrogramas de descargas de drenes expresado como coeficiente de drenaje ( $\text{mm día}^{-1}$ ). Se analizó con técnicas de regresión múltiple y simple.



Figura 19. Medición de la descarga de los drenes con el aforador de sensores.

#### 3.3.4.2.8. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica del suelo se estimó por el método de la relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes y la descarga de los drenes (coeficiente de

drenaje) (Pissani,1975). Se analizó con los modelos de Boussinesq y Hooghoudt los cuales son expresados por las ecuaciones siguientes:

Modelo de Boussinesq:

$$\frac{s}{h} = \frac{3.46K}{L^2} h \quad (21)$$

donde:

s = descarga de drenes (mm día<sup>-1</sup>).

h = carga hidráulica en el punto medio (mm).

K = conductividad hidráulica (m día<sup>-1</sup>).

L = espaciamiento entre drenes (m).

Modelo de Hooghoudt:

$$s = \frac{8K_2 dh}{L^2} + \frac{4K_1 h^2}{L^2} \quad (22)$$

donde:

s = descarga de drenes (mm día<sup>-1</sup>).

K<sub>1</sub> = conductividad hidráulica del suelo sobre el nivel de los drenes (m día<sup>-1</sup>).

K<sub>2</sub> = conductividad hidráulica del suelo bajo el nivel de los drenes (m día<sup>-1</sup>).

d = estrato equivalente (m).

h = carga hidráulica en el punto medio entre drenes (mm).

L = espaciamiento entre drenes (m).

Para la estimación de la conductividad hidráulica se aplicó un análisis de regresión simple, utilizando la relación s/h en función de h; en donde la pendiente de la línea recta equivale:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{3.46K}{L^2} \quad (23)$$

despejando conductividad hidráulica tenemos:

$$K = \frac{L^2 \operatorname{tg} \alpha}{3.46} \quad (24)$$

Para el modelo de Hooghoudt se analizó por regresión lineal simple, determinándose los coeficientes correspondientes:

$$s = \beta_0 h + \beta_1 h^2 \quad (25)$$

donde:

$$\beta_0 = \frac{8K_2 d}{L^2} \quad (26)$$

$$\beta_1 = \frac{4K_1}{L^2} \quad (27)$$

#### 3.3.4.2.9. Espacio poroso drenable

El espacio poroso drenable fue determinado de las evaluaciones directas realizadas en campo, época en que la evaporación es baja. Para calcular la porosidad efectiva se aplicó la relación existente entre las cargas hidráulicas (mm) medido en el punto medio entre drenes y las descargas de drenes como coeficientes de drenaje en (mm día<sup>-1</sup>). Esta variable fue analizada según el modelo propuesto para el balance de agua en la zona saturada (Martínez, 1978):

$$R + S = G + D_r - \mu \Delta h \quad (28)$$

donde:

R= cantidad de agua percolada (mm).

S= cantidad de infiltración (mm).

G= carga por efecto de capilaridad (mm).

$D_r$ = cantidad de agua drenada (mm).

$\mu$ = espacio poroso drenable ( $\text{mm mm}^{-1}$ ).

$\Delta h$ = decremento de carga hidráulica en el punto medio de drenes (mm).

De acuerdo a las condiciones ambientales de la zona y del proceso de drenaje, cuando la infiltración cesa, la percolación tiende a ser cero; en este momento el contenido de humedad en la zona radicular es cercano a la capacidad de campo y la carga hidráulica capilar es insignificante por la baja evaporación existente. Bajo estos supuestos el modelo de balance de agua puede estimar al espacio poroso drenable como:


$$\mu = \frac{D_r}{\Delta h} \quad (29)$$

#### 3.3.4.2.10. Transmisividad

Para el análisis y evaluación del flujo del agua a través de capas semipermeables, se estimó la transmisividad como el producto de la conductividad hidráulica y el espesor del acuífero libre no confinado.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

#### 3.3.4.3. Cultivos

##### 3.3.4.3.1. Maíz (*Zea mays L.*).

El cultivo fue establecido en los lotes C-7 y D-6, en el primero se cubrieron los cinco espaciamientos de drenaje (10, 20, 30, 35 y 50 m) abarcando un total de 4 ha; en el segundo lote se sembró solamente en el espaciamiento de 30 m. Figuras 12 y 14. La siembra se realizó el 14 de Julio de 1996 utilizando el híbrido A-775. Las labores de cultivo

realizadas fueron barbecho, rastreo, control de malezas, control de plagas y fertilización. Para esta última actividad se utilizaron 86 unidades de nitrógeno en dos aplicaciones, la mitad al momento de la siembra utilizando como fuente el fertilizante triple 17 y el resto a los 52 días, utilizando como fuente urea. 40 unidades de fósforo y 40 unidades de potasio se aplicaron al momento de la siembra, la aplicación del fertilizante se realizó por planta. El rendimiento de grano ( $\text{Kg ha}^{-1}$ ) se evaluó por espaciamiento.

#### 3.3.4.3.2. Caña de azúcar (*Saccharum officinarum*).

El cultivo de caña de azúcar variedad Mex 69-290, se estableció en Julio de 1995 en el lote C-6 en el espaciamiento de 30 m y en el lote D-6 en el espaciamiento de 40 m (Figuras 11 y 14). La preparación del terreno consistió en barbecho y rastra. La siembra fue a doble cordón con punta y cola encontrados. Se utilizaron doce toneladas de semilla para obtener una densidad de siembra de 115,000 yemas por hectárea aproximadamente, la semilla se sometió a un tratamiento preemergente a base de cal hidratada para prevenir enfermedades fungosas y acelerar la germinación. La dosis de fertilización fue de 160-80-80. El rendimiento ( $\text{t ha}^{-1}$ ) se evaluó en los ciclos de plantilla y soca; además, se consideraron los antecedentes históricos de rendimientos de los ciclos agrícolas 1992, 1993 y 1994 en los diferentes espaciamientos del módulo de drenaje.

#### 3.3.4.4. Balance de agua

Tomando en consideración la época en que se llevó a cabo el trabajo, el modelo del balance de agua fue considerado como un método directo para estimar la evapotranspiración potencial:

$$P + G + S = E + R + \Delta w \quad (30)$$

donde:

P = cantidad efectiva de precipitación (mm)



$G$  = cantidad de agua capilar aportada (mm)

$E$  = cantidad de agua evaporada (mm)

$R$  = cantidad de agua percolada (mm)

$S$  = cantidad de agua escurrida subsuperficialmente (mm)

$\Delta w$  = cambio en el contenido de agua almacenada (mm)

Cuando inicia el período de recesión, el manto freático decrece paulatinamente, en este proceso la evaporación es pequeña y el contenido de humedad es cercano a capacidad de campo, por lo que la cantidad de agua capilar puede considerarse nula ( $G=0$ ), por lo tanto la percolación neta ( $R_n$ ):

$$R_n = R - G \quad (31)$$

$$R_n = R \quad (32)$$

Si se considera que una fracción del agua percolada se pierde por efecto de drenaje natural y artificial en la zona saturada entonces:

$$R_n = D_{ra} + \mu \Delta h \quad (33)$$

donde:

$D_{ra}$  = drenaje artificial (mm)

$\mu$  = espacio poroso drenable (%)

$\Delta h$  = cambio en el manto freático (carga hidráulica, mm)

Cuando el proceso de percolación ocurre y el valor es alto por efecto de lluvias intensas, entonces el contenido de humedad en la zona no saturada corresponde aproximadamente a capacidad de campo, por lo que la relación entre el contenido de humedad ( $\Delta w$ ) es insignificante para el período considerado, entonces:

$$P = E + D_{ra} + S \quad (34)$$

### 3.4. Tercera etapa

#### 3.4.1. Modelos

Cuando se requiere generar modelos para conocer los procesos que ocurren dentro del suelo y sus relaciones con el medio ambiente, es necesario categorizar por medio de técnicas estadísticas.

Para la generación de modelos y la predicción de la relación entre la descarga de drenes en función de las variables: carga hidráulica, conductividad hidráulica, transmisividad, precipitación pluvial, evaporación y temperatura del suelo a 0, 10, 20 y 50 cm de profundidad; se utilizaron técnicas de regresión lineal simple y múltiple por el método de selección del modelo de stepwise. Este mismo proceso fue aplicado para modelar la relación entre la carga hidráulica en función de la descarga de drenes, conductividad hidráulica, transmisividad, precipitación pluvial, evaporación y temperatura del suelo a 0, 10, 20 y 50 cm de profundidad.

Para seleccionar las variables independientes que presentaron significancia estadística en la formulación del modelo matemático que describe la relación funcional entre la variable coeficiente de drenaje y las variables carga hidráulica, conductividad hidráulica, transmisividad, precipitación pluvial, evaporación, temperatura de suelo a 0, 10, 20 y 50 cm de profundidad, se utilizó el procedimiento de técnicas de regresión múltiple por el método de selección del modelo de stepwise.

La generación del modelo de predicción de la carga hidráulica ( $h$ ), en función del espaciamiento entre drenes subterráneos se realizó con la transformación de los datos de  $h$  a  $x + 1$  para estabilizar de esta manera la varianza de los datos con mayor eficacia (Snedecor y Cochran, 1967). Los mismos datos fueron analizados mediante diseño experimental completamente al azar tomando como repetición las observaciones diarias; los tratamientos fueron los espaciamientos y la variable respuesta cargas hidráulicas en el punto medio entre drenes. La significancia estadística entre tratamientos promovió la evaluación de comparación de medias por el método de Tukey.

El comportamiento del modelo fue probado con procedimientos estadísticos de análisis de varianza, prueba de  $t$  para definir las hipótesis de igualdad de los coeficientes de

regresión, pruebas de grado de funcionalidad del modelo y  $R^2_{ajustada}$ . Se compararon los valores predictivos de coeficientes de drenaje, contra los valores observados en campo utilizando prueba de medias con dos poblaciones por el método de mínimos cuadrados. Se usó el coeficiente de correlación múltiple parcial para describir la relación total que existe entre una variable dependiente y dos o más independientes, controlando el efecto de otras variables.

Para el proceso de modelación, se utilizaron los datos de campo del espaciamiento de 30 m entre drenes del Lote D-5 por presentar homogeneidad y porque en investigaciones realizadas dentro del módulo de drenaje, se han encontrado las mejores respuestas de rendimiento en los cultivos de maíz, caña de azúcar y chile.



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Primera etapa

#### 4.1.1. Variables climatológicas

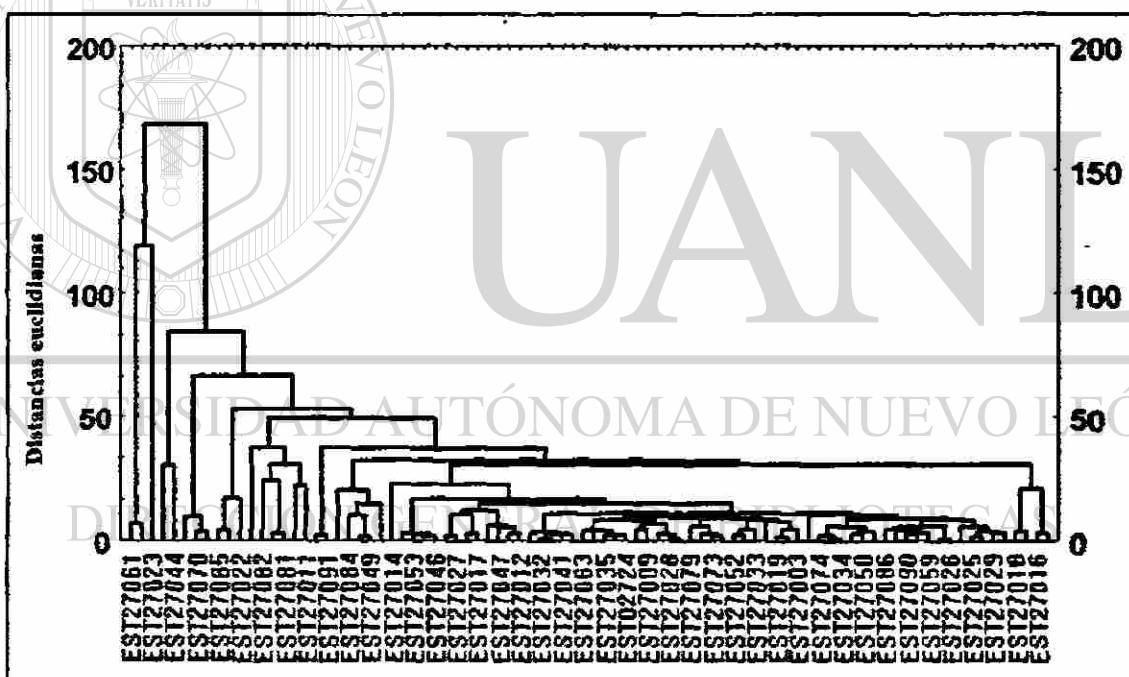
##### 4.1.1.1. Promedio de lluvias diarias del mes más lluvioso

En la Planicie Aluvial Tabasqueña la precipitación promedio máxima diaria del período más lluvioso generalmente se presenta en el mes de septiembre variando en el espacio y en el tiempo de acuerdo con el patrón general de circulación atmosférica y factores locales, considerándose a este período como el más crítico al producir daños fisiológicos a los cultivos y pérdidas económicas por el exceso de lluvias. La precipitación promedio diaria del mes de septiembre presenta espacialmente valores más uniformes a lo largo de la Planicie Aluvial (11 mm), mientras que en la cercanía de la región orográfica de la Sierra Madre de Chiapas reciben precipitaciones diarias de hasta 24.34 mm (Cuadro A1), debido a efectos orográficos; sin embargo, el valor normal o promedio de lluvias diarias del mes más lluvioso para el Estado es de 12.09 mm y 11.53 mm de acuerdo a las estimaciones por los métodos de isoyetas y media aritmética respectivamente (Cuadro 2).

En base al dendograma de las estaciones meteorológicas del Estado de Tabasco (Figura 20), dos grupos fueron formados a un nivel, con un índice de similitud de 116.6; quedando ubicado un grupo dentro de la Planicie Aluvial y el otro en las estribaciones de la Sierra Madre de Chiapas. El grupo uno asoció la mayoría de las estaciones meteorológicas con bajos índices de similitud, lo que indicó que existe mayor grado de similitud entre estas estaciones (Frontera: Alvaro Obregón, 27016; Miramar: Centla, 27085) por efecto de distribución espacial del promedio de lluvias diarias del mes de septiembre. Estas estaciones meteorológicas se localizan en la parte noreste y centro del Estado y son representativas de las condiciones de longitud y homogeneidad de la serie climática de la Planicie Aluvial Tabasqueña.

**Cuadro 2.** Promedio espacial de la lluvia. Mes de Septiembre. Método de las isoyetas y media aritmética para el Estado de Tabasco.

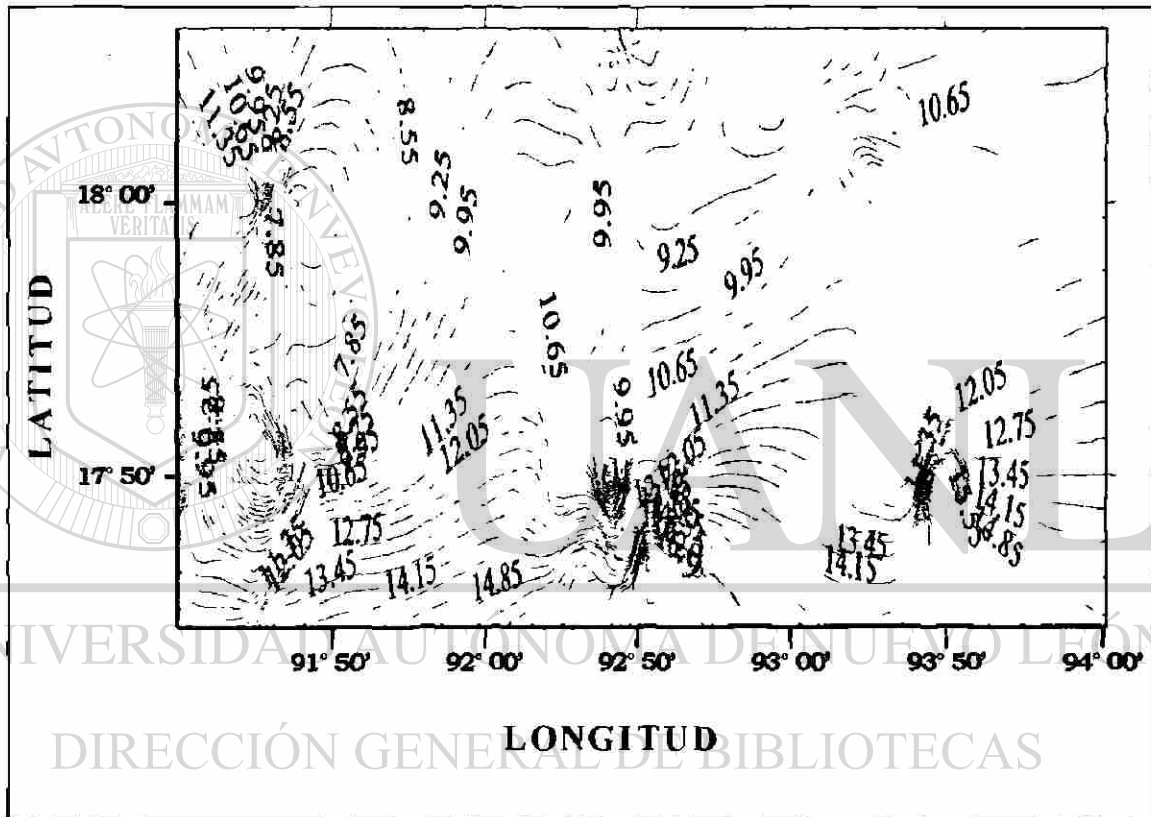
Isoyeta	Lluvia entre isoyeta (mm)	Área (Km) <sup>2</sup>	Lluvia Ponderada (mm)
1	6	148.78	0.036
2	7	241.77	0.068
3	8	464.95	0.150
4	9	1952.79	0.712
5	10	3050.07	1.236
6	11	3961.44	1.766
7	12	6788.28	3.303
8	13	2529.33	1.333
9	14	2306.15	1.309
10	15	1078.68	0.656
11	16	557.94	0.361
12	17	520.74	0.358
13	18	464.95	0.339
14	19	409.15	0.315
15	20	185.98	0.150
Lluvia ponderada			12.09 mm
Media aritmética			11.53 mm



**Figura 20.** Dendrograma de estaciones meteorológicas del Estado de Tabasco, basándose en distancias euclidianas como índice de similitud.

El grupo dos fusiona las estaciones meteorológicas que se encuentran adyacentes a la región orográfica de la Sierra Madre de Chiapas (Oxolotán: Tacotalpa, 27070; Teapa: Puyacatengo, 27061; Teapa: Teapa, 27044) y se ubican al sur del Estado; estas estaciones reflejan las series climáticas típicas del trópico húmedo lluvioso con condiciones buenas de longitud y homogeneidad en sus datos.

Concordando con Myers (1994), se sustenta que la interpolación con la técnica Kriging favorece ordinariamente la estimación de valores en aquellos sitios donde no se tomaron datos o muestras, lo que concuerda con los resultados obtenidos de las lluvias promedios diarios del mes de Septiembre para el Estado de Tabasco, los cuales no exhibieron substancial fluctuación estructural en la variabilidad espacial temporal. El mapa de isoyetas representa la distribución espacial multidimensional de la variable promedio de lluvias diarias del mes más lluvioso (Figura 21).



**Figura 21.** Distribución espacial temporal de la lluvia promedio diaria del mes más lluvioso (Septiembre), para la Planicie Aluvial del Estado de Tabasco, México.

#### 4.1.1.2. Precipitación y evaporación media mensual

De las 86 estaciones meteorológicas analizadas del Estado de Tabasco se seleccionaron dos estaciones representativas (para un periodo de 24 años, 1961-1985), una de la Planicie Aluvial Tabasqueña (Samaria-Cunduacán, 27039) ubicada a 18° 01' latitud

norte, 93° 16' longitud oeste y altitud de 12 msnm; temperatura media mensual de 27.2°C; evaporación mensual de 84.29 mm, precipitación del mes más lluvioso 340 mm que equivale a 16.19% con respecto a la precipitación media anual de 2100 mm. Y la otra de la región orográfica de la Sierra de Chiapas (Teapa, 27044) que se localiza a 17° 33' latitud norte, 92° 58' longitud oeste y altitud de 72 msnm; temperatura media mensual de 25.8°C; evaporación mensual de 58.98 mm, precipitación del mes más lluvioso 600 mm que equivalen a 17.14% con respecto a la precipitación media anual de 3500 mm. En función de los climogramas de Gausson (Figuras 22 y 23) para ambas estaciones se pueden distinguir tres periodos estacionales durante el año: Período muy húmedo, de junio a octubre que en el bimestre septiembre-octubre presenta las máximas precipitaciones promedio (650 a 1100 mm, que representan una lámina del 31% con respecto a la lámina total anual); El periodo húmedo de noviembre-enero, durante la cual se presentan lluvias de tipo ciclónico con baja intensidad y duración prolongada y el de estiaje o seco, de febrero-mayo con lluvias menores de 40 hasta 100 mm, que están por debajo de la demanda evaporativa de la atmósfera.

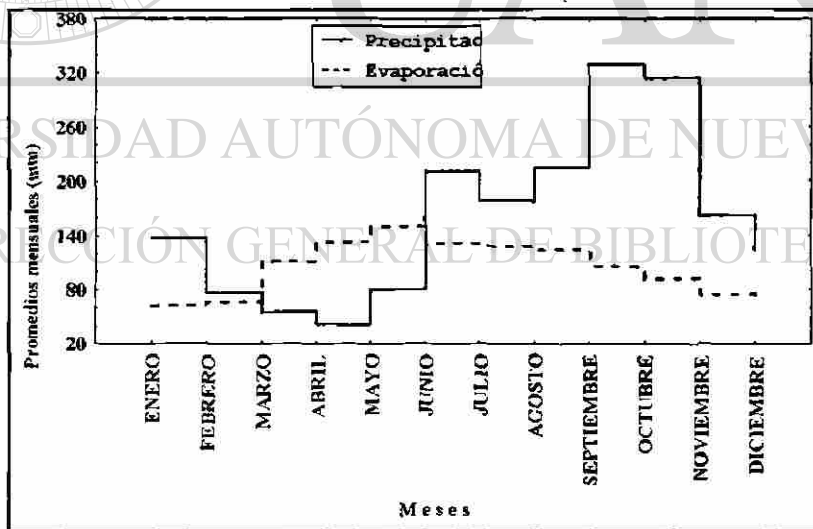


Figura 22. Climograma de Gausson. Estación meteorológica Samaria-Cunduacán (27039).

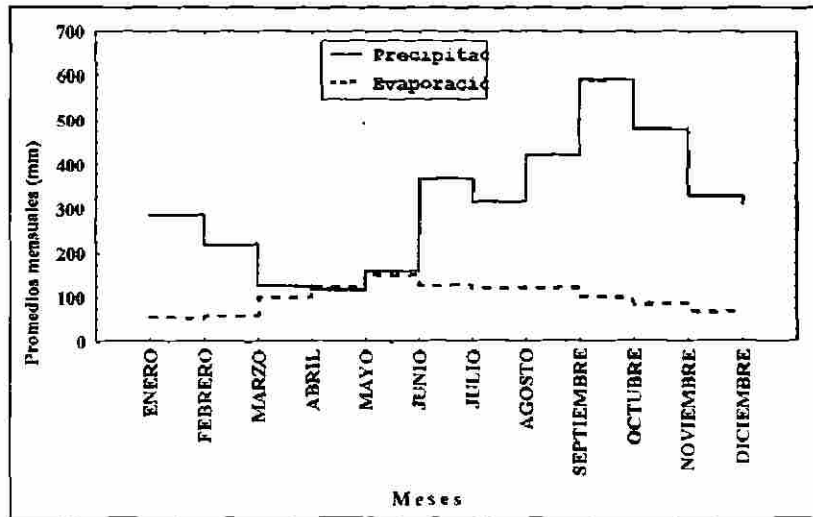


Figura 23. Climograma de Gausсен. Estación meteorológica Teapa (27044).

#### 4.1.1.3. Lluvia de diseño

El análisis de frecuencias de información hidrológica relaciona la magnitud de los eventos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad.

Los registros diarios del mes más lluvioso (Septiembre) para el Estado de Tabasco presentan periodos de recurrencia que varían entre 1 y 24 años.

Chow *et al.* (1994) considera que el periodo de retorno debe ser de 10 años como mínimo, para diseñar y operar sistemas de control de humedad con fines de producción agrícola. Tomando como base el rango de precipitación promedio (12.09 mm) y periodos de retorno de doce años, el Estado de Tabasco presenta dos categorías de lluvias de diseño: una para aplicarse en la Planicie Aluvial (48.37 mm) y otra para aplicarse en áreas adyacentes de la región orográfica de la Sierra Madre de Chiapas (66.17 mm) (Cuadro 3).

#### 4.1.2. Variables agrohidrológicas

##### 4.1.2.1. Profundidad del manto freático con respecto al nivel del terreno

Los problemas del flujo de agua subsuperficial no pueden solucionarse hasta que se conozca lo que sucede en los límites del sistema de flujo de entrada y salida (Crownover *et al.*, 1995) por lo que la red de pozos de observación se extendió más allá de los límites en estudio (colindancias de Chiapas y Campeche).



**Cuadro 3.** Períodos de retorno y de lluvia de diseño para el Estado de Tabasco: Planicie Aluvial Tabasqueña (48.37 mm) y formación orográfica Sierra Madre de Chiapas (66.17 mm).

Período R. (años)	Lluvia D. (mm)	Período R. (años)	Lluvia D. (mm)
0.04		0.05	
0.24		0.16	
0.73		0.48	
2.0		3.02	
3.0		4.03	
8.0		12.1	66.17
8.0		12.1	
12.0	48.37	12.1	
24.0		12.1	

La distribución espacial de los niveles freáticos suministraron información de velocidad de ascenso y descenso del nivel del agua por efecto de la distribución de los gradientes hidráulicos, encontrándose los valores mas bajos en la parte norte de la planicie, por lo que en estas áreas se presentan valores de conductividad hidráulica relativamente altas con respecto a la zona sur de la Planicie; además se identificaron los períodos críticos para los cultivos por efecto de descarga de aguas superficiales y subsuperficiales ocasionadas por las precipitaciones pluviales. Las isobatas (Figuras 24 y 25) permitieron delimitar zonas con diversos grados de problemas de drenaje, determinándose que un 35% de la Planicie Aluvial Tabasqueña cuenta con mantos freáticos elevados (-0.5 a 1.5 m) en el período de máximas lluvias. La Planicie Aluvial presenta topografía y dirección de flujo de agua subterránea en sentido sur-norte, variando el rango de niveles freáticos de pocos centímetros en la parte baja.

