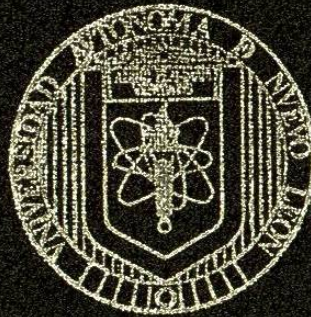


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

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

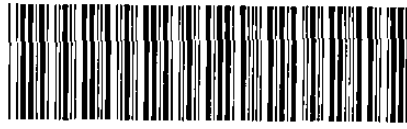
MODELACION Y SIMULACION PARA EL DRENAJE

DE TIERRAS, EN LA PLANICIE ALUVIAL

DEL ESTADO DE TABASCO, MEXICO.

W.G.CH.

TD
Z5071
FA
2000
C3

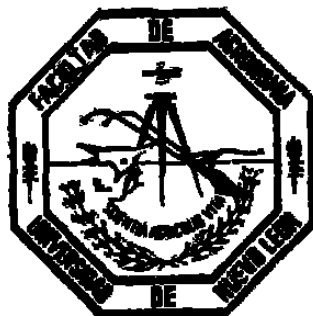


1020145420

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

0151-17460

TB
Z5071
FA
2000
C3

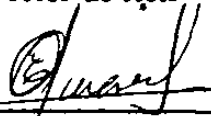


FONDO
TESIS

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

Aprobación de la Tesis

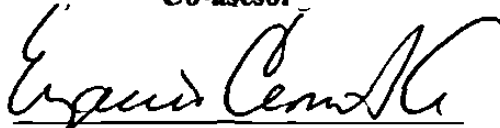
Dr. Cs. Juan Francisco Pissani Zúñiga
Director de tesis



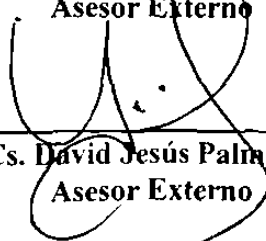
Ph.D. Emilio Olivares Sáenz
Co-asesor



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



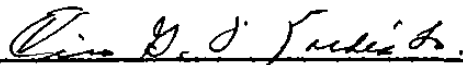
Dr. Cs. Eugenio Carrillo Avila
Asesor Externo



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

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.

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.

Areas 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”

ÍNDICE

	Página
LISTA DE CUADROS.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	xv
SUMMARY.....	xvii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Hipótesis.....	2
1.2. Objetivos.....	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
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
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
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
5. CONCLUSIONES.....	115
6. RECOMENDACIONES.....	117
7. LITERATURA CITADA.....	118
8. APENDICE.....	127

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 (μ) estimados con el método de la relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (Δh) y la descarga de drenes (D_r). Lote D-5 (sin cultivo-Serie Libertad y Limón).....	102
Cuadro 15. Valores de espacio poroso drenable (μ) estimados con el método de la relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (Δh) y la descarga de drenes (D_r). Lote C-7 (Cultivo maíz-Serie Limón).....	103
Cuadro 16. Valores de espacio poroso drenable (μ) estimados con el método de la relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (Δh) y la descarga de drenes (D_r). Lote D-6 (Cultivos caña de azúcar y maíz-Serie Limón).....	103
Cuadro 17. Valores de espacio poroso drenable (μ) estimados con el método de la relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (Δh) y la descarga de drenes (D_r). 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_a) 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

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 periodo 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 Gaussen. Estación meteorológica Samaria-Cunduacán (27039).....	67
Figura 23. Climograma de Gaussen. 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
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
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

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 (mm día^{-1}) y la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (cm), conductividad hidráulica (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 periodos 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 período 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⁻¹, el espacio poroso drenable de 0.65 a 1.52% y para el coeficiente de drenaje de 12.0 hasta 15.87 mm día⁻¹. 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

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

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.