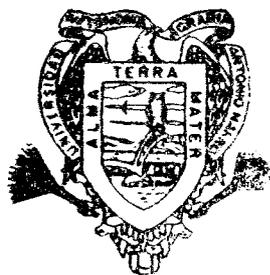


SIMULACION DE LA ACUMULACION DE MATERIA
SECA Y RENDIMIENTO DE GRANO EN MAIZ
(Zea mays L.) BAJO DIFERENTES CONDICIONES
DE HUMEDAD EN EL SUELO

LUIS HUMBERTO MACIEL PEREZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN RIEGO Y DRENAJE



**Universidad Autónoma Agraria
Antonio Narro**

**PROGRAMA DE GRADUADOS
Buenavista, Saltillo, Coah.
ABRIL DE 1992**

Tesis elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría y aprobada como requisito parcial, para optar al grado de

MAESTRO EN CIENCIAS ESPECIALIDAD EN RIEGO Y DRENAJE

COMITE PARTICULAR

Asesor principal:

Raúl Rodríguez García

Dr. Raúl Rodríguez García.

Asesor:

Clara Rosa Leyva Moreno

M.C. Clara Rosa Leyva Moreno.

Asesor:

Gregorio Briones Sánchez

M.C. Gregorio Briones Sánchez

Asesor:

Diana Jasso Cantú

Dra. Diana Jasso Cantú.

Jose M. Fernández Brondo

Dr. Jose M. Fernández Brondo
Subdirector de Asuntos de Postgrado



BIBLIOTECA
RUBEN G. REBONATC
A. A. N.
SALTILLO, COAH.

Buenavista, Saltillo, Coahuila, Abril 1992

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, el cual contribuyó a la realización de mis estudios de maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, mediante el cual fue posible realizar lo aquí presentado.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por su nobleza como institución forjadora de recursos humanos.

Al Dr. Raúl Rodríguez García, maestro investigador del Departamento de Riego y Drenaje, por su asesoría constante en la presente investigación.

Al M.C. Gregorio Briones Sánchez y M.C. Clara Rosa Leyva Moreno, por su asesoría y sugerencias en el presente trabajo.

A la Dra. Diana Jasso Cantú por su gran apoyo en la asesoría y revisión de la presente investigación.

Al Sr. Agustín Gallegos Cerros y Sra. Josefa García de Gallegos, por su apoyo incondicional en mi superación profesional.

A los compañeros de estudios Rafael Magallanes Quintanar y Alejandro Rodríguez Guillén.

A los compañeros Manuel, Eric, Vicente y Fabián así como al Sr. Enrique García Muñoz por su valiosa colaboración en los trabajos de campo.

DEDICATORIA

Con profundo Amor y Cariño a mi esposa

María de la Paz Gallegos García

y

Para nuestras máximas realizaciones

Pacita y Paloma

COMPENDIO

Simulación de la Acumulación de Materia Seca y Grano en
Maíz (*Zea mays* L.), Bajo Diferentes Condiciones
de Humedad en el Suelo.

POR

Luis Humberto Maciel Pérez

MAESTRIA

RIEGO Y DRENAJE

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MEXICO. ABRIL DE 1992

Dr. Raúl Rodríguez García - Asesor -

Palabras Clave: Simulación, maíz, riego, niveles de humedad,
materia seca, rendimiento grano.

Este estudio se realizó con el objeto de evaluar el modelo de simulación propuesto por Van Keulen y Wolf (1986), para determinar su capacidad de predicción de la acumulación de materia seca y grano en el cultivo de maíz bajo diferentes condiciones de humedad en el suelo.

Se evaluaron cuatro tratamientos de humedad del suelo, distribuidos en el campo en bloques al azar con cuatro repeticiones, con el propósito de determinar los patrones de acumulación de materia seca en raíz, tallo, hojas, mazorca y total por planta, así como el índice de área foliar, transpiración y la dinámica de humedad del suelo.

En el experimento de campo se presentaron únicamente dos condiciones contrastantes de humedad. Los resultados de la simulación, indicaron que el peso seco de la raíz, índice de área foliar y rendimiento de grano estimados difieren significativamente de los datos observados en campo; mientras que el contenido de humedad del suelo, transpiración, peso seco de hojas, tallos y rastrojo resultaron estadísticamente igual a los datos observados, con un α de 0.05 de probabilidad.

ABSTRACT

Simulation of Dry Matter Accumulation and Grain Yield
of Corn (*Zea mays* L.), Under Different
Soil Water Conditions.

BY

Luis Humberto Maciel Perez

MASTER OF SCIENCE

IRRIGATION AND DRAINAGE

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MEXICO. APRIL OF 1992

Ph.D. Raul Rodriguez Garcia

- Adviser -

Key Words: Simulation, corn, irrigation, moisture levels,
dry matter, grain yield.

This study was conducted to evaluate the simulation model proposed by Van Keulen and Wolf (1986), in order to determine his prediction capacity of dry matter accumulation and grain yield of corn crop under different soil water conditions.

Four treatments of moisture levels were evaluated in randomized blocks design with four replicates to determine dry matter accumulation of root, culm, leaves, ear and total dry plant, furthermore leaf area index, transpiration rate and soil moisture dynamics were obtained.

Only two opposite moisture conditions occurred in field experiment. Simulation results shown that estimated values of root dry matter, leaf area index and grain yield were significantly different from field observed data. Meanwhile soil water content, transpiration rate, and dry matter of leaves, culms and stubble obtained statistically same value from field observed data at a probability level $\alpha = 0.05$.

INDICE DE CONTENIDO

	Págin
INDICE DE CUADROS.....	x
INDICE DE FIGURAS.....	xvi
1. INTRODUCCION.....	
2. REVISION DE LITERATURA.....	
Conceptos Generales de los Modelos de Simulación..	
Evapotranspiración Potencial.....	11
Balance del Agua del Suelo.....	11
Partición de Materia Seca.....	21
Estrés Hídrico y Componentes del Rendimiento.....	31
Componentes que Integran el Modelo de Simulación..	31
Acumulación de Materia Seca.....	31
Evapotranspiración Potencial.....	31
Balance del Agua del Suelo.....	31
4. MATERIALES Y METODOS.....	44
Experimento de Campo.....	44
Localización.....	44
Clima.....	44
Suelo.....	45
Material Genético.....	45
Tratamientos Evaluados.....	46
Distribución de los Tratamientos en el Campo.	47
Muestreo de Materia Seca.....	47

	Página
Establecimiento del Experimento.....	48
Manejo del Cultivo.....	49
VARIABLES DE RESPUESTA.....	51
Variables de Planta.....	51
Variables de Suelo.....	53
Variables de Clima.....	55
Tabla de Partición de Materia Seca.....	55
Análisis Estadístico.....	56
Ajuste de Datos Observados.....	57
Descripción Matemática del Modelo Utilizado.....	58
Acumulación de Materia Seca.....	58
Evapotranspiración Potencial.....	65
Balance del Agua del Suelo.....	70
Capacidad de Predicción del Modelo Utilizado.	81
Mecanización del Algoritmo.....	82
4. RESULTADOS Y DISCUSION.....	83
Dinámica de la Humedad del Suelo.....	83
Transpiración del Cultivo.....	98
Acumulación de Materia Seca.....	103
Acumulación de Materia Seca en Raíz.....	104
Acumulación de Materia Seca en Tallo.....	107
Acumulación de Materia Seca en Hojas.....	110
Acumulación de Materia Seca en Mazorca.....	112
Acumulación de Materia Seca Total por Planta.	114
Rendimiento Económico y Componentes.....	116
Partición de Materia Seca.....	120
Simulación.....	125

	Página
Humedad del Suelo Simulada.....	127
Transpiración Simulada.....	130
Materia Seca Simulada.....	133
CONCLUSIONES.....	147
RESUMEN.....	151
BIBLIOGRAFIA.....	153
ENDICE A.....	161
ENDICE B.....	180
ENDICE C.....	189

INDICE DE CUADROS

Cuadro No.	Página
4.1. Calendario de riegos de auxilio aplicado a los tratamientos de humedad del suelo evaluados. UAAAN 1991.	84
4.2. Análisis de varianza para el contenido de humedad del suelo base volumen en el estrato 0-100 cm, para los muestreos realizados durante el ciclo del maíz. UAAAN 1991.....	90
4.3. Análisis de varianza para la transpiración en el haz y envés de la hoja para los muestreos realizados durante el ciclo del maíz. UAAAN 1991.....	100
4.4. Transpiración media en el haz de la hoja para los tratamientos de humedad en el suelo evaluados, expresada en $\text{mg cm}^{-2} \text{seg}^{-1}$, durante el ciclo del cultivo. UAAAN 1991.....	101
4.5. Transpiración media en el envés de la hoja para los tratamientos de humedad en el suelo evaluados, expresada en $\text{mg cm}^{-2} \text{seg}^{-1}$, durante el ciclo del cultivo. UAAAN 1991.....	103
4.6. Análisis de varianza para el peso seco en la raíz y tallo, para los muestreos realizados durante el ciclo del maíz. UAAAN 1991.....	105
4.7. Acumulación de materia seca promedio en la raíz durante el ciclo del maíz expresada en gr planta^{-1} . UAAAN 1991.....	106

4.8.	Acumulación de materia seca promedio en el tallo durante el ciclo del maíz expresada en gr planta ⁻¹ . UAAAN 1991.....	109
4.9.	Análisis de varianza para el peso seco en hojas, mazorca y total por planta en gr planta ⁻¹ para los muestreos realizados durante el ciclo del maíz. UAAAN 1991.....	111
4.10.	Acumulación de materia seca promedio en hojas durante el ciclo del maíz expresada en gr planta ⁻¹ . UAAAN 1991.....	113
4.11.	Acumulación de materia seca promedio en la mazorca durante el ciclo del maíz expresada en gr planta ⁻¹ . UAAAN 1991.....	115
4.12.	Acumulación de materia seca promedio por planta durante el ciclo del maíz expresada en gr planta ⁻¹ . UAAAN 1991.....	117
4.13.	Cuadrados medios y nivel de significancia para el ANVA del rendimiento de grano y algunos componentes evaluados. UAAAN 1991.....	118
4.14.	Medias del rendimiento económico y sus componentes evaluados. UAAAN 1991.....	119
4.15.	Prueba de t e intervalo de confianza para la media de desviaciones (\bar{D}) de los datos climáticos medidos y estimados. UAAAN 1991.....	127
4.16.	Prueba de t para los valores observados y simulados de la humedad del suelo y transpiración. UAAAN 1991.....	129
4.17.	Intervalo de confianza para la media de desviaciones (\bar{D}) de la humedad del suelo y transpiración. UAAAN 1991.....	130
4.18.	Prueba de t para los valores observados y simulados en los diferentes órganos de la planta de maíz. UAAAN 1991.....	135

Cuadro No.	Págin
4.19. Intervalo de confianza para las medias de desviaciones en tallo, hojas y rastrojo de maíz, bajo los tratamientos de humedad evaluados. UAAAN 1991.....	138
A.1. Información climatológica mensual promedio de 1980 a 1990 de la estación de Buenavista, Saltillo, Coah. UAAAN 1991.....	166
A.2. Análisis físico químico del suelo donde se realizó el experimento. UAAAN 1991.....	166
A.3. Distribución del riego y lluvia a nivel decenal durante el ciclo de crecimiento del maíz. UAAAN 1991.....	167
A.4. Requerimientos de calor (grados día) por tratamiento en función de la fecha de siembra, para los niveles de humedad evaluados. UAAAN 1991.....	167
A.5. Contenido de humedad promedio en base volumen para el estrato 0 - 20 cm de profundidad, durante el ciclo de cultivo. UAAAN 1991.....	168
A.6. Contenido de humedad promedio en base volumen para el estrato 20 - 40 cm de profundidad, durante el ciclo de cultivo. UAAAN 1991.....	169
A.7. Contenido de humedad promedio en base volumen para el estrato 40 - 60 cm de profundidad, durante el ciclo de cultivo. UAAAN 1991.....	170
A.8. Contenido de humedad promedio en base volumen para el estrato 60 - 80 cm de profundidad, durante el ciclo de cultivo. UAAAN 1991.....	171
A.9. Contenido de humedad promedio en base volumen para el estrato 80 - 100 cm de profundidad, durante el ciclo de cultivo. UAAAN 1991.....	172

Cuadro No.	Págin
A.10. Índice de área foliar promedio por planta observado en campo, expresado en $m^2 m^{-2}$, durante el ciclo del maíz. UAAAN 1991.....	173
A.11. Cuadrados medios y nivel de significancia del ANVA de regresión polinomial de segundo orden para las variables de acumulación de materia seca evaluadas en el tratamiento ETM-REF. UAAAN 1991.....	174
A.12. Cuadrados medios y nivel de significancia del ANVA de regresión polinomial de segundo orden para las variables de acumulación de materia seca evaluadas en el tratamiento 75 por ciento de humedad aprovechable en el suelo. UAAAN 1991.	174
A.13. Cuadrados medios y nivel de significancia del ANVA de regresión polinomial de segundo orden para las variables de acumulación de materia seca evaluadas en el tratamiento 50 por ciento de humedad aprovechable en el suelo. UAAAN 1991.	174
A.14. Cuadrados medios y nivel de significancia del ANVA de regresión polinomial de segundo orden para las variables de acumulación de materia seca evaluadas en el tratamiento 25 por ciento de humedad aprovechable en el suelo. UAAAN 1991.	175
A.15. Polinomios de segundo grado para el peso seco de raíz expresado en gr planta ⁻¹ para los niveles de humedad evaluados. UAAAN 1991.....	175
A.16. Polinomios de segundo grado para el peso seco de tallo expresado en gr planta ⁻¹ para los niveles de humedad evaluados. UAAAN 1991.....	175
A.17. Polinomios de segundo grado para el peso seco de hojas expresado en gr planta ⁻¹ para los niveles de humedad evaluados. UAAAN 1991.....	176
A.18. Polinomios de segundo grado para el peso seco de mazorca expresado en gr planta ⁻¹ para los niveles de humedad evaluados. UAAAN 1991.....	176

Cuadro No.	Pagin
A. 19. Polinomios de segundo grado para el peso seco total por planta expresado en gr planta ⁻¹ para los niveles de humedad evaluados. UAAAN 1991....	176
A. 20. Cuadrados medios y nivel de significancia del ANVA de regresión polinomial de segundo orden para la fracción por órgano en el incremento de materia seca en el tratamiento ETM-REF. UAAAN 1991.....	177
A. 21. Cuadrados medios y nivel de significancia del ANVA de regresión polinomial de segundo orden para la fracción por órgano en el incremento de materia seca en el tratamiento 75 por ciento de humedad aprovechable en el suelo. UAAAN 1991....	177
A. 22. Cuadrados medios y nivel de significancia del ANVA de regresión polinomial de segundo orden para la fracción por órgano en el incremento de materia seca en el tratamiento 50 por ciento de humedad aprovechable en el suelo. UAAAN 1991....	177
A. 23. Cuadrados medios y nivel de significancia del ANVA de regresión polinomial de segundo orden para la fracción por órgano en el incremento de materia seca en el tratamiento 25 por ciento de humedad aprovechable en el suelo. UAAAN 1991....	178
A. 24. Polinomios de segundo grado para la fracción de incremento en el peso seco de la raíz para los niveles de humedad evaluados. UAAAN 1991.....	178
A. 25. Polinomios de segundo grado para la fracción de incremento en el peso seco del tallo para los niveles de humedad evaluados. UAAAN 1991.....	178
A. 26. Polinomios de segundo grado para la fracción de incremento en el peso seco de las hojas para los niveles de humedad evaluados. UAAAN 1991.....	179
A. 27. Coeficientes de variación para los muestreos de planta realizados durante el ciclo de maíz. UAAAN 1991.....	179

Cuadro No.	Página
C.1. Datos climáticos relevantes de entrada al modelo de simulación de maíz. UAAAN 1991.....	190
C.2. Resultados de simulación de producción de materia seca para el tratamiento ETM-REF, durante el ciclo de cultivo. UAAAN 1991.....	190
C.3. Resultados de simulación de producción de materia seca para el tratamiento de 75 por ciento de humedad aprovechable, durante el ciclo de cultivo. UAAAN 1991.....	193
C.4. Resultados de simulación de producción de materia seca para el tratamiento de 50 por ciento de humedad aprovechable, durante el ciclo de cultivo. UAAAN 1991.....	196
C.5. Resultados de simulación de producción de materia seca para el tratamiento de 25 por ciento de humedad aprovechable, durante el ciclo de cultivo. UAAAN 1991.....	199

INDICE DE FIGURAS

Figura No.	Pagin
2.1. Diagrama de flujo del modelo de simulación de Van Keulen y Wolf (1986).....	43
4.1. Comportamiento de la humedad del suelo y riegos (R) en el tratamiento ETM-REF, en maíz. UAAAN 1991.....	85
4.2. Comportamiento de la humedad del suelo y riegos (R) en el tratamiento 75 por ciento de humedad aprovechable, en maíz. UAAAN 1991.....	86
4.3. Comportamiento de la humedad del suelo y riegos (R) en el tratamiento 50 por ciento de humedad aprovechable, en maíz. UAAAN 1991.....	87
4.4. Comportamiento de la humedad del suelo y riegos (R) en el tratamiento 25 por ciento de humedad aprovechable, en maíz. UAAAN 1991.....	88
4.5. Dinámica de la humedad del suelo por tratamiento en el estrato 0 a 20 cm, durante el ciclo del maíz. UAAAN 1991.....	91
4.6. Dinámica de la humedad del suelo por tratamiento en el estrato 20 a 40 cm, durante el ciclo del maíz. UAAAN 1991.....	93
4.7. Dinámica de la humedad del suelo por tratamiento en el estrato 40 a 60 cm, durante el ciclo del maíz. UAAAN 1991.....	95

Figura No.	Página
4.8. Dinámica de la humedad del suelo por tratamiento en el estrato 60 a 80 cm, durante el ciclo del maíz. UAAAN 1991.....	96
4.9. Dinámica de la humedad del suelo por tratamiento en el estrato 80 a 100 cm, durante el ciclo del maíz. UAAAN 1991.....	97
4.10. Transpiración en el haz de la hoja del cultivo de maíz. UAAAN 1991.....	99
4.11. Transpiración en el envés de la hoja del cultivo de maíz. UAAAN 1991.....	102
4.12. Acumulación de materia seca en la raíz durante el ciclo del maíz, en los tratamientos de humedad evaluados. UAAAN 1991.....	104
4.13. Acumulación de materia seca en el tallo durante el ciclo del maíz, en los tratamientos de humedad evaluados. UAAAN 1991.....	108
4.14. Acumulación de materia seca en las hojas durante el ciclo del maíz, en los tratamientos de humedad evaluados. UAAAN 1991.....	110
4.15. Acumulación de materia seca en la mazorca durante el ciclo del maíz, en los tratamientos de humedad evaluados. UAAAN 1991.....	114
4.16. Acumulación de materia seca total por planta durante el ciclo del maíz, en los tratamientos de humedad evaluados. UAAAN 1991.....	116
4.17. Fracción de incremento en el peso seco de raíz, hojas y tallo en el tratamiento ETM-REF. UAAAN 1991.....	121

Figura No.	Págin
4.18. Fracción de incremento en el peso seco de raíz, hojas y tallo en el tratamiento de 75 por ciento de humedad aprovechable del suelo. UAAAN 1991...	122
4.19. Fracción de incremento en el peso seco de raíz, hojas y tallo en el tratamiento de 50 por ciento de humedad aprovechable del suelo. UAAAN 1991...	123
4.20. Fracción de incremento en el peso seco de raíz, hojas y tallo en el tratamiento de 25 por ciento de humedad aprovechable del suelo. UAAAN 1991...	124
4.21. Humedad del suelo observada y estimada en los tratamientos ETM-REF (A), 75 (B), 50 (C) y 25 (D) por ciento de humedad aprovechable, en el ciclo del maíz. UAAAN 1991.....	128
4.22. Transpiración observada y estimada en los tratamientos ETM-REF (A), 75 (B), 50 (C) y 25 (D) por ciento de humedad aprovechable, en el ciclo del maíz. UAAAN 1991.....	131
4.23. Materia seca en raíz observada y simulada en los tratamientos ETM-REF (A), 75 (B), 50 (C) y 25 (D) por ciento de humedad aprovechable, en el ciclo del maíz. UAAAN 1991.....	134
4.24. Materia seca en tallos observada y simulada en los tratamientos ETM-REF (A), 75 (B), 50 (C) y 25 (D) por ciento de humedad aprovechable, en el ciclo del maíz. UAAAN 1991.....	137
4.25. Materia seca en hojas observada y simulada en los tratamientos ETM-REF (A), 75 (B), 50 (C) y 25 (D) por ciento de humedad aprovechable, en el ciclo del maíz. UAAAN 1991.....	139
4.26. Índice de área foliar observado y simulado en los tratamientos ETM-REF (A), 75 (B), 50 (C) y 25 (D) por ciento de humedad aprovechable, en el ciclo del maíz. UAAAN 1991.....	141

Figura No.	Págin.
4.27. Peso seco de rastrojo observado y simulado en los tratamientos ETM-REF (A), 75 (B), 50 (C) y 25 (D) por ciento de humedad aprovechable, en el ciclo del maíz. UAAAN 1991.....	143
4.28. Rendimiento de grano observado y simulado en los tratamientos ETM-REF (A), 75 (B), 50 (C) y 25 (D) por ciento de humedad aprovechable, en el ciclo del maíz. UAAAN 1991.....	144
A.1. Localización geográfica del sitio donde se realizó el experimento de campo. UAAAN 1991.....	162
A.2. Croquis de la distribución de los tratamientos de humedad evaluados en campo. UAAAN 1991.....	163
A.3. Climograma de la estación meteorológica de Buenavista, Saltillo, Coahuila, del período de 1980 a 1991. UAAAN 1991.....	164
A.4. Condiciones climáticas prevalecientes durante el ciclo de crecimiento del maíz. UAAAN 1991.....	164
A.5. Radiación solar medida y estimada para el período de crecimiento del cultivo. UAAAN 1991..	165
A.6. Evaporación potencial de una superficie de agua libre medida y estimada para el período de crecimiento del cultivo. UAAAN 1991.....	165

1. INTRODUCCION

En México, el maíz es el cultivo más importante, pues en los últimos diez años se sembraron en promedio ocho millones de hectáreas, lo cual representa alrededor del 38 por ciento de la superficie dedicada a la agricultura en el país, con una producción media anual de 12,512 millones de toneladas. De esta superficie, cerca de un millón de hectáreas es explotada bajo condiciones de riego y el resto bajo condiciones de temporal; el rendimiento promedio nacional es de 1.7 toneladas por hectárea. Este cultivo proporciona ocupación al 20 por ciento de la población económicamente activa del país.

Durante la última década, el déficit promedio anual de este grano fue del orden de 2,525 millones de toneladas, las cuales fueron importadas para satisfacer las necesidades internas de consumo; este diferencial de producción es debido principalmente a la presencia de fenómenos meteorológicos adversos que afectan su producción.

En el Altiplano Norte de la República Mexicana, que está integrado principalmente por los estados de Coahuila, Durango, San Luis Potosí, Zacatecas y Aguascalientes, la

superficie dedicada al maíz en esta región es de aproximadamente 120,000 y 750,000 hectáreas, con un rendimiento promedio de 3.1 y 0.8 toneladas por hectárea, bajo condiciones de riego y temporal respectivamente, cuyas limitaciones son principalmente la disponibilidad de agua y de temperatura, lo que conduce a que las pérdidas por sequía superen inclusive el 50 por ciento, mientras que el daño por heladas puede ser hasta del 20 por ciento.

De acuerdo a lo anterior, una alternativa es el uso de modelos mediante los cuales es posible predecir el comportamiento de un cultivo, lo cual es una herramienta importante de investigación, es decir, mediante la simulación es posible conocer en forma aproximada qué puede esperarse que ocurra en el sistema, cuando se efectúa un cambio en alguno de sus componentes, de tal manera que es factible hacer más corto el proceso de investigación, esto lógicamente no quiere decir que los modelos de simulación sustituyan a los experimentos de campo.

De ahí que los modelos de simulación han sido desarrollados básicamente para cubrir tres aspectos: primero, para ayudar a entender fenómenos dentro de un sistema agrícola; segundo, como una herramienta de investigación y tercero, aquellos modelos desarrollados para monitorear el crecimiento y desarrollo de los cultivos a nivel comercial.

Generalmente los modelos de simulación se dividen en iricos o correlativos y mecanistas o exploratorios; los meros describen las relaciones entre cultivo y ambiente referirse a un seguimiento biológico o físico que existe re las variables gobernantes del crecimiento y desarrollo cultivo, en tanto que los mecanistas intentan explicar forma casual las relaciones entre tales variables. El elo utilizado en el presente estudio lleva una mezcla de os tipos de modelos.

Objetivos

El objetivo general del presente estudio es:

Evaluar el modelo de simulación propuesto por Van len y Wolf en 1986, para determinar la capacidad de dición de la acumulación de materia seca y rendimiento grano en el cultivo del maíz, bajo diferentes condiciones edad.

Los objetivos específicos de la presente estigación son:

1.- Conocer la dinámica de acumulación de materia a durante el ciclo de crecimiento del cultivo, como una ción de las condiciones de temperatura y el grado de rés hídrico.

2.- Comparar la producción de materia seca observada a la producción de materia seca simulada, para determinar la capacidad de predicción del modelo.

3.- Estructurar un programa computacional para adaptar el algoritmo que se va a utilizar en la predicción de la acumulación de materia seca en maíz.

Hipótesis y Supuestos

Las hipótesis planteadas en el presente trabajo son:

El patrón de acumulación de materia seca difiere significativamente al someter a la planta a diferentes niveles de estrés hídrico.

El modelo utilizado para simular la acumulación y producción de materia seca y grano en el cultivo de maíz presenta una capacidad de predicción del 95 por ciento.

Los supuestos que se plantean en esta investigación son los siguientes:

Experimento de Campo.

a) La distribución de la humedad en el suelo por efecto del riego es uniforme.

b) El suelo en cada unidad experimental es homogéneo en cuanto a sus propiedades físicas y químicas.

c) El manejo y control experimental del cultivo fue el adecuado y similar para cada una de las parcelas experimentales.

d) No existe percolación profunda y escurrimientos superficiales del agua infiltrada.

e) Todas las pérdidas de agua durante el ciclo del maíz son atribuidas a la evapotranspiración.

Del Modelo de Simulación Utilizado.

a) Las tasas de cambio calculadas al inicio del intervalo de tiempo no cambian durante este intervalo.

b) Después de antesis únicamente ocurre incremento en el peso seco del grano, en tanto que en la raíz permanece constante, mientras que en hojas y tallo decrecen en su peso.

c) Se asume que la tasa de crecimiento de la raíz es de 15 mm d^{-1} y se distribuye uniformemente a lo largo del perfil del suelo.

d) El contenido de humedad del suelo se distribuye homogéneamente a través del perfil.

e) No existe ascenso capilar debido a la presencia de un estrato impermeable cercano a la superficie.

f) Se supone una declinación lineal en la tasa de evaporación entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

2. REVISION DE LITERATURA.

Conceptos Generales de los Modelos de Simulación

La simulación es una técnica numérica para ensayar alternativas en una computadora digital, los cuales requieren ciertos tipos de modelos lógicos y matemáticos, que describen el comportamiento de un sistema. El fundamento racional para usar la simulación en cualquier disciplina, es la búsqueda constante del hombre para adquirir conocimientos relativos a la predicción del futuro (Naylor *et al.* 1986).

Por otro lado Hall y Dracup (1974), conceptualizan la simulación como la técnica que permite reproducir la esencia de un sistema, sin reproducir el sistema en sí, pero aclaran que el significado más común de este término en los últimos años implica el uso de un modelo, el cual es formulado utilizando las relaciones aritméticas y algebraicas, así como los procesos lógicos.