#### 4.1.3. Variables edáficas

La estimación de la variabilidad de las propiedades edáficas relacionadas a unidades espaciales georeferenciadas, hacen que las propiedades del suelo se distinguan por causas tales como: procesos de formación (Boul *et al.*, 1980; Trangmar *et al.*, 1985; Rao *et al.*, 1979) y el manejo que reciben (Webster y Olivier, 1992). En función de la base de datos integrada por 91 perfiles de suelo se determinaron los valores promedio, desviaciones estándares y coeficientes de variación para cada una de las variables edáficas que se presentan en el Cuadro 4. La variabilidad espacial temporal presenta estadísticos de

dispersión con valores altos, indicando heterogeneidad entre los suelos de la Planicie Aluvial de Tabasco. Sin embargo, las variables implicadas en el manejo de agua: espesor del estrato, arena, limo, arcilla, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y densidad aparente presentaron menos variación que aquellas variables que involucran aspectos de fertilidad del suelo como es materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, calcio, magnesio, sodio, potasio, fósforo asimilable.

El método estadístico multivariado por componentes principales permitió estimar la estructuración de la variabilidad de las variables edáficas y de esta manera agrupar variables que garantizan la validez de la aplicabilidad del manejo del agua.

**Cuadro 4.** Análisis estadístico de las variables edáficas de los 91 perfiles de suelos de la Planicie Aluvial de Tabasco.

Nombre de la variable	Código	Promedio	Desviación estándar	Coficiente variación (%)
Espesor del estrato	H <sub>z</sub>	43.34 cm	25.56	58.97
Arena	A	38.72 %	22.03	56.89
Limo	L	25.77 %	15.48	60.06
Arcilla	R	34.85 %	16.79	48.17
PH	pH	6.47	1.03	15.91
Materia Orgánica	MO	1.47 %	1.50	102.04
C. Intercambio Catiónico	CIC	21.50 Meq 100 g <sup>-1</sup>	15.79	73.44
Calcio	Ca	12.54 Meq 100 g <sup>-1</sup>	13.18	105.10
Magnesio	Mg	5.190 Meq 100 g <sup>-1</sup>	5.59	107.70
Sodio	Na	0.302 Meq 100 g <sup>-1</sup>	0.44	145.69
Potasio	K	0.334 Meq 100 g <sup>-1</sup>	0.50	149.70
Fósforo asimilable	P	8.71 ppm	13.78	158.20
Capacidad de campo	CC	29.00	11.80	40.68
P. marchitez Permanente	PMP	15.46	7.28	47.08
Densidad Aparente	Da	1.25 g cm <sup>-3</sup>	0.45	36.00

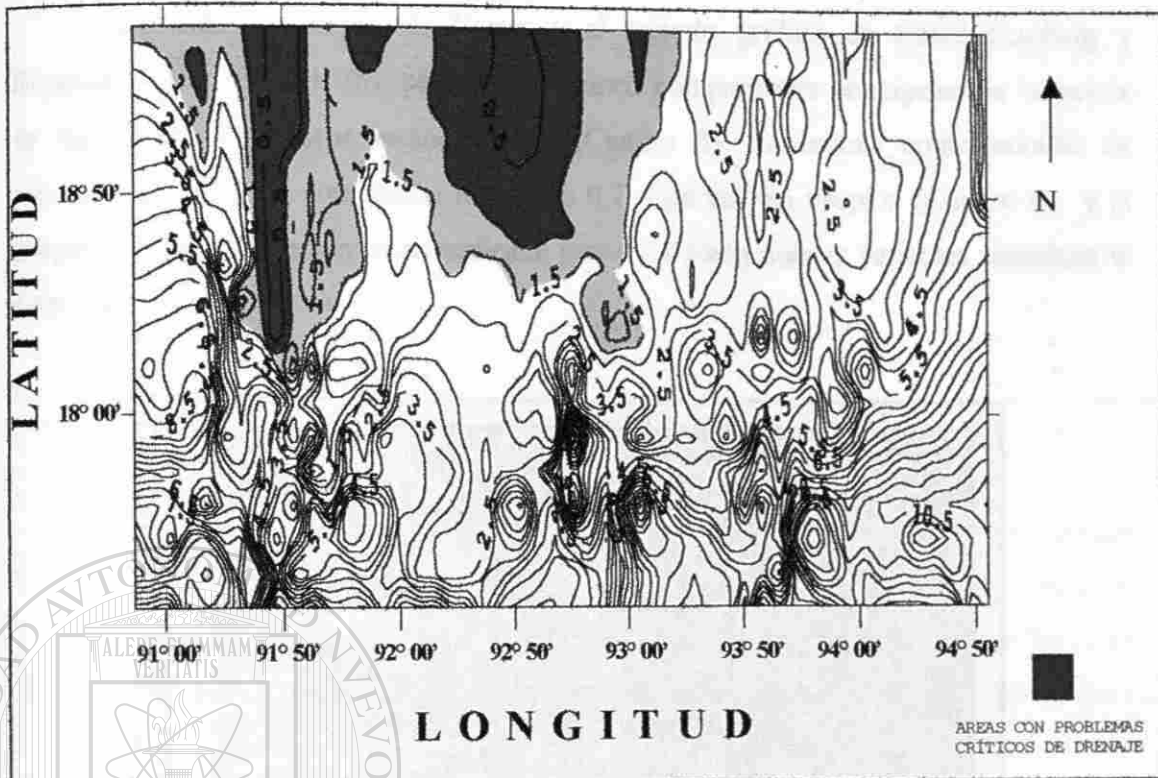


Figura 24. Mapa de isobatas del mes de septiembre. Planicie Aluvial Tabasqueña.

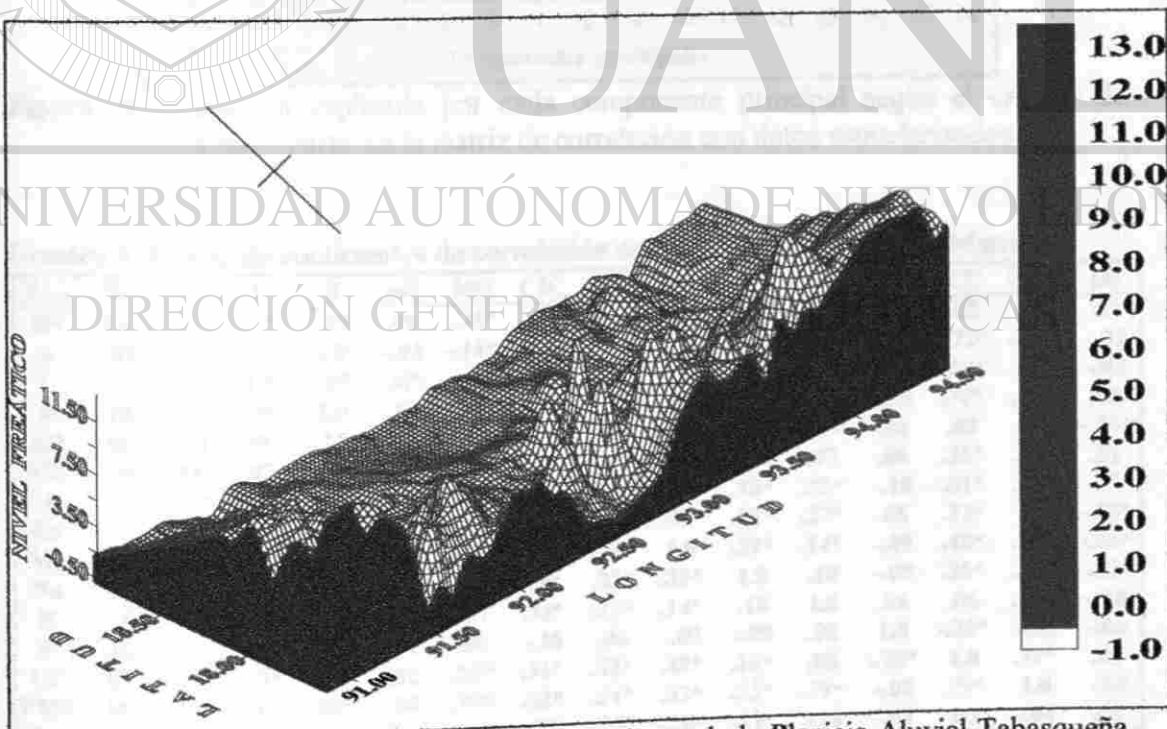


Figura 25. Distribución espacial del mapa de isobatas de la Planicie Aluvial Tabasqueña (vista tridimensional).

Aplicando el criterio de Kaiser y el método gráfico de Cattell (Ludwig y Reynolds, 1988) (Figura 26); se definieron cinco componentes principales de la matriz de correlación con datos estandarizados (Cuadro 5); tomándose como criterio de selección un valor de correlación mayor de 0.7. Los valores propios (Cuadro 6) y la proporción de la variación total explicada por estas cinco nuevas variables sintetizan el 84.67 %.

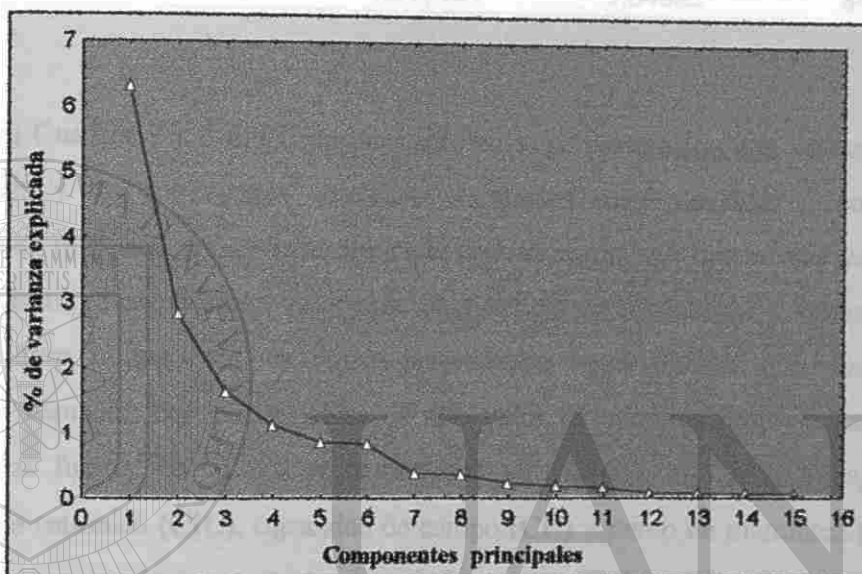


Figura 26. Variación explicada por cada componente principal según el criterio de Cattell, a partir de la matriz de correlación con datos estandarizados.

Cuadro 5. Matriz de coeficientes de correlación con datos estandarizados (Matriz R).

Vars	Hz	A	L	R	pH	MO	CIC	Ca	Mg	Na	K	P	CC	PMP	Da
Hz	1.0	-.05	.05	.10	.06	-.35*	.11	.14*	.10	.12	.05	-.01	.05	.06	.02
A	-.05	1.0	-.57*	-.68*	-.04	-.14*	-.39*	-.30*	-.32*	-.10	-.01	.08	-.72*	-.61*	-.02
L	.05	-.57*	1.0	-.05	.30*	.07	.15*	.39*	.20*	.06	.07	-.07	.29*	.20*	-.03
R	.10	-.68*	-.05	1.0	-.24*	.14*	.39*	.06	.25*	.08	-.05	-.08	.74*	.68*	.08
pH	.06	-.04	.30*	-.24*	1.0	-.07	.22*	.52*	.26*	.23*	.19*	.04	.02	.08	-.26*
MO	-.35*	-.14*	.07	.14*	-.07	1.0	.10	.05	.07	-.04	.07	.06	.22*	.19*	.01
CIC	.11	-.39*	.15*	.39*	.22*	.10	1.0	.68*	.61*	.38*	.33*	-.10	.61*	.62*	-.27*
Ca	.14*	-.30*	.39*	.06	.52*	.05	.68*	1.0	.53*	.23*	.27*	.06	.32*	.34	-.28*
Mg	.10	-.32*	.20*	.25*	.26*	.07	.61*	.53*	1.0	.39*	.14*	-.09	.48*	.52*	-.24*
Na	.12	-.10	.06	.08	.23*	-.04	.38*	.23*	.39*	1.0	.10	-.09	.26*	.33*	-.32*
K	.05	-.01	.07	-.05	.19*	.07	.33*	.27*	.14*	.10	1.0	.06	.06	.19*	-.10
P	-.01	.08	-.07	-.08	.04	.06	-.10	.06	-.09	-.09	.06	1.0	-.20*	-.02	-.04
CC	.05	-.72*	.29*	.74*	.02	.22*	.61*	.32*	.48*	.26*	.06	-.20*	1.0	.79*	.03
PMP	.06	-.61*	.20*	.68*	.08	.19*	.62*	.34*	.52*	.33*	.19*	-.02	.79*	1.0	-.04
Da	.02	-.02	-.03	.08	-.26*	.01	-.27*	-.28*	-.24*	-.32*	-.10	-.04	.03	-.04	1.0

**Cuadro 6.** Valores propios y proporción de la variación explicada por los cinco componentes principales a partir de la matriz de correlación.

Componentes principales	Valor propio	Valor propio acumulado	Proporción de la varianza total explicada.	
			Absoluta %	Acumulada %
1º	6.300201	6.300201	42.00134	42.00134
2º	2.820429	9.12063	18.80286	60.80420
3º	1.626495	10.74712	10.84330	71.64750
4º	1.106393	11.85352	7.37595	79.02345
5º	0.847324	12.70084	5.64882	84.67227

Los Cuadros 7 y 8 muestran los coeficientes de correlación con varianza máxima normalizada y los coeficientes vectoriales existentes entre variables y componentes, apreciándose que cada componente principal está asociado con una o más variables, las cuáles están representadas con valores de coeficientes de correlación y vectores propios altos, positivos o negativos, en donde las combinaciones lineales entre componentes reflejan la variación con las variables de alto valor de vectores propios. Las variables identificadas fueron: en el primer componente; arena (A), arcilla (R), capacidad de intercambio catiónico (CIC), capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP); en el segundo componente, densidad aparente (Da) y sodio (Na); para el tercer componente, espesor del estrato (Hz) y materia orgánica (MO); para el cuarto componente, limo (L) y el quinto componente se asocia con potasio (K). Por lo que se infiere que las variables con valores de vectores propios altos o correlaciones altas en los tres primeros componentes (A, R, CIC, CC, PMP, Da, Na, Hz, MO) están vinculados estrechamente con la capacidad de retención de humedad del suelo independiente de la presión potencial total en que se encuentre el agua.

**Cuadro 7. Coeficientes de correlación de los cinco componentes principales y las variables edáficas con el método de varianza máxima normalizada ( $r > 0.7$ ).**

Variable	Componente principal 1	Componente principal 2	Componente principal 3	Componente principal 4	Componente principal 5
Hz	0.101301	0.010692	0.925697*	0.010114	-0.020872
A	-0.885629*	-0.003513	0.053073	-0.379475	0.072098
L	0.338044	0.038628	-0.027463	0.884043*	-0.067626
R	0.948220*	-0.043774	-0.028857	-0.133059	-0.093915
pH	-0.250457	0.568727	0.087239	0.669089	0.133630
MO	0.264546	-0.091734	-0.878947*	-0.015964	0.018783
CIC	0.710127*	0.585790	0.011793	0.191026	0.161267
Ca	0.334074	0.581329	0.066425	0.601030	0.250723
Mg	0.600092	0.640289	0.015289	0.259301	-0.014026
Na	0.260723	0.843950*	0.118836	-0.014897	-0.171477
K	0.054644	0.293597	0.017235	0.096553	0.774914*
P	-0.374136	-0.257148	-0.095027	-0.090809	0.543408
CC	0.937115*	0.165881	-0.082364	0.147917	-0.122848
PMP	0.922148*	0.253574	-0.077632	0.086688	0.004174
Da	0.019015	-0.847028*	0.017738	-0.159166	-0.256486
Var. expl.	4.856548	3.100312	1.682837	1.928758	1.132385
Prop. tot.	0.323770	0.206687	0.112189	0.128584	0.075492

**Cuadro 8. Coeficientes vectoriales de los cinco componentes principales con el método de varianza máxima normalizada y utilizando la matriz de correlación.**

Variables	Vectores propios				
	1°	2°	3°	4°	5°
Hz	0.095325	-0.100897	0.585873	-0.014187	0.079281
A	-0.197545	0.184214	-0.024102	-0.203297	-0.025585
L	-0.008401	-0.222481	-0.011902	0.623861	-0.108799
R	0.269689	-0.090107	0.053191	-0.171931	0.072561
pH	-0.180656	0.130605	-0.018710	0.371379	-0.068172
MO	0.022458	0.008856	-0.519729	-0.006457	-0.002156
CIC	0.134148	0.135699	0.015637	-0.084805	0.147778
Ca	0.006849	0.058195	0.024525	0.249832	0.147914
Mg	0.061701	0.195720	-0.013810	-0.020079	-0.067610
Na	-0.050650	0.432676	-0.007868	-0.227767	-0.289005
K	0.093484	-0.031489	0.057177	-0.077559	0.743919
P	0.015072	-0.161566	-0.009854	-0.018218	0.551704
CC	0.203567	-0.036508	-0.008967	-0.008989	-0.031708
PMP	0.214727	0.000651	-0.003404	-0.086534	0.086014
Da	0.089597	-0.357371	0.077332	0.109735	-0.078585

En el primer componente las variables arcilla, capacidad de intercambio catiónico, capacidad de campo y punto de marchitez permanente forman un contraste

con la variable arena, ya que las primeras presentan valores de correlación altos y positivos mientras que la segunda tiene valor de correlación alto pero negativo, lo que significa que el valor del primer componente aumentará si aumenta el contenido de arcilla y por lo tanto tenderá a incrementar la capacidad de retención de agua del suelo. Para el componente principal dos contribuyen más las variables sodio y densidad aparente. Interpretando la estructura general del CP2 se aprecia que para las condiciones de la Planicie Aluvial el contenido de sodio en los suelos contrasta con la cantidad de masa del suelo seco por unidad de volumen, debido a que el sodio presenta un efecto adverso en el proceso de retención de humedad cuando el suelo presenta mayor contenido de arcilla expandible (Van Der Molen, 1978). El componente principal tres está conformado principalmente por espesor del horizonte y materia orgánica; ambos están correlacionados en forma contrastante ya que a medida que el espesor del horizonte aumenta, el contenido de materia orgánica disminuye. Desde el punto de vista de física del suelo, la materia orgánica influye en la formación y estabilidad de los agregados. La agregación lleva consigo un incremento en la porosidad lo cual significa una mayor aireación, mejor infiltración, percolación, prevención de escorrentía y erosión. Además, la alta capacidad de adsorción de agua por el humus da lugar a un aumento de la capacidad de retención de humedad del suelo (Van Beers, 1978). Para el cuarto y quinto componente principal solo existe efecto de las variables limo y potasio, respectivamente.

Las distribuciones espaciales del componente principal 1 con respecto a los otros componentes están representadas en un par de ejes ortogonales (Figuras 27 a 30). El rectángulo unitario ( $-1 \leq r \leq 1$ ) trazado con centro en el origen (0,0) del par de coordenadas, permitió identificar en forma visual las variables que conforman cada uno de los componentes principales.

Con puntos en el espacio se presentan los valores de la matriz original de las variables, arena, arcilla, capacidad de intercambio catiónico, capacidad de campo y punto de marchitez permanente presentando tendencia lineal positiva, mientras que la arena tuvo tendencia lineal negativa (Figura 31).

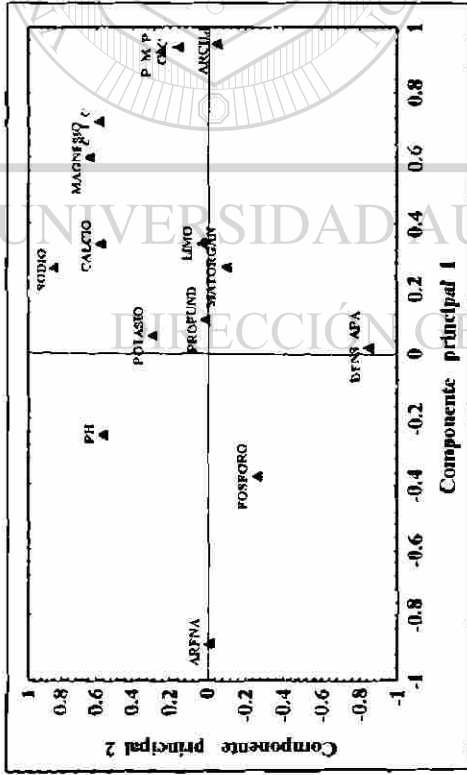


Figura 27. Distribución espacial de las variables edáficas en función del coeficiente de correlación entre el primer y segundo componente principal.

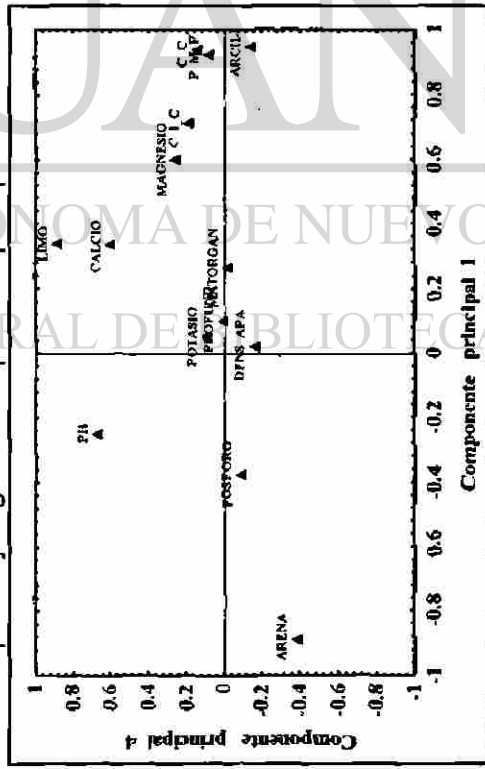


Figura 29. Distribución espacial de las variables edáficas en función del coeficiente de correlación entre el primer y cuarto componente principal.

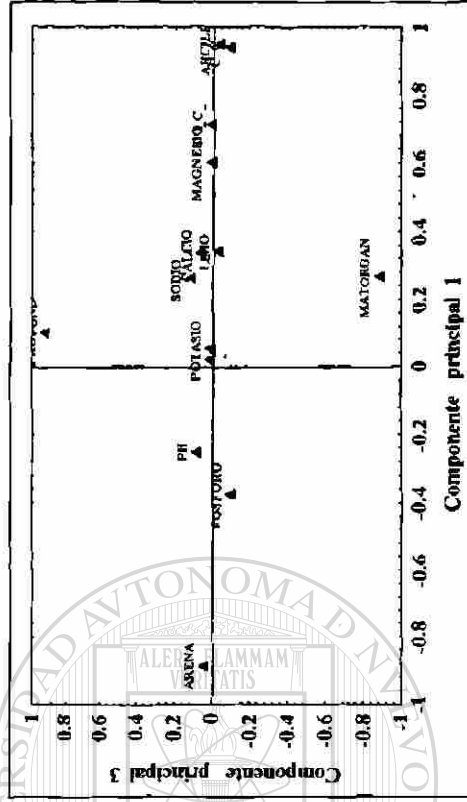


Figura 28. Distribución espacial de las variables edáficas en función del Coeficiente de correlación entre el primer y tercer componente principal.

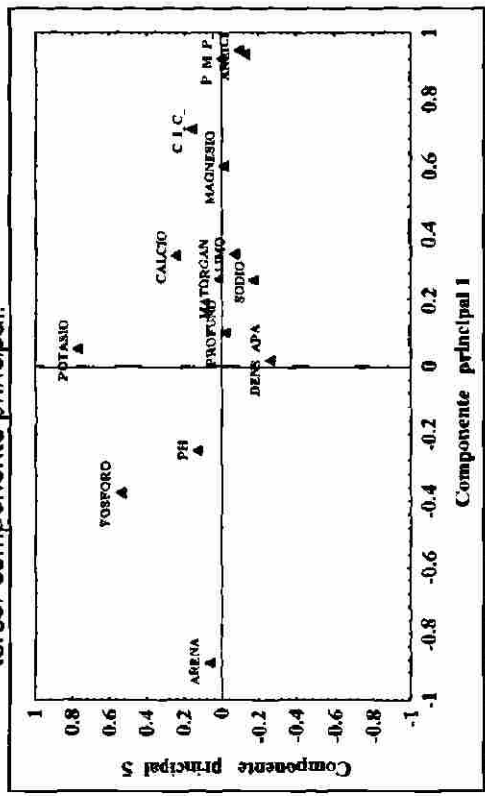


Figura 30. Distribución espacial de las variables edáficas en función del coeficiente de correlación entre el primer y quinto componente principal.



La Figura 32 muestra el diagrama de puntos de las variables sodio y densidad aparente en función del componente principal 2, donde el sodio presentó tendencia lineal positiva, mientras que la densidad aparente se comportó con tendencia lineal negativa.

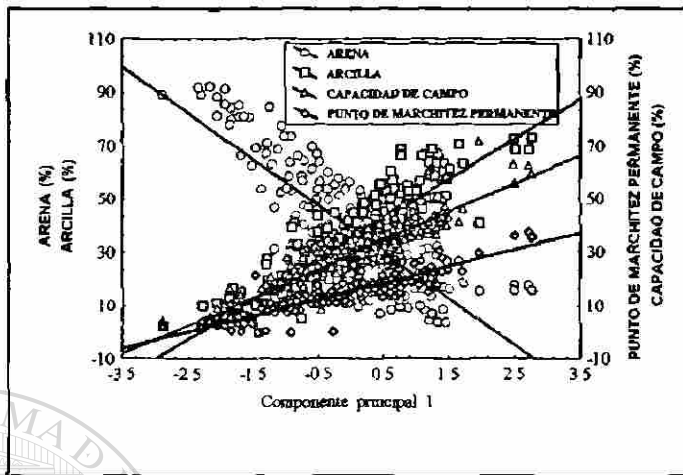


Figura 31. Diagrama de puntos que muestra la distribución y tendencia de los suelos en base a valores propios entre el primer componente principal y las variables identificadas significativamente ( $r > 0.7$ ) dentro del mismo.