Whisler *et al.* (1986), establece que el desarrollo de modelos de simulación se puede enmarcar en tres grandes categorías; la primera, aquellos formados para ayudar a entender fenómenos dentro de un sistema agrícola, por

ejemplo el flujo de agua del suelo, control estomatal, el movimiento de los nutrientes y la fertilidad del suelo, entre otros. La segunda, como herramienta de investigación, esto en el modelaje permite conocer en forma aproximada qué puede esperarse que ocurra en el sistema si se efectúa un cambio, lo que puede ser aplicable especialmente cuando el número de variables y/o tratamientos se incrementan y se requieren resultados de varios años; al probar el modelo del sistema puede ayudar a evaluar estos tratamientos y de este modo facilitar los resultados deseados, seleccionar los más idóneos y validarlos en campo para verificar las predicciones; este procedimiento no implica que los modelos eliminen las pruebas de campo, sino que permite hacer más eficiente los recursos y personal de investigación con lo que se pueden enfocar correctamente las líneas de investigación y así alcanzar las metas del proyecto en un menor tiempo. Por último, la tercer categoría, son los modelos formados con la finalidad de dar seguimiento al crecimiento de los cultivos a nivel comercial, permitiendo una mayor probabilidad de éxito. Por otra parte, el investigador que desarrolla un modelo debe considerar el nivel de detalle en que conviene ser desarrollado, ya que lo importante de estos es que permiten predecir las causas que se reflejan en el comportamiento de los cultivos.

Generalmente los modelos se clasifican en empíricos o correlativos, que describen las relaciones entre cultivo y ambiente, sin referirse a un seguimiento biológico o físico

existe entre las variables que gobiernan el crecimiento y desarrollo del cultivo, éstos reducen la posibilidad de entender dichas relaciones, y los mecanistas o laboratorios, intentan explicar en forma casual la relación entre las variables; en un modelo mecanista las funciones matemáticas representan el mecanismo hipotético que describe el comportamiento de la planta y así explicar su comportamiento observado, por esta razón la modelación mecanista es factible convertirla en un mayor entendimiento de las causas con lo que aumentarán las soluciones.

Los datos necesarios para desarrollar un modelo dependiente de la especie a considerar y el tipo de modelo que se construirá. Esencialmente los modelos de simulación relacionados al sistema agua suelo planta atmósfera, requieren información sobre la emergencia, crecimiento, maduración de órganos reproductivos; que son afectados por variables relevantes del medio ambiente y fisiológicos. Esto implica necesariamente el uso de ambientes controlados para recolectar los datos, donde se pueden variar los factores independientemente ya que en el campo no pueden ser aislados sus efectos (Waggoner, 1984).

Van Keulen (1986), afirma que desde el momento en que se utilizaron las computadoras en las ciencias agrícolas, el manejo de cultivos fue el tema de actualidad, ya que los científicos vislumbraron la posibilidad de integrar los conocimientos de los procesos fisiológicos que gobiernan el

crecimiento y desarrollo de las plantas para tratar de explicar su comportamiento bajo condiciones de campo, de tal manera que han sido desarrollados diferentes modelos para cultivos específicos.

Por otro lado Acock y Acock (1991), afirman que el sentido más realista de considerar como un gran número de factores afectan a las plantas es el uso de un factor limitante en el modelo. Esto permite desarrollar modelos mecanistas que simulan la mayoría de los procesos que ocurren en la planta, en el suelo y la atmósfera. Sin embargo, la validación de éstos requiere más tipos de datos que no los predicen los modelos empíricos. Muchos de los datos utilizados para desarrollar modelos de simulación provienen de estudios de ambientes controlados y cámaras de crecimiento de plantas, donde los factores ambientales pueden ser manipulados independientemente. Por lo tanto, está reconocido ampliamente que las plantas cultivadas en cámaras difieren de aquellas que se desarrollan en el campo, y los parámetros del modelo frecuentemente tienen que ser ajustados a los datos apropiados de campo. Así que los datos de campo son esenciales en las etapas finales del desarrollo de los modelos y en la validación.

Evapotranspiración Potencial

Hanks y Hill (1980), establecen que los modelos de mayor interés, son los que asumen que la producción de un cultivo está directamente relacionado con la evapotranspiración.

En este sentido de Wit (1958), relacionó la transpiración del cultivo con el rendimiento, mediante una relación de tipo lineal, a partir de la cual se han desarrollado diversas ecuaciones como la de Hanks (1974), Hanks y Hill (1980) y Kallsen *et al.* (1981), en las que además se integró el concepto del coeficiente de evapotranspiración (relación entre evapotranspiración real y evapotranspiración máxima), posteriormente Stewart *et al.* (1977) siguiendo en esta misma línea de investigación, consideró la conveniencia de fraccionar la evapotranspiración durante el ciclo del cultivo, expresándolo mediante coeficientes por etapa fenológica, haciendo posible cuantificar en forma más exacta el estrés impuesto al cultivo. En este mismo sentido Hanks (1974), generó una ecuación que considera la disponibilidad de humedad en el suelo.

Los resultados de predicción del rendimiento de maíz grano a través de este tipo de modelos, originan desviaciones que fluctúan desde 0.6 a 2.5 ton ha⁻¹, en las distintas localidades en los que han sido probados, lo que

nace suponer que este tipo de relaciones no integran completamente los factores que afectan el rendimiento.

A continuación se presentan investigaciones realizadas con la finalidad de determinar en forma precisa la cantidad de agua que se pierde de la superficie del suelo por efecto de la evaporación y transpiración del cultivo.

La tasa de transpiración del cultivo está determinada por las variables climáticas y por la disponibilidad de agua en el suelo, ésta se reduce cuando las raíces no reabastecen el agua perdida por el estoma de tal manera que la respuesta de la planta es cerrar estas estructuras. Además la tasa de extracción depende de la longitud y edad de las raíces, y del estrés previo de la planta. Las relaciones son muy complejas y difíciles de modelar empíricamente, aunque muchos investigadores lo han intentado. Un enfoque mecanista requiere del uso de varios ajustes durante cada simulación diaria, ya que ha sido establecido durante muchas ocasiones que la tasa de extracción de agua no es proporcional al gradiente de potencial entre el suelo y la hoja o la longitud de las raíces (Eavis y Taylor, 1979).

Ritchie (1973), establece que en la predicción de las tasas de evaporación de los cultivos de campo, es importante considerar la influencia de la condición del agua del suelo sobre la tasa de evaporación actual en relación a la tasa

potencial. Por lo cual realizó un experimento con la finalidad de determinar la tasa de evaporación actual de maíz, influenciada por el contenido de humedad del suelo y la tasa de evaporación potencial. Encontró que las tasas de evaporación son prácticamente independientes del contenido del agua del suelo para todas las condiciones prevalecientes de evaporación potencial. Durante la estación de crecimiento del cultivo fueron removidos más de 20 cm de lámina de agua del perfil de suelo de 120 cm de profundidad. Las mediciones de la resistencia a la difusión y el potencial hídrico de la hoja indicaron que por lo menos el 80 por ciento de la humedad aprovechable del suelo estuvo disponible para la planta.

Villalobos y Fereres (1990), realizaron un experimento en Córdoba, España, entre 1986 y 1988 para obtener estimadores independientes de la evaporación del suelo (E) y de la transpiración del cultivo (T) bajo condiciones de riego en maíz, algodón y girasol. La evaporación estimada cuando la superficie del suelo estuvo húmeda, varió desde 80 por ciento en la referencia $ET(ET_0)$ con índice de área foliar (IAF) de 0.8 a 15 por ciento cuando el IAF se incrementó a cuatro. Una relación simple entre E/ET_0 e IAF ajustó los datos para los tres cultivos. Los valores estimados para los períodos medidos 30 a 40 días, cuando el IAF se incrementó de 0.7 a 5.0 fue 20 a 27 por ciento de las mediciones de ET, para una frecuencia de riego de 7 a 8 días. Los valores calculados de

transpiración, tomados como la diferencia entre la ET y E variaron para un IAF dado dependiendo sobre todo del nivel de evaporación. Cuando la superficie estuvo más seca y la evaporación E fue baja, la relación T/E_0 en algodón fue 1.1 para un IAF de tres. Si la superficie estuvo húmeda por precipitación o riego la relación T/ET_0 calculada declinó a 0.58 para el primer día después del humedecimiento. Los resultados manifiestan la interdependencia de los procesos de evaporación y la transpiración en el uso consuntivo de agua por los cultivos de hileras.

Por otra parte, el dilema de cualquier modelo de evapotranspiración es que la mayoría de los modelos mecanistas, requieren información no fácilmente disponible mientras los empíricos no tienen buena habilidad para la predicción. Una alternativa es la ecuación de Penman (1963) la cual es considerada en muchos modelos dado que es de tipo mecanista, sin embargo presenta un alto grado de empirismo cuando se utiliza para cultivos, ya que es aplicada únicamente en un cultivo que está en un régimen de evapotranspiración libre sin restricciones de humedad; por lo tanto esta ecuación es utilizada únicamente para calcular la evapotranspiración potencial y son necesarios modelos adicionales para predecir la evapotranspiración real de un cultivo. La ecuación requiere un conocimiento de la radiación solar, velocidad de viento, humedad del aire, temperatura, albedo del suelo y cultivo (Tanner y Jury 1976).

Además la separación de la evapotranspiración (ET) en la evaporación del suelo (E) y la transpiración (T) y sus interacciones es un problema importante en la conservación y manejo de agua. Durante el ciclo de vida de un cultivo, el uso de agua cambia completamente de E a T, y finalmente para condiciones en la cual ambas han sido desarrolladas utilizando los diferentes enfoques y niveles de detalle para mejorar la predicción de la ET bajo tales situaciones. En un enfoque empírico para la predicción de la ET, las respuestas del cultivo en el sistema suelo planta atmósfera y el manejo de factores más importantes como el coeficiente para el cultivo en diferentes etapas de crecimiento. Las necesidades de agua actuales del cultivo son determinadas por multiplicación de la ET de referencia por la etapa y el coeficiente específico del cultivo (Jensen *et al*, 1970; Doorenbos y Pruitt, 1977).

Otro enfoque para estimar la ET es el uso de modelos similares a Ritchie (1972) y Tanner y Jury (1976) los cuales calculan la E y T donde el suelo puede estar secándose y humedeciéndose a través de ciclos. Por ejemplo el modelo de Ritchie, calcula la transpiración al multiplicar la transpiración potencial por una función empírica de índice de área foliar (IAF) para explicar el grado de cobertura del cultivo y E, la calcula en dos etapas. Después de un riego o precipitación, la E se calcula como una proporción de la evaporación potencial de la energía solar recibida en la superficie del suelo hasta una evapotranspiración potencial

determinada.

La alternativa del enfoque mecanista trata al tinum suelo planta atmósfera como un intercambio de masa y energía. Los primeros ejemplos de este enfoque fueron los modelos desarrollados por Penman (1948), Monteith (1965) y Bavel (1966) donde la evaporación del suelo y la planta fueron considerados en forma integral.

Más recientemente los modelos que separan la cubierta del suelo y la zona foliar fueron descritos por Shuttleworth y Wallace (1985), Lascano *et al.* (1987) y Adhury y Monteith (1988). En tales modelos, la resistencia al flujo de vapor de agua desde la cubierta, o desde un conjunto de hojas fue calculado al asumir que las resistencias individuales de las hojas actúan en paralelo, $r_{total} = r_s / IAF$. Sin embargo esto no parece ser la forma adecuada de calcular la resistencia superficial del suelo. Los modelos detallados a nivel de hoja que trataron el intercambio de calor latente y sensible en el estrato superior de la cubierta fueron desarrollados por Denmead (1964), Cowan (1968) y Waggoner y Reifsnyder (1968). Estos modelos requieren una gran cantidad de información sobre el suelo, la planta y el clima a través del tiempo y el espacio, y los métodos de cálculo de un balance de energía pueden ser complejos, requiriendo soluciones iterativas en intervalos de tiempo pequeños. Por consiguiente, éstos son difíciles de usar en aplicaciones rutinarias.

Jagtap y Jones (1989), utilizando los principios de balance de masa y de calor, desarrollaron un modelo de evapotranspiración para predecir el uso de agua, la evaporación del suelo, la transpiración y el microclima de un cultivo donde el suelo fue humedecido y secado a través de ciclos. Este modelo cuantifica el intercambio de energía sensible y latente y realimenta los efectos dentro y entre los espacios de aire de la cubierta, el suelo y el aire ambiental sobre la cubierta. La validación experimental de la tasa diaria de ET para soya cultivada en cámaras de ambiente controlada mostraron una excelente concordancia. Las diferencias promedio diarias entre los valores simulados y medidos de ET diarios fueron menores que el 4 por ciento. Es necesario una validación adicional del modelo bajo condiciones de campo ya que la mayoría de los parámetros están fácilmente disponibles. La utilidad práctica de este modelo estriba en programación de riegos, prediciendo la ET, E y T bajo diferentes tipos de ambientes, así como la estimación del microclima bajo condiciones bien irrigadas.

Balance del Agua del Suelo

Los modelos matemáticos para simular el transporte de agua en el suelo han tenido aplicaciones considerables en la investigación y manejo de las relaciones agua suelo planta, de esta manera Tollner y Molz (1983) con base en la relación física de la extracción de la raíz asumieron que la

velocidad de consumo de agua por unidad de volumen es proporcional al producto del área de contacto entre ésta y de la unidad de volumen de suelo, asumiendo que la permeabilidad de las raíces por unidad de longitud y la diferencia entre el potencial hídrico del suelo y el potencial del xilema de la raíz es constante en la zona de la raíz.

Molz y Remson (1971), utilizaron un modelo de extracción de agua de términos unidimensionales para simular el flujo de humedad y el proceso de remoción de agua en la proximidad de la raíz, los resultados indicaron que la extracción de la humedad por el sistema de raíces en la vecindad del suelo fue el proceso más dominante en comparación con el proceso regido por la ley de Darcy en la zona radical, establecieron que el modelo es versátil y al parecer es capaz de describir la mayoría de los fenómenos asociados con la remoción de agua por las raíces de las plantas que transpiran.

Herkelrath et al. (1977), al realizar estudios bajo condiciones de laboratorio con la finalidad de determinar la influencia del contenido del agua del suelo y el potencial hídrico de éste sobre el suministro de agua a la raíz, para lo cual utilizaron índices de extracción de la raíz de trigo durante invierno en una columna de suelo in-situ. Encontraron que los índices de extracción de las raíces tienden a decrecer cuando el contenido de agua del suelo

disminuye por debajo de $0.10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de humedad base volumen aproximadamente, lo cual corresponde a un potencial hídrico del suelo de 0.1 bar.

Las propiedades hidráulicas del suelo son usadas en la descripción del flujo capilar y las subrutinas de extracción de agua. En estos cálculos el flujo entre los espacios libres del suelo son obtenidos utilizando la ley de difusión de Darcy (Whisler *et al.*, 1986).

Driessen (1986), establece que los cambios diarios del agua en la planta pueden ser considerables; una transpiración de 0.4 cm de agua de una superficie de cultivo en un día claro corresponde a una pérdida de agua en la zona de raíces de no menos de 40 000 kg/ha/día. Si la humedad extraída del suelo no es reabastecida, el suelo se seca al grado que las plantas se marchitan y finalmente morirán. Existe un rango óptimo de potencial hídrico en el cual una planta puede tomar agua libremente, arriba o abajo de este rango la planta sufre estrés.

Hayhoe (1981), considera la conveniencia de utilizar los procesos de difusión para simular la distribución de materia seca de la raíz del cultivo de maíz, el cual desarrolló un modelo matemático con la finalidad de relacionarlo con el proceso de extracción de agua por las raíces. El modelo es una función de la tasa de cambio de peso de raíces con respecto al tiempo, de la distancia

vertical de la superficie del suelo y de la difusión de raíces. Para cuantificar el movimiento de agua en el suelo y la extracción por las plantas, está en función de la profundidad del suelo, del contenido volumétrico de agua, del potencial hídrico, de la conductividad hidráulica, de la capacidad de difusión del suelo y de la extracción radicular. Al simular el crecimiento de la raíz en un suelo limoso en Michigan con tres coeficientes de difusión para los diferentes estratos del perfil, encontró que los datos observados son significativamente diferentes en el primer estrato, pero que a medida que se incrementa la profundidad tiende a tener una buena predicción el modelo empleado. Concluye además que los mecanismos involucrados en la extracción de la raíz es compleja y aún no están completamente entendidos.

Feyen *et al.* (1980), realizó un estudio combinado de simulación y experimentación para monitorear los cambios simultáneamente de la condición del agua en la planta y el suelo durante un período de transpiración continua en el zacate Rye grass de raíces uniformes, desarrolladas en macetas, en suelo arenoso y bajo dos niveles artificiales de demanda evaporativa (12 y 8 mm d^{-1}). El patrón de extracción de la humedad del suelo se determinó de dos maneras; por diferencia de peso y a través de tensiómetros, y el potencial hídrico de la planta a través del psicrómetro. Se encontró que el modelo proporciona una descripción real de las fluctuaciones diurnas del potencial hídrico en la planta

durante el período previo al inicio del estrés hídrico; pero resultó menos práctico para describir la caída del potencial hídrico en la planta durante la deshidratación y la fase de marchitez. La rehidratación del cultivo después de una condición de estrés, es posible simularla en forma práctica asignando únicamente un valor más alto a la resistencia de la raíz a la entrada de agua, durante la fase inicial de extracción.

Hatfield (1988), establece que la cuantificación de la tasa de agua perdida de la superficie del terreno es un componente importante del balance hídrico del agua del suelo, ésta es utilizada en modelos globales climáticos. Además con el avance en la tecnología de computadoras han permitido a los científicos desarrollar modelos de simulación más amplios y sofisticados del balance hídrico del suelo. Estos modelos permiten la integración de los factores físicos y biológicos para llegar a una respuesta particular sobre una diversidad de condiciones. La evaluación de los modelos de simulación ocupan una gran cantidad de investigación científica y gasto en el área de evapotranspiración en los primeros años. Para compensar esto se requerirá una expansión del uso común de ecuaciones empíricas basadas en enfoques físicos lo cual tendría una aplicación más difundida.

Una expansión inicial de este estudio ha sido propuesto por Shuttleworth y Wallace (1985) en el cual puede

realizarse un tratamiento más detallado de la partición de la radiación neta que llega a la superficie del suelo y a la cubierta vegetal. Este refinamiento permitirá tratar con más detalle la forma de manipular el sistema, por ejemplo, la cubierta del terreno, la morfología del cultivo, prácticas culturales y superficies húmedas.

Lascano *et al.* (1987) amplió un modelo de balance hídrico propuesto inicialmente por Van Bavel *et al.* (1984) para incluir la partición de energía entre el suelo y la cubierta vegetal. A través de un periodo de 90 días la estimación del agua del suelo estuvo dentro de la desviación estándar del contenido del agua del suelo medido. Este tipo de comparaciones son necesarias para validar completamente el funcionamiento de los modelos disponibles y de esta manera evaluar también sus limitaciones.

Por otro lado, la mayoría de los modelos del sistema de raíces suponen el conocimiento de la profundidad de la zona radical durante la estación de crecimiento. Hillel y Talpaz (1976) fueron los primeros que modelaron el patrón de raíces favorecidos por la distribución de biomasa radical producida en suelos profundos húmedos. Esto fue realizado para introducir un origen y un factor de extensión que depende sobre todo del potencial mátrico del suelo. En este primer artículo ellos suponen un conocimiento a priori de las tasas de crecimiento del sistema radical. Recientemente Huck y Hillel (1983), utilizaron este modelo del sistema

radical integrado a otro de crecimiento de cultivo el cual proporciona las tasas de crecimiento necesarias para simular la producción del cultivo. Ritchie y Otter (1985), determinaron la distribución de raíces a través del perfil utilizando factores de la raíz de referencia como entrada para cada estrato, estos factores decrecen con la profundidad y dependen del contenido de humedad del suelo.

Protopapas y Bars (1987), al simular la extracción de agua y el desarrollo del sistema de raíces en el cultivo de maíz, de un experimento de campo cultivado en Flevoland, Holanda. Consideraron que la humedad del perfil es uniforme en los primeros 50 cm del perfil y después se incrementa en forma lineal hasta los 125 cm, no hubo precipitación y riegos, la concentración de solutos es de cero y la humedad decrece debido a la percolación y la evapotranspiración. Cuando la cubierta no ha sido desarrollada completamente, y la mayoría de la radiación entrante es recibida por la superficie del suelo, la tasa de demanda transpirativa fue baja y la de evaporación del suelo alta. En las etapas tardías, las raíces desarrolladas extrajeron agua desde estratos más bajos hasta una profundidad de 50 cm. La extracción de agua fue más intensa en la zona de 30 a 60 cm. La morfología del sistema de raíces mostró que las raíces jóvenes fueron inicialmente desarrolladas en los estratos superiores relativamente húmedos y su existencia redujo la humedad del suelo. Así que el crecimiento de nuevas raíces fue favorecido en estratos más bajos, mientras que las

raíces viejas se suberizaron. La actividad de las raíces jovenes representa la suma de raíces jóvenes y 30 por ciento de raíces viejas. Como se mostró, la actividad radicular es reconocida a una profundidad menor a 80 cm y concentradas en la región entre 45 a 75 cm.

Sin embargo estos modelos de balance hídrico del suelo no han sido utilizados para estimar la humedad en la zona de raíces en grandes extensiones, aunque su estimación parece ser más útil en la apreciación del impacto del clima sobre la agricultura, que los índices climatológicos de sequía comunes (Robinson y Hubbard, 1990).

Por otro lado la variabilidad espacial de la evapotranspiración de un cultivo, en el campo es ocasionado por las variaciones en las condiciones microclimáticas, de las propiedades físicas del suelo y de las propiedades mismas de la planta (Hansen y Jensen, 1986). Las propiedades físicas del suelo pueden variar, tales como la porosidad, permeabilidad y conductividad hidráulica, mientras que las propiedades del cultivo que influyen en el patrón del uso de agua entre las que se incluyen el índice de área foliar, la tasa de desarrollo fenológico, la rugosidad aerodinámica de la cubierta vegetal y la habilidad de las raíces para extraer el agua del suelo, estas variaciones se reflejan en el contenido de humedad del suelo (Hawley et al., 1983).

Partición de Materia Seca

Es frecuentemente observado que la ganancia de peso seco del cultivo es aproximadamente proporcional a la interceptación de luz de la cubierta vegetal. Estas relaciones son utilizadas en algunos modelos para predecir la ganancia de peso seco, pero el problema de su uso es que el valor de los parámetros necesarios varían de un año a otro (Van Gulen, 1986).

La relación entre la fijación de CO_2 y la interceptación de luz han sido medidas desde hace mucho tiempo sobre las hojas, la planta y la cubierta total de varios cultivos; todos ellos como una tasa instantánea convirtiéndolo a nivel diario. En la mayoría de los casos, la fijación de CO_2 muestra una dependencia hiperbólica de la interceptación de luz. Muchos modelos de simulación en cultivos usan algunos de estas relaciones empíricas como base para calcular la cantidad de CO_2 fijado (Acock et al., 1979).

En la partición de materia seca se ignoran algunos aspectos de los procesos involucrados en la partición de carbono de los diferentes órganos de la planta. Algunos investigadores dedicados a la creación de modelos usan factores empíricos de partición de materia seca que lo están de etapa en etapa conforme al desarrollo de las plantas (Wilkerson et al., 1981), otros en cambio consideran

la partición de carbono de acuerdo al potencial de crecimiento de los diferentes órganos (Baker *et al.*, 1983).

Acock y Allen (1985), sugieren que las plantas tienen el siguiente orden de prioridad para el uso del carbono: sobrevivencia, reproducción, crecimiento de órganos presentes, incremento en el número de órganos (principalmente ramificaciones) y almacenamiento de exceso de carbono para uso futuro.

Mayaki *et al.* (1976), establecen que en algunas especies la tasa de acumulación de materia seca es limitada por la disponibilidad de carbono, agua, nitrógeno, etc. pero en otras especies la tasa está influenciada muy poco por estos factores, a no ser que estén suministrados en menor cantidad o por debajo de los valores normales. Para las especies superiores, si algún factor es limitante, la expansión foliar, peciolo y tallos internodales son inhibidos, pero las hojas nuevas continúan apareciendo a una tasa dependiente exclusivamente de la temperatura.

Las investigaciones efectuadas para determinar la producción de materia seca en cultivos como sorgo, trigo y soya mediante la utilización de diferentes modelos de simulación, fueron llevados a cabo por Hodges y Kanemas (1977), al considerar las ecuaciones de fotosíntesis y respiración desarrolladas por medio de datos meteorológicos ellos estimaron la respiración como una fotosíntesis

dependiente del componente del crecimiento y a la temperatura de la biomasa como un componente del mantenimiento, indicando que el coeficiente de mantenimiento de la respiración del trigo fue menos sensitivo a la temperatura debido a que el cultivo era un zacate de estación fría, dando por resultado un aumento en la actividad fotosintética lo cual pudo haber sido ocasionado por el incremento en la capacidad de absorción de agua, suponiendo que la fotosíntesis cesó cuando la temperatura máxima fue inferior a 5 grados centígrados, lo cual indica que la acumulación de materia seca fue realizada durante el período invernal.

Vanderlip y Arkin (1977), al simular la acumulación de materia seca en sorgo para grano. Básicamente el submodelo de producción de materia seca, permite el cálculo diario del área foliar desarrollada en respuesta a la temperatura, de la contabilización de la luz interceptada calculada, del área foliar y del arreglo de las plantas; el cálculo de la fotosíntesis neta diaria potencial (obtenida del valor calculado de la intercepción de luz) y la reducción de la fotosíntesis potencial por la respiración nocturna, la temperatura y el estrés hídrico. Para probar el submodelo se usaron 25 series de datos (de seis localidades del área sorgera de los Estados Unidos), incluyendo dentro de esta una serie híbridos, diferentes años, todos ellos bajo temporal y riego. La precisión del submodelo en la

yoría de los casos, el error estándar fue de 4.1 a 5.0 as. El error estándar para el rendimiento fue de 18.5 gr m^{-2} , con un coeficiente de variación de 29 por ciento, para el índice de cosecha el error estándar fue de 0.06, con un coeficiente de variación de 13.2 por ciento.

Otros modelos desarrollados por Arkin *et al.* (1980), para determinar la producción de materia seca en sorgo, permiten predecir el desarrollo ontogénico del cultivo a través de la estación de crecimiento, basados en datos climáticos, sin embargo, es necesario determinar la respuesta de los modelos a cambios en los valores de las variables importantes del sistema como temperatura, humedad, porcentaje de agua extraíble del suelo, etc., en términos de rendimiento de grano por planta en madurez fisiológica y finalmente combinar los modelos para evaluar los sistemas de manejo de cultivos, basados en el balance hídrico diario, pérdidas por escurrimientos y producción de cultivos (Stinson *et al.*, 1981).

Villalpando (1985), al utilizar el método de la FAO para estimar la tasa de acumulación de materia seca en Popan, Jal., para maíz de humedad residual, el cual se desarrolló de mayo a septiembre, alcanza una acumulación de 1.5 ton/ha de biomasa seca total, de un ciclo de 150 días desde la siembra a madurez fisiológica; al multiplicar este valor por el índice de cosecha (0.4), se obtiene un rendimiento

o de restricción de suelo, de protección al cultivo, de riego, de fertilidad o restricciones agroclimáticas.

Karlen *et al.* (1987), realizaron un estudio para determinar las tasas de acumulación de materia seca, nitrógeno, fósforo y potasio en maíz, para lo cual se muestrearon las partes aéreas totales de plantas seleccionándose seis muestreos en 1980 y 1981, y ocho muestreos en 1982 del experimento de campo, en el cual se evaluaron tres programas de riego, dos densidades de población, dos espaciamientos entre surcos y dos tratamientos de fertilización. Lo más importante encontrado en esta investigación fue la observación de dos períodos máximos sucesivos de acumulación de materia seca y nutrientes. El primero ocurrió durante la etapa vegetativa cuando el número potencial de granos está siendo establecido y el segundo durante el desarrollo reproductivo cuando el rendimiento potencial se ha alcanzado. Esto enfatiza que para obtener altos rendimientos, deberá someterse a la planta a un mínimo estrés ambiental de producción durante todas las etapas de desarrollo. Las tasas máximas de acumulación de materia seca, nitrógeno, fósforo y potasio fueron de 650, 10, 1.6 y $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ en este estudio.

Tollenar y Bruulsema (1988), afirman que la producción de materia seca del cultivo de maíz, en ausencia de otros factores limitantes, está determinado por la absorción de radiación fotosintéticamente activa (PAR) por

o de restricción de suelo, de protección al cultivo, de riego, de fertilidad o restricciones agroclimáticas.