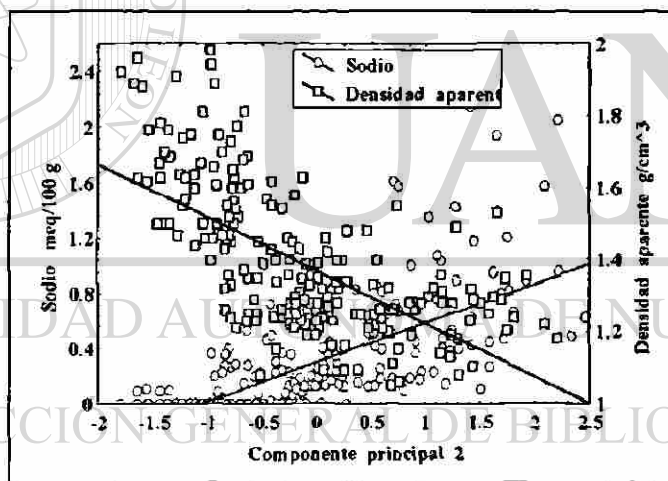


Figura 32. Diagrama de puntos que muestra la distribución y tendencia de los suelos en base a valores propios entre el segundo componente principal y las variables identificadas significativamente ( $r > 0.7$ ) dentro del mismo.

Tomando las variables: espesor del estrato, arena, limo, arcilla, pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, calcio, magnesio, sodio, potasio, fósforo asimilable, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y densidad aparente, el análisis multivariado por conglomerados permitió definir el agrupamiento de los suelos en tres grupos, con un índice de similitud de 0.01, y de acuerdo a la nomenclatura de

taxonomía de suelos FAO-UNESCO (1989), el primer grupo asoció los suelos con mayor grado de similitud de acuerdo a sus características físicas, químicas y fisico-químicas dentro de los Vertisoles. El segundo grupo se ubicó dentro de los Fluvisoles y el tercer grupo en los Gleysoles (Figura 33).

Tomando como base la capacidad de almacenamiento de agua de un suelo de acuerdo a sus características físicas como capacidad de campo, punto de marchitez permanente, espesor de horizontes y densidad aparente; el análisis de correlación y conglomerados dio como resultado que las variables humedad aprovechable y espesor de horizontes presentaron significancia estadística ( $r = 0.69$ ) (Figura 34).

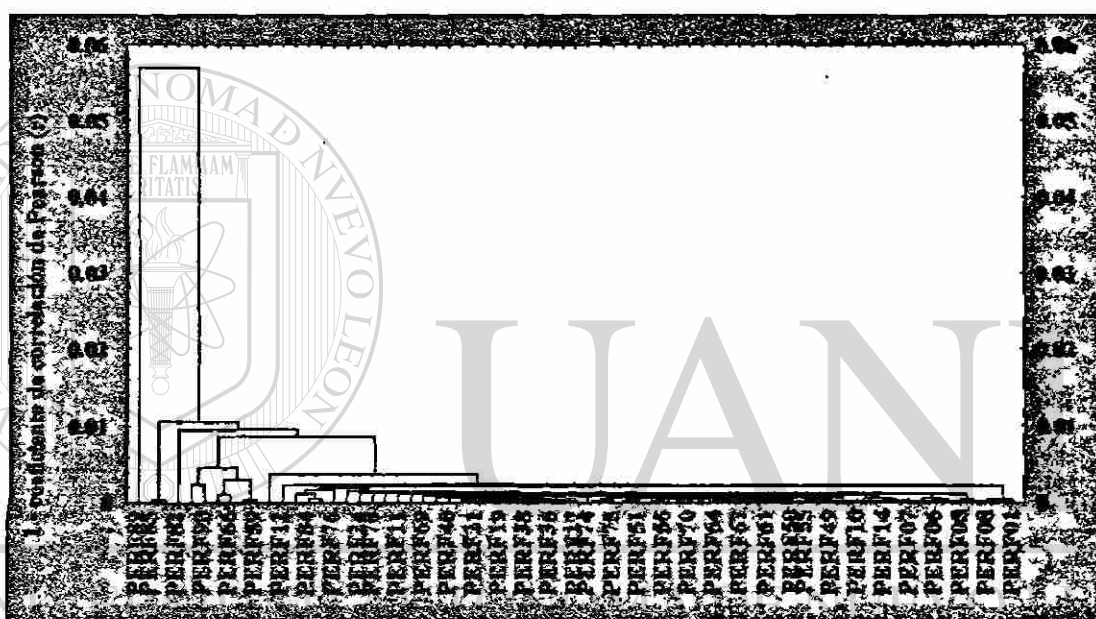


Figura 33. Dendrograma de la clasificación de perfiles de suelos de la Planicie Tabasqueña

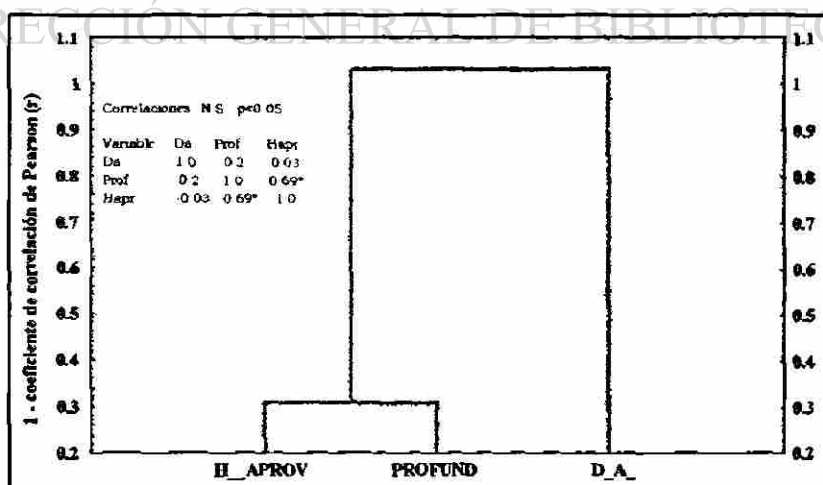


Figura 34. Dendrograma de variables geohídricas de los perfiles de suelos de la Planicie Tabasqueña.

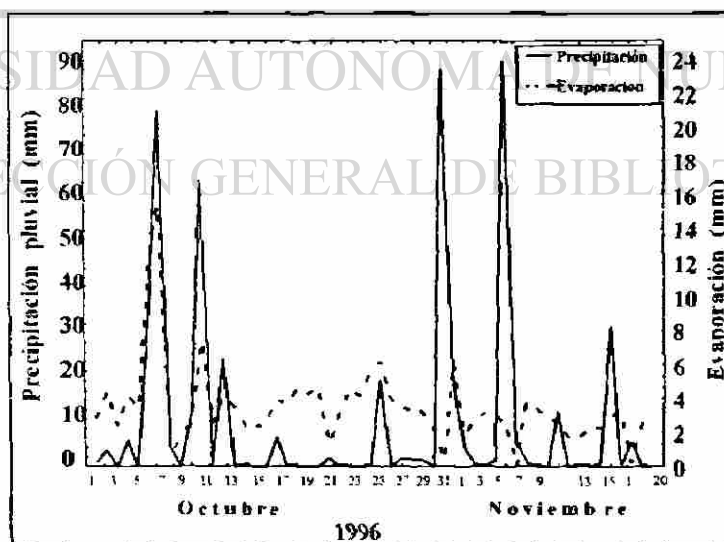
## 4.2. Segunda etapa

### 4.2.1. Variables climatológicas

Las estadísticas descriptivas de las variables climatológicas (estación meteorológica del campo experimental CEICADES) presentan la distribución de la precipitación pluvial, evaporación, humedad relativa, temperaturas máximas y mínimas en función del tiempo, para conocer el comportamiento de dichas variables durante la evaluación del módulo de drenaje (1° de Octubre – 30 de Noviembre de 1996) (Cuadro 9). El valor promedio del mes más lluvioso encontrado (11.8 mm) no difiere significativamente al valor promedio de lluvias diarias del mes más lluvioso (12.09 mm) según el método de isoyetas estimado anteriormente, por lo que, los datos de dicha estación meteorológica presentaron consistencia en longitud y homogeneidad de las series climáticas representativas para la Planicie Aluvial de Tlaxasco (Figuras 35 y 36).

**Cuadro 9.** Estadísticas descriptivas de variables climatológicas del módulo de drenaje.

Variables	Promedio	Mínimo	Máximo	Dev. Estándar
Precipitación (mm)	11.8	0.0	86.0	20.70
Evaporación (mm)	3.48	1.0	15.35	2.44
Humedad relativa (%)	89.55	72.0	98.0	4.66
Temperatura máxima (°C)	31.92	23.0	37.8	3.49
Temperatura mínima (°C)	20.05	14.2	24.0	1.94



**Figura 35.** Relación entre la precipitación pluvial y evaporación durante el periodo de evaluación del módulo de drenaje (10 de Octubre al 20 de Noviembre de 1996).

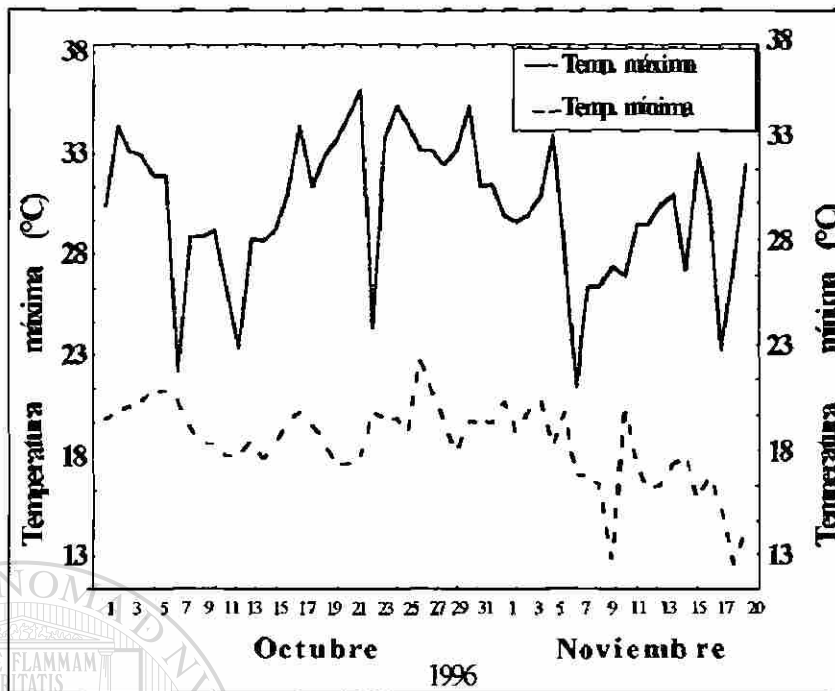


Figura 36. Relación entre temperaturas máximas y mínimas durante el período de evaluación del módulo de drenaje (1o de Octubre al 20 de Noviembre de 1996).

#### 4.2.2. Variables agrohidrológicas y edáficas

Bajo las condiciones topográficas, uso, manejo del suelo y un evento de lluvia de 75.5 mm en el módulo de drenaje en sus diferentes espaciamientos entre drenes (C-6, C-7, D-5 y D-6) se observó que la configuración espacial temporal de curvas de nivel del manto freático con respecto al nivel medio del mar (isohypsas) y al nivel del suelo (isobatas) las líneas van en dirección oeste-este en un rango de 7.6 hasta 8.9 m y el flujo del agua subterránea que es perpendicular a las líneas equipotenciales, fluye en sentido sur-norte (Figura 37).

El plano de isobatas identificó áreas con diferentes niveles freáticos con respecto al nivel del suelo, observándose que las mayores elevaciones se encuentran en las zonas suroeste y sureste en un rango de 25 hasta 40 cm donde no existe drenaje subterráneo; mientras que en la parte norte-centro-sur fluctúa de 0 hasta 10 cm, esta manifestación es debida a la respuesta con los drenes subterráneos en estas áreas (Figura 38).

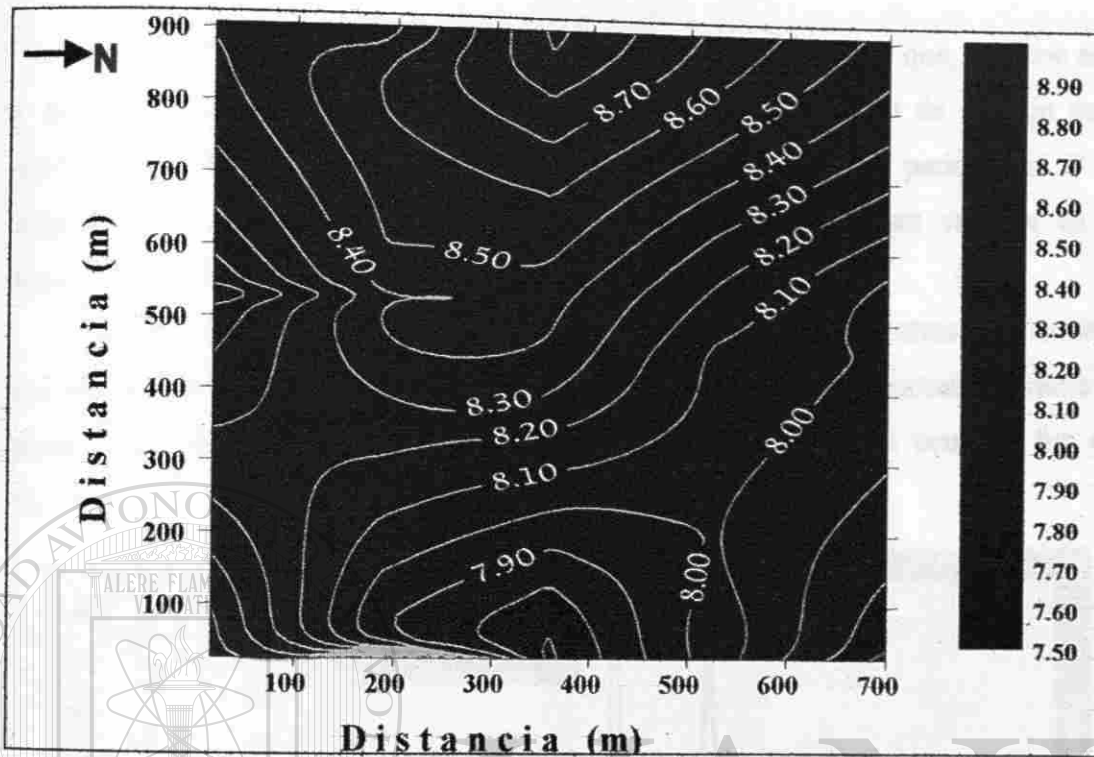


Figura 37. Plano de isohypsas del módulo de drenaje.

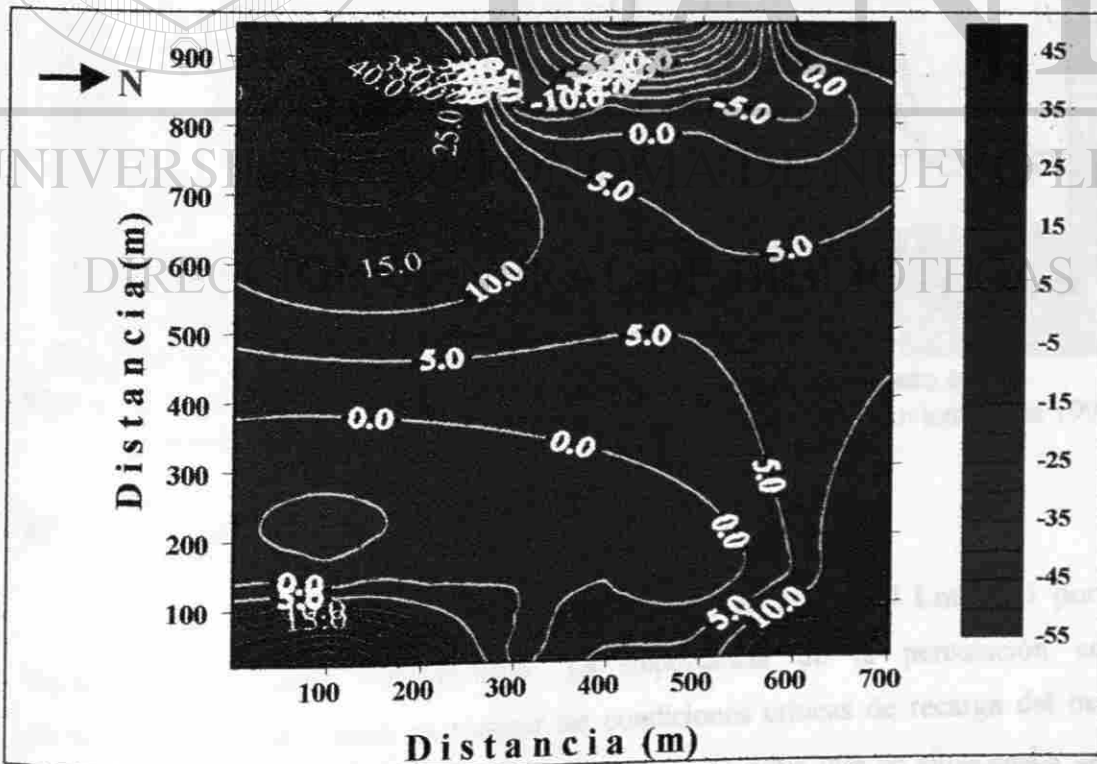


Figura 38. Plano de isobatas del módulo de drenaje.

#### 4.2.2.1. Evaporación del suelo

La evaporación es uno de los componentes del balance de agua que, año con año se evalúa en los diferentes espaciamientos entre drenes del módulo de drenaje para observar su comportamiento; durante la evaluación correspondiente al período del 1° de Octubre al 30 de Noviembre de 1996 se tomaron lecturas de esta variable en el espaciamiento de 20 m del Lote D-5.

La forma para evaluar la evaporación fue por medio de lisímetros que estiman con mayor precisión la pérdida de agua. La cantidad de agua evaporada durante el período de evaluación con respecto a la precipitación pluvial total ocurrida fue del 15.3% (Figura 39).

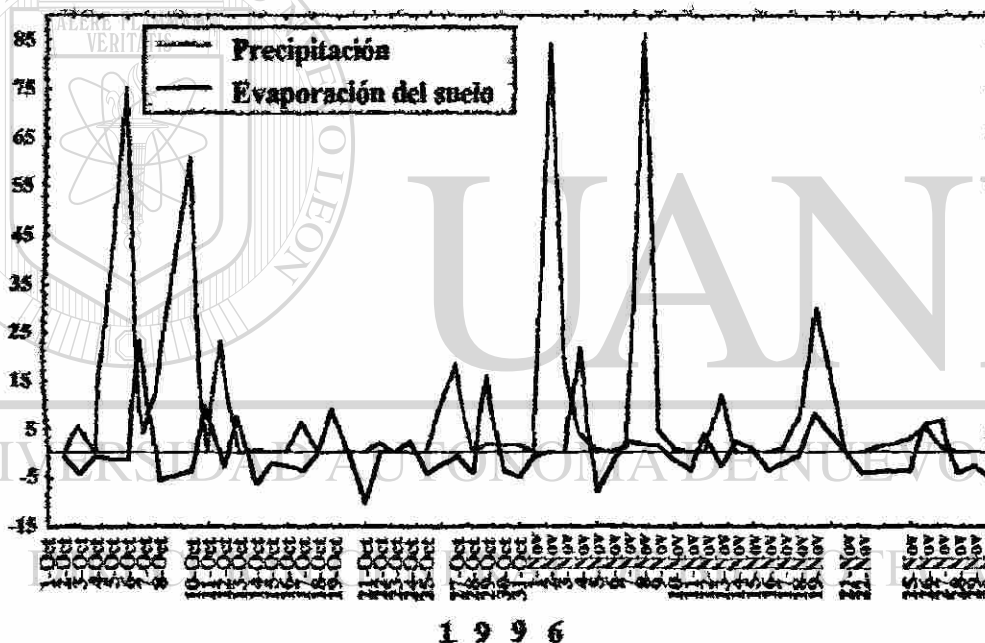


Figura 39. Relación entre la precipitación pluvial y evaporación del suelo en el espaciamiento de 20 m del lote D-5, 1o de Octubre al 30 de Noviembre de 1996.

#### 4.2.2.2. Percolación

La percolación se evaluó en el espaciamiento de 20 m del Lote D-5 por las condiciones explicadas anteriormente. La importancia de la percolación como componente del flujo radica en analizar las condiciones críticas de recarga del manto freático. La percolación se midió como el volumen de agua que se almacenaba en un

depósito ubicado en el fondo de los lisímetros, obteniéndose que el 41.43% del agua total se percola y es desalojada por los drenes subterráneos. En la Figura 40 se puede observar la relación funcional entre el tiempo y la percolación; esta suele variar a lo largo de la época de lluvias ya que depende básicamente de las condiciones de humedad presentes en el suelo.

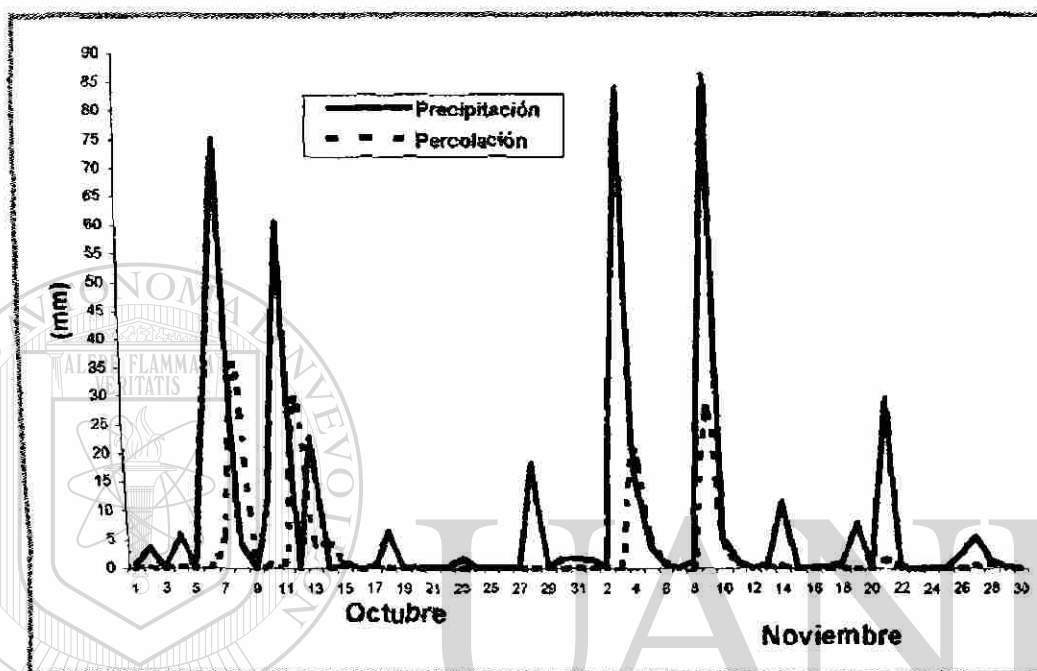


Figura 40. Relación entre la precipitación pluvial y percolación del suelo en el espaciamento 20 m del lote D-5, 1o de Octubre al 30 de Noviembre de 1996.

#### 4.2.2.3. Escorrentía superficial

Cuando la lluvia excedió la capacidad de infiltración se produjeron encharcamientos y escurrimientos en la superficie del suelo. Esta escorrentía fue evaluada durante cuatro períodos de observación en dos áreas de captación: 9 y 36 m<sup>2</sup> en el espaciamento de 20 m del Lote D-5; encontrándose en el balance hídrico, que el 29.73% se pierde por escurrimiento superficial, una vez satisfecha las necesidades de evaporación.

#### 4.2.2.4. Profundidad del estrato impermeable

Para la estimación de la distancia equivalente (profundidades al estrato impermeable) aplicable al modelo de Hooghoudt se muestrearon 31 sitios dentro del

módulo de drenaje (Figura 41). La representación espacial de la profundidad del estrato impermeable mostró que los Lotes C-6 y C-7 ubicados en la porción noroeste y noreste presentaron un rango entre 380 hasta 460 cm; mientras que los lotes D-6 y D-5 localizados en las zonas sureste y suroeste, respectivamente presentaron un rango de 390 hasta 480 cm de profundidad del estrato impermeable con respecto a la superficie del suelo.

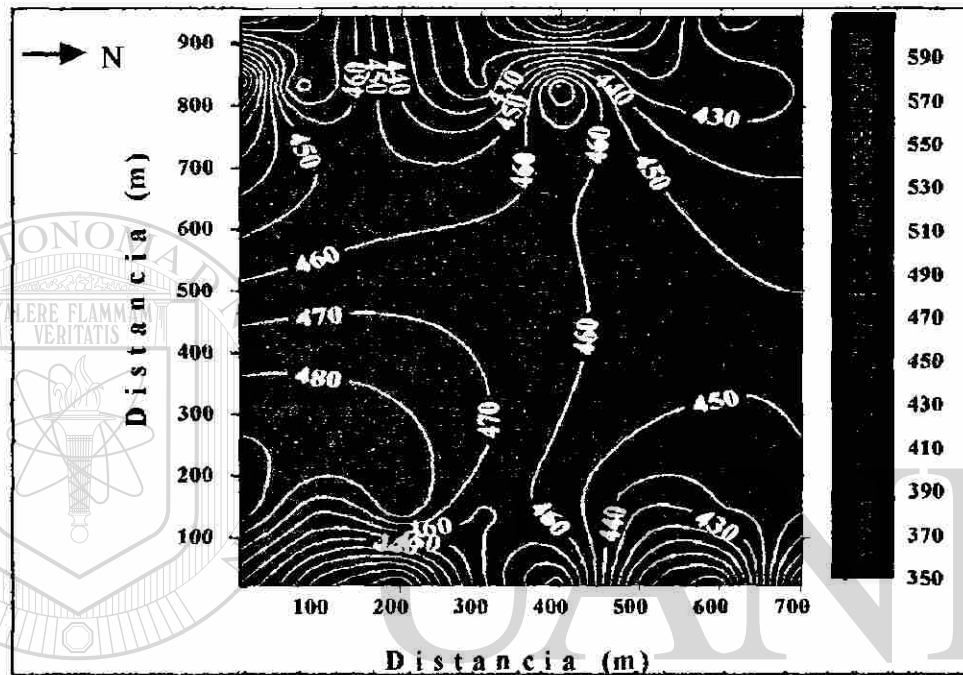


Figura 41. Configuración espacial de la capa impermeable con respecto al nivel del suelo del módulo de drenaje.

#### 4.2.2.5. Cambio en el almacenamiento de agua en el perfil del suelo en la zona no-saturada

Debido a que el período de estudio fue en época de lluvias, el patrón de comportamiento del contenido de agua en el perfil del suelo presentó poca variación en espacio y tiempo en cada uno de los estratos y espaciamientos muestreados; sin embargo, se aprecia la existencia de variabilidad en el contenido de humedad por efecto de espaciamientos entre drenes. En general, los espaciamientos de 10, 20 y 30 m presentaron menores contenidos de humedad que los de 40 y 50 m, indistintamente de los estratos analizados (0-30, 30-60, 60-90 y 90-120 cm; Figuras 42, 43, 44 y 45). Esto obedece a que existen mejores respuestas de desagüe del exceso de agua en espaciamientos más pequeños.