Karlen *et al.* (1987), realizaron un estudio para determinar las tasas de acumulación de materia seca, nitrógeno, fósforo y potasio en maíz, para lo cual se muestrearon las partes aéreas totales de plantas efectuándose seis muestreos en 1980 y 1981, y ocho muestreos en 1982 del experimento de campo, en el cual se evaluaron programas de riego, dos densidades de población, dos espaciamientos entre surcos y dos tratamientos de fertilización. Lo más importante encontrado en esta investigación fue la observación de dos periodos máximos sucesivos de acumulación de materia seca y nutrientes. El primero ocurrió durante la etapa vegetativa cuando el número potencial de granos está siendo establecido y el segundo durante el desarrollo reproductivo cuando el rendimiento potencial se ha alcanzado. Esto enfatiza que para obtener altos rendimientos, deberá someterse a la planta a un mínimo estrés ambiental de producción durante todas las etapas de desarrollo. Las tasas máximas de acumulación de materia seca, nitrógeno, fósforo y potasio fueron de 650, 10, 1.6 y 1.5 kg ha⁻¹ d⁻¹ en este estudio.

Tollenar y Bruulsema (1988), afirman que la producción de materia seca del cultivo de maíz, en ausencia de otros factores limitantes, está determinado por la cantidad de radiación fotosintéticamente activa (PAR) por

tipo de restricción de suelo, de protección al cultivo, de manejo, de fertilidad o restricciones agroclimáticas.

Karlen *et al.* (1987), realizaron un estudio para determinar las tasas de acumulación de materia seca, nitrógeno, fósforo y potasio en maíz, para lo cual se muestrearon las partes aéreas totales de plantas colectándose seis muestreos en 1980 y 1981, y ocho muestreos en 1982 del experimento de campo, en el cual se evaluaron los programas de riego, dos densidades de población, dos espaciamientos entre surcos y dos tratamientos de fertilización. Lo más importante encontrado en esta investigación fue la observación de dos periodos máximos diferentes de acumulación de materia seca y nutrientes. El primero ocurrió durante la etapa vegetativa cuando el número potencial de granos está siendo establecido y el segundo durante el desarrollo reproductivo cuando el rendimiento potencial se ha alcanzado. Esto enfatiza que para obtener altos rendimientos, deberá someterse a la planta a un mínimo de estrés ambiental de producción durante todas las etapas de desarrollo. Las tasas máximas de acumulación de materia seca, nitrógeno, fósforo y potasio fueron de 650, 10, 1.6 y 8 kg ha⁻¹ d⁻¹ en este estudio.

Tollenar y Bruulsema (1988), afirman que la producción de materia seca del cultivo de maíz, en ausencia de otros factores limitantes, está determinado por la absorción de radiación fotosintéticamente activa (PAR) por

una cubierta de cultivo y la eficiencia con la cual es convertida en materia seca, establecieron un experimento para determinar los efectos de la densidad de plantas y la fase de desarrollo sobre la absorción de PAR y la eficiencia de conversión en maíz. Las tasas de crecimiento del cultivo declinaron durante la fase de desarrollo debido a una disminución en la PAR incidente y a una disminución en la eficiencia de conversión de 5.8 a 3.5 por ciento; la PAR absorbida fue aproximadamente de 89 por ciento y permaneció estable. Aunque las tasas de crecimiento de la densidad de población no fueron diferentes durante el período de llenado de grano, las diferencias en la absorción de PAR fueron muy pequeñas para mostrar un efecto significativo de la densidad de plantas sobre la eficiencia de conversión. La eficiencia fotosintética de conversión parece estar influenciada por la fase de desarrollo, pero los efectos de la densidad de plantas sobre la eficiencia parecen ser muy pequeños.

Grant (1989), afirma que para ejecutar en forma segura los modelos de simulación, éstos requieren un tratamiento exacto de la fenología del cultivo, por lo que desarrolló un procedimiento para simular la fenología del maíz como una subrutina para el modelo de crecimiento el cual corre a un incremento de tiempo de una hora. El número de hojas estimadas estuvieron de algún modo dentro de aquellos observados pero no en el lugar donde se realizó el experimento de fenología, donde fue sobre estimado en más de cuatro el número de hojas. Las fechas de iniciación de

espiga y estado masoso, estuvieron normalmente dentro de un rango de 5 días de los datos observados, excepto en las localidades más cálidas de Texas donde las fechas estimadas antecedieron a los datos observados por 5 a 15 días. Los datos sugieren que la aclimatación a temperaturas muy altas pueden resultar en tasas más bajas de desarrollo que aquellas precedidas en algunos lugares más cálidas.

Castro *et al.* (1988), evaluaron el modelo de simulación Corn-Ap. desarrollado por Sackson y Arkin en 1984, adaptado y alimentado con datos climáticos, edáficos y de planta de los tipos de maíces cultivados en Durango, para simular el desarrollo, crecimiento y productividad de esta especie bajo condiciones de riego y temporal. Los resultados indicaron que es posible lograr buenas predicciones para condiciones edáficas pre-establecidas. Bajo riego las predicciones pueden hacerse con aproximaciones de 10 por ciento a la realidad. Como comparación el H-311 con 45 mil plantas por hectárea, de 160 días a madurez, sembrado el 20 de abril, produce 8.4 ton ha⁻¹ de grano y 29 ton ha⁻¹ de materia seca, el modelo pronostica 8.719 ton ha⁻¹ de grano y 30.586 ton ha⁻¹ de materia seca. Sin embargo, bajo temporal las predicciones se aproximan a la realidad con un 20 por ciento de error.

Estrés Hídrico y Componentes del Rendimiento

La etapa de antesis y aparición de estigmas en el maíz, es la más sensible a déficit hídrico ya que se disminuye significativamente la acumulación de materia seca y por consecuencia el rendimiento de grano, lo cual ha sido determinado por Robbins y Domingo (1953), Denmead y Shaw (1960), Stewart *et al.* (1975), Doorenbos y Kassam (1979), Palacios (1980), Frey (1982) y Rodríguez (1985) entre otros, los cuales detectaron reducciones hasta de un 50 por ciento en el rendimiento de grano dependiendo principalmente de la intensidad del estrés hídrico, además estos investigadores han reportado reducciones de hasta un 25 por ciento del rendimiento cuando el estrés se presenta en la etapa de desarrollo vegetativo y de 20 por ciento cuando ocurre en el llenado de grano.

Kaliappa *et al.* (1976), en estudios realizados en la India, aplicaron el riego durante el ciclo vegetativo del maíz al 25, 50 y 75 por ciento de abatimiento de la humedad disponible del suelo o combinando cualquiera de dos niveles de humedad durante la fase de desarrollo vegetativo (hasta 50 días después de la siembra), y la fase de madurez. El riego al 75 por ciento de abatimiento de la humedad disponible durante la fase vegetativa y al 50 por ciento durante la fase de madurez proporcionó los rendimientos más altos de grano, con un consumo de agua de 382 mm.

Por otra parte la planta de maíz tiene una alta eficiencia en el uso del agua en cuanto a la producción de materia seca, y entre los cereales es potencialmente el cultivo de grano de mayor rendimiento (Doorenbos y Kassam, 1979). Sin embargo la planta evapora agua como cualquier otro sistema físico, además de las necesidades hídricas que requiere para las demandas metabólicas, debe cubrir las demandas evaporativas a través de la epidermis en la transpiración. En condiciones normales una planta de maíz absorbe durante su ciclo de vida alrededor de 300 kilogramos de agua, de los que utiliza en procesos metabólicos aproximadamente un dos por ciento y transpira el resto (Rojas, 1972).

Gándara (1989), al evaluar el efecto de diferentes niveles de sequía inducida en tres etapas fenológicas del desarrollo sobre el rendimiento de grano de maíz y sus componentes, utilizando el modelo de simulación de la humedad del suelo propuesto por Palacios (1982) para la aplicación del riego. Sus resultados muestran que el componente del rendimiento, que tienen más efectos sobre la producción de grano fue el número de granos por hilera.

Eck (1986), realizó un estudio con el propósito de reportar el efecto de la fecha y duración de los períodos de estrés hídrico sobre el crecimiento y los componentes de rendimiento de maíz, evaluar los requerimientos de riego de

adaptación del cultivo en una región de demanda evaporativa alta. El déficit hídrico impuesto 41 días después de la plantación disminuyó las hojas, tallos y el rendimiento de mazorcas, mientras que aquel impuesto 55 días después de plantación afectó únicamente los tallos y el rendimiento de mazorca. El déficit durante el crecimiento vegetativo redujo el número de granos pero tuvo un efecto pequeño sobre el peso del grano. El déficit durante el llenado de grano no tuvo efecto sobre las hojas y el tallo, pero redujo el rendimiento de mazorca, en esta etapa el número de granos no fue afectado a menos de que fuera impuesto un déficit más severo antes de este período, así que las reducciones en el rendimiento de grano fueron proporcionales a la reducción en el peso del grano.

Grant *et al.* (1989), diseñaron un experimento en invernadero para determinar los periodos de sensibilidad de los componentes del rendimiento del maíz al estrés hídrico. El intervalo cuando el número de granos fue más sensible al estrés crítico comenzó 2 a 7 días después de la aparición de estigmas y finalizó 16 a 22 días después de esta etapa. El estrés iniciado antes de la etapa de aparición de estigmas con riego de auxilio dos días después de la ocurrencia de esta etapa, no reduce el número de granos, el peso del grano, o el rendimiento de la planta. El menor número de granos, es decir 45 por ciento con respecto al testigo, ocurrió para el período de estrés de 7 días después de la aparición de estigmas. El estrés durante el período de

llenado de grano redujo el peso de grano y el que ocurrió 12 a 16 días después de la aparición de estigmas, ocasionó que el peso disminuyera en un 51 por ciento con respecto al testigo.

Componentes que Integran el Modelo de Simulación

El modelo de simulación utilizado fue desarrollado y compilado por Van Keulen y Wolf (1986), en el Centre for World Food Studies situado en Holanda. De acuerdo a los objetivos de la presente investigación se contemplaron básicamente tres submodelos los cuales fueron: acumulación de materia seca, evapotranspiración potencial y balance del agua del suelo, para lo cual se presentan a continuación.

Acumulación de Materia Seca

La tasa de incremento diario en la estructura del peso seco de la superficie de un cultivo puede ser aproximado por la fórmula:

$$\Delta W = E_g (E_{gs} - R_m * W) \quad (\text{ec. 2.1})$$

donde:

ΔW = Es la tasa de incremento en la estructura del peso seco ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$).

E_g = Es la eficiencia de conversión de carbohidratos materia seca (kg kg^{-1}).

expresado en carbohidratos ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$).

R_m = Es la tasa relativa de mantenimiento de la respiración ($\text{kg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$).

W = Es el peso seco total de las partes vivas del cultivo (kg ha^{-1}).

El orden de aparición de los diferentes órganos es una característica de cada especie, éste puede variar dentro de una especie y es casi independiente del medio. Sin embargo, la tasa y el tiempo de aparición de un órgano, son dependientes sobre todo de las condiciones ambientales y por lo tanto, altamente variables.

Las principales condiciones ambientales que influyen en el desarrollo fenológico son la temperatura y la longitud del día. Para la mayoría de los cultivos, las altas temperaturas generalmente ocasionan un acortamiento de la duración de la fase fenológica. El producto que relaciona el número de días y temperatura es la suma de temperaturas o también llamadas unidades térmicas (expresados en unidades de grados día). El método más común para la obtención de los valores de unidades térmicas para determinar la duración de la fase fenológica, es sumar el promedio diario de temperaturas por encima de un valor umbral. El rango de las temperaturas umbrales varían entre 0 y 10 C para las diferentes especies o variedades. Algunas veces existe una temperatura óptima. En este caso, las temperaturas que exceden el óptimo, son reemplazadas en el cálculo por su

Aunque los procesos básicos que gobiernan el desarrollo fenológico y la producción, actúan independientemente, ambos fenómenos están fuertemente interrelacionados. Si la tasa de desarrollo es alta, la producción de biomasa será baja, porque el periodo de crecimiento lineal será corto. Por otra parte los cultivos generalmente no se establecen por la biomasa total, sino por sus órganos de almacenamiento, tales como, tubérculos, granos y vainas. Estos órganos de almacenamiento crecen únicamente durante la parte última del ciclo de crecimiento, después de que las raíces, hojas y tallos han sido producidos. Un periodo de crecimiento corto, resulta en una baja biomasa vegetativa, especialmente de hojas responsables de la intercepción de luz, conduciendo hacia un cultivo pobre. Por el contrario, es invertida mucho más biomasa en órganos vegetativos lo que puede conducir a una producción relativamente baja de órganos de almacenamiento, porque en este caso los requerimientos de mantenimiento son altos. Por lo tanto, no es de interés únicamente la producción de biomasa total, sino también su distribución a través de las diferentes partes de la planta. La proporción actual de hojas, tallos, raíces y órganos de almacenamiento, en la biomasa total en un momento dado, dependen sobre todo de las tasas de crecimiento precedentes, las cuales están gobernadas por el clima y el índice de área foliar que se presentaron en el pasado, y la distribución de la materia seca incrementada a través de las diferentes partes de la planta. La forma de distribución está por ejemplo, factores

de partición definidos como función de la etapa de desarrollo, no necesariamente conduce a una relación constante de los diferentes órganos.

Evapotranspiración Potencial

Para la determinación de este componente se utilizó la ecuación de Penman (1964), de tal manera que se describirá en forma muy generalizada. En este sentido la radiación quien provee la energía para evaporar el agua es considerada en combinación con la turbulencia del aire, para remover el vapor de agua. Este procedimiento permite la estimación de la evapotranspiración potencial, utilizando datos de estaciones meteorológicas estándar.

Las pérdidas de calor sensible de una superficie es proporcional a la diferencia de temperatura entre la superficie de agua y el aire. Análogo al calor sensible, una superficie de agua pierde vapor en proporción a la diferencia de presión de vapor entre la superficie y el aire circundante. El aire en la superficie de agua es vapor de agua saturado. Esta presión de vapor a saturación está relacionada con la temperatura de la superficie.

De tal forma que la pérdida de agua que es calculada en este sentido es referida a la evapotranspiración potencial de una superficie de cultivo cerrada, corta y bien

no hay distinción entre las pérdidas de agua por transpiración de las hojas y aquella que se pierde por evaporación de la superficie húmeda del suelo por debajo del cultivo.

Balance del Agua del Suelo

La mayor parte del agua que la planta toma del suelo se pierde de nuevo a la atmósfera por transpiración a través de los estomas. Cualquier modelo que esté dirigido hacia la capacidad productiva de un cultivo de secano, debe por lo tanto seguir de cerca el potencial hídrico del suelo para determinar cuando y en que grado el cultivo se expuso a un estrés de agua. Esto se hace comúnmente con la ayuda de una ecuación de balance del agua del suelo, con la cual se compara para un período dado de tiempo, el agua que entra a la zona del suelo ocupada por la raíz con el agua que sale y cuantificar la diferencia entre ambas como un cambio en el contenido de la humedad almacenada. Esta zona de suelo con raíces, es una capa continua de suelo que tiene como límite superior la superficie del suelo y como límite inferior la profundidad alcanzada por el sistema de raíces. Se considera que el agua entra o sale del suelo de acuerdo a estos límites, pero el agua puede ser removida directamente de esta zona mediante la extracción o absorción por las raíces, para abastecer la transpiración.

La tasa de cambio en el contenido de humedad en la zona de raíces es determinada con la ecuación del balance del agua de la siguiente manera:

$$RSM = (IM + (CR - D) - T)/RD \quad (\text{ec. 2.2})$$

donde:

RSM = Tasa de cambio del contenido de humedad de la zona de raíces ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$).

IM = Tasa de entradas netas a través del límite superior (cm d^{-1}).

(CR - D) = Tasa de entradas netas a través del límite inferior (cm d^{-1}).

T = Tasa de transpiración del cultivo (cm d^{-1}).

RD = Profundidad de la zona de raíces (cm).

Considerando los diferentes flujos de entradas y salidas de agua en el sistema suelo - planta - atmósfera, el abastecimiento por el límite superior de la zona de raíces se compone de precipitación (a una tasa P en cm d^{-1}), del riego (a una tasa I_r en cm d^{-1}) y posiblemente de agua que fue temporalmente almacenada sobre la superficie (encharcamiento), a una tasa DS en cm d^{-1} . También hay una pérdida de agua en este límite o superficie del suelo, vía evaporación (a una tasa E_a en cm d^{-1}). Entonces el abastecimiento neto en la superficie es (P + I_r + DS - E_a) en cm d^{-1} . Este abastecimiento neto en la superficie del suelo se infiltra en el suelo a una tasa IM en cm d^{-1} . Durante algunos intervalos de tiempo, la tasa de abastecimiento neto en la superficie puede exceder la tasa máxima a la cual el agua se puede infiltrar en un suelo

particular (IM_{max}). En una primera instancia, el exceso de abastecimiento se almacena en la superficie. La máxima capacidad de almacenamiento en la superficie (SS_{max}), depende de las propiedades de la superficie y del ángulo de la pendiente del terreno. Si el abastecimiento es excesivo y mayor que la capacidad de almacenamiento superficial $(SS_{max} - SS_i) / \Delta t$, el resto del agua sale del sistema como escurrimiento (a una tasa SR en $cm d^{-1}$).

De acuerdo a los supuestos del modelo establecidos anteriormente, los términos $(CR - D)$ de la ecuación 2.2 no son considerados.

Una vez cuantificados la tasa de infiltración (IM), la tasa de flujo subsuperficial $(CR - D)$ y la tasa de transpiración del cultivo (T), es simple de solucionar la ecuación del balance hídrico. La ecuación produce la tasa de cambios (RSM) en el contenido de la humedad del suelo de la zona de raíces.

La tasa de cambio en el contenido de humedad del suelo calculada, puede ser utilizada para establecer el contenido de humedad del suelo de la zona radicular al final del intervalo de tiempo. Esto es por adición al contenido inicial de humedad ($SM_{i,j}$) el cambio calculado ($RSM \times \Delta t$). El resultado, $SM_{i,j} + RSM \times \Delta t$, representa también el contenido de humedad al inicio del siguiente intervalo de tiempo y el valor de $SM_{i,j}$ para calcular el balance hídrico de este

intervalo. El intervalo utilizado en este modelo es de una longitud de 10 días.

El diagrama de flujo que integra los tres submodelos antes descritos se muestra en la figura 2.1. y su descripción matemática detallada se presenta en el siguiente capítulo.

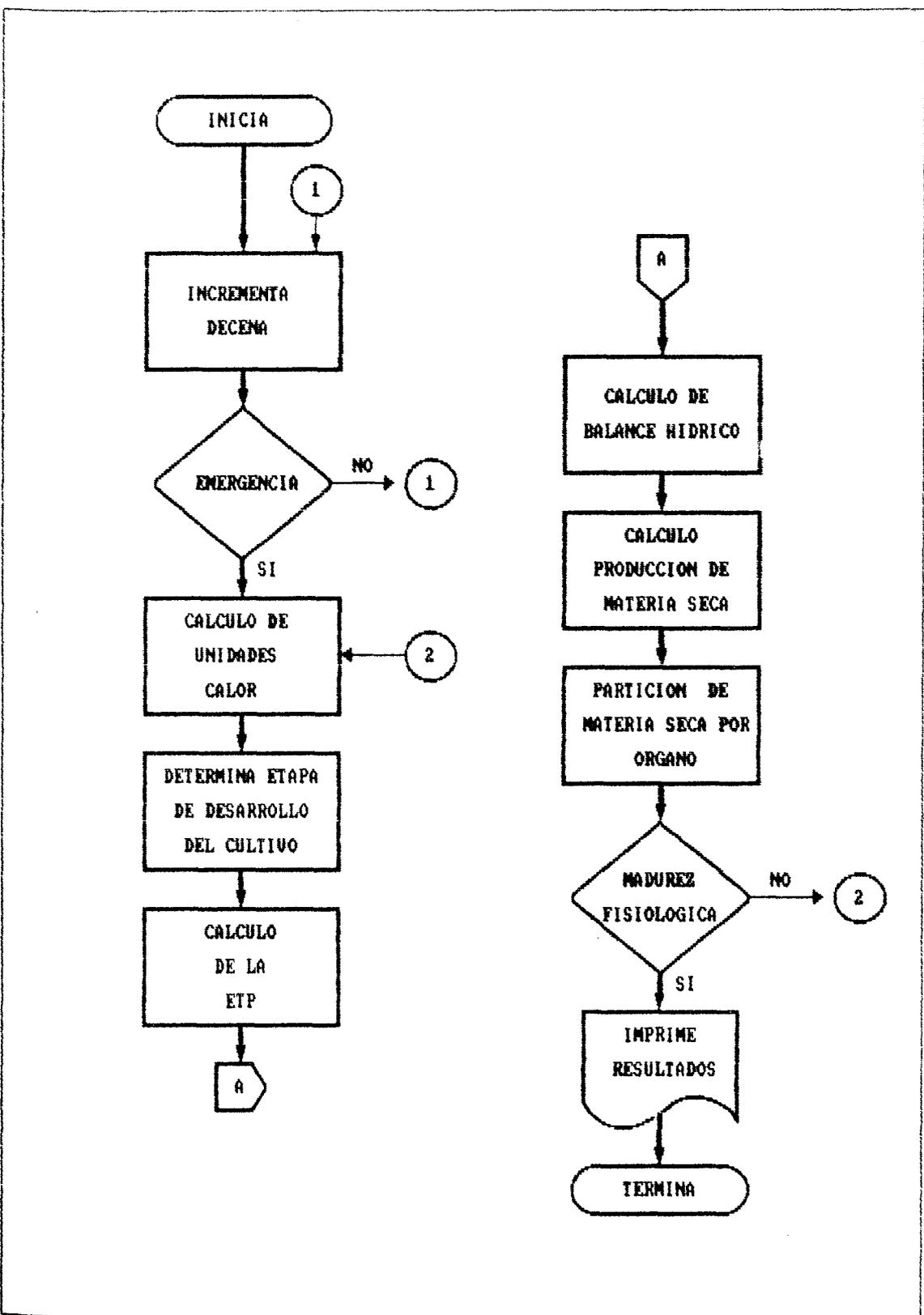


Figura 2.1. Diagrama de flujo del modelo de simulación de Van Keulen y Wolf (1986).

3. MATERIALES Y METODOS

Experimento de Campo

Localización

La presente investigación se llevó a cabo en terreno de la Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro", ubicada en Buenavista, municipio de Saltillo, Coahuila y cuyas coordenadas geográficas son 25° 21' 20" de latitud norte 101° 01' 30" de longitud oeste y a una altitud media sobre el nivel de mar de 1743 m (Figura A.1).

Clima

El clima predominante en esta localidad, de acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por E. García (1973) es del tipo BW hw (x') (e) que equivale a un clima muy seco semicálido, con invierno fresco, extremoso y verano cálido. La temperatura media anual es de 16.6 °C, con régimen de lluvias intermedio entre verano e invierno, con una precipitación media anual de alrededor de 443 mm y una evaporación promedio anual de 2167 mm (Cuadro A.1).

Suelo

El suelo es origen aluvial, perteneciente a la unidad taxonómica faeozem calcárica, de acuerdo CETENAL (1976). La pendiente del terreno es de 0.68 por ciento, la textura es migajón arcillosa con un contenido de materia orgánica del 5.4 por ciento, medianamente ricos en nitrógeno y fósforo, y rico en potasio; el pH es ligeramente alcalino (8.4) y la densidad aparente es de alrededor de 1.12 g cm^{-3} . Las constantes específicas del suelo de capacidad de campo y punto de marchitez permanente promedio del perfil fueron de 39.55 y $23.66 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en base a volumen respectivamente, de tal forma que la humedad aprovechable es de $15.89 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Cuadro A.2).

Material Genético

El material genético utilizado en el presente estudio fue proporcionado por el Programa de Maíz y Sorgo del Campo Agrícola Experimental Pabellón, perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP), siendo el híbrido H-204, cuyas características agronómicas principales son: altura de planta 1.65 m, altura de la mazorca 1.20 m, de 60 a 70 días a floración masculina, de 100 a 110 días a madurez fisiológica, el color de la planta es verde claro, espiga blanco y tipo de grano blanco y harinoso.

Tratamientos Evaluados

Se sometieron en estudio tres niveles de humedad aprovechable en el suelo, más un tratamiento de referencia con la finalidad de someter a la planta a diferentes grados de estrés hídrico durante su ciclo vegetativo, para así evaluar la influencia que tiene la condición del agua del suelo sobre el patrón de partición de materia seca por órgano y los componentes de rendimiento del maíz, los cuales fueron:

Tratamiento 1. Tratamiento referencia (ETM-REF), en el cual no existieron restricciones de humedad durante el ciclo vegetativo del cultivo, para lo cual se programaron riegos cada siete días, aplicándose láminas en base a la evaporación acumulada e iniciando estos a los 29 días después de la siembra.

Tratamiento 2. Permitir un abatimiento de la humedad en el suelo del 25 por ciento de la humedad disponible, es decir mantener la humedad aprovechable del suelo por encima del 75 por ciento (75% H.A.S.). La determinante de riego utilizada para este tratamiento fue de $35.58 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en base a volumen.

Tratamiento 3. Permitir un abatimiento de la humedad en el suelo del 50 por ciento de la humedad disponible, es

decir mantener la humedad aprovechable del suelo por encima del 50 por ciento (50% H.A.S.). La determinante de riego para este tratamiento fue de $31.60 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en base a volumen.

Tratamiento 4. Permitir un abatimiento de la humedad en el suelo del 75 por ciento de la humedad disponible, es decir mantener la humedad aprovechable del suelo por encima del 25 por ciento (75% H.A.S.). La determinante de riego para este tratamiento fue de $27.63 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ base volumen.

Distribución de los Tratamientos en el Campo

Los cuatro tratamientos se establecieron en el campo en un diseño experimental de bloques al azar, con cuatro repeticiones (Figura A.2), la unidad experimental fue de 10 surcos de 10 m de largo (80 m^2) y la parcela útil de 4 surcos de 6 m (19.2 m^2).

Muestreo de Materia Seca

Los muestreos de acumulación de materia seca, se realizaron cada siete días, tomando cuatro plantas de competencia completa por tratamiento, es decir una planta por repetición, una vez muestreadas las plantas, se procedió a llevarlas al laboratorio en donde se lavó perfectamente la raíz (evitando que se desprendieran las raicillas

planta en raíz, tallo (incluyendo la espiga) y la mazorca. Posterior a ello se tomaron los pesos frescos por órgano y se llevaron a secar a una estufa con aire forzado a una temperatura de 60 °C durante 36 horas, para finalmente pes las muestras de los diferentes órganos de la planta y esta manera determinar el peso seco por órgano.

Establecimiento del Experimento

La preparación del terreno donde se estableció el experimento fue realizada durante la primera quincena de marzo, efectuándose un barbecho, dos rastreos y surcado a 20 cm. El riego de presiembra se aplicó el 16 de abril con una lámina de riego de 15 cm. una vez que el suelo presentara condiciones adecuadas de humedad (capacidad de campo) se realizó un rastreo el terreno y se arropó (22 de abril), para evitar la pérdida de la humedad del suelo.

La siembra se efectuó el 23 de abril de 1991, una vez que se inició el período libre de heladas y que las condiciones de humedad y temperatura del suelo fueran adecuadas, realizándose en forma mecánica, para la cual se utilizó alrededor de 24 kg/ha de semilla, el tratamiento de fertilización fue el 160-60-00, teniendo como fuente de nitrógeno la urea (46 por ciento de N) y de fósforo el superfosfato de calcio triple (46 por ciento de P₂O₅), la aplicación se hizo fraccionada, 80-60-00 a la siembra

Manejo del Cultivo

Dentro de los problemas más graves que se presentaron durante el desarrollo del cultivo se encuentra la presencia de plagas y enfermedades, lo cual fue ocasionado por las condiciones de alta humedad y temperatura presentes en el ciclo de crecimiento y desarrollo del cultivo. Se detectó la presencia de pulgón (*Myzus persicae* L.), mosquita blanca (*Trialeurodes vaporariorum* L.), gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* L.) y gusano elotero (*Heliothis zea* L.), entre los más importantes; por lo que fue necesario realizar seis aplicaciones a los 41, 51, 84, 91 y 98 días después de la siembra, con los productos químicos Pounds líquido, Pounds granulado y Folimat a una dosis de 1.5 cm³ por litro de agua, en forma localizada y 2.0 cm³ por litro de agua respectivamente. Dentro de las enfermedades que se presentó en el lote experimental fue el carbón del maíz (*Ustilago maydis* L.) con un porcentaje de infestación de 11, 12, 9 y 17 para los tratamientos 1, 2, 3 y 4 respectivamente, no siendo significativo este efecto de acuerdo al análisis de varianza efectuado. Para el control de las malas hierbas fue necesario realizar dos deshierbes uno mecánico a los 23 días después de la siembra y uno manual a los 63 días después de la siembra. Además fue necesario realizar una aplicación de herbicida para hoja ancha (Hierbamina) a los 85 días después de la siembra a una dosis de 2 cm³ por litro de agua. Mediante tales prácticas se evitó el enmascaramiento de la

seca, para que las pérdidas de agua de la superficie y de interior del perfil del suelo fueron únicamente causadas por la evaporación directa del suelo y la transpiración de la planta.

Los riegos se aplicaron una vez que se presentaron las condiciones de humedad permitidas para los tratamientos (determinantes de riego). El estrato control utilizado como indicador de riego fue el 0 a 40 cm, para lo cual se promediaron los valores de humedad de 0-20 y 20-40 cm, si embargo al momento del riego se aplicó una lámina de agua para restablecer la condición de humedad a capacidad de campo en los cinco estratos considerados. Para determinar la lámina de riego a aplicar se utilizó la siguiente ecuación:

$$Lr = Pv \times Pr \quad (\text{ec. 3.1})$$

donde:

Lr = Es la lámina de riego por aplicar (cm).

Pv = Contenido de humedad del suelo en base volumen antes del riego ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Pr = Profundidad del estrato (cm).

Además para la aplicación adecuada de la lámina de riego se utilizó la siguiente ecuación:

$$Tr = 27.8 \times \left[\frac{Lr \times Sa}{Q} \right] \times 60 \quad (\text{ec. 3.2})$$

donde:

Tr = Es el tiempo de riego (min).

Lr = Es la lámina de riego por aplicar (cm).

Sa = Es la superficie a regar (ha).

Q = Es el gasto aplicado por unidad aforadora (l/s).

Para determinar el gasto se utilizaron sifones de 1/4 de pulgada de diámetro como estructuras aforadoras, para lo cual fue necesario calibrarlas previamente a cargas hidráulicas desde 1 a 30 cm, resultando la ecuación de alibración:

$$Q = 0.054563 + 0.054509H \quad (\text{ec. 3.3})$$

onde:

Q = Es el gasto real del sifón (l/s).

H = Es la carga hidráulica que existe entre la base del sifón y el espejo del agua (cm).

Al momento de aplicar el riego fue necesario medir la carga hidráulica en el sifón para de esta manera conocer la cantidad de agua aplicada por unidad de tiempo.

Variables de Respuesta

Dado que el objetivo principal del trabajo de campo es determinar la tabla de partición de materia seca, así como su distribución en la planta, para lo cual se dividieron en variables de planta, suelo y clima.

Variables de Planta

1. Fenología del cultivo por tratamiento. Para la valuación de esta variable se etiquetaron 10 plantas por unidad experimental ubicadas al centro de la parcela en la cual se tomaron las etapas de emergencia (cuando ocurrió un 100% de emergencia), días a floración masculina (cuando el

estado lechoso masoso (50% de las plantas presentaran es condición) y madurez fisiológica (cuando en la placenta d grano se observe una capa negra), durante todo el ciclo vegetativo del cultivo.

2. Area foliar por planta. Para la cuantificación esta variable se empleo el método destructivo, haciendo uso del medidor automático de área (modelo AAM-7), el cual permite realizar esta medición con alta exactitud, determinó la desviación estándar en las lecturas del aparato la cual fue de 1 cm^2 , siendo no significativa dicha variación. Se determinó en cuatro plantas por tratamiento es decir una por repetición.

3. Indice de área foliar. Una vez obtenida el área foliar por planta se dividió entre el área de suelo ocupada por la planta, resultando así la proporción de tierra cubierta por efecto del crecimiento de las hojas de planta.

4. Acumulación de materia seca total por órgano. Es decir en la raíz, tallo, hojas, mazorca y total por planta para lo cual se efectuaron 18 muestreos a través del ciclo vegetativo del cultivo.

6. Transpiración. La medición se realizó a nivel de planta, utilizando para ello el porómetro de estado estable (marca LI-1600 de LI-COR). para lo cual se etiquetó u

planta en cada unidad experimental para que la dinámica transpirativa fuera de la misma planta. Las mediciones iniciaron a los 36 días después de la siembra en el haz en vez de la hoja, con una frecuencia de muestreo de cada tercer día. Además se tuvo especial cuidado en mantener seco el material desecante para lo cual se metió a la estufa cada siete días a 150 grados centígrados durante dos horas con lo que se evitó errores en la lectura.

Una vez que los tratamientos evaluados presentaron un 80 por ciento de las plantas secas, se procedió a la cosecha del experimento (agosto 23), tomándose los siguientes componentes del rendimiento:

Número de plantas por hectárea.

Peso de 1000 semillas.

Peso de rastrojo por hectárea.

Peso de grano por hectárea.

Peso de olote por hectárea.

Relación olote grano

Porcentaje de humedad del grano.

Variabes de Suelo

1. Se determinaron las constantes de humedad de suelo capacidad de campo y punto de marchitez permanente por estrato haciendo uso de la técnica de laboratorio mediante las ollas de presión (Cuadro A.2).

2. dinámica de la humedad del suelo. Para la medición del contenido de humedad del suelo se utilizó el método de aspersor de neutrones (Troxler 3320), para lo cual se instalaron 16 tubos de acceso de aluminio de dos pulgadas de diámetro (uno por unidad experimental), a una profundidad de 100 cm, sellando la parte inferior del tubo perfectamente para evitar la entrada de agua al área de sondeo, lo que ocasiona daños a la sonda y errores de lectura (Troxler Electronics Inc, 1983); se tuvo cuidado de mantener el área superficial de los tubos cubiertos para evitar la entrada del agua de lluvia principalmente. Previo a lo anterior se realizó la calibración del aparato, para lo cual se estableció un tubo de aluminio de las mismas dimensiones en una superficie de suelo de un metro cuadrado en el que se realizaron muestreos diarios de la humedad tanto con el aparato como con el método gravimétrico, de tal manera que permitió detectar las constantes de capacidad de campo punto de marchitez permanente para el suelo del área experimental. La ecuación resultante de dicha calibración fue:

$$Y = - 4.5808 + 0.7948X \quad (\text{ec. 3.4})$$

donde:

Y =Es el contenido de humedad del suelo real ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

X =Es el contenido de humedad medido por el aparato ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

El coeficiente de determinación (R^2) de dicha

ecuación es 0.99. La frecuencia de muestreo fue cada

tercer día considerando estratos de 20 cm hasta una profundidad de 100 cm.

VARIABLES DE CLIMA

Esta información fue tomada de las observaciones realizadas en la estación del Servicio Meteorológico Nacional ubicado en terrenos de la UAAAN, considerando el periodo en el cual se desarrolló el experimento de campo específicamente del mes de abril al mes de agosto de 1991 (ver Figura A.4 del apéndice).

Se consideraron las siguientes lecturas:

- Temperatura máxima, mínima y media.
- Humedad relativa.
- Velocidad de viento a dos metros de altura.
- Insolación, es decir la cantidad de horas que alumbra el sol.
- Precipitación pluvial.
- Evaporación libre de agua de un tanque evaporimétrico tipo "A".

Tabla de Partición de Materia Seca

Para cada muestreo se determinó la etapa de desarrollo del cultivo en función de la temperatura acumulada y la cantidad de calor requerida por la planta para alcanzar la etapa fenológica de antesis tomando como punto de partida la emergencia. Los factores de distribución

consecutivos, se consideró el valor promedio de la etapa de desarrollo entre estas dos fechas. Para cada período, el incremento relativo en el peso seco de los diferentes órganos de la planta fueron calculados como la diferencia en el peso en las dos cosechas consecutivas. A partir de estos valores parciales, fue obtenido el incremento en el peso seco total y en base a esta cantidad se calculó la fracción asignada a cada uno de ellos en cada período. Se consideró además que después de la síntesis únicamente ocurre incremento en el peso seco del grano, mientras que los otros órganos permanecen constantes o disminuyen su peso. Una vez obtenidas las tablas de partición de materia seca por tratamiento, se procedió a ajustar los datos mediante el uso de un polinomio de segundo orden.

Análisis Estadístico

El análisis estadístico de los resultados de campo se efectuó mediante el uso del modelo estadístico:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \xi_{ij} \quad (\text{ec. 3.5})$$

donde:

- Y_{ij} = Es el rendimiento en el i -ésimo tratamiento en el j -ésimo bloque.
- μ = Es la media general.
- τ_i = Es el tratamiento i -ésimo.
- β_j = Es el bloque j -ésimo.
- ξ_{ij} = Es el error experimental inherente al tratamiento i -ésimo dentro del bloque j -ésimo.

Para las variables de materia seca por órgano, transpiración, humedad del suelo y el rendimiento económico y componentes evaluados, se realizó el análisis de varianzas a través de bloques al azar para cada muestreo. Se eligió un nivel de probabilidad del 5 por ciento para la prueba estadística realizada. La separación de medias fue realizada a través de la diferencia mínima significativa con un valor de $\alpha = 0.05$ de probabilidad.

Además se realizó un ajuste de los datos de acumulación de materia por órgano para todos los tratamientos, con la finalidad de determinar la fracción de incremento en el peso seco de los diferentes partes de la planta, utilizando para ello el promedio acumulativo de las medias observadas en cada fecha de muestreo, cuya fórmula es:

$$Y_a = \frac{\sum_{i=1}^{a+1} Y_i}{3} \quad (\text{ec. 3.6})$$

donde:

Y_a = Es la media acumulada ajustada para la observación "a".

Y_i = Es el valor observado en el muestreo "i".

Ajuste de Datos Observados

Para el caso de la acumulación de materia seca por órgano y total, área foliar e índice de área foliar, se utilizó un polinomio de segundo grado para ajustar los datos

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 \quad (\text{ec. 3.7})$$

donde:

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ = Coeficientes parciales de regresión.

X = Días después de la siembra.

Descripción Matemática del Modelo Utilizado.

Acumulación de Materia Seca

La tasa de asimilación por día parcialmente nublada es obtenida mediante la siguiente fórmula:

$$F_{gc} = f_0 F_{ov} + (1 - f_0) F_{cl} \quad (\text{ec. 3.8})$$

donde:

F_{gc} = Es la tasa potencial de asimilación de CO_2 por la cubierta vegetal ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$).

f_0 = Es la fracción del día en que el cielo está nublado (f_0 es cero para días completamente claros, f_0 es uno para días completamente nublados).

F_{ov} = Es la tasa de asimilación potencial de CO_2 para un día completamente nublado ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$).

F_{cl} = Es la tasa de asimilación potencial de CO_2 para un día claro ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$).

La radiación global diaria para un día completamente nublado se estimó en forma aproximada al multiplicar el valor de un día completamente claro por 0.2, quedando como sigue:

$$f_o = \frac{(H_g - H_a)}{(H_g - 0.2 H_g)} \quad (\text{ec. 3.9})$$

donde:

H_g = Radiación global total para un día completamente despejado (Joules $\text{m}^2 \text{d}^{-1}$).

H_a = Radiación global total medida (Joules $\text{m}^2 \text{d}^{-1}$).

Si el cultivo no cubre totalmente la superficie, como al inicio y al final del ciclo de crecimiento, no toda la radiación recibida es interceptada, y la asimilación de CO_2 es reducida en relación a aquella de una cubierta vegetal completa. La reducción es estimada a partir de la fracción de radiación recibida e interceptada por el cultivo:

$$f_h = (1 - e^{-k_e * IAF}) \quad (\text{ec. 3.10})$$

donde:

f_h = Fracción de luz interceptada por el cultivo.

k_e = Coeficiente de extinción de la luz visible, el valor inicial se encuentra entre 0.5 y 0.8, dependiendo de la geometría del cultivo.

Para el cultivo de maíz específicamente se consideraron las siguientes constantes:

Coeficiente de extinción de la luz visible en la cubierta vegetal (k_e) fue considerado igual a 0.65.

Eficiencia de conversión (E_g) de material primario en estructuras de la planta es de 0.65.

La tasa relativa de mantenimiento de la respiración

de antesis a madurez fisiológica (Van Keulen y Wolf, 1986).

La tasa de crecimiento de la raíz de este cultivo fue asumida en 15 mm d^{-1} de emergencia a antesis, después de la cual se considera constante.

Para transformar el peso seco de hojas a área foliar se utilizó la constante específica de área foliar (CEAF) de $18 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$.

El cálculo de la acumulación de unidades calor (UC) se efectuó en base a la siguiente ecuación:

$$UC = T_m - T_b \quad (\text{ec. 3.11})$$

donde:

T_m = Es la temperatura media del aire, es decir temperatura máxima más temperatura mínima dividida entre dos (C).

T_b = Temperatura base a partir de la cual existe crecimiento y desarrollo, cuyo valor es de 10 C.

La tasa potencial de asimilación de la cubierta vegetal (F_{gs}) expresada en $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ de carbohidratos, es obtenida mediante:

$$F_{gs} = F_{gc} \frac{30}{44} \quad (\text{ec. 3.12})$$

La cual representa la asimilación potencial bruta, es decir aquella realizada por una cubierta completamente cerrada la cual intercepta toda la energía recibida.

Por consiguiente la tasa de asimilación bruta (Tab) en $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$, fue calculada con la expresión:

$$\text{Tab} = F_{gs} \times f_h \quad (\text{ec. 3.13})$$

Si ocurre un déficit de agua en el suelo, es decir no se satisfacen las demandas transpirativas del cultivo, la tasa de asimilación actual (Taa) en $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$, es modificada por:

$$\text{Taa} = \text{Tab} \times (T/T_m) \quad (\text{ec. 3.14})$$

La tasa de transpiración (T) y la transpiración máxima (T_m), se obtiene en el subcomponente denominado balance del agua del suelo.

La tasa de mantenimiento de la respiración (T_{mr}) expresada en $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$, se obtiene al multiplicar la materia seca viva por la tasa de mantenimiento de la respiración:

$$\text{Tmr} = \text{Tab} \times R_m \quad (\text{ec. 3.15})$$

La cantidad de productos asimilados disponibles para el incremento en el peso seco del cultivo (Adips) en $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$, es la diferencia entre la asimilación bruta y la tasa de mantenimiento de la respiración:

$$\text{Adips} = \text{Taa} - \text{Tmr} \quad (\text{ec. 3.16})$$

La conversión de productos asimilados primarios en material estructural de la planta (Cme) expresada en kg ha^{-1}

d^{-1} , ocasiona una nueva pérdida de energía, que es la respiración de crecimiento, la cual está representada por el complemento, la eficiencia de conversión (E_g), entonces:

$$Cme = Adips \times E_g \quad (\text{ec. 3.17})$$

Este es utilizado para determinar el crecimiento de las diferentes partes de la planta. Para lo cual es necesario, determinar que fracción se le asigna a cada órgano (raíz, tallo, hojas y mazorca) lo cual está en función de la etapa fenológica, considerando las etapas de emergencia (cero), anthesis (uno) y madurez fisiológica (dos), en las Figuras 4.17 a 4.20 se presentan los factores de partición para los diferentes órganos de la planta. La etapa de desarrollo del cultivo se determinó para la parte media entre dos periodos sucesivos.

La tasa de incremento en el peso seco por órgano (TIO) en $kg \ ha^{-1} \ d^{-1}$, se obtiene de la siguiente manera:

$$TIO = \text{Fracción por órgano} \times Cme \quad (\text{ec. 3.18})$$

El peso seco actual de un órgano es igual a:

$$Psa_t = Psa_{t-1} + (TIO \times \Delta t) \quad (\text{ec. 3.19})$$

donde:

Psa_t = Peso seco actual del órgano en cuestión expresado en $kg \ ha^{-1}$.

Psa_{t-1} = Peso seco en el periodo $t-1$.

Δt = Intervalo de tiempo considerado (d).

La ecuación 3.19 se aplica a cada uno de los órganos de la planta.

El cálculo del índice de área foliar (IAF), es calculado mediante la ecuación:

$$\text{IAF} = \text{CEAF} \times \text{PSH} \quad (\text{ec. 3.20})$$

donde:

CEAF = Constante específica de área foliar ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$).

PSH = Peso seco de hojas (kg ha^{-1}).

La materia seca total acumulada por encima de la superficie del suelo se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{Msa}_t = \text{PST} + \text{PSH} + \text{PSM} \quad (\text{ec. 3.21})$$

donde:

Msa_t = Materia seca acumulada por encima de la superficie del suelo (kg ha^{-1}).

PST = Peso seco de tallo (kg ha^{-1}).

PSM = Peso seco de mazorca (kg ha^{-1}).

La materia seca total de la planta se obtiene mediante la expresión:

$$\text{Mst}_t = \text{Msa}_t + \text{PSR} \quad (\text{ec. 3.22})$$

donde:

Mst_t = Materia seca total al final del periodo t (kg ha^{-1}).

PSR = Peso seco de la raíz (kg ha^{-1}).

Cuando existe un período de estrés hídrico, es decir cuando el coeficiente de transpiración (T/T_m) es inferior a uno, se determina un factor de abatimiento del peso de hojas

(Fah):

$$Fah = 0.03 \times (1 - T/T_m) \quad (\text{ec. 3.23})$$

donde:

T = Tasa de transpiración actual del cultivo (mm d⁻¹).

T_m = Tasa transpiración máxima en la cual existe estrés hídrico (mm d⁻¹).

Una vez obtenido este factor se determina la disminución en el peso de hojas (DPH) kg ha⁻¹, es ocasionado por un estrés hídrico a través:

$$DPH = RDR \times PSH \quad (\text{ec. 3.24})$$

Además una vez que se alcanza la etapa fenológica de antesis, se considera una tasa de mortandad de las hojas (TMH) en kg ha⁻¹, de 0.02 kg por kg de peso seco de hojas de tal manera que se calcula:

$$TMH = 0.02 \times PSH \quad (\text{ec. 3.25})$$

Estas últimas dos tasas de mortandad de hojas se acumulan y se convierte en el peso seco total muerto durante el ciclo vegetativo (PSTM) expresado en kg ha⁻¹, de la siguiente manera:

$$PSTM = DPH + TMH \quad (\text{ec. 3.26})$$

El peso seco total vivo (PSTV) en kg ha⁻¹, para cualquier periodo es igual a:

$$PSTV = Mst_t - PSTM \quad (\text{ec. 3.27})$$

Este procedimiento se realiza iterativamente hasta que se alcanza la madurez fisiológica del cultivo incrementos de 10 días.

Evapotranspiración Potencial

Para estimar este componente del modelo de simulación se requiere del cálculo de las siguientes variables climáticas:

Radiación

Para este propósito se utilizó la fórmula de Angström la cual es:

$$R_L = R_A (a + b n N^{-1}) \quad (\text{ec. 3.28})$$

donde:

R_L = Radiación actual recibida ($\text{Joules m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

R_A = Valor de Angström, o la cantidad teórica de radiación que llegaría a la tierra en ausencia de atmósfera ($\text{Joules m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

nN^{-1} = Relación de la duración real de insolación en un día dado (n) con respecto a la duración de la insolación en un día sin nubes (N), ambos en horas.

a , b = Constantes empíricas, consideradas de 0.18 y 0.55 respectivamente para zonas templadas y frías (Frere y Popov, 1979).

Se utilizó la siguiente expresión para estimar el balance de radiación de onda larga:

$$R_b = \sigma (T_a + 273)^4 (0.56 - 0.079 e^{0.5}) (0.1 + 0.9 nN^{-1})$$

donde:

R_s = Balance de radiación de onda larga saliente
(Joules $m^2 d^{-1}$).

σ = Constante de Stefan Boltzman (4.9×10^{-8} Joules
 $m^2 d^{-1} k^4$).

T_a = Temperatura media del aire (C), el factor de
273 es la conversión a grados Kelvin.

e_a = Presión actual de vapor del aire (mbar).

La radiación neta está dada por:

$$R_n = R_L (1 - r_a) - R_s \quad (\text{ec. 3.30})$$

donde:

R_n = Radiación neta (Joules $m^2 d^{-1}$).

R_L = Radiación de onda corta (Joules $m^2 d^{-1}$).

r_a = Albedo (adimensional).

Evaporación.

Se calculó mediante un balance de calor de la forma

$$R_n = H + LE \quad (\text{ec. 3.31})$$

donde:

R_n = Radiación neta (Joules $m^2 d^{-1}$).

H = Pérdida de calor sensible (Joules $m^2 d^{-1}$).

E = Tasa de agua pérdida de la superficie ($kg m^{-2} d^{-1}$).

L = Calor latente de vaporización del agua
(2450×10^3 Joules kg^{-1}).

LE = Pérdida de calor latente (Joules $m^2 d^{-1}$).

Las pérdidas de calor sensible de una superficie
proporcional a la diferencia de temperaturas, de acuerdo
la siguiente expresión:

$$H = h_u (T_s - T_a) \quad (\text{ec. 3.32})$$

donde:

H = Pérdida de calor sensible ($\text{Joules m}^2 \text{ d}^{-1}$).

h_u = Coeficiente de transferencia de calor sensible
($\text{Joules m}^2 \text{ d}^{-1} \text{ C}^{-1}$).

T_s = Temperatura de la superficie evaporante (C).

T_a = Temperatura media del aire (C).

El valor del coeficiente de transferencia de calor sensible (h_u), depende sobre todo de la turbulencia atmosférica y puede ser expresado como una función empírica determinada por la velocidad media del viento en una altura determinada (Penman, 1948):

$$h_u = a_u (1 + b_u \bar{u}) \quad (\text{ec. 3.33})$$

donde:

\bar{u} = Velocidad media del viento (ms^{-1}).

a_u, b_u = Constantes empíricas.

Para una superficie de terreno lisa y una velocidad de viento medida a una altura de 2 m, los valores indicativos de a_u es de $6.4 \times 10^5 \text{ Joules m}^2 \text{ d}^{-1} \text{ C}$ y para b_u de 0.54 ms^{-1} (Frere y Popov, 1979).

Análogo al calor sensible, una superficie de agua pierde vapor en proporción a la diferencia de presión de vapor entre la superficie y el aire circundante:

$$E = k_u (e_s - e_a) \quad (\text{ec. 3.34})$$

donde:

E = Tasa de vapor de agua pérdida ($\text{H}_2\text{O m}^2 \text{ d}^{-1}$).

k_u = Coeficiente de transferencia de vapor ($\text{kg m}^2 \text{ d}^{-1} \text{ mbar}^{-1}$).

e_s, e_a = Presión de vapor en la superficie evaporante y en el aire circundante (mbar).

El aire en la superficie de agua es vapor de agua saturado. Esta presión de vapor a saturación está relacionada con la temperatura de la superficie (T_s), la cual puede ser aproximada por:

$$e_s = 6.11 \exp\left(\frac{17.4 \times T_s}{T_s + 239}\right) \quad (\text{ec. 3.35})$$

donde:

e_s = Presión de vapor a saturación (mbar).

T_s = Temperatura de la superficie ($^{\circ}\text{C}$).

El intercambio de calor sensible y el de evaporación están gobernados por los mismos procesos físicos de turbulencia y difusión. Por lo tanto existe una relación entre el coeficiente de transferencia de calor sensible y el coeficiente de transferencia de vapor (relación de Bowen's) dicho de otra manera:

$$\gamma = h_u K_u^{-1} L^{-1} \quad (\text{ec. 3.36})$$

donde:

γ = Constante psicrométrica, su valor es alrededor de 0.66.

Sustituyendo las ecuaciones 3.34, 3.35 y 3.36 en la ecuación 3.31 se tiene:

Esta ecuación contiene dos términos desconocidos, temperatura de la superficie del agua (T_s), y la presión vapor a saturación en el aire en esta superficie (e_s). Ambas variables están relacionadas en la forma descrita en ecuación de e_s . Es decir, son dos ecuaciones con dos incógnitas, así que la temperatura de la superficie y presión de vapor en la superficie fueron solucionadas mediante el uso del método numérico de falsa posición (Fuentes y Martínez, 1988).

Para determinar $(e_s - e_a)$, se utilizó la siguiente relación:

$$(e_s - e_a) = \Delta (T_s - T_d) \quad (\text{ec. 3.38})$$

donde:

T_d = Temperatura al punto de rocío, es decir a la temperatura en la cual la presión actual de vapor del aire se convierte en la presión de vapor a saturación.

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor saturación entre la temperatura media del aire y el punto de rocío.

Sustituyendo la ecuación 3.38 en la ecuación 3.3 resulta:

$$R_n = h_u (T_s - T_a) + (h_u \Delta / \gamma) (T_s - T_d) \quad (\text{ec. 3.39})$$

En la ecuación 3.39 la temperatura de la superficie (T_s) es el único término desconocido y puede hacer explícito:

$$T_s = T_a + \left[\left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) \left(\frac{R_n}{h_u} \right) \right] - \left[\left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (T_a - T_d) \right] \quad (\text{ec. 3.40})$$

Combinando las ecuaciones 3.31, 3.32 y 3.40 resulta:

$$LE = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} [R_n + h_u (T_a - T_d)] \quad (\text{ec. 3.41})$$

que es la ecuación bien conocida de Penman para calcular la evaporación de una superficie libre de agua. En la ecuación 3.41, se puede reemplazar el término $(T_a - T_d)$ por $(e_s - e_a)/\Delta$, en la cual e_s es la presión de vapor saturación a la temperatura del aire. Entonces la ecuación de Penman puede ser descrita por:

$$LE = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} [\Delta R_n + h_u (e_s - e_a)] \quad (\text{ec. 3.42})$$

Para determinar la evapotranspiración potencial de un cultivo de referencia se consideró la ecuación 3.42 y un albedo de 0.25 para la superficie del cultivo.

Balance del Agua del Suelo

Humedad Almacenada en el Suelo

Para determinar la humedad almacenada en el suelo se utilizará la siguiente ecuación:

$$SM_r = SM_o * \exp [-\gamma (\ln \Psi)^2] \quad (\text{ec. 3.43})$$

donde:

- SM_r = Contenido de humedad del suelo, $cm^3 cm^{-3}$.
 SM_o = Espacio poroso total, $cm^3 cm^{-3}$.
 λ = Constante específica del suelo en base a la textura.
 Ψ = potencial mátrico del suelo, en cm.

Tasa Máxima de Infiltración (IM_{max})

La tasa de infiltración máxima, esta determinada por los efectos combinados de la fuerzas mátricas y de gravedad, está definida mediante la siguiente ecuación:

$$IM_{max} = S_o * (1 - SM_r/SM_o) * \Delta t^{-0.5} + A \quad (\text{ec. 3.44})$$

donde:

- S_o = Absorción estándar de un suelo y está en función de la textura, en $cm d^{-1}$.
 A = Permeabilidad del suelo en la zona de transmitancia y están en una función de la textura, en $cm d^{-1}$.
 Δt = Período de tiempo a considerar en el balance de humedad del suelo (d).

Tasa Efectiva de Precipitación (P)

Debido a lo incierto de los efectos de la intercepción y el bajo nivel de confianza que se tiene de los estimadores de lluvia efectiva, en condiciones variables de follaje en que los datos son poco precisos, se consideró el dato directo del pluviómetro para utilizarse en el balance hídrico.

Tasa de Infiltración Efectiva (I_e)

La tasa de riego efectiva representa la entrada neta de agua en la zona de raíces, la cual se calculará mediante la ecuación:

$$I_e = I * E_p \quad (\text{ec. 3.45})$$

donde:

I =Tasa de agua a la salida de la fuente de abastecimiento, en cm día^{-1} .

E_p =Factor de eficiencia global de aplicación.

Tasa Actual de Evaporación (E_a)

La evaporación de la superficie del suelo depende básicamente de tres factores, primero de la tasa de evaporación potencial, la cual es una expresión de la demanda atmosférica (E_o), segundo de la conductividad hidráulica de la superficie del suelo y tercero del efecto del sombreado del cultivo, lo cual es una función directa del área foliar.