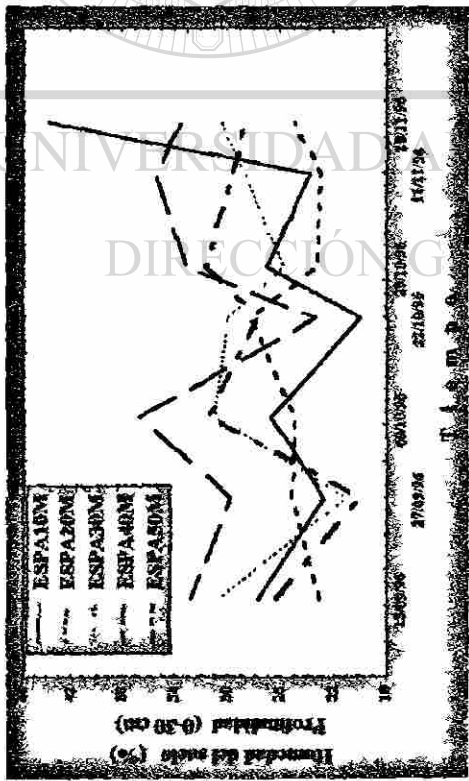


Figura 42. Comportamiento del contenido de humedad del suelo a una profundidad de 0.0-30 cm.

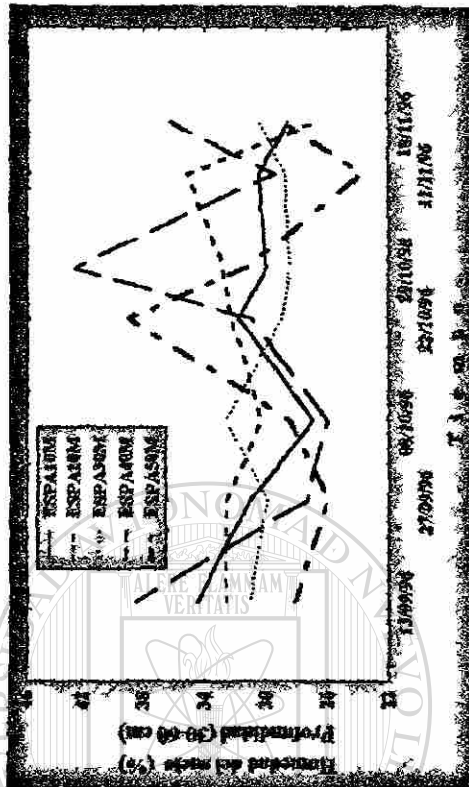


Figura 43. Comportamiento del contenido de humedad del suelo a una profundidad de 30-60 cm.

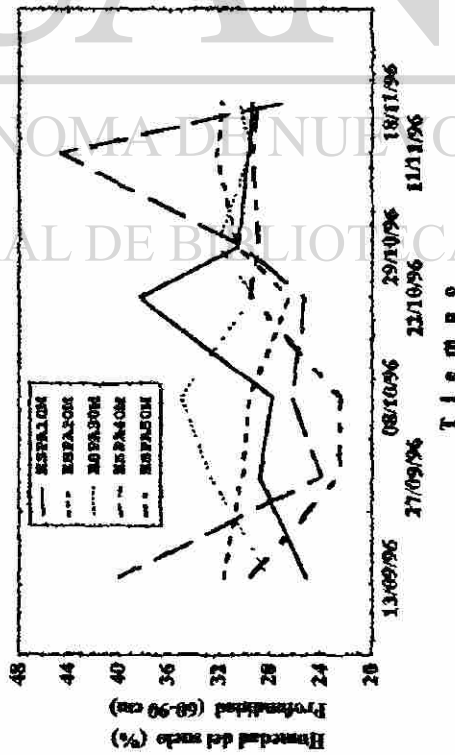


Figura 44. Comportamiento del contenido de humedad del suelo a una profundidad de 60-90 cm.

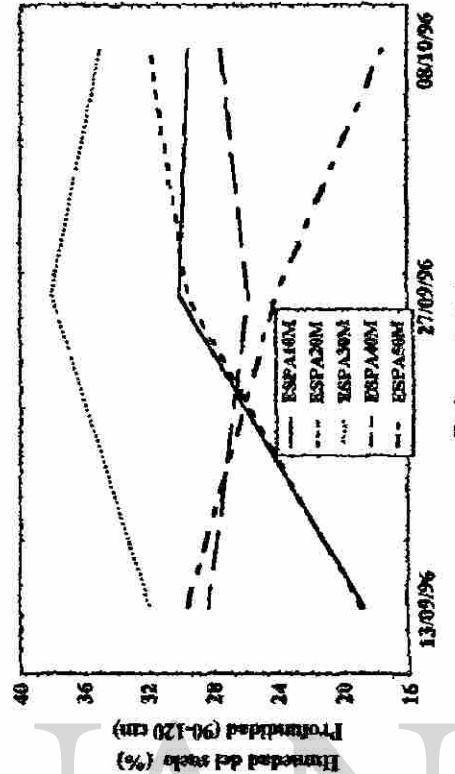


Figura 45. Comportamiento del contenido de humedad del suelo a una profundidad de 90-120 cm.

#### 4.2.2.6. Relación entre la altura del manto freático (carga hidráulica) y la descarga de los drenes

##### 4.2.2.6.1. Lote D-5

En el lote D-5, el patrón de comportamiento entre la precipitación pluvial (mm), carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $h$  en cm) y descarga de drenes expresada como coeficiente de drenaje ( $q$  en  $\text{mm día}^{-1}$ ) para los espaciamientos entre drenes de 10, 20, 30, 40 y 50 m está caracterizado en tres períodos: El primer período en donde no existe recarga al manto freático por causas de baja intensidad y cantidad de lluvia, por lo que el manto freático se mantiene cerca del nivel de los drenes y sin presencia de descargas ( $h = 0$ ,  $q = 0$ ).

El segundo período describe las elevaciones de la carga hidráulica en el punto medio entre drenes después de existir un evento de lluvia, lo cual trae consigo el inicio e incremento de la descarga de drenes; considerando la relación espacio poroso y precipitación se estimó que este período ocurre cuando se tiene un evento de lluvia superior a 17.5 mm. Cuando este proceso está sucediendo no existe una relación estricta entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes y la descarga de drenes, siendo los valores de descarga en este momento más altos que lo que sería bajo condiciones de flujo estabilizado o transitorio con la misma carga hidráulica.

El incremento de las elevaciones de carga hidráulica en el punto medio entre drenes (pendientes positivas) básicamente depende de la cantidad de agua percolada al acuífero, tipo de suelo y manejo del agua expresado como espaciamiento entre drenes. Las cargas hidráulicas en función de los espaciamientos entre drenes subterráneos y bajo las condiciones en que se manejó el suelo del lote D-5, se encontró que en eventos de lluvia de 75.5, 84.0 y 86.0 mm, las respuestas de reacción difieren poco entre espaciamientos (similar magnitud y dirección). Sin embargo, las cargas hidráulicas máximas que alcanzaron con las recargas de estos eventos de lluvia fueron diferentes variando de 120 a 130 cm (Figura 46) y manteniéndose por uno o dos días hasta que la recarga fue menor que la descarga de drenes (puntos picos). Patrones similares ocurren para las descargas de drenes, inmediatamente después de un aumento instantáneo de la carga hidráulica, la descarga de drenes cambió hasta alcanzar valores promedios de  $14.4 \text{ mm día}^{-1}$  (Figura 47).

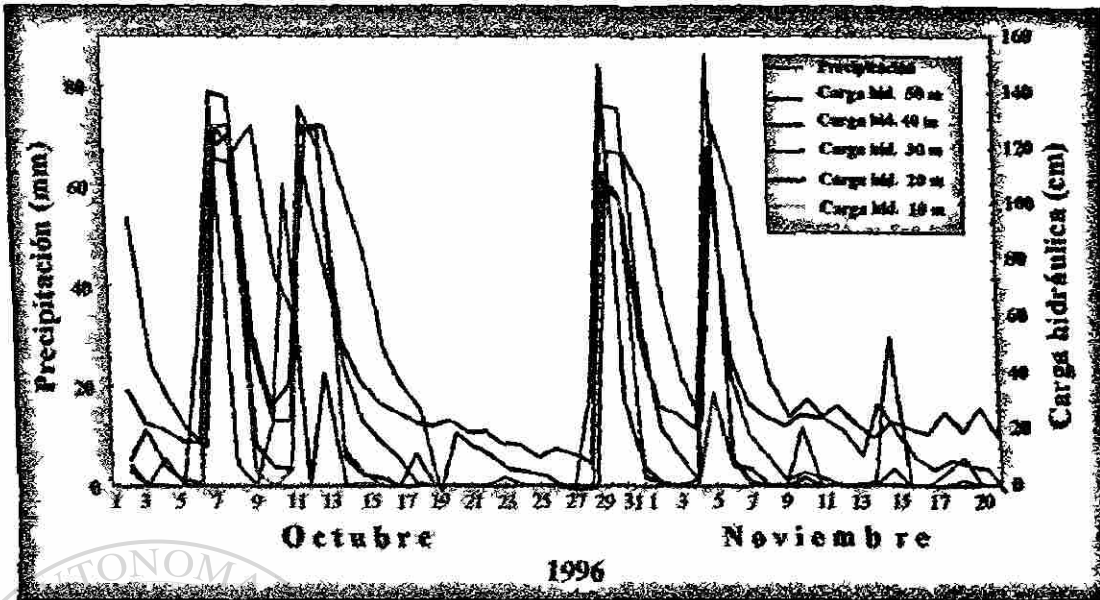


Figura 46. Hidrograma de la precipitación pluvial y la carga hidráulica en el punto medio entre drenes para los espaciamientos de 10, 20, 30, 40 y 50 m (Lote D-5). 1o de Octubre al 20 de Noviembre. de 1996.

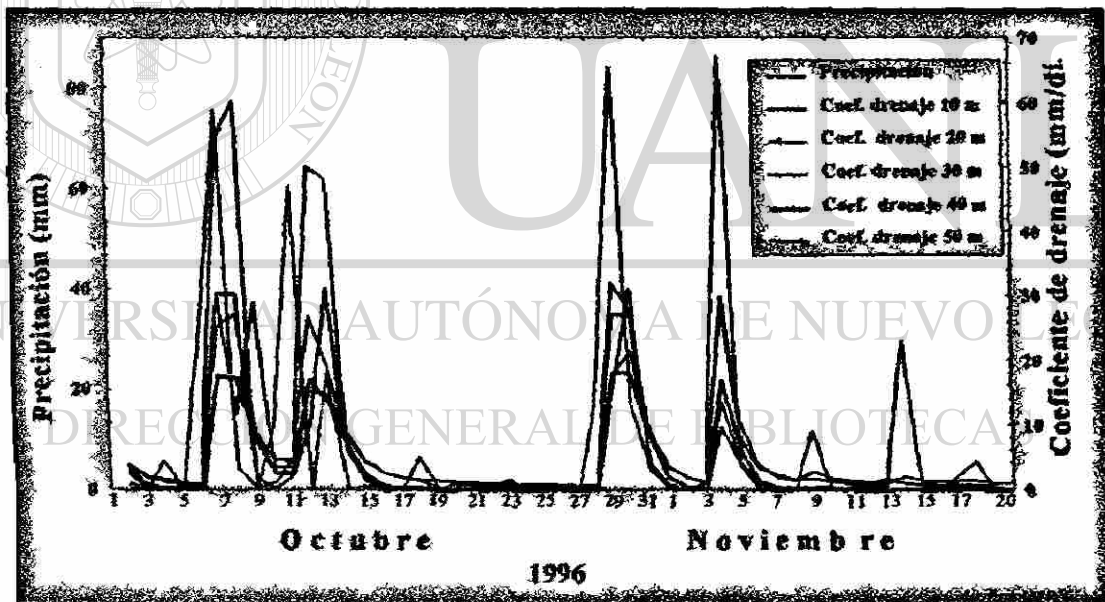


Figura 47. Hidrograma de la precipitación pluvial y los coeficientes de drenaje para los espaciamientos de 10, 20, 30, 40 y 50 m (Lote D-5). 1o de Octubre al 20 de Noviembre de 1996.

El tercer período denominado proceso de recesión puede considerarse como comportamiento estabilizado, es decir, la relación funcional del abatimiento de la carga hidráulica en el punto medio entre drenes y las descargas de drenes disminuyen en forma gradual hasta llegar a la recesión completa. Tomando como referencia el número de días

que tardan drenando los drenes en forma continua (tiempo de recesión), el espaciamiento de 50 m se comportó diferente a los demás, llegando a tardar 12 días para un evento de lluvia de 75.5 mm, mientras que los espaciamientos de 10, 20, 30 y 40 m tardaron 3, 3, 7 y 6 días, respectivamente (Figura 48); esto es debido a la variabilidad espacial de la constitución granulométrica en el perfil del suelo, microgeomorfología y respuesta por efecto del espaciamiento entre drenes.

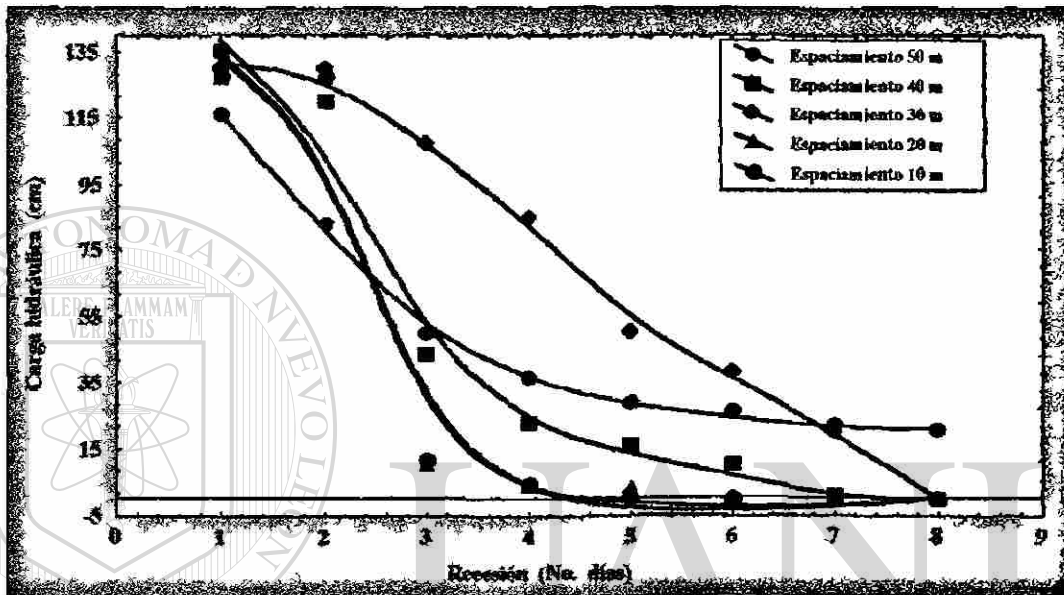


Figura 48. Tiempo de recesión para los espaciamientos de 10, 20, 30, 40 y 50 m correspondientes a las condiciones de manejo del lote D-5 para un evento de lluvia de 75.5 mm.

#### 4.2.2.6.2. Lote C-7

En el lote C-7, las relaciones que guardan la precipitación, carga hidráulica y descarga de drenes solo presentaron dos períodos; El primer período no existió ( $h=0$ ,  $q=0$ ) debido a que los drenes en todos los espaciamientos 10, 20, 30, 35 y 50 m trabajaron en forma continua ( $h \geq 0$ ,  $q \geq 0$ ).

El segundo período presentó la misma tendencia de respuesta instantánea a un evento de lluvia para las cargas hidráulicas en el punto medio entre drenes en todos los espaciamientos llegando a alcanzar valores de 120 cm. Aun cuando no existe diferencia representativa de cargas hidráulicas entre espaciamientos el orden de máximo a mínimo valor fueron para los espaciamientos de 35, 30, 50, 10 y 20 m (Figura 49). Las descargas de drenes durante este período alcanzaron valores de  $16 \text{ mm día}^{-1}$  (Figura 50).

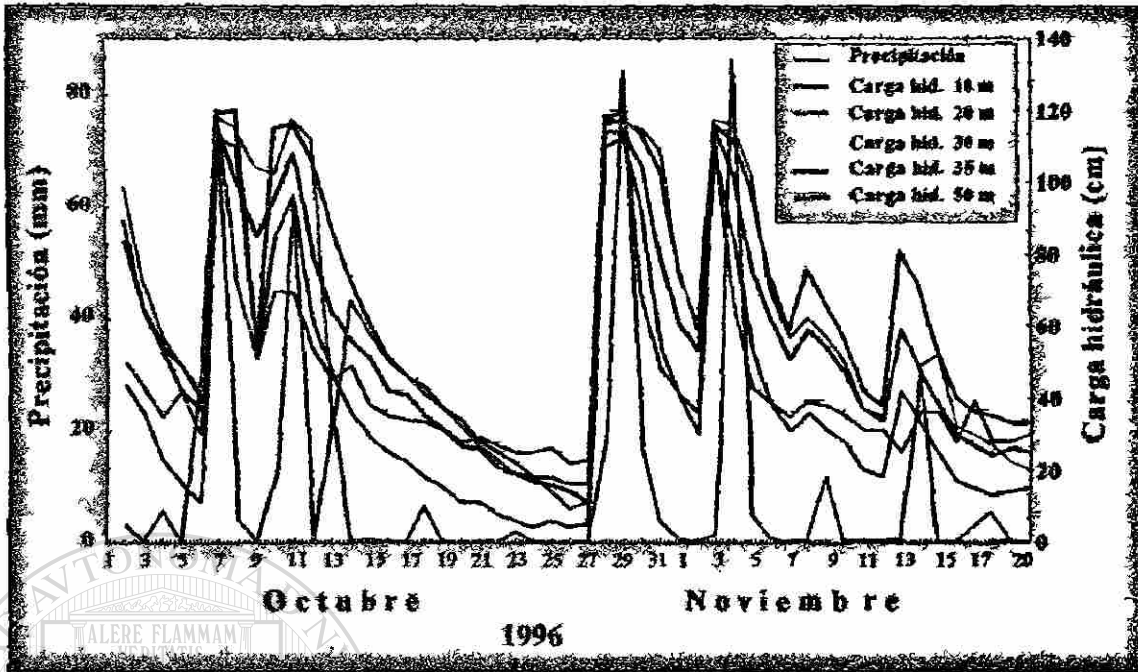


Figura 49. Hidrograma de la precipitación pluvial y la carga hidráulica en el punto medio entre drenes para los espaciamientos de 10, 20, 30, 35 y 50 m (Lote C-7). 1o de Octubre al 20 de Noviembre de 1996.

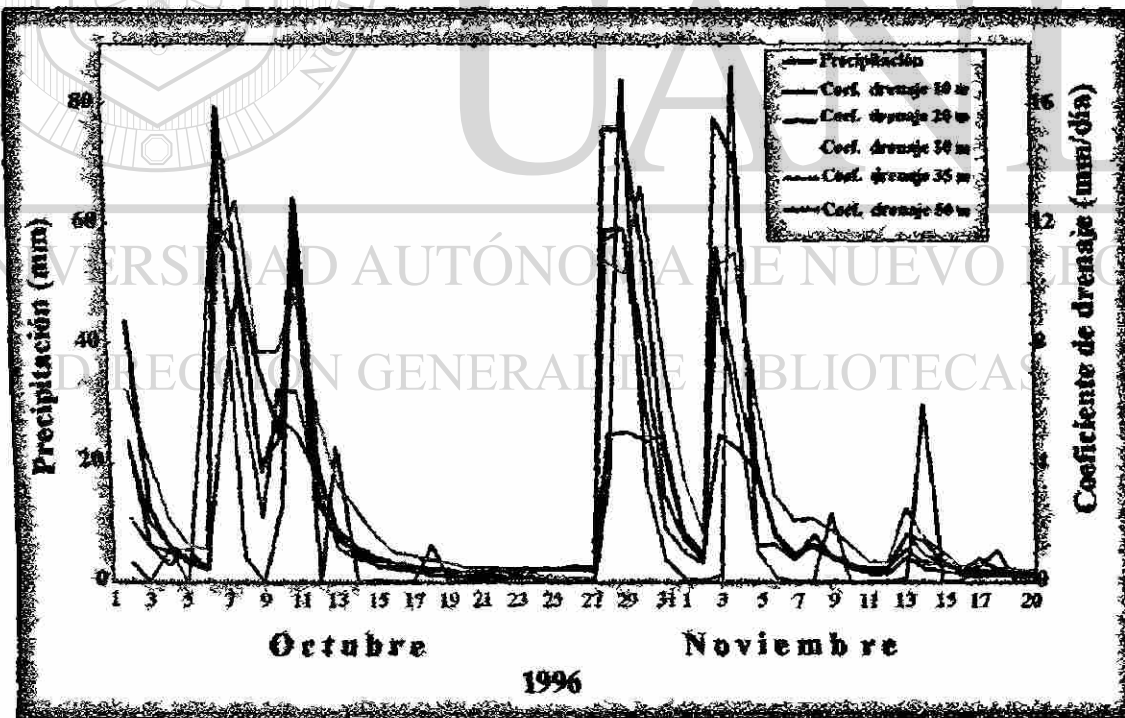


Figura 50. Hidrograma de la precipitación pluvial y los coeficientes de drenaje para los espaciamientos de 10, 20, 30, 35 y 50 m (Lote C-7). 1o de Octubre al 20 de Noviembre de 1996.

El tercer periodo o recesión total no se presentó debido a que el dren colector abierto en donde desalojan el agua los drenes subterráneos permaneció parcialmente azolvado, trabajando de esta forma bajo condiciones semiahogadas y ahogadas. Sin embargo, se puede observar al quinto día después de un evento de lluvia, que las respuestas en las descargas de los drenes ocurrieron en el siguiente orden: 10, 20, 50, 30 y 35 m por efecto de espaciamiento (Figura 51).

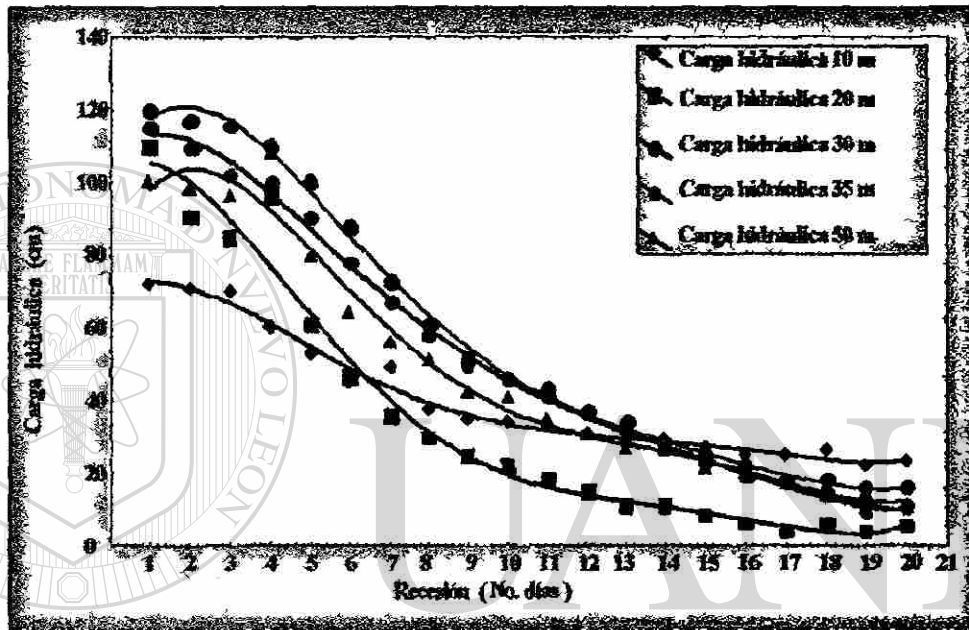


Figura 51. Tiempo de recesión para los espaciamientos de 10, 20, 30, 35 y 50 m correspondientes a las condiciones de manejo del lote C-7 para un evento de lluvia de 75.5 mm.

#### 4.2.2.6.3. Lote D-6

El lote D-6 con espaciamientos de 30 y 40 m sembrados con maíz (*Zea mays* L.) y caña de azúcar (*Sacharum officinarum*), respectivamente; alcanzaron valores de 120 cm de carga hidráulica en el punto medio entre drenes; mientras, que los coeficientes de drenaje presentaron valores de 12 y 15 mm día<sup>-1</sup> (Figuras 52 y 53). Después de un evento de lluvia de 75.5 mm se pudo observar un período de recesión de 9 y 2 días en los espaciamientos, esta diferencia en tiempo pudo deberse al efecto que tiene la evapotranspiración de los cultivos, ya que la caña de azúcar se encontraba en madurez fisiológica y con dosel cerrado (Figura 54).

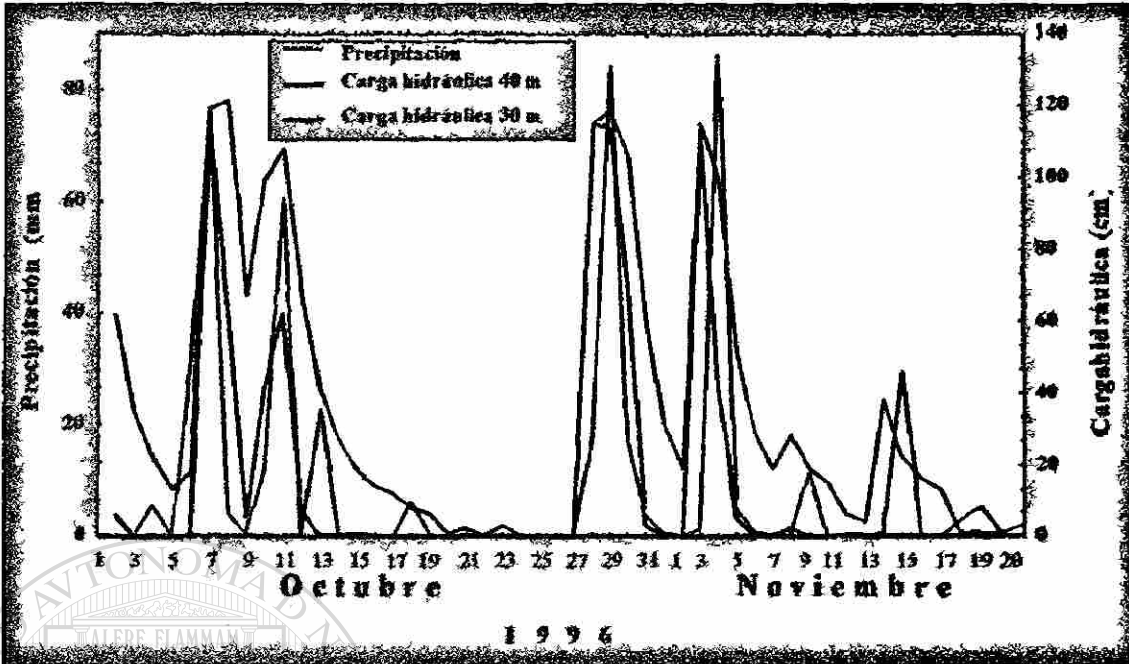


Figura 52. Hidrograma de la precipitación pluvial y la carga hidráulica en el punto medio entre drenes para los espaciamientos de 30 y 40 m (Lote D-6). 1o de Octubre al 20 de Noviembre de 1996.