Cuando no existe cultivo, la tasa de evaporación máxima (E_m), se asumirá que es igual a E_o .

Cuando existe el cultivo, la tasa de evaporación máxima siempre es menor que la evaporación potencial, por lo que se calculará con la siguiente ecuación:

$$E_m = E_o * \exp^{-0.4 * IAF} \quad (\text{ec. 3.46})$$

donde:

- E_m = Es la tasa de evaporación máxima, en cm día^{-1} .
 E_a = Es la tasa de evaporación potencial, tomada de un tanque evaporímetro tipo "A", en cm día^{-1} .
 I_{AF} = Es el índice de área foliar del cultivo.

La tasa de evaporación actual para cualquier contenido de humedad del suelo se calcula con la siguiente ecuación:

$$E_a = \frac{E_m (SM_r - SM_{pmp})}{(SM_o - SM_{pmp})} \quad (\text{ec. 3.47})$$

donde:

- E_a = Tasa de evaporación actual, en cm día^{-1} .
 E_m = Tasa de evaporación máxima, en cm día^{-1} .
 SM_{pmp} = Es el contenido de humedad del suelo en punto de marchitez permanente, en $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

Capacidad de Almacenamiento Superficial (SS_{max})

La capacidad de almacenamiento superficial se describe mediante la siguiente ecuación:

$$SS_{max} = 0.5 \left[\frac{\text{Sen}^2(\delta - P)}{\text{Sen } \delta} \right] \left[\frac{\text{Cotan}(\delta + P) + \text{Cotan}(\delta - P)}{2(\text{Cos } \delta) (\text{Cos } P)} \right] d \quad (\text{ec. 3.48})$$

donde:

- SS_{max} = Capacidad de almacenamiento superficial, en cm .
 d = Es la rugosidad de la superficie, en cm .

δ = Es el ángulo formado entre el terrón y el surco, en considerado de 30 grados, para terrón angular.

P = Es la pendiente del terreno, en grados.

Almacenamiento Superficial Actual (SS_t) y el Escurrimiento Superficial (SR).

La cantidad de agua almacenada en la superficie del suelo puede permanecer igual, aumentar o disminuir en el transcurso de un intervalo de tiempo. La cuantificación del cambio en el almacenamiento superficial (DS), del escurrimiento (SR), es cuestión de llevar una simple contabilidad como sigue:

1) Primero. Se considera una situación de equilibrio en la cual el abastecimiento es igual a la capacidad de infiltración del suelo sí:

$$IM_{max} = P + I_e - E_a \quad (\text{ec. 3.49})$$

entonces, el cambio en el almacenamiento superficial es igual a cero ($DS = 0$) y el escurrimiento superficial es igual a cero ($SR = 0$).

2) Segundo. Si el abastecimiento es menor que la capacidad de almacenamiento del suelo, es decir:

$$IM_{max} < P + I_e - E_a \quad (\text{ec. 3.50})$$

entonces, todo el abastecimiento puede infiltrarse y aún quedar capacidad de infiltración. La disminución en el almacenamiento superficial nunca puede exceder la cantidad presente ($DS \leq SS_t/\Delta t$), así que pueden darse dos posibilidades:

a) La capacidad de infiltración puede exceder el abastecimiento actual si ocurre lo siguiente:

$$IM_{max} - (P + I_e - E_a) \geq SS_i / \Delta t \quad (\text{ec. 3.51})$$

entonces, el cambio en el almacenamiento superficial es igual a:

$$DS = SS_i / \Delta t \quad (\text{ec. 3.52})$$

es decir toda el agua almacenada se infiltra en el intervalo Δt y el escurrimiento superficial es igual a cero ($DS = 0$).

b) El excedente de la capacidad de infiltración es menor que el almacenamiento actual, es decir se presenta la siguiente situación:

$$IM_{max} - (P + I_e - E_a) < SS_i / \Delta t \quad (\text{ec. 3.53})$$

entonces, el cambio en el almacenamiento superficial se define por la fórmula siguiente:

$$DS = IM_{max} - (P + I_e - E_a) \quad (\text{ec. 3.54})$$

es decir, la capacidad de almacenamiento está limitada por la capacidad de infiltración disponible y no hay escurrimiento ($SR = 0$).

3) Tercero. Si el abastecimiento a la superficie excede la capacidad de infiltración del suelo, es decir ocurre que:

$$P + I_e - E_a > IM_{max} \quad (\text{ec. 3.55})$$

entonces, el exceso de agua en primer instante, es almacenado en la superficie. La capacidad de almacenamiento alcanza la cantidad $(SS_{max} - SS_i)$. Si el abastecimiento excede la capacidad de almacenamiento, entonces $(SS_{max} - SS_i)$ se

alcanza y el resto se pierde como escurrimiento (SR), aquí también se presentan dos posibilidades:

a) El abastecimiento excede la capacidad disponible de almacenamiento, es decir se presenta lo siguiente:

$$(P + I_e - E_a) - IM_{max} > (SS_{max} - SS_i) / \Delta t \quad (\text{ec. 3.56})$$

entonces, el cambio en el almacenamiento superficial (DS) se determina por la ecuación:

$$DS = - (SS_{max} - SS_i) / \Delta t \quad (\text{ec. 3.57})$$

es decir, es utilizada toda la capacidad de almacenamiento superficial y el escurrimiento superficial se calcula de la siguiente manera:

$$SR = (P + I_e - E_a) - IM_{max} - DS \quad (\text{ec. 3.58})$$

b) El exceso de abastecimiento es igual o menor que la capacidad disponible de almacenamiento, si ocurre lo siguiente:

$$(P + I_e - E_a) - IM_{max} \leq (SS_{max} - SS_i) / \Delta t \quad (\text{ec. 3.59})$$

entonces, el cambio en el almacenamiento superficial se evaluará mediante la ecuación siguiente:

$$DS = IM_{max} - (P + I_e - E_a) \quad (\text{ec. 3.60})$$

es decir, el exceso de abastecimiento puede ser almacenado haciendo uso de la capacidad de almacenamiento disponible y no se presenta escurrimiento ($SR = 0$).

Condición del Agua en el Suelo (RSM).

Para determinar el contenido de humedad en el suelo el modelo contempla un balance de agua en el suelo explorado

por las raíces en base a la ecuación 2.2, y los términos individuales del balance de agua del suelo se describen en forma breve a continuación:

La tasa de entradas netas a través del límite superior o infiltración actual se define por la ecuación:

$$IM = P + I + - E_a + DS - SR \quad (\text{ec. 3.61})$$

donde:

P = Tasa de precipitación actual, cm d^{-1} .

I = Tasa de riego efectiva, cm d^{-1} .

E_a = Tasa de evaporación actual, cm d^{-1} .

DS = Tasa de declinación del abastecimiento superficial, cm d^{-1} .

SR = Tasa de escurrimiento de la superficie, cm d^{-1} .

Transpiración del Cultivo (T)

Para determinar la transpiración del cultivo, es necesario determinar la tasa de transpiración potencial la cual es obtenida mediante la siguiente ecuación de tipo logístico:

$$T_o = ET_o - E_o * \exp^{-0.4 * IAF} \quad (\text{ec. 3.62})$$

donde:

T_o = Es la transpiración potencial del cultivo, en cm d^{-1} .

ET_o = Es la evapotranspiración del cultivo en cm d^{-1} .

E_o = Es la evaporación potencial de una superficie libre de agua, en cm d^{-1} .

IAF = Es el índice de área foliar del cultivo (se consideró un valor de seis).

Transpiración Máxima (T_m).

La tasa de transpiración máxima bajo condiciones de humedad óptimas es una función del área foliar total que transpira y de la tasa de transpiración potencial. Asumiendo proporcionalidad entre la intercepción de luz por la superficie evapotranspirante, la tasa de transpiración máxima está definida por la ecuación siguiente:

$$T_m = T_o * (1 - \exp^{-0.8 * IAF}) \quad (\text{ec. 3.63})$$

donde:

$$T_m = \text{Es la transpiración máxima, en cm d}^{-1}.$$

Reducción de la transpiración bajo condiciones de estrés hídrico (T/T_m).

La tasa de transpiración del cultivo (T), únicamente es igual a la tasa de transpiración máxima (T_m) si el contenido de humedad del suelo de la zona radicular se encuentra entre el rango óptimo de capacidad de campo (SM_{100}) y el contenido de humedad a punto crítico (SM_{cr}), esto es:

$$T = T_m \quad \text{si} \quad SM_{cr} \geq SM_r \leq SM_{100} \quad (\text{ec. 3.64})$$

La tasa de transpiración será menor que la tasa de transpiración máxima si el contenido de humedad del suelo es mayor que SM_{100} o si es menor que SM_{cr} , de tal manera que:

$$T < T_m \quad \text{si} \quad SM_r > SM_{100} \quad \text{ó} \quad \text{si} \quad SM_r < SM_{cr} \quad (\text{ec. 3.65})$$

Para cualquier contenido de humedad de suelo SM_r , se pueden presentar las siguientes condiciones:

a) Si $SM_r > (SM_o - 0.05)$ entonces la transpiración (T) es igual a 0.1.

b) Si $(SM_o - 0.05) \geq SM_r \leq SM_{100}$ entonces la transpiración se calculará mediante la ecuación:

$$T = (((SM_o - 0.05) - SM_r) / (SM_o - 0.05) - SM_{100})) * T_m$$

(ec. 3.66)

c) Si $SM_{100} \geq SM_r > SM_{cr}$ entonces la transpiración del cultivo va a ser igual a la tasa de transpiración máxima ($T = T_m$).

d) Si $SM_{cr} \geq SM_r \geq SM_{10000}$ entonces la transpiración se calculará mediante la ecuación:

$$T = ((SM_r - SM_{10000}) / (SM_{cr} - SM_{10000})) * T_m \quad (\text{ec. 3.67})$$

e) Si $SM_r < SM_{10000}$ entonces la transpiración del cultivo (T) es igual 0.1.

Determinación del Contenido de Humedad del Suelo a Punto Crítico (SM_{cr}) para el Cultivo de Maíz.

Es necesario determinar un contenido de humedad de punto crítico para ese suelo y cultivo específicamente, el cual está dado por la ecuación:

$$SM_{cr} = (1 - p) (SM_{cc} - SM_{pmp}) + SM_{pmp} \quad (\text{ec. 3.68})$$

donde:

SM_{cr} = Es el contenido de humedad de punto crítico
en $cm^3 cm^{-3}$.

p = Fracción de abatimiento de la humedad del suelo
en $cm^3 cm^{-3}$.

SM_{cc} = Contenido de humedad a capacidad de campo
en $cm^3 cm^{-3}$.

SM_{pmp} = Contenido de humedad a punto de marchiteo
permanente en $cm^3 cm^{-3}$.

Cuando el contenido actual de la humedad está cerca del valor crítico (SM_{cr}), la transpiración actual es igual a la transpiración máxima.

La ecuación 3.69 de balance hídrico fue utilizada para todos los intervalos de tiempo durante la estación de crecimiento fue:

$$SM_{r(t+\Delta t)} = SM_{r_t} + RSM \times \Delta t \quad (\text{ec. 3.69})$$

donde:

$SM_{r(t+\Delta t)}$ = Es el contenido de humedad del suelo al final del intervalo de tiempo, iniciando en el día t y terminando en el día $(t + \Delta t)$, en $cm^3 cm^{-3}$.

SM_{r_t} = Es el contenido de humedad al inicio del intervalo de tiempo (día t), en $cm^3 cm^{-3}$.

RS = Es la tasa de cambio en el contenido de humedad del suelo dentro del intervalo de tiempo, en $cm^3 cm^{-3} d^{-1}$.

Capacidad de Predicción del Modelo Utilizado.

Para evaluar la capacidad de predicción del modelo de simulación se realizó un análisis de las desviaciones de los datos observados y simulados (Snedecor y Cochran, 1967), lo cual permitió hacer inferencia estadística sobre el comportamiento del modelo en la predicción de la acumulación de materia seca y rendimiento de maíz. Es decir bajo el supuesto de distribución normal de los errores se plantearon las hipótesis:

$$H_0: \mu_D = 0$$

$$H_a: \mu_D \neq 0$$

donde μ_D corresponde a la media de las desviaciones reducidas de tal manera que:

$$t_c = \frac{\sqrt{n} (\bar{X} - \mu_D)}{S} \quad (\text{ec. 3.70})$$

Siendo n el número de errores o pares de datos comparados, \bar{X} la media y S la desviación de la serie de errores. Bajo la teoría de normalidad, t_c se distribuye con una t -Student con $n-1$ grados de libertad (g.l.) si y sólo si $H_0: \mu_D = 0$ es cierta. La regla de decisión es rechazar $H_0: \mu_D = 0$ si $|t_c| \geq t_{\alpha/2} (n-1)$ g.l. (Ostle, 1983), α se consideró de 0.05. El intervalo de confianza para μ_D , basado en la distribución t -Student, con una confianza del 95 por

$$\bar{X} - (t\alpha/2 (n-1) \text{ g. l. })(S) \leq \mu_D \leq \bar{X} + (t\alpha/2 (n-1) \text{ g. l. })(S)$$

(ec. 3.71)

Mecanización del algoritmo.

Para la integración de los tres subcomponentes arriba descritos, se escribió un programa computacional, con la finalidad de agilizar el cálculo de la acumulación de materia seca, el cual fue compilado en el lenguaje Turbo Pascal versión 5.5 (Apéndice B).

4. RESULTADOS Y DISCUSION.

Para la presentación y discusión de los resultados obtenidos mediante la presente investigación, el orden a considerar será el análisis de la dinámica de la humedad de suelo, transpiración del cultivo en el haz y envés de la hoja, la dinámica de acumulación de materia seca por órgano, materia seca total por planta, partición de materia seca en términos de incremento, rendimiento de grano y componentes evaluados, simulación de la acumulación de materia seca mediante el modelo propuesto y su capacidad de predicción.

Dinámica de la Humedad del Suelo

En base a que esta variable se mantuvo bajo control se presentan los resultados de los muestreos mediante los cuales fue determinado el momento de aplicación del riego así como la lámina de agua necesaria para restablecer la condición de humedad en el suelo.

Bajo esta consideración al tratamiento ETM-REF, se le aplicaron un total de siete riegos de auxilio, iniciados a los 29 días después de la siembra y concluyendo a los 90

Cuadro 4.1. Calendario de riegos de auxilio aplicado a los tratamientos de humedad del suelo evaluados. UAAAN 1991.

Tratamiento	Número de riegos de auxilio							Lámina Aplicada (mm)
	1	2	3	4	5	6	7	
Referencia (ETM)	29*	36	43	57	64	92	98	396.26
75 por ciento H.A.S.	29	43	62	92	101			405.85
50 por ciento H.A.S.	29	45	64	98				339.62
25 por ciento H.A.S.	38	66	98					312.48

* Expresado en días después de la siembra.

días, la lámina total aplicada fue de 396 mm (Cuadro 4.1), cuya distribución fue: cuatro durante el periodo de siembra a floración masculina (FM), uno de floración masculina a estado lechoso (EL) y dos riegos de estado lechoso a madurez fisiológica (MF) como se muestra en la Figura 4.1., con lo que se completó el ciclo vegetativo de este tratamiento, y láminas aplicadas en estos tres periodos de 208, 81 y 107 mm respectivamente. Es evidente que para este tratamiento los niveles de abatimiento en los diferentes estratos fueron bajos de acuerdo a las tendencias presentadas manteniendo al cultivo en buenas condiciones de humedad del suelo.

Para el tratamiento cuyo nivel de humedad aprovechable fue del 75 por ciento, fue necesario aplicar cinco riegos de auxilio, iniciados a los 29 días y aplicando el último a los 101 días después de la siembra, con una lámina total de 406 mm (Cuadro 4.1), distribuidos tres de siembra a floración masculina (FM) y dos de estado lechoso (EL) a madurez fisiológica (MF), durante el periodo de floración masculina a estado lechoso no se aplicaron riegos,

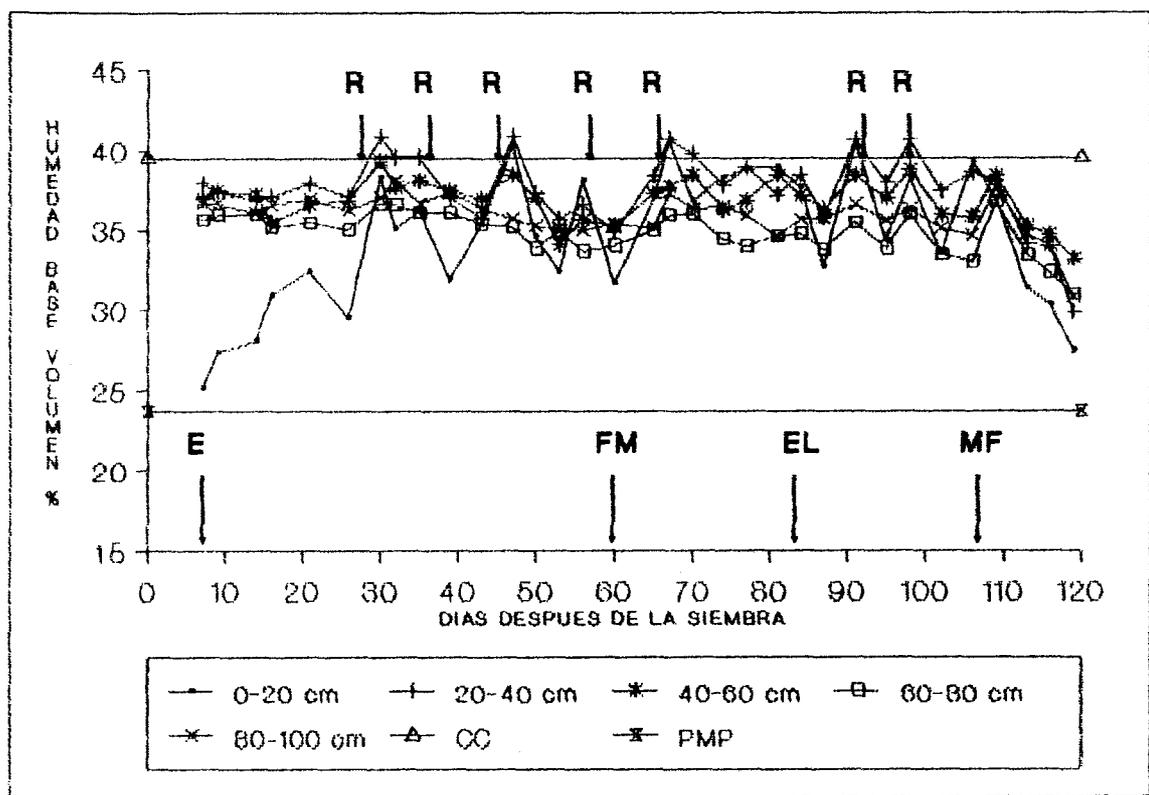


Figura 4.1. Comportamiento de la humedad del suelo y riegos (R) en el tratamiento ETM-REF, en maíz. UAAAN 1991.

debido a que el contenido de humedad del suelo estuvo en forma general por encima de la determinante de riego en el estrato indicador, ocasionado en parte por la presencia de lluvias y por los riegos aplicados previamente como es mostrado en la Figura 4.2., por otra parte la lámina de agua aplicada en estos periodos fue de 298 y 108 mm respectivamente. Además la variación del contenido de humedad del suelo fue mayor en los estratos superiores, causado principalmente por la evaporación directa del suelo, pero a partir de los 20 cm hacia abajo, las variaciones tienden a ser más pequeñas debido a que las pérdidas en las capas más profundas son ocasionadas principalmente por la extracción radical, como fue reportado por Protopapas y Bars

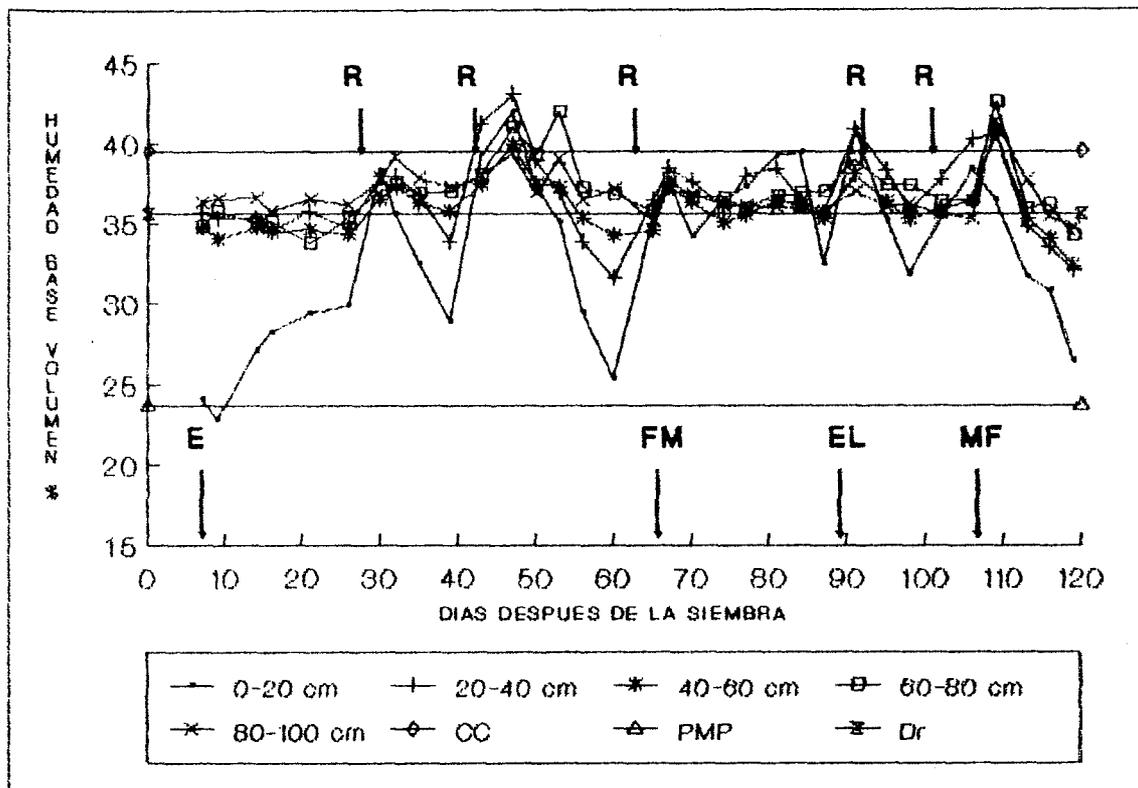


Figura 4.2. Comportamiento de la humedad del suelo y riegos (R) en el tratamiento 75 por ciento de humedad aprovechable, en maíz. UAAAN 1991.

(1987).

Para restablecer el contenido de humedad en el tratamiento cuyo nivel de humedad aprovechable del suelo fue del 50 por ciento, se aplicaron cuatro riegos de auxilio durante el periodo comprendido de los 29 a los 98 días después de la siembra, con una lámina total de 340 mm (Cuadro 4.1), distribuyendo dos en la etapa de crecimiento vegetativo (siembra a floración masculina), uno de floración masculina a estado lechoso y uno de estado lechoso a madurez fisiológica, con láminas de agua de 184, 60 y 81 mm respectivamente. La Figura 4.3., muestra que se presentaron

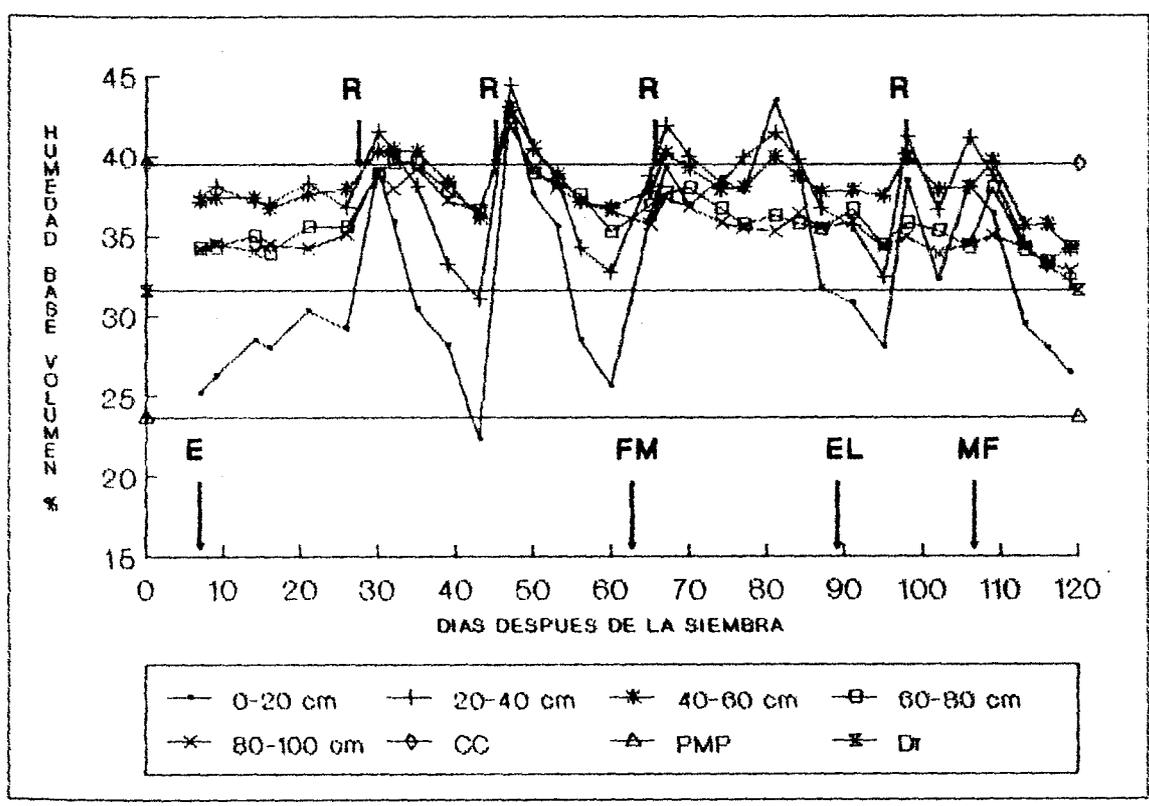


Figura 4.3. Comportamiento de la humedad del suelo y riegos (R) en el tratamiento 50 por ciento de humedad aprovechable, en maíz. UAAAN 1991.

tres periodos de diez días aproximadamente en los que el contenido de humedad del estrato control alcanzó el máximo déficit de agua en el suelo, siendo alrededor de los 42, 60 y 95 días después de la siembra.