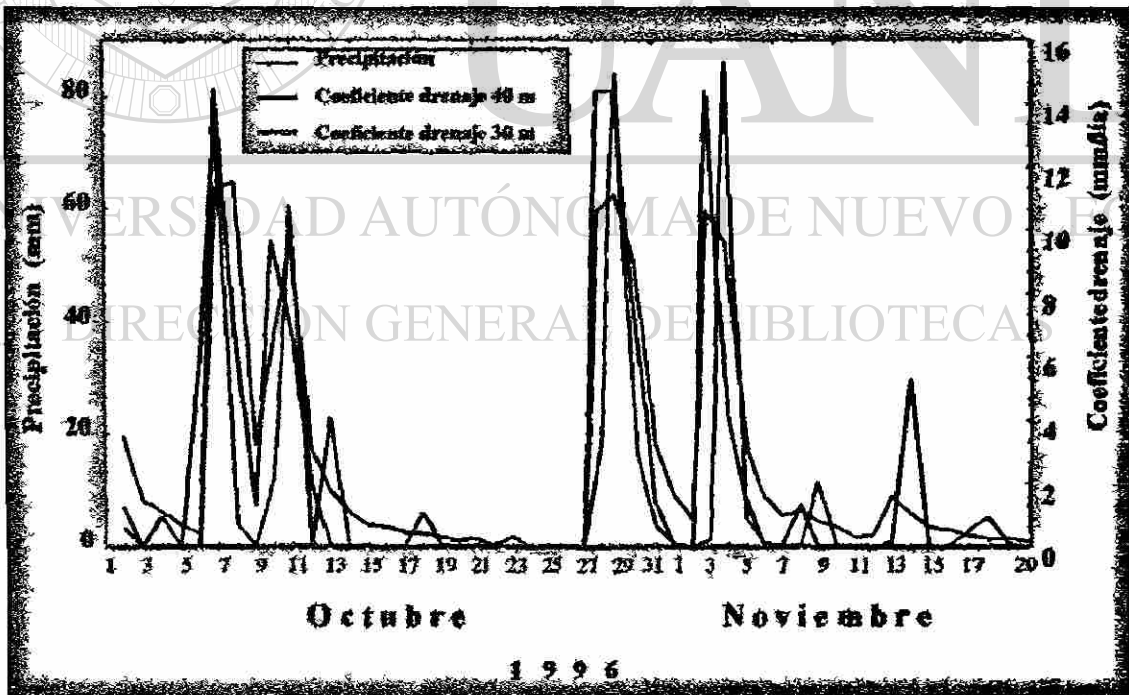


Figura 53. Hidrograma de la precipitación pluvial y los coeficientes de drenaje para los espaciamientos de 30 y 40 m (Lote D-6). 1o de Octubre al 20 de Noviembre de 1996.

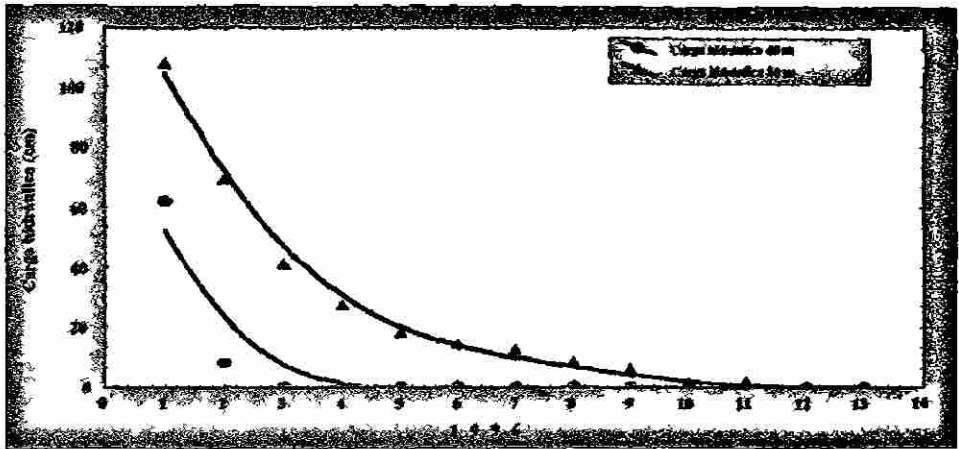


Figura 54. Tiempo de recesión para los espaciamientos de 30 y 40 m correspondientes a las condiciones de manejo del lote D-6 para un evento de lluvia de 75.5 mm.

4.2.2.6.4. Lote C-6

El lote C-6 con un espaciamiento de 30 m y sembrado con caña de azúcar presentó tres periodos. Durante el primer periodo no existió recarga al manto freático y por lo tanto sin presencia de descargas. En el segundo periodo después de un evento de lluvia de 75.5 mm presentó una carga hidráulica de 115 cm y coeficientes de drenaje de 18 mm día<sup>-1</sup> (Figura 55). El tercer periodo o recesión presentó una duración de 9 días (Figura 56); aunque se observó que en el primer día la carga hidráulica disminuyó hasta 60 cm mostrando alta capacidad para drenar el agua en menos tiempo, esto pudo deberse a que los drenes tienen un filtro de arena que influye en la rapidez con que se desaloja el agua; además, de la elevada evapotranspiración potencial del cultivo sembrada en dicho lote.

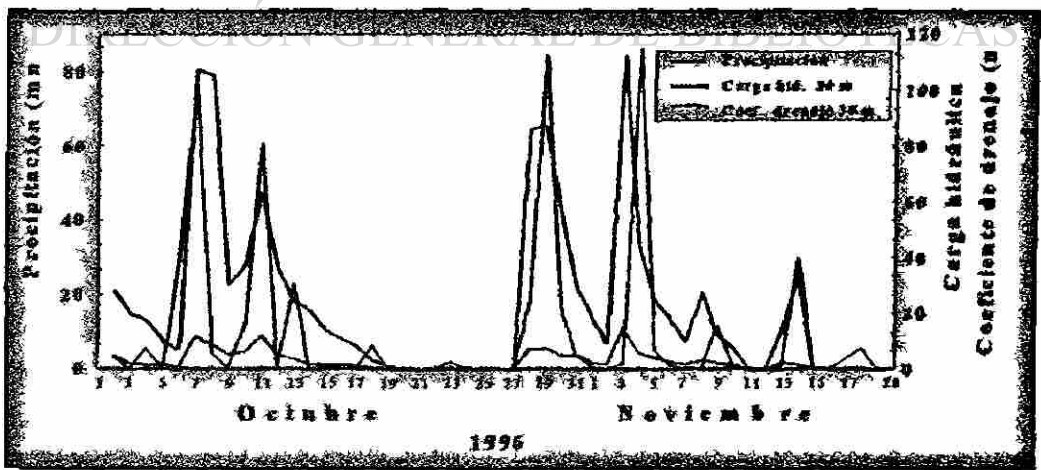


Figura 55. Relación entre precipitación pluvial, carga hidráulica en el punto medio entre drenes y coeficiente de drenaje para el espaciamiento de 30 m (Lote C-6). 1o de Octubre al 20 de Noviembre de 1996.



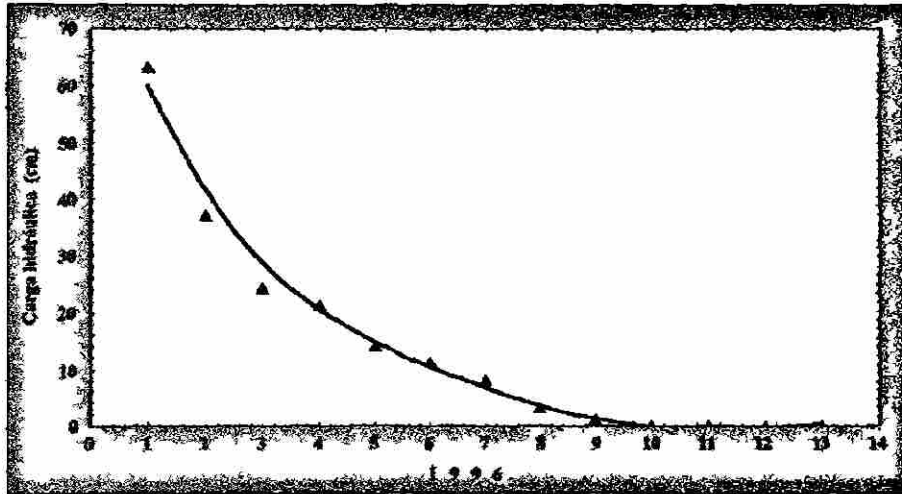


Figura 56. Tiempo de recesión para el espaciamiento de 30 m correspondiente a las condiciones de manejo del lote C-6 para un evento de lluvia de 75.5 mm.

#### 4.2.2.7. Conductividad hidráulica

La variación en la relación entre las descargas de drenes y cargas hidráulicas en el punto medio entre drenes fueron pequeñas en el período de recesión, semejando a las condiciones de flujo estabilizado. Bajo esas condiciones la aplicación de la teoría de

Hooghoudt  $q = \frac{8K_2 d \Delta h}{L^2} + \frac{4K_1 \Delta h^2}{L^2}$  dió como resultado curvas parabólicas, lo cual

muestra que la relación descarga-carga hidráulica no es lineal sino cuadrática, por lo que el término  $h^2$  es más importante que  $h$ , consecuentemente, la mayor parte del flujo de las aguas subterráneas fluye por encima del nivel de los drenes indicando que los drenes están colocados sobre o cerca del estrato impermeable.

##### 4.2.2.7.1. Lote D-5

Las relaciones funcionales de la carga hidráulica en el punto medio entre drenes y descarga de drenes, así como los valores resultantes de conductividad hidráulica demuestran que el flujo del agua en el lote D-5 se produce tanto por encima como por debajo del nivel de los drenes, siendo la intensidad de dicho flujo más elevado en la parte superior para todos los espaciamientos (0.707, 1.750, 1.890, 3.080 y 1.237 m día<sup>-1</sup>) (Cuadro 10).

**Cuadro 10.** Valores de conductividad hidráulica estimados con el método de la relación carga hidráulica en el punto medio entre drenes y descarga de drenes. Lote D-5.

Espaciamiento entre drenes: 10 m			
Coef. regresión	$t_{calculada}$	(niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = 0.009517$	2.089	0.04	0.111
$\beta_1 = 0.000283$	2.603	0.01	0.707
Espaciamiento entre drenes: 20 m			
Coef. regresión	$t_{calculada}$	(niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = 0.012209$	3.035	0.003	0.359
$\beta_1 = 0.000175$	1.788	0.050	1.750
Espaciamiento entre drenes: 30 m			
Coef. regresión	$t_{calculada}$	(niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = 0.002581$	3.437	0.001	0.152
$\beta_1 = 0.000084$	7.499	0.000	1.890
Espaciamiento entre drenes: 40 m			
Coef. regresión	$t_{calculada}$	(niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = 0.004623$	4.599	0.000	0.479
$\beta_1 = 0.000077$	4.060	0.000	0.308
Espaciamiento entre drenes: 50 m			
Coef. regresión	$t_{calculada}$	(niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = 0.002778$	4.321	0.000	0.405
$\beta_1 = 0.001980$	14.915	0.000	1.237

Los valores de K para  $\beta_1$  y  $\beta_1$  corresponden al flujo horizontal del agua por debajo y por encima del nivel de los drenes

Las relaciones existentes entre las descargas de drenes y cargas hidráulicas representadas gráficamente mostraron que el espaciamiento de 40 m (Figura 60) presentó curvatura menos pronunciada que los espaciamientos de 10, 20, 30 y 50 m (Figuras 57, 58, 59, 61 y Cuadro A2); esto indica que el flujo fue más intenso en la parte superior a los drenes subterráneos para los espaciamientos de 10, 20, 30 y 50 m que en el de 40 m. Este efecto puede ser explicado porque el espaciamiento de 40 m se encuentra ubicado en la serie de suelo Limón, la cual presenta textura arcillosa del tipo montmorillonítica en todo el perfil; mientras que los espaciamientos restantes se localizan dentro de la serie de suelo Libertad que tiene textura franco-arcillosa en los primeros estratos y cambia a texturas medias a partir de los 50 cm.

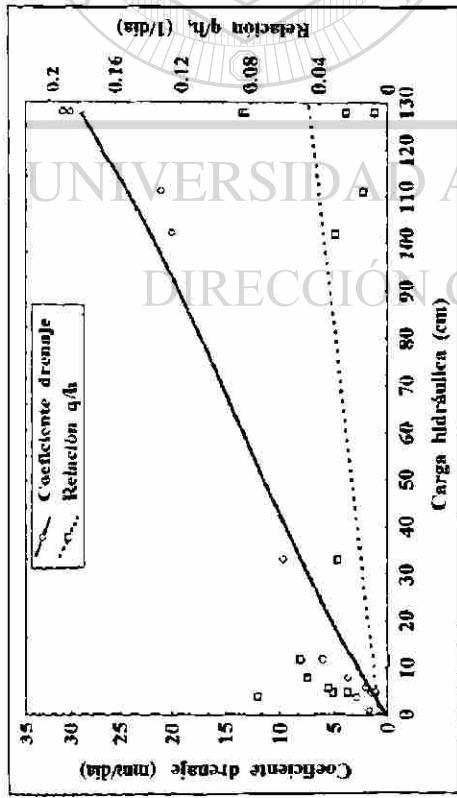


Figura 57. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) y para el espaciamiento de 10 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote D-5.

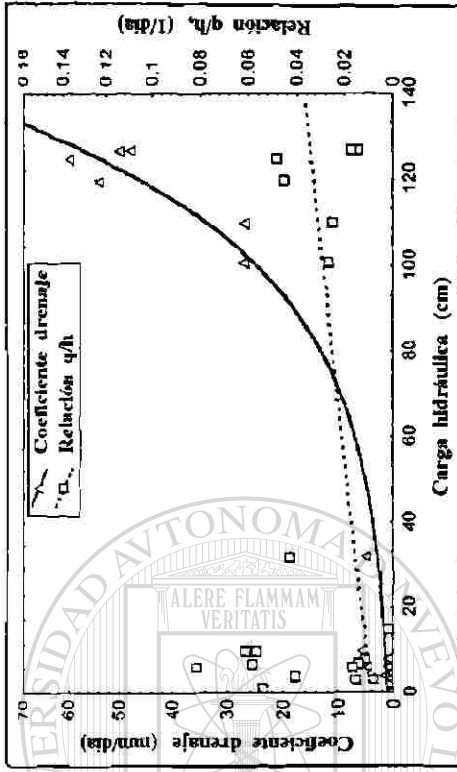


Figura 58. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 20 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote D-5.

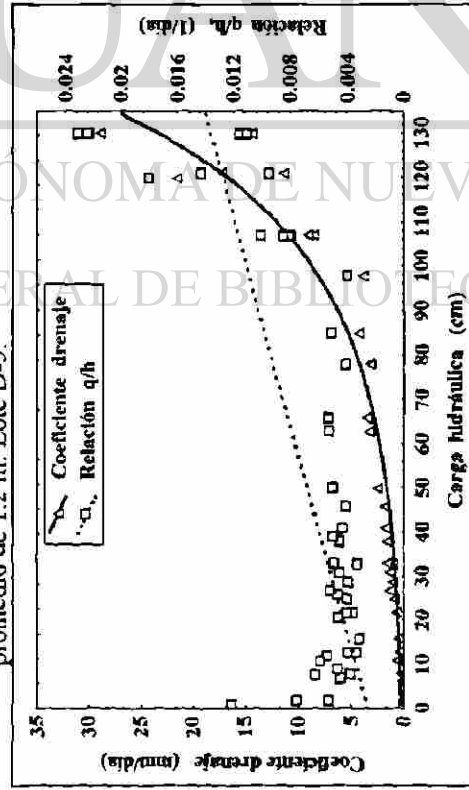


Figura 59. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 30 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote D-5.

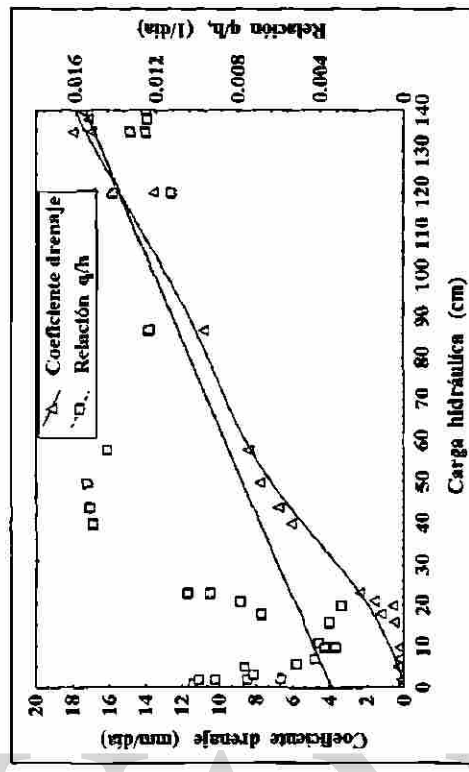


Figura 60. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 40 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote D-5.

## 8. APENDICE

**Cuadro A1. Lluvia promedio diaria del mes de Septiembre para las 86 estaciones meteorológicas del Estado de Tabasco, México.**

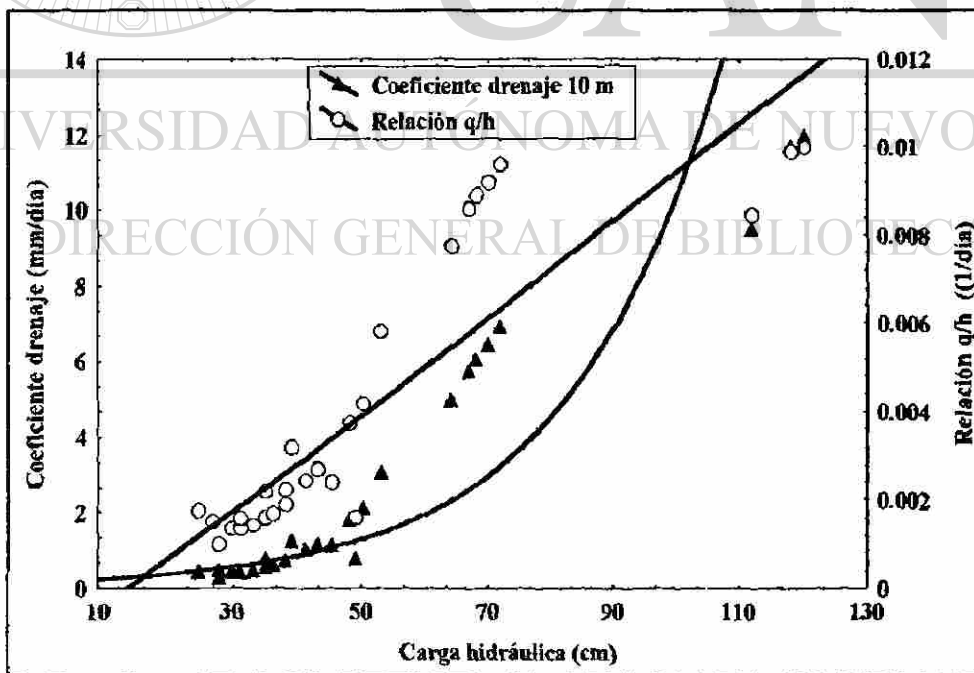
Nombre Estación	Longitud W Grados	Latitud N Grados	Elevación Metros	Promedio	Varianza	Desviación Estándar	Coefficiente variación
EST27001	92.32	17.48	18.00	11.7	581.7	24.11	2.05
EST27002	92.43	18.28	18.00	8.34	291.12	17.06	2.04
EST27003	93.56	18.06	18.00	11.17	388.76	19.71	1.76
EST27004	91.31	17.26	100.00	14.05	560.55	23.67	1.68
EST27006	91.27	18.00	100.00	11.72	393.46	19.83	1.69
EST27007	93.37	18.00	100.00	11.06	441.70	21.01	1.89
EST27008	93.22	18.01	21.00	10.99	453.22	21.28	1.93
EST27009	93.13	18.16	10.00	10.40	433.06	20.81	1.99
EST27010	93.11	18.04	10.00	9.81	439.60	20.96	2.13
EST27011	92.50	17.36	60.00	22.26	0.77	0.87	0.03
EST27012	91.46	17.45	60.00	12.22	479.54	21.89	1.79
EST27013	93.29	18.18	60.00	10.19	458.95	21.42	2.10
EST27014	92.56	18.01	60.00	8.52	255.58	15.98	1.87
EST27015	93.54	17.50	7.00	13.44	453.79	21.30	1.58
EST27016	92.39	18.32	1.00	9.33	583.38	24.15	2.58
EST27017	93.24	17.50	193.00	11.28	499.91	22.35	1.98
EST27018	93.28	17.52	193.00	10.52	560.85	23.68	2.24
EST27019	92.48	17.47	193.00	13.13	393.90	19.84	1.51
EST27020	93.03	18.12	193.000	8.56	349.61	18.69	2.18
EST27021	91.17	17.37	14.00	10.82	295.55	17.19	1.58
EST27022	92.34	17.37	14.00	16.77	635.79	25.21	1.50
EST27023	93.48	17.50	14.00	24.34	1136.62	33.71	1.38
EST02724	92.55	17.45	14.00	13.06	419.56	20.48	1.56
EST27025	92.55	17.59	14.00	10.28	294.19	17.15	1.66
EST27026	94.01	18.08	14.00	10.97	309.38	17.58	1.60
EST27027	92.41	17.36	14.00	15.04	509.88	22.58	1.50
EST27028	92.09	18.06	14.00	10.85	442.68	21.04	1.93
EST27029	92.50	18.10	14.00	8.87	288.19	16.97	1.91
EST27030	92.35	17.46	68.00	12.68	429.39	20.72	1.63
EST27031	92.36	17.45	60.00	11.42	651.39	25.52	2.23
EST27032	93.25	17.38	60.00	13.50	454.47	21.31	1.57
EST27033	93.38	17.44	100.00	11.47	380.39	19.50	1.69
EST27034	93.13	18.24	100.00	8.98	337.05	18.35	2.04
EST27035	93.22	17.41	100.00	12.22	421.27	20.52	1.67
EST27036	93.07	18.00	100.00	10.37	374.48	19.35	1.86
EST27037	92.54	17.50	60.00	11.20	365.87	19.12	1.70
EST27038	93.04	18.19	72.00	9.56	337.63	18.37	1.92
EST27039	93.16	18.01	72.00	11.01	414.96	20.37	1.84
ETS27040	91.10	17.46	21.00	9.53	301.13	17.35	1.81
EST27041	92.32	18.06	21.00	10.80	455.54	21.34	1.97
EST27042	92.47	17.28	60.00	18.43	730.46	27.02	1.46
EST27043	92.49	17.36	60.00	13.63	366.01	19.13	1.40
EST27044	92.58	17.33	72.00	19.79	843.78	29.04	1.46
EST27045	92.57	17.33	50.00	19.99	1011.70	31.80	1.59
EST27046	91.26	17.29	600.00	13.09	528.74	22.99	1.75

tendencias e intensidad del flujo del agua es debida a que los drenes subterráneos están instalados en la Serie Limón.

**Cuadro 11.** Valores de conductividad hidráulica estimados con el método de la relación carga hidráulica en el punto medio entre drenes y descarga de drenes. Lote C-7.

Espaciamiento entre drenes: 10 m			
Coef. Regresión	$t_{calculada}$	p (niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = -0.001233$	-3.025	0.003	0.013
$\beta_1 = 0.000105$	13.381	0.000	0.262
Espaciamiento entre drenes: 20 m			
Coef. Regresión	$t_{calculada}$	p (niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = 0.002854$	4.469	0.000	0.086
$\beta_1 = 0.000063$	5.119	0.000	0.630
Espaciamiento entre drenes: 30 m			
Coef. Regresión	$t_{calculada}$	p (niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = -0.000370$	-0.785	0.436	0.021
$\beta_1 = 0.000077$	11.626	0.000	1.732
Espaciamiento entre drenes: 35 m			
Coef. Regresión	$t_{calculada}$	p (niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = 0.000300$	0.005	0.995	0.020
$\beta_1 = 0.000041$	5.717	0.000	1.250
Espaciamiento entre drenes: 50 m			
Coef. regresión	$t_{calculada}$	p (niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = -0.003498$	-6.523	0.000	0.466
$\beta_1 = 0.000130$	15.735	0.000	0.800

Los valores de K, para  $\beta_0$  y  $\beta_1$  corresponden al flujo horizontal del agua por debajo y por encima del nivel de los drenes.



**Figura 62.** Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $h$ ) y el coeficiente de drenaje ( $q$ ) para el espaciamiento de 10 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote C-7.

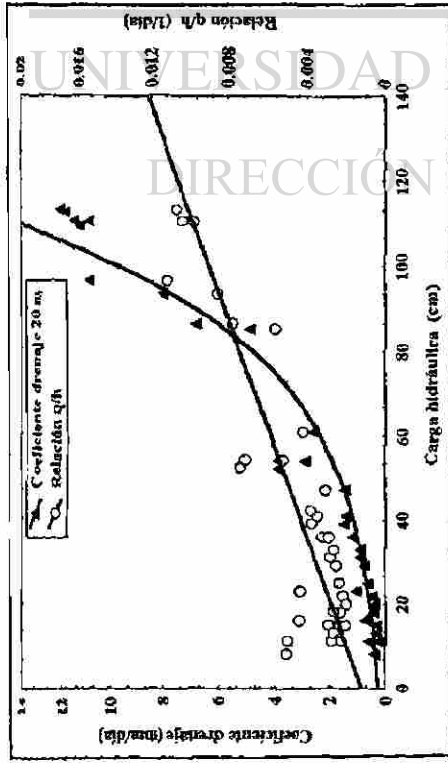


Figura 63. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 20 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote C-7.

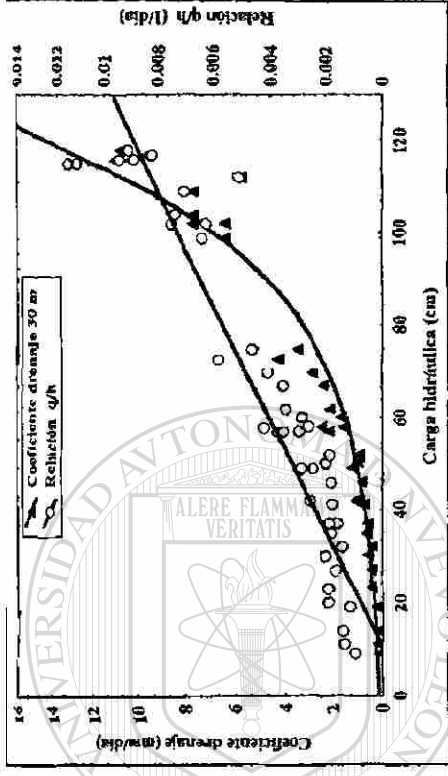


Figura 64. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 30 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote C-7.

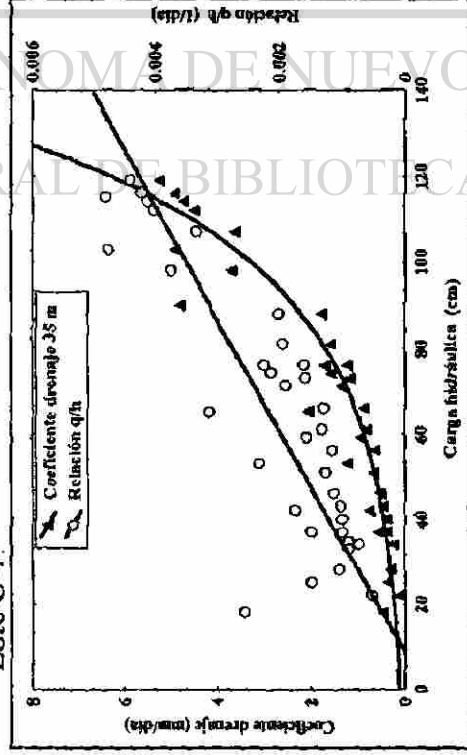


Figura 65. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 35 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote C-7.

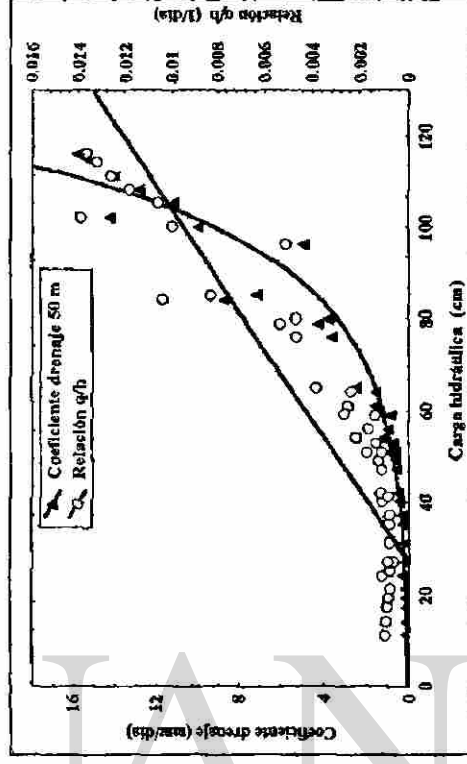


Figura 66. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 50 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote C-7.

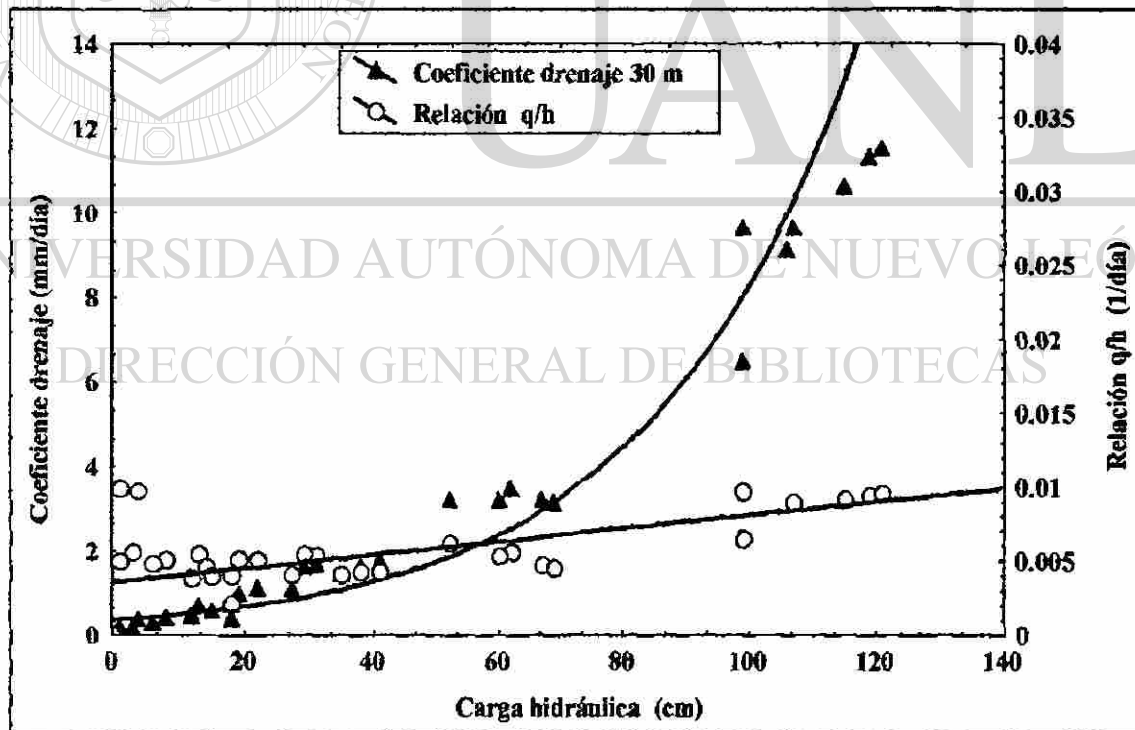
### 4.2.2.7.3. Lote D-6

En el lote D-6 los espaciamientos de 30 y 40 m sembrados con maíz y caña de azúcar, respectivamente, se encontraron valores de conductividad hidráulica ligeramente más altos en la parte inferior del estrato con respecto al nivel de los drenes subterráneos, por lo que el flujo del agua en esta parte es más rápido que en los primeros estratos con respecto al nivel del suelo (Cuadros 12, A4 y Figuras 67 y 68).

**Cuadro 12.** Valores de conductividad hidráulica estimados con el método de la relación carga hidráulica en el punto medio entre drenes y descarga de drenes. Lote D-6.

Espaciamiento entre drenes: 30 m			
Coef. Regresión	$t_{calculada}$	p (niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = 0.006552$	5.238	0.000	0.190
$\beta_1 = 0.000009$	0.407	0.685	0.090
Espaciamiento entre drenes: 40 m			
Coef. regresión	$t_{calculada}$	p (niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = 0.005313$	2.610	0.011	0.475
$\beta_1 = 0.000088$	1.633	0.108	0.352

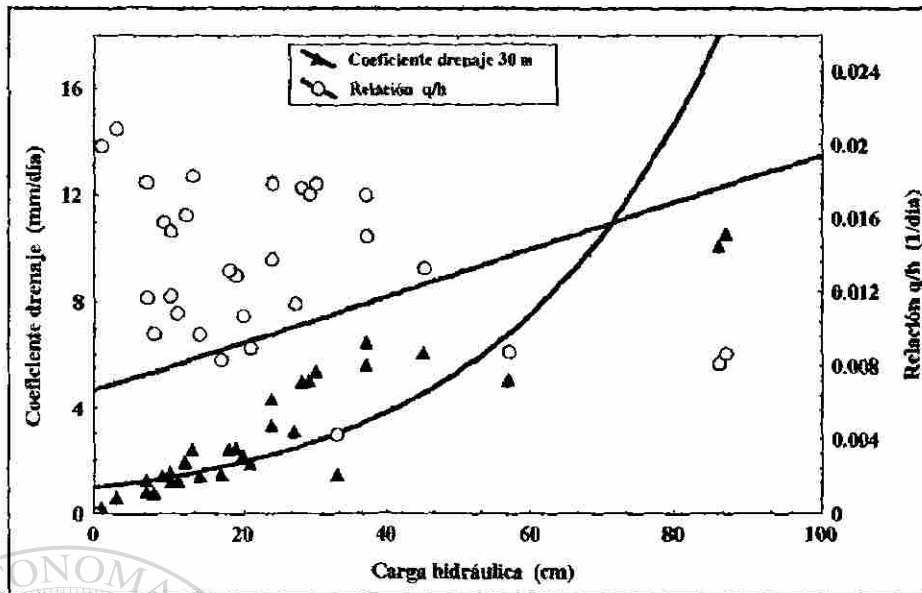
Los valores de K para  $\beta_0$  y  $\beta_1$  corresponden al flujo horizontal del agua por debajo y por encima del nivel de los drenes.



**Figura 67.** Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 30 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote D-6.

EST27047	91.26	17.29	60.00	11.09	473.53	21.76	1.96
EST27048	92.21	17.49	600.00	13.50	509.98	22.58	1.67
EST27049	93.44	17.52	600.00	8.82	209.26	14.46	1.63
EST27050	92.38	18.25	30.00	9.41	343.35	18.52	1.96
EST27051	93.17	18.10	30.00	11.45	497.27	22.29	1.94
EST27052	93.28	18.26	30.00	9.62	376.34	19.39	2.01
EST27053	92.55	18.23	30.00	10.22	529.76	23.01	2.25
EST27054	92.57	17.59	10.00	11.49	401.58	20.03	1.74
EST27055	92.55	17.59	10.00	11.86	526.46	22.94	1.93
EST27056	91.33	17.49	18.00	10.6	453.00	15.69	1.48
EST27057	93.13	18.16	10.00	10.01	721.70	26.86	2.68
EST27059	91.10	17.57	60.00	9.45	323.64	17.99	1.90
EST27060	92.59	17.56	1.00	10.48	485.43	22.03	2.10
EST27061	92.56	17.32	72.00	19.60	1018.15	31.90	1.62
EST27063	91.04	17.36	10.00	10.84	410.96	20.27	1.86
EST27064	91.01	17.50	10.00	14.01	477.64	21.85	1.55
EST27065	92.55	17.59	10.00	13.33	417.92	20.44	1.53
EST27066	91.01	17.17	60.00	10.00	450.00	17.00	1.70
EST27067	91.26	17.29	60.00	9.85	346.16	18.60	1.88
EST27069	91.46	17.52	21.00	9.79	320.57	17.90	1.82
EST27070	92.45	17.22	100.00	17.71	727.09	26.96	1.52
EST27071	92.25	17.46	58.00	9.08	314.38	17.73	1.95
EST27073	92.25	18.18	100.00	9.87	365.41	16.29	1.64
EST27074	93.33	18.18	100.00	11.12	336.86	18.35	1.64
EST27075	93.29	18.14	100.00	10.03	208.73	14.44	1.43
EST27076	93.35	18.14	100.00	10.22	277.90	16.67	1.63
EST27077	93.33	18.09	100.00	11.76	309.59	17.59	1.49
EST27078	93.25	18.04	100.00	13.87	814.45	28.53	2.05
EST27079	93.25	18.03	100.00	11.76	359.95	18.97	1.61
EST27080	93.25	17.58	100.00	12.61	530.17	23.02	1.82
EST27081	92.41	17.47	55.00	4.47	54.11	7.35	1.64
EST27084	93.00	18.22	100.00	7.34	199.39	14.12	1.92
EST27085	92.45	18.30	60.00	11.33	655.26	25.59	2.25
EST27087	91.23	17.59	193.00	4.46	56.56	7.52	1.68
EST27088	91.32	17.52	14.00	3.88	93.87	9.68	2.49
EST27090	91.36	17.58	60.00	9.46	318.13	17.83	1.88
EST27091	91.48	17.56	100.00	7.49	143.26	11.96	1.59
EST27092	92.55	17.50	100.00	11.71	179.95	13.41	1.14
EST27093	91.34	18.00	21.00	5.86	142.95	11.95	2.03





**Figura 69.** Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $h$ ) y el coeficiente de drenaje ( $q$ ) para el espaciamiento de 30 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote C-6.

En forma general se puede decir que los valores de conductividad hidráulica en todos los espaciamientos son más altos en los estratos superiores que en los inferiores con respecto al nivel de la instalación de los drenes. El flujo del agua es más intenso en la parte de arriba que en la parte de abajo. El lote C-7 presenta los valores más bajos de conductividad hidráulica, lo que hace que la recesión sea más lenta que en los lotes D-5, D-6 y C-6.

#### 4.2.2.8. Espacio poroso drenable

En forma general se observó que el espacio poroso drenable se incrementó conforme la carga hidráulica disminuyó, ya que un cambio en el nivel del manto freático equivale a la porosidad efectiva de la zona del suelo en que tienen lugar las fluctuaciones. Kessler y Ridder (1978) mencionan que el espacio poroso drenable es más bajo para la arcilla y materiales arcillosos (0.5 a 5%) y más alto para arenas gruesas (20 a 35%); estos valores coinciden con los encontrados en los diferentes lotes para suelos arcillosos.

#### 4.2.2.8.1. Lote D-5

El variable espacio poroso drenable en el lote D-5 y sin cultivo en los espaciamientos de 10, 20, 30 y 50 m mostró valores similares (2.29 a 2.45%) mientras que el espaciamiento de 40 m presentó un espacio poroso drenable de (1.25%); esta diferencia pudo deberse a que los espaciamientos se encuentran ubicados dentro de dos tipos de suelos diferentes, los primeros espaciamientos se localizan en la serie de suelos Libertad y el espaciamiento de 40 m en la serie de suelos Limón que de acuerdo a sus características físicas y químicas, el flujo del agua es considerado como lento, ya que el espacio poroso drenable varía con el tamaño forma y distribución de las partículas del suelo (Cuadro 14).

**Cuadro 14.** Valores de espacio poroso drenable ( $\mu$ ) estimados con el método de la relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $\Delta h$ ) y la descarga de drenes ( $Dr$ ), Lote D-5 (Sin Cultivo- Serie Libertad y Limón).

Espaciamiento entre drenes: 10 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
02 - 130	1280	30.0	2.34
97 - 130	330	9.67	2.93
Espaciamiento entre drenes: 20 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
20 - 130	1100	27	2.45
Espaciamiento entre drenes: 30 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
00 - 130	1300	30.0	2.30
Espaciamiento entre drenes: 40 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
00 - 130	1300	17.0	1.25
86 - 130	440	6.75	1.53
Espaciamiento entre drenes: 50 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
14 - 130	1160	26.6	2.29
47 - 130	830	19.2	2.31

#### 4.2.2.8.2. Lote C-7

Considerando un espesor de 1 m de profundidad con respecto al nivel del suelo, los espaciamientos de 10, 20, 30, 35 y 50 m del lote C-7 presentaron valores similares de espacio poroso drenable (1.44, 1.04, 1.32, 1.43 y 1.52), respectivamente; estos valores concuerdan con los reportados para suelos arcillosos por Martínez (1978) (Cuadro 15).

**Cuadro 15.** Valores de espacio poroso drenable ( $\mu$ ) estimados con el método de la relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $\Delta h$ ) y la descarga de drenes ( $Dr$ ). Lote C-7 (Cultivo Maíz- Serie Limón).

Espaciamiento entre drenes: 10 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
72 – 92	200	1.80	0.90
92 – 99	70	1.01	1.44
Espaciamiento entre drenes: 20 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
48 – 59	110	1.03	0.93
59 – 66	70	0.73	1.04
Espaciamiento entre drenes: 30 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
36 – 55	190	2.50	1.31
55 – 64	90	1.19	1.32
Espaciamiento entre drenes: 35 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
79 – 89	100	0.65	0.65
89 – 94	50	0.51	1.02
94 – 97	30	0.43	1.43
Espaciamiento entre drenes: 50 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
57 – 73	160	2.15	1.34
73 – 81	80	1.22	1.52

#### 4.2.2.8.3. Lote D-6

Aún cuando los valores de espacio poroso drenable tuvieron poca variación (0.8 y 1.0%) en ambos espaciamientos (30 y 40 m) sembrados con maíz y caña de azúcar en este lote; se puede observar que existió un efecto causado por la evapotranspiración del cultivo en cada espaciamiento, ya que cada cultivo requiere o tiene diferentes necesidades hídricas (Cuadro 16).

**Cuadro 16.** Valores de espacio poroso drenable ( $\mu$ ) estimados con el método de la relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $\Delta h$ ) y la descarga de drenes ( $Dr$ ). Lote D-6 (Cultivos Caña de azúcar y Maíz – Serie Limón).

Espaciamiento entre drenes: 30 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
22 – 61	390	3.12	0.20
61 – 89	280	1.75	0.62
89 – 103	140	1.11	0.79
103 – 112	90	0.72	0.80
Espaciamiento entre drenes: 40 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
68 – 130	620	6.39	1.03
60 – 130	700	7.06	1.00

#### 4.2.2.8.4. Lote C-6

Esta área de drenaje con un espaciamiento de 30 m, sembrado con caña de azúcar y ubicada en la serie Limón, su espacio poroso drenable fue de 2.4%, este valor es alto con los encontrados en esta misma serie de suelos de los otros lotes; esto puede explicarse porque en este espaciamiento los drenes subterráneos tienen arena como filtro envolvente, lo que hace que haya una mayor velocidad del flujo del agua hacia los drenes (Cuadro 17). Cabe mencionar que aún cuando los dos tipos de suelos son de origen aluvial reciente, existen diferencias en los valores de espacio poroso drenable por efecto del tipo de suelo y por manejo con el cultivo. Realizando una comparación con la serie Libertad sin cultivo y el espaciamiento de 30 m se encontraron valores de 2.3% (Lote D-5); mientras que en la serie Limón cultivada con maíz y espaciamiento de 30 m (Lote C-7) los valores fueron de 1.3%, esta diferencia es por efecto en el manejo del suelo y cambios en la estructura.

El lote D-5 contra el lote D-6 ambos con espaciamiento de 40 m e igual serie de suelos (Limón) pero con diferente manejo (sin cultivo y con caña de azúcar, respectivamente), se encontraron valores de 1.25 y 1.03%, esta diferencia se debió a que el lote D-5 se mantuvo barbechado y rastreado lo cual permitió la disgregación de la estructura del suelo y por lo tanto un mayor espacio poroso drenable.

**Cuadro 17.** Valores de espacio poroso drenable ( $\mu$ ) estimados con el método de la relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $\Delta h$ ) y la descarga de drenes ( $Dr$ ). Lote C-6 (Cultivo Caña-Serie Limón).

Espaciamiento: 30 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
73 - 101	280	5.04	1.8
101 - 111	100	2.45	2.4

#### 4.2.2.9. Transmisividad

En el módulo de drenaje la variable transmisividad fue evaluada como el producto de la conductividad hidráulica y el estrato permeable; los valores mostraron un rango de 0.527 hasta 5.111 m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>. Como puede observarse la transmisividad está en función de la conductividad hidráulica y ésta depende de factores entre los que destacan: geometría de los poros, naturaleza de la superficie de las partículas, textura, estructura, densidad, materia

orgánica y tipo de mineral de la arcilla. Estas características hacen que el flujo hídrico en medios porosos bajo condiciones naturales se comporten diferentes en espacio y tiempo (Huan y Shan, 1993). Sin embargo las variaciones de transmisividad presentes en los diferentes espaciamientos se debió a que el estrato permeable fluctuó en un rango de 3.7 hasta 5.0 m (Cuadros 18 a 21).

**Cuadro 18.** Valores de transmisividad lote D-5 (Sin cultivo – Series Libertad y Limón).

Lote D-5					
Variables	Espac. 10 m	Espac. 20 m	Espac. 30 m	Espac. 40 m	Espac. 50 m
Distancia al estrato semipermeable (m)	3.70	4.85	4.02	4.07	4.30
Cond. hidráulica (m día <sup>-1</sup> )	0.409	1.054	1.021	0.393	0.821
Transmisividad (m <sup>2</sup> día <sup>-1</sup> )	1.513	5.111	4.104	1.599	3.530

**Cuadro 19.** Valores de transmisividad lote C-7 (Cultivo maíz . Serie Limón).

Lote C-7					
Variable	Espac. 10 m	Espac. 20 m	Espac. 30 m	Espac. 35 m	Espac. 50 m
Distancia al estrato semipermeable (m)	5.00	3.70	4.40	3.93	4.45
Cond. Hidráulica (m día <sup>-1</sup> )	0.137	0.716	0.876	0.635	0.633
Transmisividad (m <sup>2</sup> día <sup>-1</sup> )	0.685	2.649	3.854	2.495	2.816

**Cuadro 20.** Valores de transmisividad lote D-6 (Cultivos maíz y caña de azúcar – Serie Limón).

Lote D-6		
Variable	Espac. 30 m	Espac. 40 m
Distancia al estrato semipermeable (m)	3.77	4.03
Cond. Hidráulica (m día <sup>-1</sup> )	0.140	0.413
Transmisividad (m <sup>2</sup> día <sup>-1</sup> )	0.527	1.664

**Cuadro 21.** Valores de transmisividad del lote C-6 (Cultivo caña de azúcar – Serie Limón).

Lote C-6	
Variable	Espaciamiento 30 m
Distancia al estrato semipermeable (m)	4.25
Conductividad hidráulica (m <sup>2</sup> día <sup>-1</sup> )	1.119
Transmisividad (m <sup>2</sup> día <sup>-1</sup> )	4.755

### 4.2.3. Cultivos

#### 4.2.3.1. Maíz (*Zea mays L.*)

En el módulo de drenaje en sus diferentes espaciamientos se han evaluado las respuestas de diversos cultivos. El presente trabajo se realizó en el ciclo agrícola temporal 1996; donde se estimó el rendimiento de grano en maíz, encontrando efecto de espaciamiento entre drenes y que el mejor fue el de 30 m con un rendimiento de 2.7 t ha<sup>-1</sup> (Cuadro 22).

**Cuadro 22.** Estadísticas de producción del cultivo de maíz (Híbrido: A-775) en diferentes espaciamientos de drenes subterráneos en el módulo de drenaje. Región Chontalpa. Ciclo agrícola de temporal 1996.

Espaciamiento entre drenes (m)	Rendimiento de grano (t ha <sup>-1</sup> )
10	1.93
20	2.35
30	2.70
35	2.15
50	2.48

#### 4.2.3.2. Caña de azúcar (*Saccharum officinarum*)

La caña de azúcar es un cultivo de importancia económica que se siembra en la Planicie Aluvial de Tabasco. Desde 1992 se ha venido evaluando el rendimiento de esta gramínea en los diferentes espaciamientos del módulo de drenaje. La presente investigación se llevó a cabo durante el ciclo agrícola 1995/96 y 1996/97 período donde los rendimientos de plantilla y soca fueron de 92.62 y 86.85 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Los resultados encontrados por diferentes investigadores desde 1992 a 1997 han mostrado diferencias en rendimientos en el cultivo y han coincidido que en el espaciamiento de 30 m se han obtenido los mejores rendimientos (Carrillo, 1995a; Melo, 1994; Lagunes *et al.*, 1995; Salgado *et al.*, 1994; Váldez, 1997). Las variaciones en el rendimiento reportadas por éstos investigadores pueden ser debidas a efectos de espaciamiento, diferentes tipos de suelos en los lotes, fertilización y condiciones climáticas presentes durante el ciclo de cultivo (Cuadro 23).

**Cuadro 23.** Estadísticas de producción del cultivo de caña de azúcar ( $t\ ha^{-1}$  en el híbrido: Mex 69-290) en diferentes espaciamientos de drenes subterráneos en el módulo de drenaje. Región Chontalpa.

Año	Lote	Ciclo	Espaciamientos					
			10 m	20 m	30 m	35 m	40 m	50 m
1992/93	C-7	Plantilla	124.8	119.8	140.6	92.9		
1993/94	C-7	Soca	81.6	81.1	97.6	77.9		
1992/94	D-5	Plantilla	142.2	129.3	158.6		159.1	134.8
1994/95	D-5	Soca	82.1	112.4	81.9		67.94	113.9
1994	D-5	Plantilla	144.0	139.0	157.0		154.0	129.0
1995/96	D-6	Plantilla					92.62	
1996/97	D-6	Soca					86.85	

#### 4.2.4. Balance de agua

El balance parcial de agua durante la fase de recesión (Cuadro 24) se realizó en el espaciamiento de 20 m del lote D-5 (Sin cultivo), que abarca dos series de suelos. Limón y Libertad (Figura 13). Para la estimación de los parámetros de los componentes del balance se utilizó el periodo estacional de mayor precipitación pluvial (Septiembre-Octubre), dividiéndose a su vez en cuatro periodos de observación (recesión), se consideró la precipitación pluvial (PP) como único componente de entrada al modelo y se encontró que el 41.43% de la precipitación fue desalojada por los drenes subterráneos (Dr), el 15.3% fueron pérdidas por evaporación del suelo (Ev), el 29.73% se transformó en escurrimiento superficial, el 13.54% restante es almacenado en el suelo debido al proceso de infiltración. El contenido de humedad del suelo se mantuvo cerca o a capacidad de campo durante los periodos de observación.

**Cuadro 24.** Balance parcial de agua en la fase de recesión sin cultivo, con espaciamiento de 20 m. Lote D-5.

Período	PP (mm)	Dr (mm)	Ev (mm)	Ev media (mm día <sup>-1</sup> )	Escorrentía (mm)	$\Delta h$ y recarga acuífero (mm)
1/oct/96 - 8/oct/96	119.10	38.10	14.74	1.63	8.07	58.19
10/oct/96 - 22/oct/96	101.78	58.73	32.49	2.49	10.56	0
3/nov/96 - 7/nov/96	105.30	58.88	10.34	2.06	36.08	0
9/nov/96 - 15/nov/96	103.60	22.39	8.11	1.15	73.10	0
<b>Total</b>	429.78	178.1	65.68	7.33	127.81	58.19
%		41.43%	15.30%		29.73%	13.54%

### 4.3. Tercera etapa

#### 4.3.1. Modelos

##### 4.3.1.1. Modelo de regresión lineal simple y múltiple para coeficiente de drenaje

En el análisis de regresión lineal simple y múltiple, mediante el procedimiento de selección del modelo por stepwise, en donde intervienen la carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $h$ ), conductividad hidráulica ( $K$ ), transmisividad ( $T$ ), precipitación, evaporación, temperatura del suelo a 0, 10, 20 y 50 cm de profundidad, como variables independientes y el coeficiente de drenaje ( $q$ ) como variable dependiente, se encontró que aun cuando la proporcionalidad de la variabilidad explicada por el modelo (90.58%); solamente las variables  $h$ ,  $K$  y  $T$ , presentaron significancia estadística al 95% de confianza usando prueba de  $t$  (Cuadro 25); es decir, la influencia principal de la fluctuación de la descarga de los drenes está estrechamente correlacionada con la carga hidráulica en el punto medio entre drenes, conductividad hidráulica y transmisividad del acuífero que presenta el suelo de la serie limón con drenes subterráneos de PVC corrugado de 4 pulgadas de diámetro.