Así para el tratamiento con mayor estrés hídrico, es decir el de 25 por ciento de humedad aprovechable, únicamente se aplicaron tres riegos de auxilio con una lámina total de 312.48 mm (Cuadro 4.1), realizados uno en cada periodo de crecimiento ya mencionados, con láminas de 92.63, 109.75 y 110.01 mm respectivamente, es importante mencionar que los riegos se iniciaron a los 38 días y

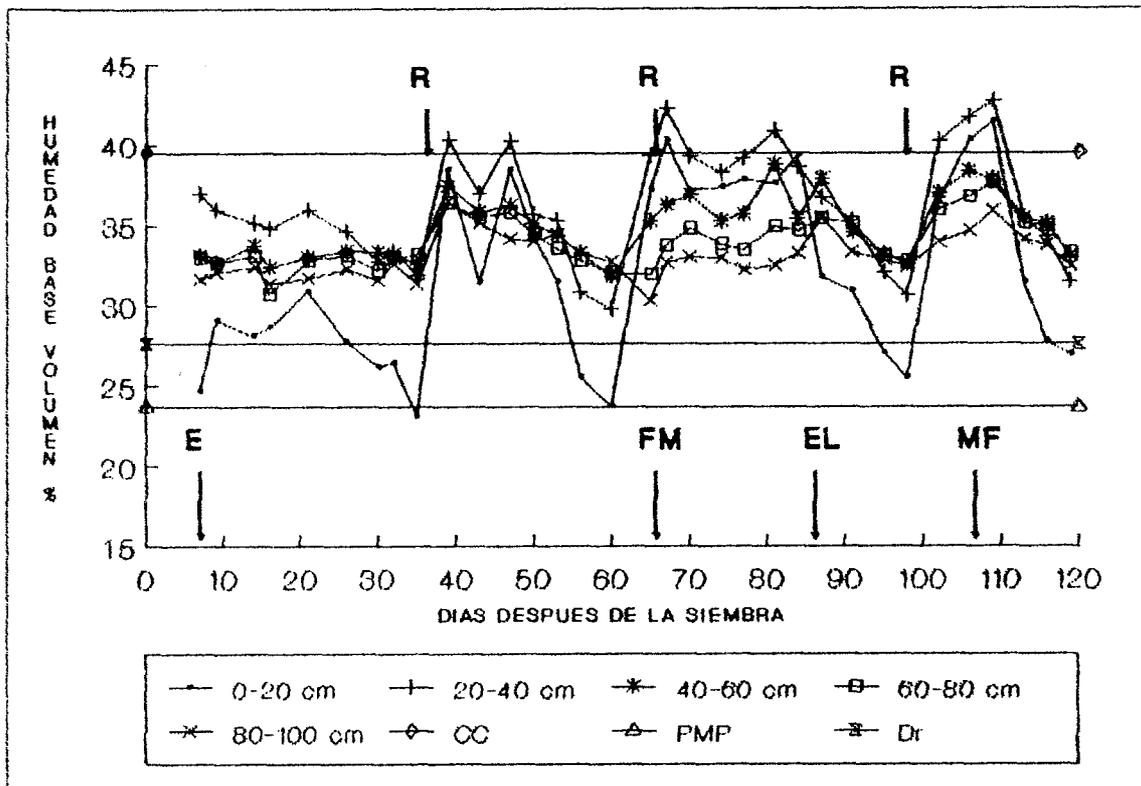


Figura 4.4. Comportamiento de la humedad del suelo y riegos (R) en el tratamiento 25 por ciento de humedad aprovechable, en maíz. UAAAN 1991.

terminaron a los 98 días después de la siembra, lo cual ocasionó que la humedad en los diferentes estratos se diferenciara significativamente del resto de tratamientos y mostrara un mayor abatimiento en los estratos más profundos por efecto de la extracción radical y por la falta de abastecimiento (Figura 4.4.). Se presentaron tres periodos críticos en los cuales la planta fue sometida a estrés siendo aproximadamente a los 35, 62 y 98 días después de la siembra.

El análisis gráfico del contenido de humedad del suelo en los diferentes tratamientos muestra en forma

general evidencias que de acuerdo a los criterios establecidos para evaluar los distintos grados de estrés hídrico, las plantas fueron sometidas a diferentes condiciones de humedad del suelo, aunque no se presentaron periodos de sequía crítica en las etapas de floración masculina, aparición de estigmas y llenado de grano, consideradas más sensibles al estrés de agua en las que pueden existir reducciones considerables en la respuesta de la planta en función de la intensidad y de la etapa fenológica en que se presenten (Robbins y Domingo, 1953; Denmead y Shaw (1960), Stewart *et al.*, 1975; Doorenbos y Kassam, 1979; Palacios, 1980; Frey, 1982 y Rodríguez, 1985). La precipitación durante el ciclo de crecimiento fue de 249 mm y cuya distribución a nivel decenal se muestra en la Figura A.4 del apéndice, observándose que el periodo de lluvias se presentó de los 70 a 90 días después de la siembra en el que no se aplicaron riegos.

Para establecer en forma más concreta la diferenciación de los tratamientos evaluados, se presentan los resultados del análisis estadístico efectuado a cada uno de los 33 muestreos realizados durante el ciclo de cultivo y su separación de medias, por lo cual es presentado por estratos.

En el Cuadro 4.2., se muestra el análisis de varianzas para el estrato 0 a 20 cm, el cual indicó que en 15 muestreos se detectaron diferencias estadísticas entre

Cuadro 4.2. Análisis de varianza para el contenido de humedad del suelo base volumen, en el perfil 0-100 cm, para los muestreos realizados durante el ciclo del maíz. UAAAN 1991.

DDS	Estrato 0-20 cm		Estrato 20-40 cm		Estrato 40-60 cm	
	Cuad.	Medio F	Cuad.	Medio F	Cuad.	Medio F
7	1.040	0.14	3.724	0.93	13.242	2.33
9	6.436	0.59	5.153	1.15	23.440	3.91*
14	2.431	0.91	5.572	2.21	13.071	2.93
16	7.313	0.95	7.514	1.59	13.621	2.59
21	6.611	3.24	7.095	1.13	16.808	2.98
26	3.414	0.58	7.077	2.19	18.066	3.29
30	156.829	45.07**	60.934	23.03**	35.964	5.67*
32	82.928	10.40**	37.331	6.74**	34.880	9.50**
35	123.003	10.74**	44.527	14.07**	42.582	12.39**
39	88.386	43.71**	42.389	7.01**	4.958	1.47
43	212.228	59.31**	69.866	17.33**	2.092	0.28
47	16.512	6.80**	14.991	3.58*	32.043	6.50*
50	12.500	10.40**	17.197	3.02	20.189	4.99*
53	16.189	9.38**	9.097	1.89	21.401	6.53*
56	117.792	22.70**	22.151	6.58**	10.131	3.36
60	48.424	5.11*	18.341	8.06**	17.333	3.52
65	3.144	0.56	6.168	1.64	9.768	1.81
67	6.382	0.82	11.549	1.77	10.969	2.26
70	7.643	1.46	4.382	1.07	7.494	1.24
74	3.611	0.81	5.121	0.95	6.784	1.42
77	1.596	0.23	1.868	0.31	5.627	0.85
81	20.140	0.85	15.965	1.07	8.734	1.27
84	3.310	0.48	7.480	1.06	8.416	1.19
87	0.716	0.61	1.337	0.32	6.150	1.64
91	128.843	24.60**	35.065	11.29**	12.600	1.80
95	70.711	20.58**	46.543	14.77**	11.250	2.27
98	152.934	33.51**	96.310	14.74**	45.644	9.38**
102	13.889	4.06*	9.728	3.10	3.629	0.90
106	3.490	0.69	7.165	2.83	6.207	2.30
109	23.147	4.63*	6.090	0.68	6.042	0.34
113	4.199	0.90	1.424	0.53	0.136	0.05
116	10.087	1.88	1.142	0.34	1.894	0.71
119	0.985	0.23	5.315	0.61	2.244	0.48

* Significativo al 0.05 de probabilidad.

** Significativo al 0.01 de probabilidad.

DDS Días después de la siembra.

tratamientos, la Figura 4.5., confirma la presencia de dos periodos contrastantes de humedad, los cuales fueron de los 30 a 60 días el primero y de los 91 a 109 días después de la siembra el segundo, observándose además que en este estrato

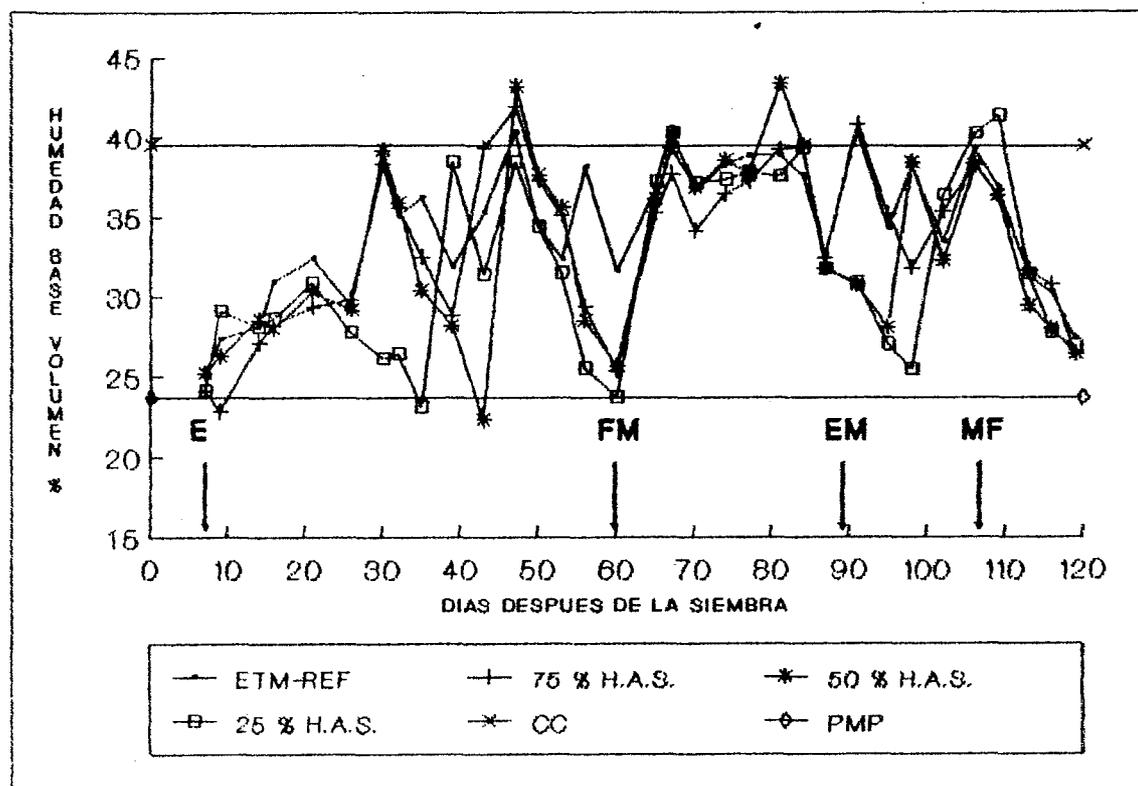


Figura 4.5. Dinámica de la humedad del suelo por tratamiento en el estrato 0 a 20 cm, durante el ciclo del maíz. UAAAN 1991.

los cambios de humedad a través del ciclo fueron muy drásticos ocasionado por las pérdidas directas de la evaporación del suelo, también es evidente que el tratamiento con mayor contenido de humedad a lo largo del período de crecimiento fue el ETM-REF, debido a las condiciones de abastecimiento de agua ya mencionadas, seguido después por los tratamientos con 75, 50 y 25 por ciento de humedad aprovechable. Es importante remarcar que en el estrato de 0 a 20 cm fue el único en el que se alcanzó el punto de marchitez permanente, sin embargo las plantas no se marchitaron pues alcanzaron madurez a cosecha los tratamientos de 50 y 25 por ciento de humedad

Cuadro 4.2.continuación.

DDS	Estrato 60-80 cm		Estrato 80-100 cm	
	Cuad. Medio	F	Cuad. Medio	F
7	5.066	0.58	21.298	1.61
9	9.010	0.76	18.457	1.33
14	5.975	0.50	12.688	0.90
16	18.051	1.88	19.110	1.70
21	9.964	0.70	28.052	2.78
26	4.977	0.49	16.287	1.35
30	33.107	3.78	40.615	3.31
32	30.176	3.17	29.453	3.98*
35	22.780	2.61	44.418	4.27*
39	2.471	0.99	0.984	0.45
43	6.158	1.02	3.873	2.09
47	49.047	10.70**	43.983	5.25*
50	32.639	8.67**	19.971	4.66*
53	56.400	2.39	19.717	6.68**
56	23.619	3.63	10.512	2.42
60	15.943	2.35	13.085	2.65
65	17.968	3.55	24.193	3.05
67	14.656	2.85	19.473	2.40
70	6.996	0.94	9.466	1.19
74	9.096	1.44	9.356	2.24
77	6.014	1.00	14.837	5.00*
81	4.486	0.65	7.311	1.39
84	4.349	0.67	7.273	1.68
87	7.285	3.45	0.252	0.21
91	11.987	1.08	8.551	1.42
95	14.498	1.56	4.968	1.23
98	15.931	1.04	11.668	1.62
102	6.818	0.71	2.266	0.35
106	12.661	1.49	0.028	0.01
109	27.092	0.61	20.965	0.96
113	4.811	0.51	0.730	0.16
116	11.331	1.79	1.860	0.18
119	9.701	1.37	7.811	1.20

* Significativo al 0.05 de probabilidad.

** Significativo al 0.01 de probabilidad.

DDS Días después de la siembra.

aprovechable, sin embargo la contribución de éste en la extracción radical es baja debido que la mayor actividad de la raíz se localiza fuera de este estrato. En el Cuadro A.5. del apéndice, se muestra la separación de medias, en el en el que se reafirma lo anteriormente establecido.

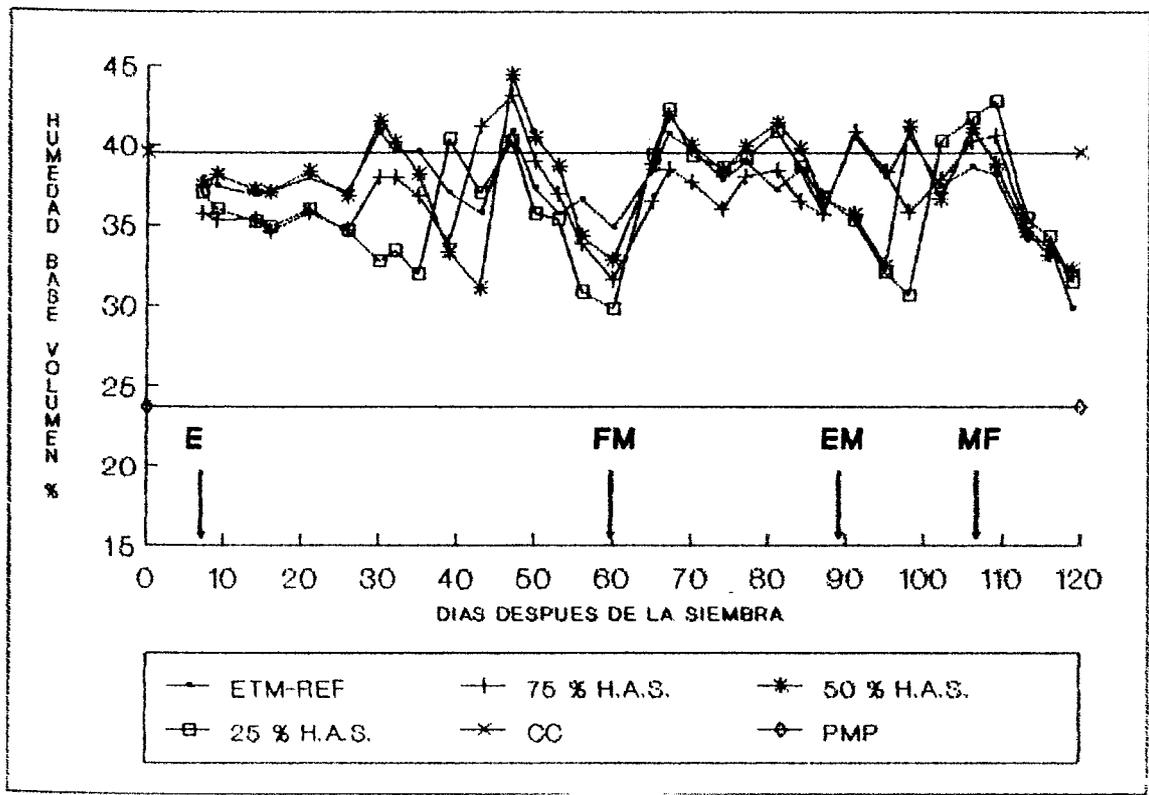


Figura 4.6. Dinámica de la humedad del suelo por tratamiento en el estrato 20 a 40 cm, durante el ciclo del maíz. UAAAN 1991.

Para el estrato de 20 a 40 cm, el análisis de varianza efectuado detectó diferencias estadísticas en diez muestreos (Cuadro 4.2). En la Figura 4.6., se presentan los contenidos de humedad por tratamiento en la que se observa que en la mayor parte del ciclo del cultivo los contenidos de humedad fueron superiores a un 35 por ciento, lo que equivale a un abatimiento del 60 por ciento de la humedad aprovechable en los periodos de mayor estrés hídrico y para aquellos cuyo déficit de agua lo permitió. Es evidente que el tratamiento cuya humedad se mantuvo por encima del resto de tratamientos y con menor variación a lo largo del ciclo fue el ETM-REF, seguidos por los tratamientos con 50, 75 y

25 por ciento de humedad aprovechable, la separación de medias (Cuadro A.6.) muestra que el tratamiento ETM-REF fue diferente al resto a los 43 días después de la siembra, en tanto que los tratamientos con 75 y 50 por ciento de humedad aprovechable siempre fueron iguales, alternándose entre ellos. Es de mencionar que el tratamiento con 25 por ciento de humedad aprovechable fue diferente de los demás a los 30, 32, 35, 56 y 98 días después de la siembra, con lo cual se corrobora que fue el tratamiento con mayor déficit hídrico.

En el siguiente estrato, es decir de 40 a 60 cm, se detectaron diferencias estadísticas en siete muestreos como se muestra en el Cuadro 4.2., lo que permite establecer que a mayor profundidad de suelo la variabilidad de la humedad es menor, lo cual se confirma en la Figura 4.7., en la que se observa que durante la mayor parte del ciclo el tratamiento con mayor humedad es el de 50 por ciento de humedad aprovechable, seguido por los tratamientos ETM-REF, 75 y 25 por ciento de humedad aprovechable, lo cual indudablemente se reflejó en la respuesta de la planta como se mostrará posteriormente. La separación de medias corrobora lo antes establecido, ya que en los muestreos con diferencia estadística, el tratamiento con 50 por ciento de humedad aprovechable fue el que presentó los más altos contenidos de humedad, también se observó que los tratamientos ETM-REF y 75 por ciento de humedad aprovechable tienden a ser iguales y el más castigado es el de 25 por

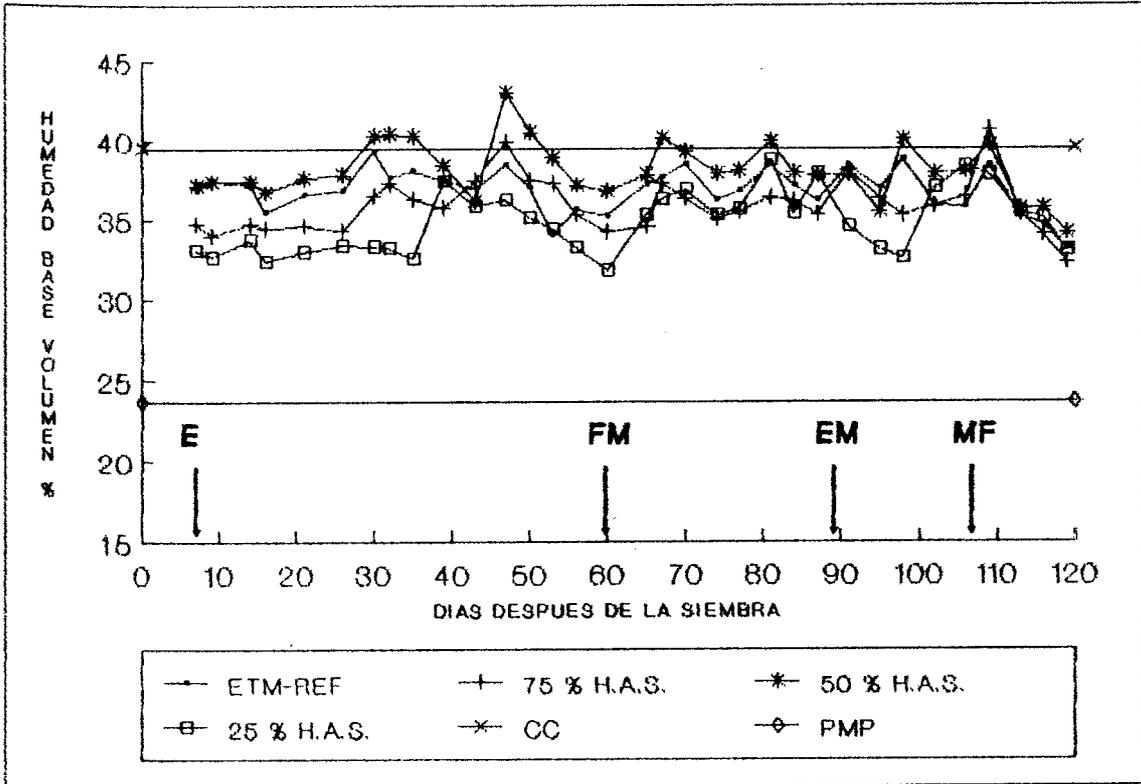


Figura 4.7. Dinámica de la humedad del suelo por tratamiento en el estrato 40 a 60 cm, durante el ciclo del maíz. UAAAN 1991.

En el estrato 60 a 80 cm de profundidad, el análisis de varianza indicó que solamente a los 47 y 57 días después de la siembra hubo diferencias estadísticas entre los tratamientos (Cuadro 4.2), de tal manera que en los muestreos restantes fueron iguales. La Figura 4.8., muestra que el tratamiento con un nivel de humedad aprovechable del 50 por ciento, permaneció por encima de los demás hasta los 80 días después de la siembra, durante este periodo los tratamientos ETM-REF y 75 por ciento de humedad aprovechable tienen un comportamiento similar, aunque después de los 50 días éste último presenta mayores contenidos de humedad. A los 80 días, el tratamiento con mayor humedad fue el del 75

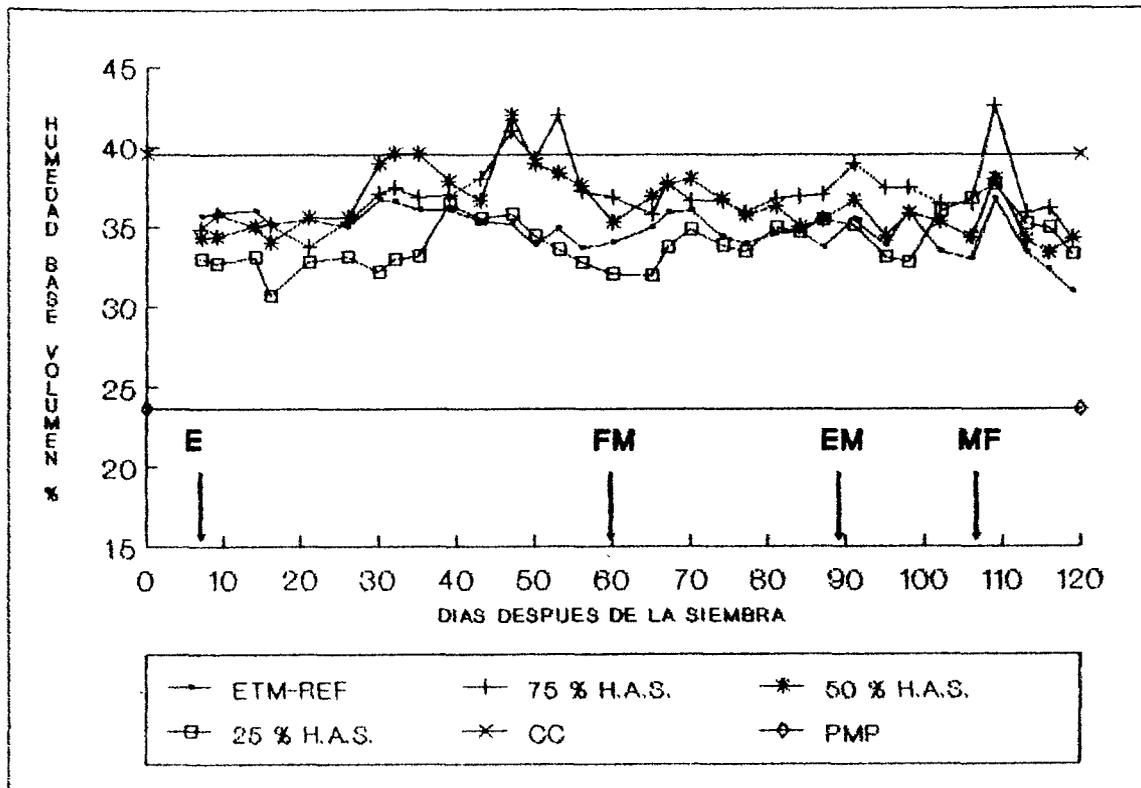


Figura 4.8. Dinámica de la humedad del suelo por tratamiento en el estrato 60 a 80 cm, durante el ciclo del maíz. UAAAN 1991.

por ciento de humedad aprovechable manteniéndose hasta el final del ciclo de cultivo, lo cual fue resultado de las aplicaciones de agua anteriormente mencionadas. Nuevamente el tratamiento con menor disponibilidad de agua en este estrato durante el periodo de crecimiento fue el de 25 por ciento de humedad aprovechable. La separación de medias determinó que a los 47 y 50 días después de la siembra, los tratamientos 50 y 75 por ciento de humedad aprovechable fueron iguales entre sí pero diferentes de los tratamientos ETM-REF y 25 por ciento de humedad aprovechable (Cuadro A.8).

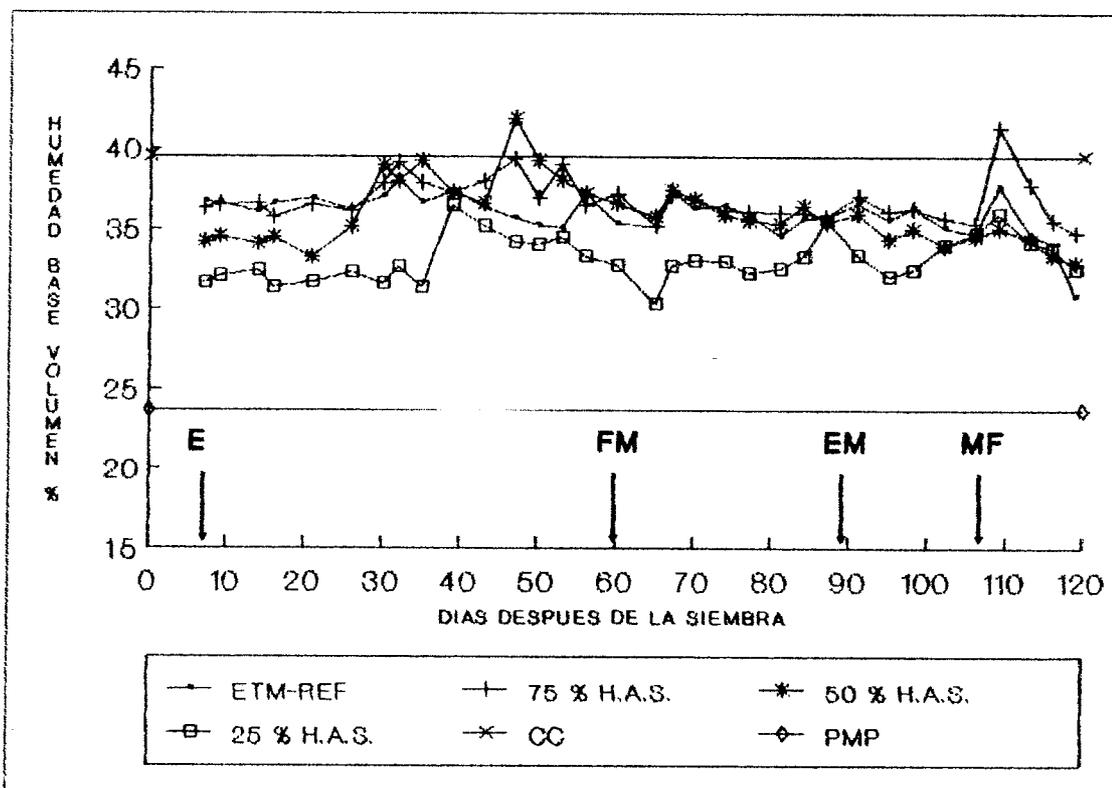


Figura 4.9. Dinámica de la humedad del suelo por tratamiento en el estrato 80 a 100 cm, durante el ciclo del maíz UAAAN 1991.

Para el estrato 80 a 100 cm, se detectaron diferencias estadísticas en seis muestreos como se muestra en el Cuadro 4.2. En la Figura 4.9., se presentan las fluctuaciones de la humedad en este estrato, de tal manera que a lo largo del ciclo vegetativo parecen ser iguales los tratamientos ETM-REF, 75 y 50 por ciento de humedad aprovechable, dado que sus líneas se mantienen muy próximas entre sí, siendo evidente que el tratamiento con mayor estrés (25 por ciento de humedad aprovechable), es el que muestra los mayores abatimientos hasta los 100 días después de la siembra. Al efectuar la prueba de medias, el tratamiento con 50 por ciento de humedad aprovechable fue el

que presentó mayor humedad en este estrato del perfil, seguido por los tratamientos de 75 por ciento de humedad aprovechable, ETM-REF y el de 25 por ciento (Cuadro A.9).