**Cuadro 25.** Coeficientes de regresión del modelo con sus respectivos errores estándar, valores de  $t$ , niveles de significancia y la relación funcional del modelo.

Coefficientes de regresión	Variables	Error Estándar	Valores de $t_{calculada}$	Nivel de significancia	$R^2$ ajustada
$\beta_0 = -3.6605$		9.504	-0.385	0.702	0.9058
$\beta_1 = 0.0576$	$h$	0.010	5.282	0.000	
$\beta_2 = 6.7779$	$K$	2.112	3.209	0.002	
$\beta_3 = 2.2593$	$T$	0.704	3.001	0.001	
$\beta_4 = -0.0002$	PP	0.018	-0.012	0.989	
$\beta_5 = 0.1072$	Evap	0.144	0.740	0.463	
$\beta_6 = -0.2471$	$T_0$	0.296	-0.834	0.408	
$\beta_7 = -0.0238$	$T_{10}$	0.548	-0.043	0.965	
$\beta_8 = 0.0559$	$T_{20}$	0.555	0.100	0.920	
$\beta_9 = 0.1457$	$T_{50}$	0.614	0.237	0.813	

El análisis de varianza (Cuadro A3) que probó la hipótesis de igualdad entre los coeficientes de regresión ( $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ ) del modelo:

$$q = -4.739 + 0.058h + 6.797K + 2.265T \quad (35)$$



mostró alta significancia estadística ( $p=0.000$ ) por lo que existe un efecto importante de: carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $h$ ), conductividad hidráulica ( $K$ ) y transmisividad ( $T$ ) sobre el coeficiente de drenaje ( $q$ ); es decir que al menos uno de los coeficientes de regresión es diferente al nivel de significancia del 95%. Como los coeficientes de regresión  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ , y  $\beta_3$  son positivos se afirma que a medida que se incrementan los valores de carga hidráulica, conductividad hidráulica y transmisividad, los valores del coeficiente de drenaje también tienden a incrementarse (Cuadro 26). Las tasas de cambio indican que por cada unidad de cambio de la conductividad hidráulica, el coeficiente de drenaje varió en un rango de 6.797 a 19.181  $\text{mm día}^{-1}$ .

**Cuadro 26.** Coeficientes de regresión ( $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3$ ), pruebas de t para los coeficientes de regresión, funcionalidad del modelo ( $R^2_{aj}$ ) y características del análisis de varianza de los modelos lineal simple y múltiple donde intervienen como variables independientes:  $h$ ,  $K$  y  $T$  y como variable dependiente,  $q$ .

No. Var	Var	Coef. de regresión estimados ( $\beta_i$ )				$t_{calculada}$	P	$R^2_{aj}$	ANVA		
		$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$				CME	F	p
1	h	-2.388	0.1497	-----	-----	$t_{\beta_0} = -2.71$ $t_{\beta_1} = 11.39$	0.009 0.000	0.72	17.76	129.79	0.000
1	K	-4.694	-----	19.181	-----	$t_{\beta_0} = -7.62$ $t_{\beta_2} = 19.92$	0.000 0.000	0.88	7.12	397.12	0.000
1	T	-4.694	-----	-----	6.393	$t_{\beta_0} = -7.62$ $t_{\beta_3} = 19.92$	0.000 0.000	0.88	7.12	397.11	0.000
2	h, K	-5.106	0.061	14.001	-----	$t_{\beta_0} = -11.68$ $t_{\beta_1} = 7.13$ $t_{\beta_2} = 14.10$	0.000 0.000 0.000	0.94	3.52	426.44	0.000
2	h, T	-5.106	0.061	-----	4.666	$t_{\beta_0} = -11.68$ $t_{\beta_1} = 7.13$ $t_{\beta_3} = 14.10$	0.000 0.000 0.000	0.94	3.52	426.44	0.000
2	K, T	-4.230	-----	9.134	3.044	$t_{\beta_0} = -5.86$ $t_{\beta_2} = 3.48$ $t_{\beta_3} = 3.48$	0.000 0.001 0.001	0.84	10.07	133.66	0.000
3	h,K,T	-4.739	0.058	6.797	2.265	$t_{\beta_0} = -8.45$ $t_{\beta_1} = 5.87$ $t_{\beta_2} = 3.31$ $t_{\beta_3} = 3.31$	0.000 0.000 0.001 0.001	0.90	5.93	162.74	0.000

El efecto de cambio por unidad en la transmisividad ( $\text{m}^2 \text{ día}^{-1}$ ), el coeficiente de drenaje cambia entre 2.265 y 6.393  $\text{mm día}^{-1}$ . Los cambios menos sensibles se presentan para los índices de cargas hidráulicas en el punto medio entre drenes (cm) donde por cada

unidad de cambio para esta variable el coeficiente de drenaje fluctúa entre 0.058 y 0.149 mm día<sup>-1</sup>. En el Cuadro 26 los coeficientes de regresión ( $\beta_2, \beta_3, \beta_1$ ) corresponden a valores de k, T y h respectivamente con respecto a (q).

Utilizando como herramienta el cuadrado medio del error (CME) para definir la precisión en el ajuste del modelo (Infante y Zárate, 1997), se encontró que el mejor modelo de regresión lineal ajustado es en donde interviene la conductividad hidráulica (K), ya que posee el valor más bajo (3.52); cabe citar también que al utilizar la transmisividad se observan valores bajos del CME, esto es debido a que esta característica edáfica está en función intrínseca con la conductividad hidráulica. Sin embargo, cuando en el modelo se utilizan las tres variables (h, K, y T) en forma conjunta el ajuste del modelo es considerado como aceptable (5.93).

Tomando como criterio el porcentaje que explica la funcionalidad del modelo matemático ( $R^2_{aj}$ ), podemos definir que los modelos lineales donde interviene la conductividad hidráulica son los que mejor se ajustan por poseer los valores más altos; por lo que el proceso de la mecánica de flujos en medios porosos (suelos de la Planicie Aluvial Tabasqueña), es explicado en un 90% cuando intervienen la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h), la conductividad hidráulica (K) y la transmisividad (T). La Figura 70 indica la relación entre valores observados y predictivos del modelo encontrado, en donde el coeficiente de drenaje es linealmente positivo.

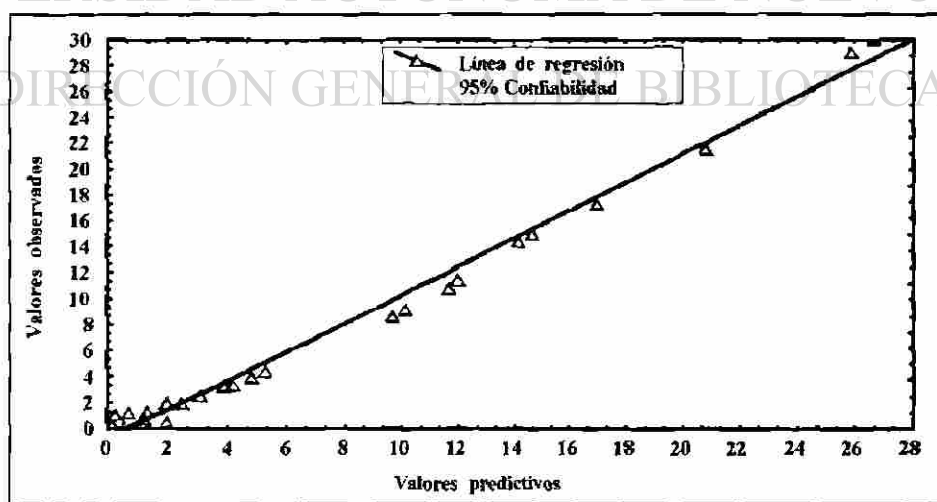


Figura 70. Relación existente entre los valores observados y predictivos ajustados por cuadrados mínimos utilizando coeficiente de drenaje como variable dependiente.

#### 4.3.1.2. Modelo lineal simple por efecto de espaciamiento sobre la fluctuación del manto freático

El análisis de regresión simple para explorar la relación funcional entre la variable espaciamiento entre drenes subterráneos ( $E$ ), sobre la variable carga hidráulica ( $h$ ) en el punto medio entre drenes para las condiciones de la Planicie Aluvial de Tabasco, demostró que existe un efecto importante del espaciamiento sobre la carga hidráulica. Los parámetros estimados ( $\beta_0$  y  $\beta_1$ ) del modelo fueron estadísticamente significativos mediante la prueba de  $t$ ; determinándose de esta manera que los coeficientes de regresión son diferentes de cero (Cuadro 27).

**Cuadro 27.** Coeficientes de regresión del modelo con sus respectivos errores estandar, valores de  $t_{calculada}$  y niveles de significancia observados.

Coeficientes de regresión	Error estándar	Valores de $t_{calculada}$	Nivel de significancia	$R^2$ ajustada	Número Datos
$\beta_0 = 1.871897$	0.4912	3.81	0.0001	0.0977	255
$\beta_1 = 0.079172$	0.0148	5.33	0.0000		

El modelo matemático:

$$h = 1.871897 + 0.079172E \quad (36)$$

Explica la funcionalidad entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes y el espaciamiento entre drenes subterráneos. La fracción de la varianza explicada indica que, solamente el 9.77% de la variabilidad de la fluctuación del manto freático en el punto medio entre drenes es explicada por el efecto del espaciamiento existente entre drenes subterráneos (de PVC, diámetro de 10 cm y filtro de poliéster), para las condiciones de los suelos de las series: Limón y Libertad de la Planicie Aluvial del Estado de Tabasco.

El análisis de varianza para el análisis de regresión, resultó altamente significativo lo que determinó que los coeficientes del modelo son diferentes de cero (Cuadro A4). La relación lineal estimada con el modelo de regresión entre la carga hidráulica y espaciamiento de drenes indicó que por cada incremento de 1 m lineal en el espaciamiento entre drenes, la carga hidráulica entre el punto medio entre drenes aumenta en 0.079 cm (Figura 71).

La precisión del ajuste del modelo considerándose en función del coeficiente de variación (c.v. = 0.829) y varianza ( $s^2 = 12.362$ ) es adecuado, por lo que se confirma que el modelo de regresión guarda una relación funcional lineal y positiva.

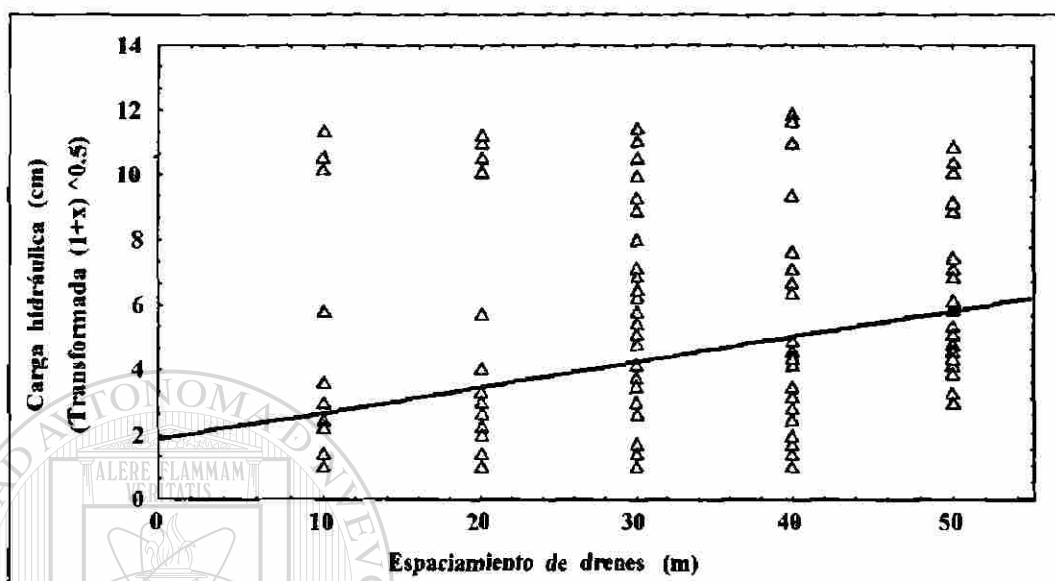


Figura 71. Comportamiento de respuesta del manto freático en el punto medio entre drenes en los diferentes espaciamientos de drenes.

Utilizando la carga hidráulica en el punto medio entre drenes, los espaciamientos como tratamientos y las observaciones diarias como repeticiones, el análisis de varianza del diseño completamente al azar mostró diferencia altamente significativa entre tratamientos a un nivel de significancia del 5% ( $\alpha = 0.05$ ) (Cuadro A5) por lo que la respuesta esperada de los niveles freáticos difieren significativamente con los espaciamientos de drenes subterráneos. La prueba de comparación de medias por el método de Tukey, determinó que los espaciamientos de drenes de 10, 20 y 40 m (ubicados en la Serie Libertad y Limón) se comportan de manera semejante, mientras que los espaciamientos de 30 y 50 m (ubicados en la Serie Libertad) también se comportan de forma similar en las fluctuaciones del nivel freático. Presentándose diferencias estadísticas significativas en el comportamiento de respuesta del manto freático en el punto medio entre drenes de los espaciamientos de 10, 20 y 40 m con respecto a los espaciamientos de 30 y 50 m (Cuadro A6).

### 4.3.1.3. Modelos para carga hidráulica en el punto medio entre drenes

Las estadísticas, análisis de regresión y análisis de varianza (Cuadros 28 y A7) identifican que solamente el coeficiente de drenaje ( $q$ ) actúa como factor principal para explicar la variación total de la carga hidráulica en el punto medio entre drenes, con un 62.25% (Cuadro 28). Por lo que, utilizando el análisis de regresión (Cuadro 29), en donde se considera sólo ( $q$ ) dio como resultado el modelo lineal:

$$h = 27.42055 + 4.40628q \quad (37)$$

el cual explica el 65.30% de la variación total de la fluctuación del manto freático en el punto medio entre drenes.

**Cuadro 28.** Coeficientes de regresión del modelo con sus respectivos errores estándar, valores de  $t_{calculada}$ , niveles de significancia y la relación funcional del modelo.

Coeficientes de regresión	Error estándar	Valores de $t_{calculada}$	Nivel de significancia	$R^2$ ajustada
$\beta_0 = -84.596$	104.206	-0.811	0.421	0.6225
$\beta_1 = 4.1306$	1.021	4.044	0.000	
$\beta_2 = 1.6786$	24.764	0.067	0.946	
$\beta_3 = 0.5596$	8.255	0.067	0.946	
$\beta_4 = -0.0572$	0.224	-0.254	0.800	
$\beta_5 = -1.3955$	1.698	-0.821	0.415	
$\beta_6 = -1.2869$	3.359	-0.383	0.703	
$\beta_7 = -0.8441$	6.036	-0.139	0.889	
$\beta_8 = -3.9529$	6.042	-0.654	0.516	
$\beta_9 = 0.4218$	6.524	1.597	0.117	

El análisis de regresión (Cuadro 29), considerando solamente  $q$  presentó alta significancia estadística observada ( $\alpha = 0.000$ ). Por consiguiente la carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $h$ ) en función del coeficiente de drenaje, dio como resultado el modelo lineal:

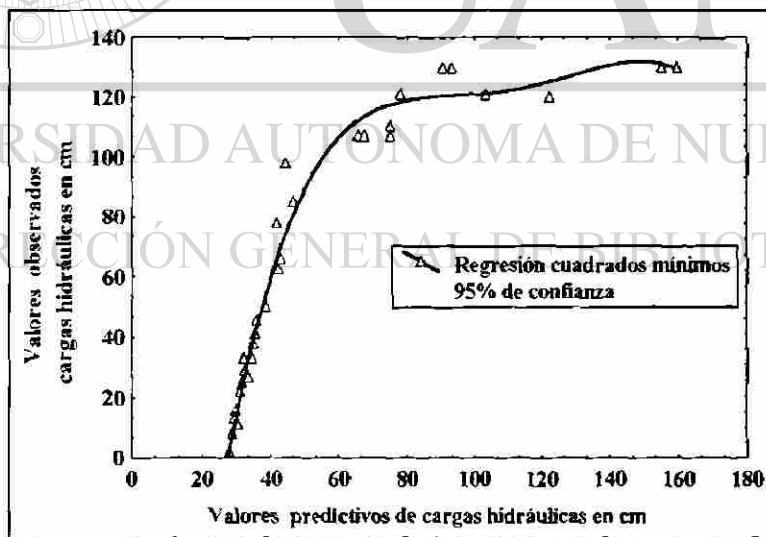
$$h = 27.42055 + 4.40628q \quad (38)$$

La prueba de sus coeficientes ( $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1$ ) fueron diferentes de cero a un nivel de significancia del 0.01 (Cuadro 29); dicho modelo explicó el 65.3% de la variación total de la fluctuación del manto freático en el punto medio entre drenes.

**Cuadro 29.** Coeficientes de regresión del modelo con sus respectivos errores estándar, valores de  $t_{calculada}$ , niveles de significancia y la relación funcional del modelo.

Coeficientes de regresión	Error estándar	Valores de $t_{calculada}$	Nivel de significancia	$R^2$ ajustada
$\beta_0 = 27.42055$	4.381	6.257	0.000	0.6530
$\beta_1 = 4.40628$	0.451	9.751	0.000	

La Figura 72 muestra la relación existente entre valores predictivos y observados según el modelo lineal encontrado; en ella se aprecia que cuando los valores observados de carga hidráulica en el punto medio entre drenes fluctúa de 0 a 80 cm, los valores predictivos guardan una relación lineal funcional positiva; a valores mayores de 80 cm los valores predictivos presentan una tendencia diferente; esto es debido al estado de flujo hidráulico que prevalece en ese momento.



**Figura 72.** Relación existente entre los valores observados y predictivos ajustados por cuadrados mínimos utilizando carga hidráulica como variable dependiente.

## 5. CONCLUSIONES

1. El análisis multivariado por conglomerado, de 15 variables edáficas de 91 perfiles de suelos de la Planicie Aluvial definió el agrupamiento de los suelos en tres grupos con un índice de similitud de 0.01 y de acuerdo con la nomenclatura de taxonomía de suelos FAO (1989); el primer grupo caracterizó los suelos con mayor grado de similitud y correspondió a los Vertisoles, el segundo a los Fluvisoles y el tercer grupo a los Gleysoles.
2. Con respecto a la superficie total de la Región de la Chontalpa (780, 290 ha) los Vertisoles éutricos representan el 33.79% (263,650 ha); Fluvisoles éutricos 14.05% (109,645 ha), Fluvisoles gleyi-éutricos 1.75% (13,633 ha); Gleysoles mólicos 10.51% (81, 984 ha) y los Gleysoles éutricos 1.0% (7, 870 ha).
3. Del análisis por componentes principales de las 15 variables edáficas, fueron cinco los componentes principales representados, de los cuales el primero aportó el 42% de la variación total y fue inherente a la capacidad de retención de humedad del suelo, por las variables: capacidad de campo, punto de marchitez permanente, arcilla, arena y capacidad de intercambio catiónico.
4. En la evaluación del módulo de drenaje subterráneo del "Trapezio" durante el periodo de recesión, el patrón de comportamiento entre la precipitación pluvial, la carga hidráulica en el punto medio entre drenes y descarga de drenes expresada como coeficiente de drenaje, se asemejaron a las condiciones de flujo estabilizado o permanente. La relación descarga y carga hidráulica es cuadrática, ajustándose a la ecuación de Hooghoudt para el cálculo de la conductividad hidráulica.
5. El espacio poroso drenable se incrementa a medida que disminuye la carga hidráulica, bajo condiciones del periodo de recesión en el que se considera cese de la percolación, capilaridad despreciable por bajo índice de evaporación y contenido de humedad cercano a capacidad de campo en la zona radicular.

6. En la Serie de suelo Limón la conductividad hidráulica presentó valores desde 0.013 hasta 1.732 m día<sup>-1</sup>, el espacio poroso drenable de 0.65 a 1.52% y para el coeficiente de drenaje de 12 hasta 15.87 mm día<sup>-1</sup>.
7. El cultivo de maíz (Híbrido A-775) establecido en la Serie de suelos Limón (para las condiciones climatológicas que prevalecieron en el módulo de drenaje durante el ciclo de temporal 1996) alcanzó el máximo rendimiento (2.70 t ha<sup>-1</sup>) en el espaciamiento entre drenes subterráneos de 30 m.
8. Mediante el análisis del balance parcial de agua para el período de mayor precipitación realizado en el lote D-5, para el espaciamiento de 20 m (sin cultivo), que abarca las series de suelos: Limón y Libertad, se determinó que el 41.43% de la precipitación fue desalojada por los drenes subterráneos, un 13.54% se descarga a los colectores abiertos por infiltración horizontal y recarga el acuífero profundo, el 15.3% se pierde por evaporación del suelo y el 29.73% por escurrimiento superficial.
9. La variación del coeficiente de drenaje en función de la conductividad hidráulica, transmisividad y carga hidráulica fue lineal y positiva presentándose los cambios más sensibles para conductividad hidráulica.

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## 6. RECOMENDACIONES

1. Hacer una evaluación integral de los componentes del sistema de manejo de agua en el módulo de drenaje en función de los principales cultivos de la región, considerando los efectos de la lixiviación de nutrientes y agroquímicos en el suelo, la calidad de las aguas drenadas y de los cuerpos receptores de dichas aguas y su impacto en el ambiente.
  2. Debido a la importancia que representa el balance hidrológico dentro de la planeación de un sistema integral de manejo de agua, es conveniente que además de la lámina de lluvia se considere la intensidad de la misma y se automatice su registro, así como también el de las fluctuaciones del manto freático.
  3. Mejorar el mantenimiento y conservación de los drenes colectores de tipo abierto en donde se descargan las aguas de los drenes subterráneos, debido a que por problemas de azolvamiento las descargas de dichos drenes se ahogan y principalmente en el período de mayor precipitación trae como consecuencia una subida rápida del manto freático, en muchos casos por encima del nivel del terreno afectando a los cultivos.
- 
4. Además del sistema de drenaje subterráneo es necesario establecer o mejorar el sistema de drenaje superficial para reducir la recarga del manto freático, la lixiviación de nutrientes e intensidad de lavado de los suelos; mejorando las condiciones para la formación, conservación de la fertilidad de los suelos y el desarrollo de los cultivos.

## 7. LITERATURA CITADA

- Ahmad, N., and R. S. Kanwar. 1991. Effect of different moisture stress levels on corn growth in field lysimeters. *Transactions of the ASAE* 34(5): 1991-1996.
- Armstrong, A. C., D. W. Rycroft, and D. J. Welch. 1980. Modelling water table response to climatic inputs-its use in evaluating drainage designs in Britain. *Journal of Agricultural Engineering Research* Vol. 25:311-323.
- Benz, L. C., E. J. Doering, and G. A. Reichmann. 1985. Water-table and irrigation effects on corn and sugarbeet. *Transaction of the ASAE*. Vol. 28 (6). 1951-1956.
- Bresler, E., G. Dagan, D. J. Wagenet and A. Laufer. 1984. Statistical analysis of salinity and texture effects on spatial variability of soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 16-25.
- Buol, S. W., F. D. Hole and R. J. McCracken. 1980. Soil genesis and classification. 2a. Edición. Iowa State University Press. Iowa, USA. 221 p.
- Burrough, P. A., J. Bouma and S. R. Yates. 1994. The state of the art in pedometrics. *Geoderma an International Journal of Soil Science* (62): 311-326.
- Camp, C. R. and Carter C. E. 1983 Sugarcane yield response to subsurface drainage for an alluvial soil. *Transactions of the ASAE*. Vol. 26(4): 1112-1116.
- Campos, D. F. 1995. Guías para la elaboración de estudios agroclimáticos de cultivos (propuesta normativa). *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. X, Núm.1. p. 15-33.
- Carter, C.E., R. L. Bengtson, and J. S. Rogers. 1986. Drainage needs as indicated by high water-table. *American Society of Agricultural Engineers*. Paper No. 86-2553.
- Carter, C. E. and Camp C. R. 1994 Drain spacing effects on water table control and cane sugar yields. Vol. 37(5). 1509-1513.
- Carrillo A. E. 1995a. Experiencias en drenaje con caña de azúcar. En Memoria de resultados de investigación en el cultivo de caña de azúcar. Cuarto día del cañero. C. P. e ISPROTAB. H. Cárdenas, Tabasco. 59 p.
- \_\_\_\_\_ 1997b. Esquema global para la evaluación del módulo de drenaje subsuperficial de 60 ha. construido en el Campus Tabasco del Colegio de Postgraduados. Informe final. Colegio de Postgraduados. Campus Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco. 223 p.

CEICADES. 1993. Construcción de un modulo de drenaje subterráneo controlado en 60 ha del campo experimental "EL TRAPECIO" memoria técnica. CEICADES H. Cárdenas, Tabasco. 59 p.

CETENAL. 1976. Estudio de gran visión del Estado de Tabasco (Proyecto E1-6-2). Secretaría de la Presidencia. México, D. F. 380 p.

CNA. 1991. Estudio geohidrológico de la zona de los ríos Estado de Tabasco. Subgerencia General de Admón. del Agua. Gerencia de Aguas Subterráneas. Tabasco, México. 345 p.

Cristóbal, A. D. 1993. Comparación de métodos de interpolación en variables hídricas del suelo. Tesis de maestría en ciencia. Centro de hidrocencias, Montecillo, México. 115 p.

Crownover, S. H., N. B. Comerford, D. G. Neary and J. Montgomery. 1995. Horizontal groundwater flow patterns through a cypress swamp-pine flatwoods landscape. *Journal of Soil Science* 59:1199-1206.

Cuanalo, H. E. and R. Webster. 1970. A comparative study of numerical classification and ordination of soil profiles in a locality near Oxford. I analysis of 85 sites. *J. Soil Sci.* (23): 62-75.

Chow, V. T., Maidment, R.D. y Mays, W.L. 1994. Hidrología aplicada. De McGraw-Hill. 579 p.

Chung, S. O., A. D. Ward and C. W. Schalk. 1992. Evaluation of the hydrology component of the adapt water table management model. *Transactions of the ASAE* 35(2):571-579.