Transpiración del Cultivo

Los muestreos de esta variable se efectuaron a partir de los 36 días después de la siembra, una vez que se inició la diferenciación de los tratamientos de humedad del suelo bajo estudio, efectuando las mediciones tanto en el haz como en el envés de la hoja.

En la Figura 4.10., es mostrado el efecto de los cuatro niveles de humedad del suelo sobre la transpiración en el haz de la hoja, en la que es evidente que existen tres periodos máximos transpirativos durante el ciclo vegetativo de la planta, es decir a los 55, 90 y 110 días después de la siembra, decreciendo en intensidad a medida que se alcanza la madurez del cultivo, tales picos máximos coinciden con las etapas fenológicas de floración masculina (FM), estado lechoso (EL) y madurez fisiológica, con valores promedio de 35, 25 y 15 $\mu\text{g cm}^{-2} \text{seg}^{-1}$ para todos los tratamientos y en cada etapa respectivamente, en las que la actividad de redistribución de asimilatos hacia la mazorca es muy alta, lo que concuerda en parte con lo reportado por Karlen *et al.* (1987).

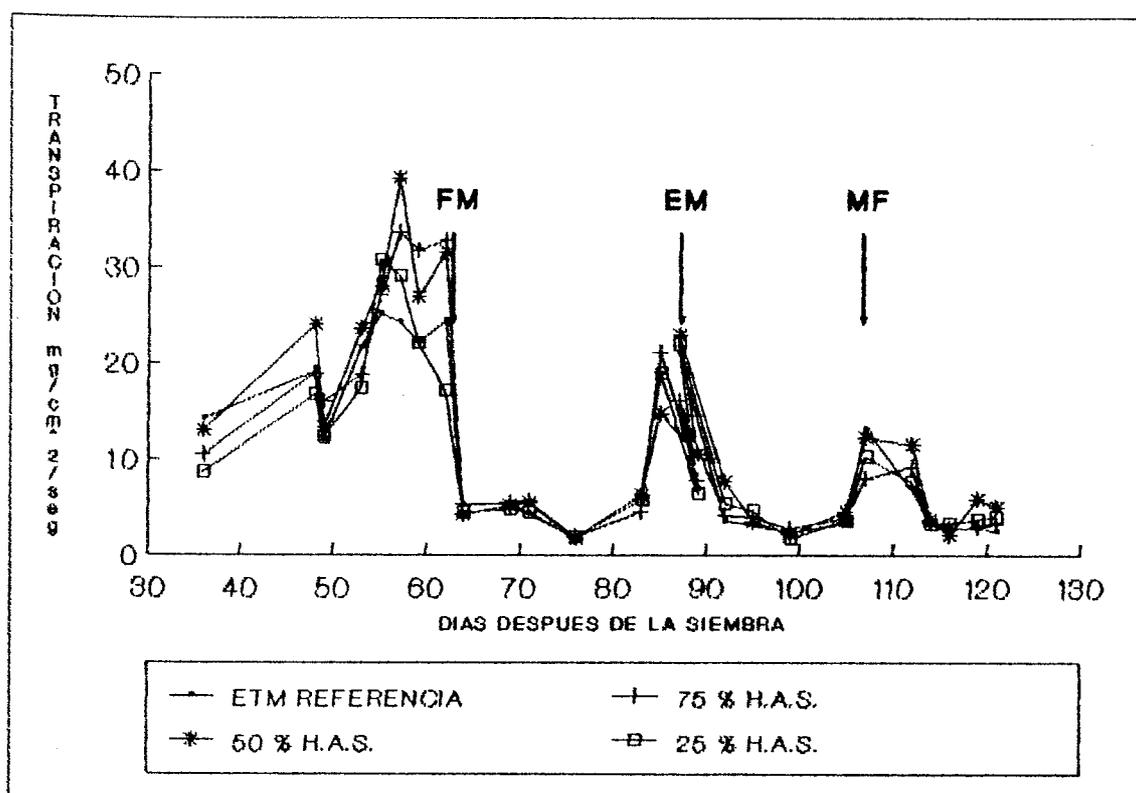


Figura 4.10. Transpiración en el haz de la hoja del cultivo de maíz. UAAAN 1991.

El análisis estadístico para esta variable en los distintos muestreos detectó diferencias significativas ($P = 0.05$) únicamente a los 119 días después de la siembra (Cuadro 4.3), lo que fue causado principalmente por el grado de madurez fisiológica alcanzado en algunos de los tratamientos, lo cual fue resultado de la condición de humedad del suelo prevaleciente durante el ciclo de crecimiento del cultivo, la separación de medias mostró que los tratamientos 50 y 25 por ciento de humedad aprovechable fueron estadísticamente iguales entre sí, pero diferentes a los tratamientos ETM-REF y 75 por ciento de humedad aprovechable los cuales son iguales, como se muestra en el Cuadro 4.4.

Cuadro 4.3. Análisis de varianza para la transpiración en el haz y envés de la hoja para los muestreos realizados durante el ciclo del maíz. UAAAN 1991.

DDS	Transpiración haz		Transpiración envés	
	Cuad. Medio	F	Cuad. Medio	F
36	24.8349	2.34	128.4339	4.83*
48	37.9479	1.66	254.9929	45.05**
49	12.8639	0.80	27.7354	0.55
53	30.8311	0.76	136.5970	1.86
55	21.6523	0.30	158.0658	0.90
57	161.6257	3.84	55.6305	2.23
59	84.6156	0.91	66.2923	0.59
62	210.5130	1.66	108.2614	0.58
64	1.5479	0.40	0.6108	0.12
68	0.7130	0.18	0.9292	0.09
73	1.0410	0.21	12.0720	2.27
78	0.0437	0.39	0.3086	0.50
80	2.6978	1.20	6.1174	0.65
87	28.1497	0.67	49.8089	1.31
89	13.5150	0.49	14.4674	0.52
91	36.6006	0.79	131.1328	1.26
94	12.8204	1.20	9.7471	0.42
97	1.6130	0.94	2.2047	0.39
99	0.6059	0.75	7.9795	1.28
104	1.1175	0.26	8.7579	2.35
108	21.1907	1.45	6.4673	1.79
113	16.5826	0.42	61.0435	1.36
115	0.1739	0.58	12.2780	6.88*
116	0.6176	0.28	4.0519	1.00
119	7.2450	4.13*	5.7263	0.33
121	4.5109	1.41	7.8757	6.14*

* Significativo al 0.05 de probabilidad.

** Significativo al 0.01 de probabilidad.

DDS Días después de la siembra.

La transpiración en el envés de la hoja presentada en la Figura 4.11., muestra el comportamiento de las tasas transpirativas en esta parte de la hoja, manifestándose nuevamente tres picos máximos a lo largo de ciclo de cultivo, siendo el primero antes de la floración masculina (FM), el segundo en pleno estado lechoso (EL) y el tercero una vez que se alcanza la madurez fisiológica, decreciendo su intensidad a medida que se acerca a esta última etapa,

Cuadro 4.4. Transpiración media en el haz de la hoja para los tratamientos de humedad en el suelo evaluado expresada en $\mu\text{g cm}^{-2} \text{seg}^{-1}$, durante el ciclo de cultivo. UAAAN 1991.

DDS	ETM-REF	75% H.A.S.	50% H.A.S.	25% H.A.
36	14.25	10.59	13.09	8.71
48	19.16	18.99	24.03	16.71
49	12.06	15.98	13.36	12.30
53	21.63	18.81	23.57	17.39
55	25.22	27.15	28.15	30.80
57	24.37	33.64	39.27	29.16
59	22.22	31.77	26.90	22.09
62	24.44	32.86	31.56	17.14
64	5.22	5.31	4.28	4.41
68	5.48	5.43	5.15	4.81
73	4.38	5.60	5.44	4.47
78	1.79	1.94	1.77	1.97
80	6.27	4.53	6.27	5.71
87	18.98	21.20	14.85	19.01
89	6.97	7.89	10.60	6.48
91	21.06	16.15	22.94	22.00
94	3.65	4.20	7.68	5.38
97	3.12	3.98	3.49	4.58
99	2.41	2.78	2.21	1.80
104	3.29	3.87	4.52	3.58
108	13.28	8.06	12.28	10.35
113	6.94	9.24	11.54	7.65
115	3.27	3.39	3.67	3.20
116	2.90	2.80	2.10	3.30
119	2.87b	2.99b	5.78a	3.73al
121	2.48	3.24	4.96	4.01

Medias seguidas por la misma literal son estadísticamente iguales al 0.05 de probabilidad, leídas en forma horizontal DDS Días después de la siembra.

por otra parte muestra también que los tratamientos de 50 y 75 por ciento de humedad aprovechable fueron los que tuvieron las tasas transpirativas más altas a lo largo del ciclo vegetativo, seguidos por los tratamientos ETM-REF y 25 por ciento de humedad aprovechable. El análisis estadístico realizado en los distintos muestreos, detectó diferencias altamente significativas ($P = 0.01$) a los 48 días y 53 días. El análisis estadístico realizado en los distintos muestreos, detectó diferencias

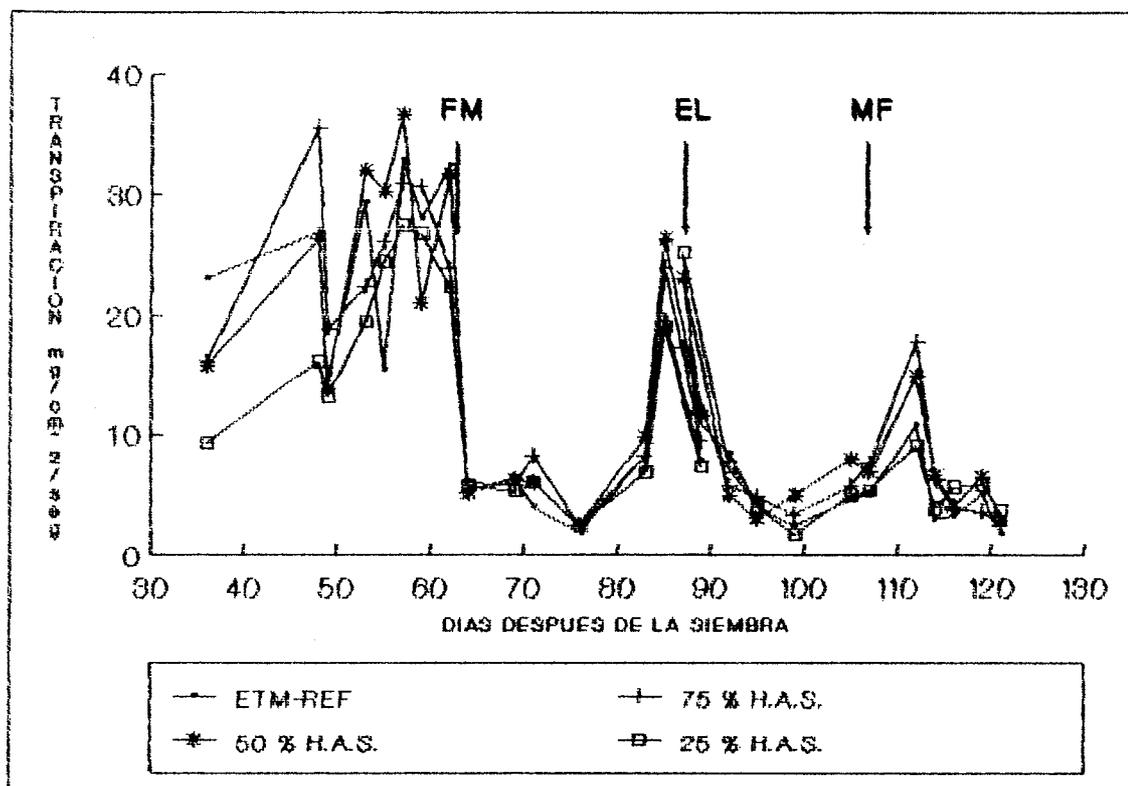


Figura 4.11. Transpiración en el envés de la hoja de cultivo del maíz. UAAAN 1991.

altamente significativas ($P = 0.01$) a los 48 días significativos ($P = 0.05$) a los 36, 115 y 121 días después de la siembra (Cuadro 4.3). Al realizar la separación de medias se encontró que en los muestreos ubicados dentro de desarrollo vegetativo (36 y 48 días), los tratamientos ETM-REF, 75 por ciento de humedad aprovechable fueron diferentes al resto de tratamientos, lo cual guarda relación con el período en el que hubo condiciones contrastantes de humedad, lo que se traduce en altas tasas de asimilación de CO_2 dado que ésta es directamente proporcional a la transpiración, a su vez produce un mayor incremento en el peso seco de los diferentes órganos de la planta. Si embargo a los 115 y 121 días el tratamiento que presentó un

Cuadro 4.5. Transpiración media en el envés de la hoja para los tratamientos de humedad en el suelo evaluados, expresada en $\mu\text{g cm}^{-2} \text{seg}^{-1}$, durante el ciclo del cultivo. UAAAN 1991.

DDS	ETM-REF	75% H.A.S.	50% H.A.S.	25% H.A.S.
36	23.12a	16.05ab	15.70ab	9.25b
48	27.00b	35.37a	26.44b	16.06c
49	14.55	18.96	13.78	13.14
53	29.39	22.45	32.02	19.50
55	15.39	26.20	30.28	24.48
57	32.90	30.93	36.59	27.51
59	28.08	30.65	21.02	26.83
62	32.46	23.90	31.69	22.39
64	5.40	5.98	5.07	5.70
68	6.29	5.72	6.20	5.25
73	3.98	8.24	6.03	6.01
78	1.93	2.45	2.54	2.44
80	8.24	8.18	9.83	6.81
87	19.89	23.98	26.53	19.01
89	7.78	9.47	11.51	7.32
91	12.67	17.24	23.15	25.28
94	8.43	5.67	4.98	7.29
97	4.12	4.84	3.03	4.04
99	2.47	3.37	4.97	1.67
104	4.61	5.71	7.90	4.96
108	5.01	7.60	6.91	5.32
113	10.83	17.75	14.84	9.11
115	3.01b	6.23a	6.56a	3.85b
116	3.22	3.83	4.05	5.59
119	5.03	3.64	6.41	5.80
121	1.87b	5.23	2.98	3.60ab

Medias seguidas por la misma literal son estadísticamente iguales al 0.05 de probabilidad, leídas en forma horizontal. DDS Días después de la siembra.

mayor tasa transpirativa fue el del 75 por ciento, como lo indica el Cuadro 4.5.

Acumulación de Materia Seca

Durante el ciclo de cultivo se realizaron un total de 18 muestreos para determinar el peso seco en los diferentes

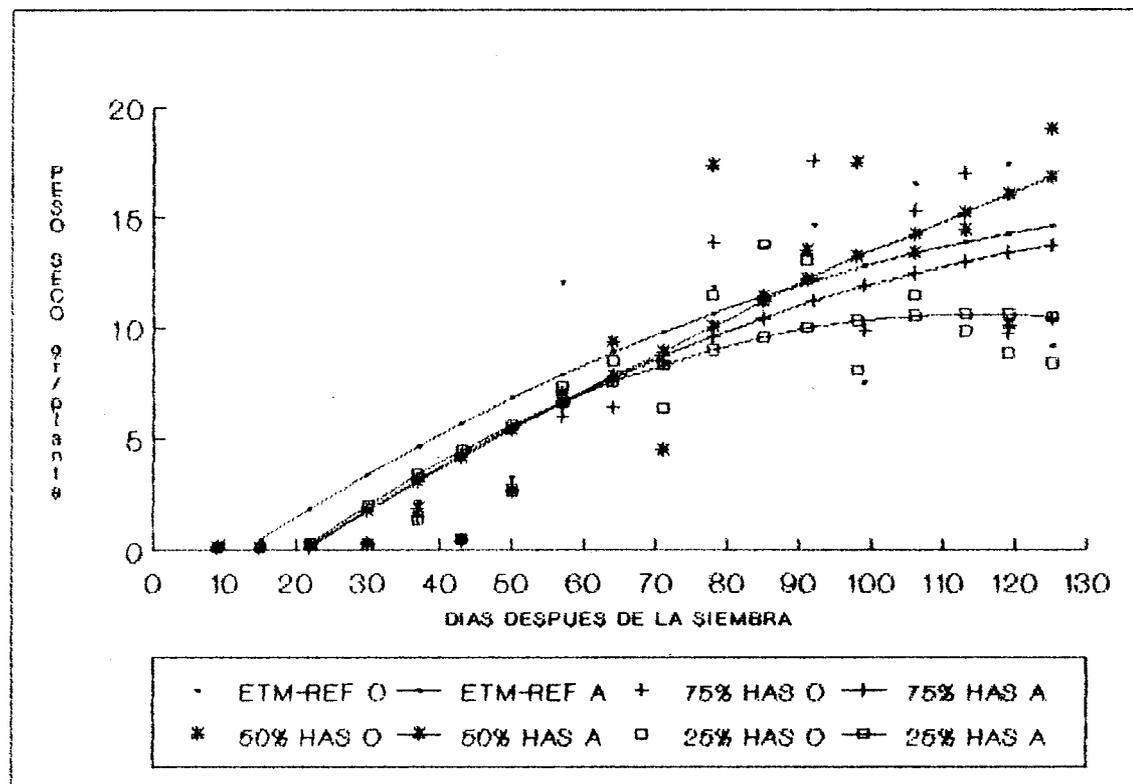


Figura 4.12. Acumulación de materia seca en la raíz durant el ciclo del maíz, en los tratamientos de humeda evaluados. UAAAN 1991.

rganos y el peso seco total por planta, en los cuatr tratamiento de humedad del suelo evaluados.

Acumulación de Materia Seca en Raíz

En lo referente a la raíz, en la Figura 4.12., s presentan las líneas de acumulación de materia seca po tratamiento ajustadas (ver Cuadros A.11 a A.15 de Apéndice), en la que se observa que el tratamiento utilizad como referencia (ETM-REF), fue el que en términos generale presentó una mayor acumulación de peso seco hasta los 9 días, sin embargo después de tal período fue superado por e

Cuadro 4.6. Análisis de varianza para el peso seco en raíz y tallo, para los muestreos realizados durante el ciclo del maíz. UAAAN 1991.

DDS	RAIZ		TALLO	
	CUAD. MEDIO	F	CUAD. MEDIO	F
9	0.0006	0.29	0.0006	1.00
15	0.5422	43.21	0.0018	2.03
22	0.0088	2.29	0.0035	0.76
30	0.0356	1.39	0.0817	0.57
37	0.5117	1.88	3.1842	5.55*
43	0.0090	0.08	14.5807	1.97
50	0.3408	0.51	23.8307	0.94
57	29.6073	4.20*	363.9948	8.56*
64	6.6175	0.78	34.2630	0.19
71	21.5329	3.99*	144.5651	0.94
78	29.4871	0.85	274.8490	3.18
85	10.8906	0.64	111.4688	1.05
92	16.5479	0.54	198.4531	1.03
99	85.7885	2.01	823.8936	4.18*
106	21.1010	1.30	254.9089	2.32
113	36.0681	1.44	678.9558	2.91
119	62.8988	1.89	531.8594	2.75
125	96.7928	8.24**	691.3333	4.35

* Significativo al 0.05 de probabilidad.

** Significativo al 0.01 de probabilidad.

DDS Días después de la siembra.

de 50 por ciento de humedad aprovechable.

El análisis de varianza efectuado en los diferentes muestreos (Cuadro 4.6), indicó diferencias significativas ($P = 0.05$) a los 57 días, es decir dentro del periodo de crecimiento vegetativo del cultivo y altamente significativas ($P = 0.01$) a los 71 y 124 días después de la siembra, lo que corresponde al llenado de grano y madurez respectivamente. La separación de medias determinó que a los 57 días después de la siembra, el tratamiento ETM-REF fue significativamente diferente al resto de tratamientos; si embargo a los 71 días resultaron ser estadísticamente

Cuadro 4.7. Acumulación de materia seca promedio en la raíz durante el ciclo del maíz expresada en gr planta⁻¹ UAAAN 1991.

DDS	ETM-REF	75% H.A.S.	50% H.A.S.	25% H.A.S.
9	0.13	0.15	0.14	0.13
15	0.10b	0.13b	0.12b	0.10a
22	0.18	0.26	0.26	0.28
30	0.43	0.33	0.28	0.20
37	2.18	1.55	1.90	1.38
43	0.48	0.40	0.50	0.50
50	3.25	2.93	2.65	2.63
57	12.10a	6.00b	7.03b	7.30b
64	8.88	6.42	9.38	8.48
71	9.80a	8.46a	4.52b	6.39a
78	11.88	13.90	17.40	11.45
85	13.60	10.40	11.43	13.75
92	14.66	17.58	13.52	13.05
99	7.50	9.90	17.53	8.08
106	16.75	15.28	13.38	11.45
113	14.40	17.05	14.43	9.83
119	17.45	9.78	10.12	8.83
125	9.18b	10.40b	19.03a	8.40b

Medias con la misma literal son estadísticamente iguales al 0.05 de probabilidad, leídas en forma horizontal.
DDS Días después de la siembra.

iguales los tratamientos ETM-REF, 75 y 25 por ciento de humedad aprovechable, pero diferentes del 50 por ciento. Cuando en las cuatro condiciones de humedad se alcanzó la madurez fisiológica, el tratamiento que presentó el mayor peso seco en la raíz fue el del 50 por ciento de humedad aprovechable, tal y como se muestra en el Cuadro 4.7.

De acuerdo al comportamiento anterior y considerando en forma global los muestreos de este órgano, se puede establecer que los tratamientos con niveles más altos de humedad en el suelo presentaron una tendencia a acumular mayor peso seco, lo cual pudo haber sido ocasionado por la técnica utilizada en el presente estudio para el muestreo de

este órgano, con la cual no fue posible obtener la totalidad de éste, de tal manera que se puede estar enmascarando los resultados, porque en los tratamientos secos el mayor volumen de raíces es posible se localice a profundidades mayores que aquellas exploradas durante los muestreos (40 cm). Por otro parte como se utilizó la profundidad 0 a 40 cm de estrato control, esta parte del suelo fue la que presentó mayores contenidos de humedad por la frecuencia de riegos utilizada, de tal manera que favorecieron una mayor crecimiento de este órgano en aquellos tratamientos con mayor humedad.

Acumulación de Materia Seca en Tallo

La Figura 4.13., muestra la acumulación de materia seca en el tallo, en la que se observan los tratamientos de humedad evaluados, presentando tanto los datos observados en campo así como las líneas ajustadas (Cuadros A.11 a A.16 del Apéndice), en la que los tratamientos ETM-REF, 75 y 50 por ciento de humedad aprovechable presentan una tendencia similar, en tanto que el tratamiento con 25 por ciento de humedad aprovechable es el que presenta menor peso durante el ciclo vegetativo.

Al realizar el análisis de varianza para los distintos muestreos (Cuadro 4.6), se detectaron diferencias altamente significativas ($P = 0.01$) a los 57 días después de

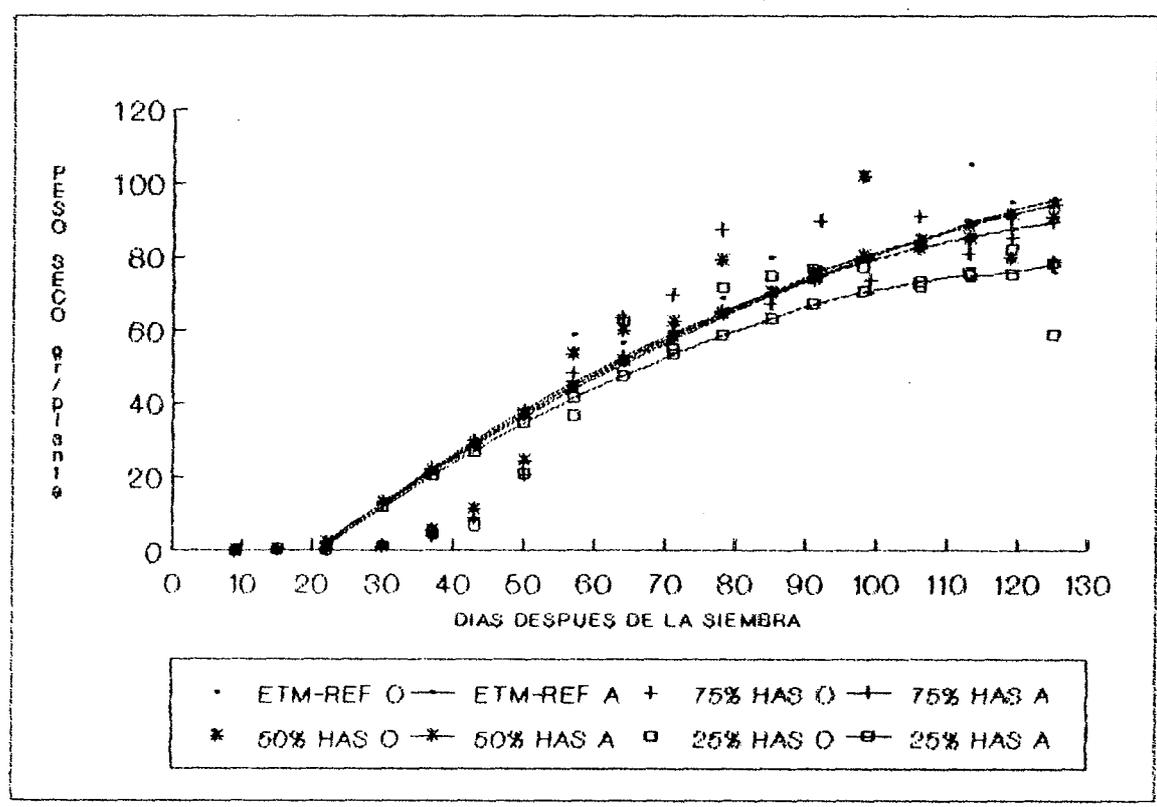


Figura 4.13. Acumulación de materia seca en el tallo durante el ciclo del maíz, en los tratamientos de humedad evaluados. UAAAN 1991.

días, los cuales se encuentran dentro del periodo en el cual se sometió a los tratamientos a diferentes grados de estrés hídrico.

La separación de medias efectuada (Cuadro 4.8), mostró que durante el periodo vegetativo (37 y 57 días), los tratamientos ETM-REF, 75 y 50 por ciento de humedad aprovechable presentaron un comportamiento similar, los cuales fueron diferentes del tratamiento de 25 por ciento de humedad aprovechable ya que éste presentó pesos secos más bajos, lo que es resultado del grado de estrés al que fue sometido, ya que hasta ese momento el número de riegos de

Cuadro 4.8. Acumulación de materia seca promedio en el tallo durante el ciclo del maíz expresada en g planta⁻¹. UAAAN 1991.

DDS	ETM-REF	75% H.A.S.	50% H.A.S.	25% H.A.S.
9	0.12	0.10	0.10	0.10
15	0.15	0.16	0.13	0.12
22	0.36	0.30	0.36	0.32
30	1.10	1.28	0.93	1.10
37	6.13a	4.08c	5.40ab	4.65ab
43	10.90	8.80	11.03	6.85
50	25.18	20.53	24.40	20.80
57	58.85a	48.20b	53.55ab	36.55c
64	56.74	63.34	60.06	62.67
71	61.21	69.65	62.38	54.99
78	68.85	87.35	79.23	71.73
85	79.97	67.28	70.53	74.85
92	77.14	89.64	74.15	76.71
99	70.10b	73.95b	101.88a	77.28b
106	85.40	91.13	82.50	72.08
113	105.10	81.10	85.15	74.98
119	95.03	85.50	79.83	82.16
125	75.85ab	78.78ab	90.85a	58.96b

Medias con la misma literal son estadísticamente iguales al 0.05 de probabilidad, leídas en forma horizontal.