Dieleman, P. J. 1978. Deducción de constantes hidrológicas del suelo a partir de pruebas de drenaje en el campo. En principios y aplicaciones del drenaje. Ed. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Vol. III. Wageningen, The Netherlands. 395 p.

Dieleman, P. J y De Ridder, N. A. 1978. Hidráulica elemental del agua en la zona saturada. En principios y aplicaciones de drenaje. Ed. International Institute For Land Reclamation and Improvement. vol. 1. Wageningen, the Netherlands. 257 p.

Dirección de agrología. 1972 Estudio agrológico especial del proyecto de riego "Balancan-Tenosique", Tabasco. Serie Estudios, Publicacion No. 3: Dirección General de Estudios. Secretaría de Recursos Hidráulicos. México, D.F. 318 p.

Dobermann, A. 1994. Factors causing field variation of direct-seeded flooded rice. *Geoderma an International Journal of Soil Science* (62): 125-150.

Dorsey, J. D., A. D. Ward, N. R. Fausey and E. S. Bair. 1990. A comparison of four field methods for measuring saturated hydraulic conductivity. *Transactions of the ASAE* 33(6): 1925-1931.

Edmonds, W. J., J. B. Campbell and M. Lentner. 1985. Taxonomic variation within three soil mapping units in Virginia. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (49): 394-401.

Ernst, L. F. 1979. Second and third degree equations for the determination of the spacings between parallel drainage channels. In proceedings of the International Drainage Workshop. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen, the Netherlands. Paper No. 1.02. p 85-107.

Evans, R. O., R. W. Skaggs and R. E. Sneed. 1991. Stress day index models to predict corn and soybean relative yield under high water table conditions. *Transactions of the ASAE* 34(5): 1997-2005.

Everts, C. J. and R. S. Kanwar. 1990. Estimating preferential flow to a subsurface drain with tracers. *Transactions of the ASAE* 33(2): 451-457.

FAO. 1989. FAO/UNESCO. Carte Mondiale des Sols legende revisee. Rapport sur les ressources en sols du monde, No. 60. FAO. Roma, Italia. 125 p. + carta.

García, E. 1976. Modificación del sistema de clasificación climática de Köeppen (para adaptarlo a las condiciones climáticas de la República Mexicana). Instituto de Geografía. UNAM Mexico, D.F. 84 p.

Goovaerts, P. 1994. Study of spatial relationships between two sets of variables using multivariate geostatistics. *Geoderma an International Journal of Soil Science* (62): 93-107.

Gupta, R. K., R. P. Rudra, W. T. Dickinson, N. K. Patni and G. J. Wall. 1993. Comparison of saturated hydraulic conductivity measured by various field methods. *Transactions of the ASAE* 36(1):51-55.

Huan, X. W. and Ch. K. Shan. 1993. Stochastic simulation of solute transport in heterogeneous formations: A comparison of parametric and nonparametric geostatistical approaches. *Ground Water*. Vol.31,(6): 953-965.

Jabro, J. D. 1992. Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data. *Transactions of the ASAE* 35(2): 557-560.

Jhonson, R. A. and D. W. Wichern. 1988. Applied Multivariate Statistical Analysis Ed Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 396 p.

Jones, J. W., J. W. Mishoe and K. J. Boote. 1987. Introduction to simulation and modeling. Bulletin no. 100. Food & Fertilizer Technology Center. USA 291 p.

Kanwar, R. S. and J. Sanoja. 1988. Comparison between DRAINMOD and a DRAINAGE model. American Society of Agricultural Engineers. Paper no. 88-2056. 16p.

Kanwar, R. S., J. L. Baker and S. Mukhtar. 1988. Excessive soil water effects at various stages of development on the growth and yield of corn. Transactions of the ASAE 31(1): 133-141.

Kessler, J., y Raad, S. J. 1978. Análisis de datos pluviométricos. En principios y aplicaciones de drenaje (Ed.) International Institute for Land Reclamation and Improvement. Vol. III. Wageningen, The Netherlands. 395 p.

Lagunes E. L del C., S. Salgado G., M L. Ortega D. 1995. Comportamiento de variedades de caña de azúcar bajo condiciones de drenaje subterráneo. En Memoria de resultados de investigación en el cultivo de caña de azúcar. Cuarto día del cañero. C. P. e ISPROTAB. H. Cárdenas, Tabasco. 59 p.

Linsley, K. R., Kohler A. M., y Paulhus L. H. J. 1994. Hidrología para Ingenieros. Ed. McGraw-Hill. México, D F. p. 385.

Ludwig, J. A and J. F. Reynolds 1988. Statistical Ecology. A primer on methods and computing. Ed. John Wiley & Sons, Inc. USA. 239 p.

Madramootoo, C A. 1990. Assessing drainage benefits on a heavy clay soil in Quebec. Transactions of the ASAE 33(4).1217-1223.

Martínez, B J. 1978 Drainage and reclamation of salt-affected soils. Bardenas area, Spain. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen, The Netherlands 321 p.

McCarthy, E J. 1990. Modification, testing and application of a hidrologic model for a drained forest watershed Ph D. thesis, North Carolina State University, Raleigh. 254 p

McCarthy, E. J., and R. W Skaggs 1991. A simplified model for predicting drainage rates for changing boundary conditions. Transactions of the ASAE 34(2): 443-448

- Medina, G. G. y Ruiz C. J. A. 1992. Sistema de Información para Caracterizaciones Agroclimáticas. Versión 2.0. Campo Experimental Zacatecas Zacatecas, México.
- Melo A. J. 1994. La producción de caña de azúcar bajo condiciones de drenaje. En Memoria de resultados y avances de investigación en el cultivo de caña de azúcar. Tercer día del cañero. C. P. H. Cárdenas, Tabasco. 74 p.
- Moody, 1966. Nonlinear differential equation of drain spacing, Amer. Soc. Civil Eng., Proc. 92 (IR2):1-9.
- Mukhtar, S., J. L. Baker and R. S. Kanwar. 1990. Corn growth as affected by excess soil water. Transactions of the ASAE 33(2):437-442.
- Myers, D. E. 1994. Spatial interpolation: an overview. Geoderma an International Journal of Soil Science (62): 17-28.
- National Soil Erosion-Soil Productivity Research Planning Committee, USDA-ARS. 1981. Soil erosion effects on soil productivity: A research perspective. J soil water conserv. 36:82-90.
- Ovalles, F. A. and M. E. Collins. 1988. Variability of Northwest Florida soils by principal component analysis. Soil Sci. Am. J. (52): 1430-1435
- Palma, L. D.J. y Cisneros, D.J. 1996. Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco, Volumen I. Fundación Produce Tabasco A.C. Villahermosa, Tab., 116 p. + anexos.
- Pankratz, A. 1983. Forecasting with univariate Box-Jenkins models. Concepts and Cases. Ed. John Wiley & Sons, Inc. USA. 361 p.
- PEMEX. 1979. Estudio geohidrológico del campo Antonio J. Bermúdez, Estado de Tabasco. Tomo I P. 8-13
- Perret, J. S., S. O. Prasher, R. S. Clemente, and A. Bhardwaj. 1997. Analysis of uncertainty in the design of drainage systems. Transactions of the ASAE 40(1): 71-80.
- Pissani, Z. J. F. 1975. Drenaje. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Colegio de graduados. 253 p.
- Rao, P. V., P. S. C. Rao, J. M. Davidson and L. C. Hammond. 1979. Use of goodness-of-fit Test for Skaggs, R. W. 1991. Drainage. in: Modeling plant and soil systems. agronomy monograf 31. 205 - 243.

Ritzi, R. W. Jr., S. L. Wright, B. Mann and M. Chen. 1993. Analysis of temporal variability in hidrogeochemical data used for multivariate analyses. *Ground Water*. Vol. 31(2): 221-229.

Rogers, J. S. 1985. Water management model evaluation for shallow sandy soils. *Transactions of the ASAE* 28(3):785-790.

Roldán, J. 1994. Tendencias actuales en el modelado de la precipitación diaria. *Ingeniería del agua*. Vol. I., Núm.1. p. 99.

Sabbagh, G. J., R. L. Bengtson and J. L. Fouss. 1991. Modification of epic to incorporate drainage systems . *Transactions of the ASAE* 34(2):467-472.

Sabbagh, G. J., J. L. Fouss and R. L. Bengtson. 1993. Comparison of Epic-wt and Drainmod simulated performance of land drainage system. *Transactions of the ASAE* 36(1): 73-79.

Salgado G. S., L. Bucio A., y L del C. Lagunes E. 1994. Evaluación de cinco variedades de caña de azúcar bajo tres dosis de fertilización y cinco espaciamientos de drenaje subterráneo. Proyecto de investigación del CEICADES. C.P. H. Cárdenas, Tabasco. 59 p.

Sanoja, J., R. S. Kanwar and S. W. Melvin. 1990. Comparison of simulated (DRAINMOD) and measured tile outflow and water table elevations from two field sites in Iowa. *Transactions of the ASAE* 33(3):827-833.

SARH 1972a. Estudio agrológico detallado de la unidad cabecera Usumacinta. Dirección de Agrología, residencia de Mérida, Yucatán, México. 158 p.

SARH. 1972b. Estudio agrológico especial del proyecto Balancán-Tenosique, 1a. Etapa. Dirección de Agrología, México, D.F.. 119 p. + anexos.

SARH. 1976a. Estudio agrológico semidetallado del proyecto de riego Playa Larga, Municipio de Jonuta, Tabasco, Dirección de Agrología, residencia regional de Merida, Yucatán, México. 187 p.

SARH. 1976b. Estudio agrológico de la zona de Tabasco. Dirección de Agrología, México, D.F. 104 p.

SARH. 1976c. Estudio agrológico semidetallado del proyecto de riego "E.T.A 224" Villa Tecolutilla, Municipio de Comalcalco, Estado de Tabasco. Yucatan, México. 43 p.

SARH 1979. Estudio de ingeniería básica para el desarrollo del arroz, módulo de 2000 hectareas en Jonuta, Tabasco. Comisión del Río Grijalva. Cárdenas, Tabasco. México. 312 p.

SARH. 1980a. Estudio de factibilidad técnica y económica de la unidad de producción hidroagrícola de Macuspana, Tabasco. Comisión del Río Grijalva. Cardenas, Tabasco, México. 257 p.

SARH. 1980b. Estudio agrológico semidetallado de Comalcalco, Tabasco. Subdirección de Agrología. México. D.F. 134 p.

SARH. 1981a. Estudio de factibilidad técnica y económica de la unidad de producción hidroagrícola de San Miguel de afuera, Tabasco. Comisión del Grijalva Cárdenas, Tabasco, México. 218 p.

SARH. 1981b. Estudio agrológico semidetallado bajo Tacotalpa, Tabasco. Subdirección de Agrología. México. D.F. 310 p.

SARH. 1981c. Estudio agrológico semidetallado bajo Tacotalpa, Tabasco. Subdirección de Agrología. México. D.F. 149 p.

SARH. 1982a. Estudio agrológico semidetallado de la zona de las márgenes del Río Usumacinta, en el Estado de Tabasco. Dirección General de Estudios México, D.F. 182 p.

SARH. 1982b. Estudio agrológico semidetallado de la zona de Tacotalpa. Tabasco. Dirección General de Estudios. México, D.F. 186 p.

SARH. 1984a. Estudio agrológico de reconocimiento del Distrito de Temporal 120. H. Cárdenas, Tabasco. Subdirección de Agrología. México, D.F. 181 p.

SARH. 1984b. Estudio agrológico de reconocimiento del Distrito de Temporal 1, Villahermosa, Tabasco. 100 p.

SARH. 1987a. Estudio agrológico detallado del proyecto Usumacinta, Campeche-Tabasco. Dirección General de Estudios. México, D.F. 100 p.

SARH. 1987b. Proyecto de temporal tecnificado Cupilco, Municipio de Comalcalco, Tabasco, México, D.F. 75 p. + anexos.

Servicio de Conservación de Suelos. 1972. Principios de avenamiento o drenaje centro regional de ayuda técnica (RTAC), agencia para el desarrollo internacional (AID), Dpto. de Estado del Gobierno de los EE.UU. Editorial Diana, S.A. México, D.F. 64 p.

Shirmohammadi, A. D. L. Thomas and M. C. Smith. 1991. Drainage subirrigation design for pelham loamy sand. Transactions of the ASAE 34(1): 73-80.

Skaggs, R. W. and Y. K. Tang. 1979. Effect of drain diameter openings and envelopes on water table drawdown. Transactions of the ASAE 14(3):326-333.



- Skaggs, R. W. 1980. Drainmod reference report, methods for desing and evaluation of drainage water management systems for soils with high water tables Report for USDA-SCS.S. Nat. Tech. Center, Texas, USA. 367 p.
- Skaggs, R. W. 1981. Water management model evaluation for North Central Ohio Transactions of the ASAE 24(4):922-928
- Skaggs, R. W. 1982. Optimizing drainage system design for corn. Advances in drainage. 50-61p.
- Skaggs, R. W. 1991a. Drainage. in: Modeling plant and soil system agronomy monograf. 31:205-243.
- Skaggs, R. W. 1991b. Modeling water table response to subirrigation and drainage. Transactions of the ASAE. 34(1): 169-175.
- Snedecor G. W. y G. Cochran W. 1967. Métodos estadísticos. 3ª impresión. Compañía Editorial Continental, S.A. Mexico, D.F. 389 p.
- Stakman, W. P. 1978. Medida de la humedad del suelo. En Principios y aplicaciones del drenaje (Ed.) International Institute for Land Reclamation and Improvement. Vol. III Wageningen, The Netherlands. 395 p.
- Subdirección de Agrología. 1978. Estudio Agrologico de la primera fase del Plan Chontalpa, Municipios de Cárdenas y Huimanguillo, Estado de Tabasco. Dirección General de Estudios. Serie Estudios. Publicación No. 15. México, D.F. 291 p.
- Subdirección de Agrología. 1980. Estudio Agrologico semidetallado de Comalcalco, Tabasco. Dirección General de Estudios, SARH México, D.F. 228 p
- Trangmar, B.B. R. S. Yost and G. Uehara 1985. Aplicacion of geostatistics to spatial studies of soil properties in: Advances in Agronomy 5:38-48. Academic Press, Inc.
- Trujillo N. A. y Palma L. D. 1988. Estudio agrológico detallado del Centro de Enseñanza, Capacitación e Investigación para el Desarrollo Agropecuario, Forestal y Acuicola del sureste (CEICADES). Tabasco, México. 127 p
- Valdéz B. A. 1997. Selección de variedades de caña de azúcar. En Memoria de resultados de investigación en el cultivo de caña de azúcar. Sexto día del cañero C. P. e ISPROTAB. H Cárdenas, Tabasco. 54 p
- Van Beers W F J 1978. Suelos y propiedades del suelo. En Principios y aplicaciones del drenaje (Ed.) International Institute for Land Reclamation and Improvement. Vol. I. Wageningen. The Netherlands. 257 p.

Van De Goor G. A. W. 1978. Diseño y manejo de los sistemas de drenaje Drenaje de arrozales. En Principios y aplicaciones del drenaje (Ed.) International Institute for Land Reclamation and Improvement. Vol. IV. Wageningen, The Netherlands. 547 p.

Van Der Meer, K., and Messemæckers Van De Graaff, R. H. 1978. Estudio Hidropedológico. En Principios y aplicaciones del drenaje (Ed) International Institute for Land Reclamation and Improvement. Vol. III Wageningen, The Netherlands 395 p.

Van Genuchten, M. T and P. J. Wierenga. 1976. Mass transfer studies in sorbing porous media. I. Analytical Solution. Soil Sci. Soc. Am. J. 40: 473-480.

Van Schilfgaarde, J. 1974. Nonsteady flow to drains in Drainage for Agriculture. Madison, Wis.: American Society of Agronomy, Inc. P. 245-270.

Van Schilfgaarde, J., Engelund, F., Kinkham, D., Peterson D. F y Maasland, M 1983 Teoria del drenaje de tierras En drenaje de tierras agrícolas. Editorial Limusa, S.A. México, D F. 386 p

Voltz, M. and M Goulard. 1994. Spatial interpolation of soil moisture retention curves. Geoderma and International Journal of Soil Science (62): 109-123.

Webster, R. and T. M. Burgess. 1980. Optimal interpolation and Isarithmic mapping of soil properties III Changing Drift and Universal Kriging Journal of Soil Science. 31:505-524.

Webster, R. 1985. Quantitative spatial analysis of soil in the field. Advances in Soil Science. Vol (3): 1-70.

Webster, R., M. A. Olivier. 1992. Sample adequately to estimate Variograms of Soil Properties Journal of Soil Science 43 177-192.

West, R. C., Psuty, N. P. and Thom, B. G 1976. Las tierras bajas de Tabasco en el sureste de México. Gobierno del Estado de Tabasco. Villahermosa, Tab. Mexico 481 p.

Workman, S. R., and R. W. Skaggs 1990. PREFLO: A water management model capable of simulating preferential flow. Transactions of the ASAE 33(6) 1939-1948

## 8. APENDICE

**Cuadro A1.** Lluvia promedio diaria del mes de Septiembre para las 86 estaciones meteorológicas del Estado de Tabasco, México.

Nombre Estación	Longitud W Grados	Latitud N Grados	Elevación Metros	Promedio	Varianza	Desviación Estándar	Coefficiente variación
EST27001	92.32	17.48	18.00	11.7	581.7	24.11	2.05
EST27002	92.43	18.28	18.00	8.34	291.12	17.06	2.04
EST27003	93.56	18.06	18.00	11.17	388.76	19.71	1.76
EST27004	91.31	17.26	100.00	14.05	560.55	23.67	1.68
EST27006	91.27	18.00	100.00	11.72	393.46	19.83	1.69
EST27007	93.37	18.00	100.00	11.06	441.70	21.01	1.89
EST27008	93.22	18.01	21.00	10.99	453.22	21.28	1.93
EST27009	93.13	18.16	10.00	10.40	433.06	20.81	1.99
EST27010	93.11	18.04	10.00	9.81	439.60	20.96	2.13
EST27011	92.50	17.36	60.00	22.26	0.77	0.87	0.03
EST27012	91.46	17.45	60.00	12.22	479.54	21.89	1.79
EST27013	93.29	18.18	60.00	10.19	458.95	21.42	2.10
EST27014	92.56	18.01	60.00	8.52	255.58	15.98	1.87
EST27015	93.54	17.50	7.00	13.44	453.79	21.30	1.58
EST27016	92.39	18.32	1.00	9.33	583.38	24.15	2.58
EST27017	93.24	17.50	193.00	11.28	499.91	22.35	1.98
EST27018	93.28	17.52	193.00	10.52	560.85	23.68	2.24
EST27019	92.48	17.47	193.00	13.13	393.90	19.84	1.51
EST27020	93.03	18.12	193.000	8.56	349.61	18.69	2.18
EST27021	91.17	17.37	14.00	10.82	295.55	17.19	1.58
EST27022	92.34	17.37	14.00	16.77	635.79	25.21	1.50
EST27023	93.48	17.50	14.00	24.34	1136.62	33.71	1.38
EST27024	92.55	17.45	14.00	13.06	419.56	20.48	1.56
EST27025	92.55	17.59	14.00	10.28	294.19	17.15	1.66
EST27026	94.01	18.08	14.00	10.97	309.38	17.58	1.60
EST27027	92.41	17.36	14.00	15.04	509.88	22.58	1.50
EST27028	92.09	18.06	14.00	10.85	442.68	21.04	1.93
EST27029	92.50	18.10	14.00	8.87	288.19	16.97	1.91
EST27030	92.35	17.46	68.00	12.68	429.39	20.72	1.63
EST27031	92.36	17.45	60.00	11.42	651.39	25.52	2.23
EST27032	93.25	17.38	60.00	13.50	454.47	21.31	1.57
EST27033	93.38	17.44	100.00	11.47	380.39	19.50	1.69
EST27034	93.13	18.24	100.00	8.98	337.05	18.35	2.04
EST27035	93.22	17.41	100.00	12.22	421.27	20.52	1.67
EST27036	93.07	18.00	100.00	10.37	374.48	19.35	1.86
EST27037	92.54	17.50	60.00	11.20	365.87	19.12	1.70
EST27038	93.04	18.19	72.00	9.56	337.63	18.37	1.92
EST27039	93.16	18.01	72.00	11.01	414.96	20.37	1.84
ETS27040	91.10	17.46	21.00	9.53	301.13	17.35	1.81
EST27041	92.32	18.06	21.00	10.80	455.54	21.34	1.97
EST27042	92.47	17.28	60.00	18.43	730.46	27.02	1.46
EST27043	92.49	17.36	60.00	13.63	366.01	19.13	1.40
EST27044	92.58	17.33	72.00	19.79	843.78	29.04	1.46
EST27045	92.57	17.33	50.00	19.99	1011.70	31.80	1.59
EST27046	91.26	17.29	600.00	13.09	528.74	22.99	1.75

EST27047	91.26	17.29	60.00	11.09	473.53	21.76	1.96
EST27048	92.21	17.49	600.00	13.50	509.98	22.58	1.67
EST27049	93.44	17.52	600.00	8.82	209.26	14.46	1.63
EST27050	92.38	18.25	30.00	9.41	343.35	18.52	1.96
EST27051	93.17	18.10	30.00	11.45	497.27	22.29	1.94
EST27052	93.28	18.26	30.00	9.62	376.34	19.39	2.01
EST27053	92.55	18.23	30.00	10.22	529.76	23.01	2.25
EST27054	92.57	17.59	10.00	11.49	401.58	20.03	1.74
EST27055	92.55	17.59	10.00	11.86	526.46	22.94	1.93
EST27056	91.33	17.49	18.00	10.6	453.00	15.69	1.48
EST27057	93.13	18.16	10.00	10.01	721.70	26.86	2.68
EST27059	91.10	17.57	60.00	9.45	323.64	17.99	1.90
EST27060	92.59	17.56	1.00	10.48	485.43	22.03	2.10
EST27061	92.56	17.32	72.00	19.60	1018.15	31.90	1.62
EST27063	91.04	17.36	10.00	10.84	410.96	20.27	1.86
EST27064	91.01	17.50	10.00	14.01	477.64	21.85	1.55
EST27065	92.55	17.59	10.00	13.33	417.92	20.44	1.53
EST27066	91.01	17.17	60.00	10.00	450.00	17.00	1.70
EST27067	91.26	17.29	60.00	9.85	346.16	18.60	1.88
EST27069	91.46	17.52	21.00	9.79	320.57	17.90	1.82
EST27070	92.45	17.22	100.00	17.71	727.09	26.96	1.52
EST27071	92.25	17.46	58.00	9.08	314.38	17.73	1.95
EST27073	92.25	18.18	100.00	9.87	365.41	16.29	1.64
EST27074	93.33	18.18	100.00	11.12	336.86	18.35	1.64
EST27075	93.29	18.14	100.00	10.03	208.73	14.44	1.43
EST27076	93.35	18.14	100.00	10.22	277.90	16.67	1.63
EST27077	93.33	18.09	100.00	11.76	309.59	17.59	1.49
EST27078	93.25	18.04	100.00	13.87	814.45	28.53	2.05
EST27079	93.25	18.03	100.00	11.76	359.95	18.97	1.61
EST27080	93.25	17.58	100.00	12.61	530.17	23.02	1.82
EST27081	92.41	17.47	55.00	4.47	54.11	7.35	1.64
EST27084	93.00	18.22	100.00	7.34	199.39	14.12	1.92
EST27085	92.45	18.30	60.00	11.33	655.26	25.59	2.25
EST27087	91.23	17.59	193.00	4.46	56.56	7.52	1.68
EST27088	91.32	17.52	14.00	3.88	93.87	9.68	2.49
EST27090	91.36	17.58	60.00	9.46	318.13	17.83	1.88
EST27091	91.48	17.56	100.00	7.49	143.26	11.96	1.59
EST27092	92.55	17.50	100.00	11.71	179.95	13.41	1.14
EST27093	91.34	18.00	21.00	5.86	142.95	11.95	2.03

**Cuadro A2.** Coeficientes de los modelos de regresión de segundo orden para las respuestas de coeficientes de drenaje en función de cargas hidráulicas en el punto medio entre drenes para los espaciamientos de 10, 20, 30, 40 y 50 m. Lote D-5.

Espaciamiento ( m )	Coeficientes de regresión			Coeficiente determinístico ( R <sup>2</sup> )
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	
10	2.0757747	-0.07583154	0.017212804	0.95
20	-0.1351602	0.47469880	-0.002068897	0.99
30	0.6255431	-0.01183528	0.000821228	0.91
40	-0.7057049	0.11705813	0.000201490	0.91
50	-1.4885032	0.10755492	0.001858361	0.96

**Cuadro A3.** Análisis de varianza de la regresión entre el coeficiente de drenaje (mm día<sup>-1</sup>) y la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (cm), conductividad hidráulica (m día<sup>-1</sup>) y transmisividad (m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>).

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F	Probabilidad (niv. de prob)
Regresión	3	2898.514	966.171	176.495	0.0000
Error	46	251.814	5.474		
Total		3150.328			

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

**Cuadro A4.** Análisis de varianza de la regresión entre la carga hidráulica (cm) y el espaciamiento entre drenes subterráneos (m).

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F	Probabilidad (niv. de prob)
Regresión	1	317.161	317.1606	28.42505	0.0000
Error	252	2811.761	11.1578..		
Total		3128.922			

**Cuadro A5.** Análisis de varianza tomándose como tratamientos los espaciamientos entre drenes subterráneos y como variable dependiente la carga hidráulica en el punto medio entre drenes.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados Medios	F	Probabilidad (niv. de prob)
Tratamiento	4	629.0636	157.2659	15.664	0.0000
Error	249	2499.858	10.03959		
Total	253	3128.92			

**Cuadro A6.** Valores de p en pruebas de comparación de medias para la variable carga hidráulica en el punto medio entre drenes subterráneos.

	Trat 1= 10 m Media= 2.48	Trat 2= 20 m Media= 2.6	Trat 3= 30 m Media= 6.3	Trat 4= 40 m Media= 3.9	Trat 5= 50 m Media= 5.8
Trat 1	0.0	0.998191	0.000017*	0.135793	0.000018*
Trat 2	0.998191	0.0	0.000017*	0.253178	0.000023*
Trat 3	0.000017*	0.000017*	0.0	0.001502*	0.928780
Trat 4	0.135793	0.253178	0.001502*	0.0	0.026259*
Trat 5	0.000018*	0.000023*	0.928780	0.026259*	0.0

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**Cuadro A7.** Análisis de varianza de la regresión entre carga hidráulica en el punto medio entre drenes y el coeficiente de drenaje, conductividad hidráulica, transmisividad, precipitación, evaporación, temperatura del suelo a 0, 10, 20 y 50 cm.

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F	Probabilidad (niv. de prob)
Regresión	9	70973.4	7885.937	10.1617	0.0000
Error	41	31817.6	776.038		
Total		102791.0			