DDS Días después de la siembra.

auxilio aplicados fue de 4, 2, 2 y 1 con 289, 216, 184 y 9 mm para los tratamientos ETM-REF, 75, 50 y 25 por ciento de humedad aprovechable respectivamente. Al final de la etapa de llenado de grano (99 días), el tratamiento de 50 por ciento de humedad aprovechable presentó el mayor peso seco en el tallo y fue diferente al resto de tratamientos ocasionado posiblemente por la mayor disponibilidad de agua en estratos donde se localiza la mayor actividad radical. En madurez fisiológica completa (125 días), los tratamientos ETM-REF, 75 y 50 por ciento de humedad aprovechable fueron similares entre sí pero diferentes del 50 por ciento manifestando el mismo orden de la etapa vegetativa.

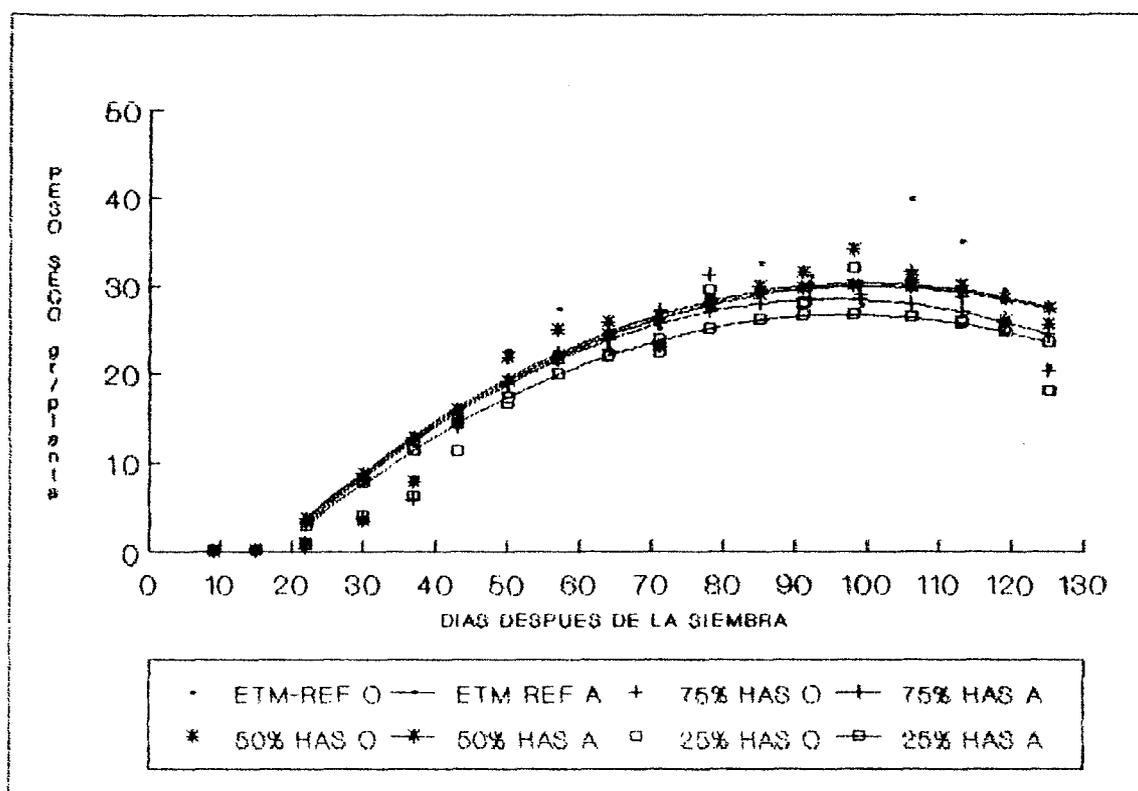


Figura 4.14. Acumulación de materia seca en las hojas durante el ciclo del maíz, en los tratamientos de humedad evaluados. UAAAN 1991.

En base a lo anterior es posible establecer que el déficit hídrico impuesto en la etapa de desarrollo vegetativo reduce significativamente el peso seco del tallo, siempre y cuando los abatimientos de la humedad del suelo sean inferiores al 25 por ciento de humedad aprovechable.

Acumulación de Materia Seca en Hojas

El peso seco de hojas tanto ajustado como observado a lo largo del ciclo vegetativo (Cuadros A.11 a A.17) es mostrado en la Figura 4.14., en la cual se observa que el tratamiento utilizado como referencia (ETM-REF), presentó la

Cuadro 4.9. Análisis de varianza para el peso seco en hojas, mazorca y total por planta en gr planta⁻¹ para los muestreos realizados durante el ciclo del maíz. UAAAN 1991.

DDS	Hojas		Mazorca		Total	
	Cuad.	Medio F	Cuad.	Medio F	Cuad.	Medio F
9	0.0023	1.94	0.0000	0.00	0.0014	0.23
15	0.0024	0.90	0.0000	0.00	0.0088	2.33
22	0.1697	2.21	0.0000	0.00	0.2138	2.76
30	0.5040	0.61	0.0000	0.00	0.4842	0.29
37	5.9267	3.83	0.0000	0.00	23.6976	5.14*
43	11.8249	1.22	0.0000	0.00	51.0648	1.66
50	29.0716	2.40	0.0000	0.00	110.5026	1.30
57	26.5410	6.18**	0.0000	0.00	711.3073	9.38**
64	12.4681	0.55	12.0179	0.44	353.4180	0.48
71	17.6869	1.21	328.9714	4.02*	3845.6620	3.91*
78	12.8529	1.39	59.0130	0.15	596.2292	0.16
85	28.8405	1.10	309.1719	2.14	3297.7080	1.62
92	9.0944	0.35	724.1250	1.33	6282.1250	1.35
99	32.9246	1.52	182.2136	0.84	1950.0830	0.93
106	9.6579	0.27	256.7084	0.14	2618.0000	0.15
113	57.8532	2.02	741.3021	1.99	6928.3340	1.99
119	14.2806	2.23	142.6280	1.00	1830.8330	0.63
125	40.4577	1.95	1021.8020	1.03	10437.9200	0.63

* Significativo al 0.05 de probabilidad.

** Significativo al 0.01 de probabilidad.

DDS Días después de la siembra.

mayor acumulación a lo largo del ciclo de crecimiento, seguido por el tratamiento de 50 por ciento de humedad aprovechable, de tal manera que al final de ciclo tienden a ser iguales, ocasionado por la translocación de los fotosintatos a la mazorca, después de ellos le sigue el tratamiento de 75 por ciento de humedad aprovechable, haciéndose más notoria la diferencia de este tratamiento con los antes mencionados a los 55 días después de la siembra, aumentando a medida que se alcanza madurez fisiológica. El tratamiento que presentó una menor acumulación de materia seca en este órgano fue el de 25 por ciento de humedad

Al efectuar el análisis de varianza para los diferentes muestreos únicamente se detectaron diferencias altamente significativas ($P = 0.01$) a los 57 días después de la siembra (Cuadro 4.9), fecha en la cual ocurrió la antesis en la mayoría de los tratamientos, que es donde se presenta la máxima acumulación de fotosintatos y además se ha definido el número potencial de granos de la mazorca (Karlen *et al.* (1987), durante el resto del ciclo vegetativo los tratamientos evaluados fueron estadísticamente iguales.

La separación de medias (Cuadro 4.10), determinó que los tratamientos ETM-RKF y 50 por ciento de humedad aprovechable fueron iguales entre sí pero diferentes de los tratamientos 75 y 25 por ciento de humedad aprovechable, sin embargo los tratamientos de 75 y 50 por ciento de humedad aprovechable fueron también iguales, lo que permite establecer que únicamente hubo dos condiciones contrastantes de humedad en la respuesta de este órgano.

Acumulación de Materia Seca en Mazorca

Una vez alcanzada la antesis, la planta inicia el proceso reproductivo translocando la mayoría de sus carbohidratos producidos y almacenados en el período vegetativo hacia la mazorca, en la Figura 4.15., se muestra la acumulación de materia seca ajustada (Cuadros A.11 a A.18) y aquella determinada en campo para este órgano durante el ciclo de desarrollo, observándose que durante la

Cuadro 4.10. Acumulación de materia seca promedio en hojas durante el ciclo del maíz expresada en gr planta⁻¹. UAAAN 1991.

DDS	ETM-REF	75% H.A.S.	50% H.A.S.	25% H.A.S.
9	0.13	0.10	0.10	0.15
15	0.28	0.25	0.22	0.23
22	0.86	0.51	0.99	0.86
30	3.23	3.70	3.53	4.08
37	8.50	6.00	7.85	6.25
43	15.33	14.03	14.50	11.35
50	22.70	19.28	21.88	16.75
57	27.30a	22.40bc	24.98ab	21.65c
64	22.94	24.65	25.98	22.02
71	25.14	27.21	23.32	22.47
78	27.15	31.35	28.38	29.60
85	32.73	29.10	29.93	26.20
92	31.05	29.87	31.55	28.16
99	27.88	29.10	24.20	32.10
106	33.90	31.65	31.30	30.20
113	35.13	28.77	30.10	26.05
119	29.48	26.19	26.08	25.03
125	20.78	20.39	25.63	18.05

Medias con la misma literal son estadísticamente iguales al 0.05 de probabilidad, leídas en forma horizontal.
DDS Días después de la siembra.

mayor parte del período de llenado de grano el tratamiento ETM-REF fue ligeramente superior al resto de tratamientos, aunque el análisis de varianza (Cuadro 4.9), detectó únicamente diferencias significativas ($P = 0.05$) a los 71 días después de la siembra que corresponde al inicio del período de llenado de grano, la separación de medias determinó que únicamente el tratamiento ETM-REF fue diferente del de 25 por ciento de humedad aprovechable, lo que es debido indudablemente a las condiciones de estrés hídrico contrastantes a que fueron sometidos, como se presenta en el Cuadro 4.11.

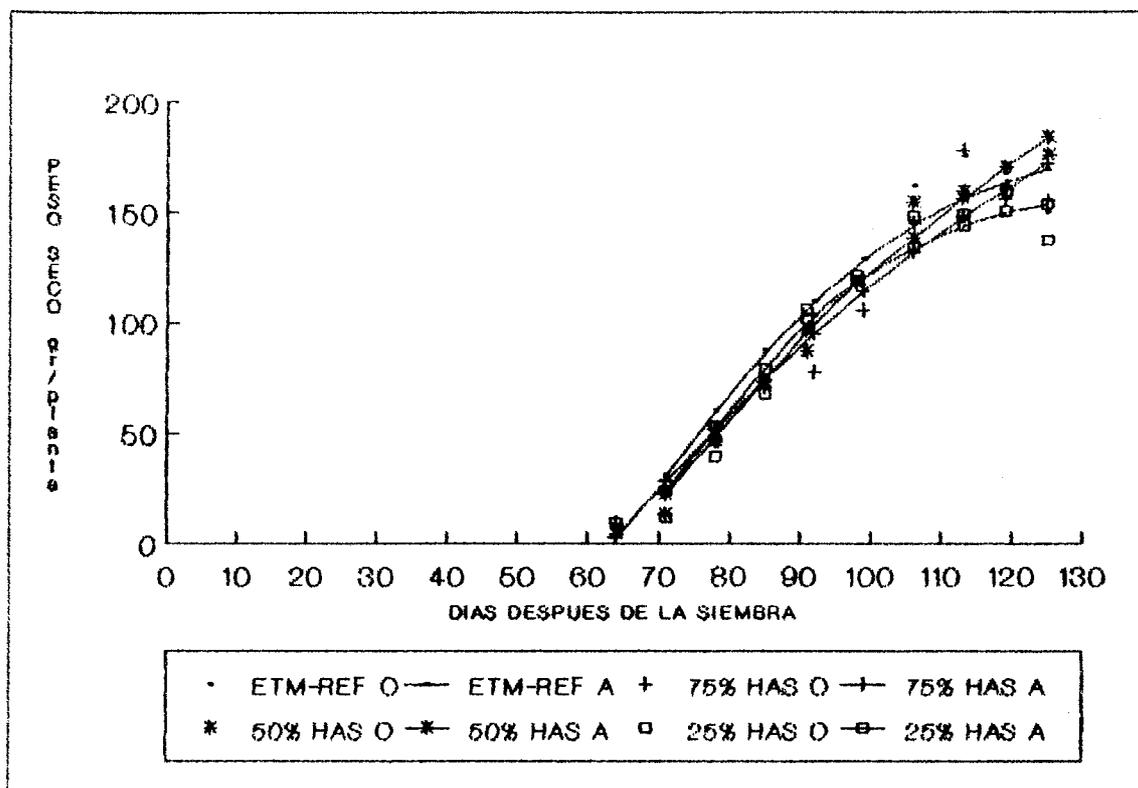


Figura 4.15. Acumulación de materia seca en la mazorca durante el ciclo del maíz, en los tratamientos de humedad evaluados. UAAAN 1991.

Esta diferencia fue causada principalmente por la respuesta fenológica de los distintos tratamientos de humedad del suelo como se muestra en el Cuadro A.4., dado que la etapa de antesis se retardó más en aquellos tratamientos cuyo nivel de humedad aprovechable en el suelo fue menor, sin embargo se acortó el periodo comprendido entre la antesis y madurez fisiológica.

Acumulación de Materia Seca Total por Planta

El peso seco total por planta presentado en la Figura 4.16., en la cual se muestran tanto las líneas ajustadas

Cuadro 4.11. Acumulación de materia seca promedio en la mazorca durante el ciclo del maíz expresada en gr planta⁻¹. UAAAN 1991.

Días	ETM-REF	75% H.A.S.	50% H.A.S.	25% H.A.S.
9	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.00	0.00	0.00
37	0.00	0.00	0.00	0.00
43	0.00	0.00	0.00	0.00
50	0.00	0.00	0.00	0.00
57	0.00	0.00	0.00	0.00
64	7.89	9.48	4.60	9.34
71	30.07a	28.91a	13.25ab	11.78b
78	44.25	48.13	46.65	39.55
85	87.55	70.98	71.48	68.18
92	103.37	78.02	87.00	106.30
99	114.73	105.83	118.53	121.33
06	162.83	145.35	155.18	148.43
13	176.00	178.32	160.25	149.53
19	168.45	156.48	171.33	160.43
25	150.60	155.95	176.20	137.78

Días con la misma literal son estadísticamente iguales al 05 de probabilidad, leídas en forma horizontal.
S Días después de la siembra.

Cuadros A.11 a A.19) por tratamiento así como los valores servados, en la que es evidente que el tratamiento ETM-REF es el que acumuló mayor peso seco, seguido por los tratamientos 50, 75 y 25 por ciento de humedad aprovechable del suelo.

En el análisis de varianza se detectaron diferencias significativas ($P = 0.05$) a los 37 y 71 días y altamente significativas ($P = 0.01$) a los 57 días después de la siembra (Cuadro 4.9). La prueba de medias mostró que a los 37 y 57 días, los tratamientos ETM-REF y 50 por ciento de humedad aprovechable superaron al de 75 y 25 por ciento, en tanto que a los 71 días los tratamientos ETM-REF y 75 por

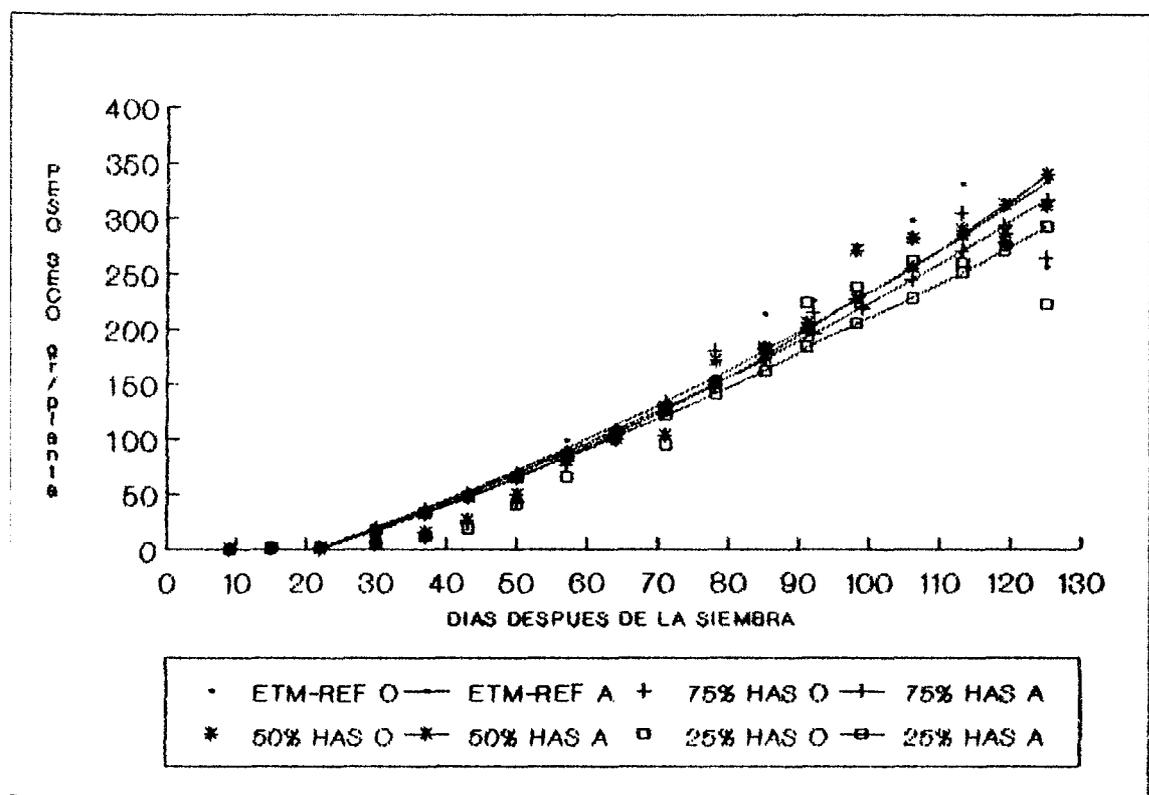


Figura 4.16. Acumulación de materia seca total por planta durante el ciclo del maíz, en los tratamientos de humedad evaluados. UAAAN 1991.

imiento de humedad aprovechable fueron estadísticamente iguales entre sí pero diferentes del 50 y 25 por ciento de humedad aprovechable, como es mostrado en el Cuadro 4.12.

Rendimiento Económico y Componentes

En base al análisis de crecimiento de los distintos órganos de la planta, así como del contenido de humedad del suelo y la transpiración para cada tratamiento, la resultante final integradora es el rendimiento económico y los componentes evaluados a la cosecha, se establece que de

Cuadro 4.12. Acumulación de materia seca promedio por planta durante el ciclo del maíz expresada en gr planta⁻¹. UAAAN 1991.

DDS	ETM-RKF	75% H.A.S.	50% H.A.S.	25% H.A.S.
9	0.37	0.35	0.33	0.37
15	0.53	0.54	0.47	0.44
22	1.40	1.08	1.62	1.46
30	4.75	5.30	4.73	5.38
37	16.80a	11.63c	15.15ab	12.28bc
43	26.70	23.33	26.03	18.70
50	51.13	42.73	48.93	40.18
57	98.25a	76.60bc	85.55ab	65.50c
64	96.25	103.89	100.02	102.52
71	126.21a	134.23a	103.47b	95.63b
78	152.13	180.73	171.65	152.33
85	213.84	177.75	183.35	182.98
92	226.22	215.30	206.21	224.21
99	220.20	218.78	272.13	238.78
106	298.88	283.40	282.35	262.15
113	330.63	305.23	289.93	260.38
119	310.40	277.94	287.36	276.43
125	256.40	265.52	311.70	223.19

Medias con la misma literal son estadísticamente iguales al 0.05 de probabilidad, leídas en forma horizontal. DDS Días después de la siembra.

acuerdo al análisis de varianza presentado en el Cuadro 4.13., no se detectaron diferencias estadísticas entre los tratamientos de humedad del suelo evaluados, es decir no hubo efecto significativo de la variable bajo estudio sobre el peso de mil semillas (PMS), peso de rastrojo por hectárea (PRH), rendimiento de grano por hectárea (RGH) y peso de olote por hectárea (POH), además que la densidad de población (DP) en el lote experimental fue homogénea al no haber diferencia estadística en esta variable. Esta falta de respuesta fue debido a que el rango de humedad disponible no alcanzó a producir un déficit significativo, lo que probablemente se debe primero, a que el periodo de lluvias presentado durante la fase reproductiva interfirió la

Cuadro 4.13. Cuadrados medios y nivel de significancia para el ANVA del rendimiento de grano y algunos componentes evaluados. UAAAN 1991.

Fuente de variación	g.l.	Cuadrados Medios				
		DP	PMS	PRH	RGH	POH
Bloques	3	24.6 _{ns}	194.7 _{ns}	595.3 _{ns}	143.9 _{ns}	8.1 _{ns}
Tratamientos	3	0.9 _{ns}	71.5 _{ns}	324.6 _{ns}	670.5 _{ns}	7.2 _{ns}
Error	9	12.0	64.4	548.9	267.6	11.8
Total	15					
D.V. (%)		5.98	2.52	10.43	8.54	14.29

_{ns} No significativo.

programación del riego y segundo a que el estrato control considerado también influyó en las condiciones de humedad prevalecientes en los distintos estratos. Las medias obtenidas para las variables antes mencionadas se muestran en el Cuadro 4.14., en el cual se puede observar lo siguiente: el peso de mil semillas, aquí el tratamiento sobresaliente fue aquel cuyo nivel de humedad aprovechable del suelo fue del 25 por ciento con un promedio de 322 gr, indicando con ello que la planta desarrollada bajo estas condiciones translocó mayor cantidad de fotosintatos hacia la mazorca que el resto de tratamientos, en tanto que los tratamientos ETM-REF, 50 y 75 por ciento de humedad provechable fue de 319, 320 y 312 gr respectivamente. El peso seco de rastrojo, es decir la suma de hojas, tallo y la envoltura de la mazorca, presentó una tendencia concordante con el régimen de humedad del suelo, es decir de 7.4, 7.3, 6.9 y 6.9 ton/ha para los tratamientos ETM-REF, 75, 50 y 25 por ciento de humedad aprovechable, lo cual muestra que el estrés hídrico al que fueron sometidos los diversos

Cuadro 4.14. Medias del rendimiento económico y sus componentes evaluados. UAAAN 1991.

Tratamiento	Ton ha ⁻¹				
	NPH	PMS	PRH	RGH	POH
ETM-REF	57682	319.25	7.421	6.387	0.817
75% H.A.S.	57552	312.14	7.262	6.011	0.765
50% H.A.S.	58203	319.92	6.871	6.329	0.732
25% H.A.S.	58594	321.78	6.852	5.493	0.723

tratamientos fue muy pequeño dado que el contenido de humedad no descendió hasta niveles críticos donde la planta empieza a disminuir su peso seco debido a la escasez de agua.

Además para el rendimiento de grano se observó que la mayor producción fue para el tratamiento ETM-REF con 6.4 ton ha⁻¹, seguido por el tratamiento que se mantuvo a un 50 por ciento de humedad aprovechable con 6.3 ton ha⁻¹, posteriormente se ubicó el tratamiento de 75 por ciento de humedad aprovechable con 6.0 ton ha⁻¹ y por último el de 25 por ciento de humedad aprovechable con 5.2 ton ha⁻¹. Para el caso del peso de olote por hectárea la respuesta fue similar a la presentada para el peso seco de rastrojo, resultando con 0.8, 0.8, 0.7 y 0.7 ton ha⁻¹ para ETM-REF, 75, 50 y 25 por ciento de humedad aprovechable del suelo respectivamente.

Estos resultados concuerdan con la respuesta de los tratamientos de humedad evaluados, en los que hubo una relación muy estrecha entre el peso seco de hojas (antes de

floración masculina) con el rendimiento de grano en las cuatro condiciones evaluadas, además se observó que la respuesta en la biomasa aérea, sin considerar el grano, estuvo en función de la frecuencia y láminas de riego aplicadas.

Partición de Materia Seca

La distribución de materia seca formada en los diferentes órganos es la principal determinante en la producción y rendimiento económico del cultivo. De acuerdo a la metodología empleada en el análisis de los patrones de distribución de materia seca, se describen en base al incremento relativo en el peso seco de los diferentes órganos en relación al incremento del peso seco total de la planta, es decir en función a su edad fisiológica. Para la determinación de la fracción de incremento en el peso seco se consideró únicamente el período comprendido entre la emergencia (cero) y la antesis (uno), ya que después de ésta únicamente existe incremento en el peso seco de la mazorca, de acuerdo a los supuestos establecidos previamente.

En base a los supuesto del modelo, los incrementos relativos en el peso seco fueron ajustados mediante un polinomio de segundo grado, los cuales resultaron no significativos para la raíz en todos los tratamientos de

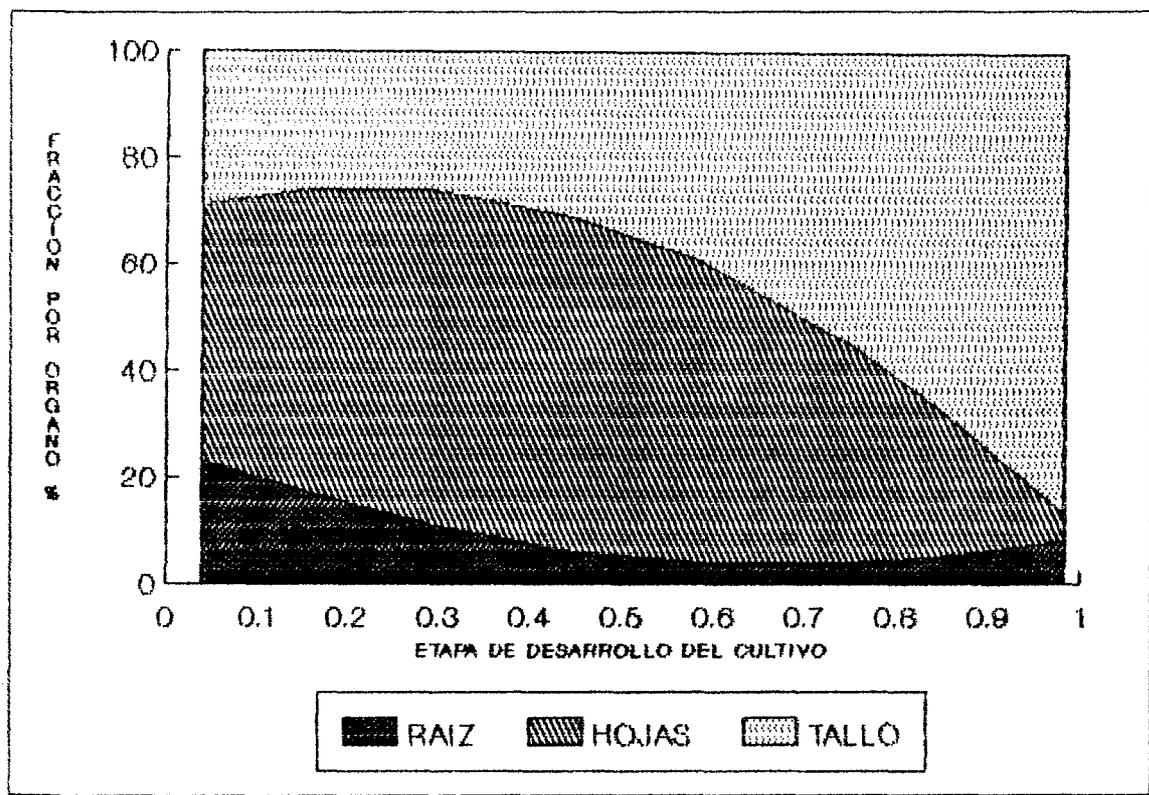


Figura 4.17. Fracción de incremento en el peso seco de raíz, hojas y tallo en el tratamiento ETM-REF. UAAAN 1991.

acuerdo al análisis de varianza como se muestra en los Cuadros A.20 a A.23 del apéndice, cuyos coeficientes de determinación (R^2) fueron de 0.58, 0.58, 0.55 y 0.50 para cada tratamiento respectivamente (Cuadro A.24), sin embargo fueron utilizados éstos debido a que el modelo de simulación validado supone este tipo de comportamiento para este órgano.

Las variaciones encontradas en los muestreos de la raíz (Cuadro A.27), se atribuye principalmente a la técnica utilizada en el muestreo de campo, lo cual ya fue discutido anteriormente.

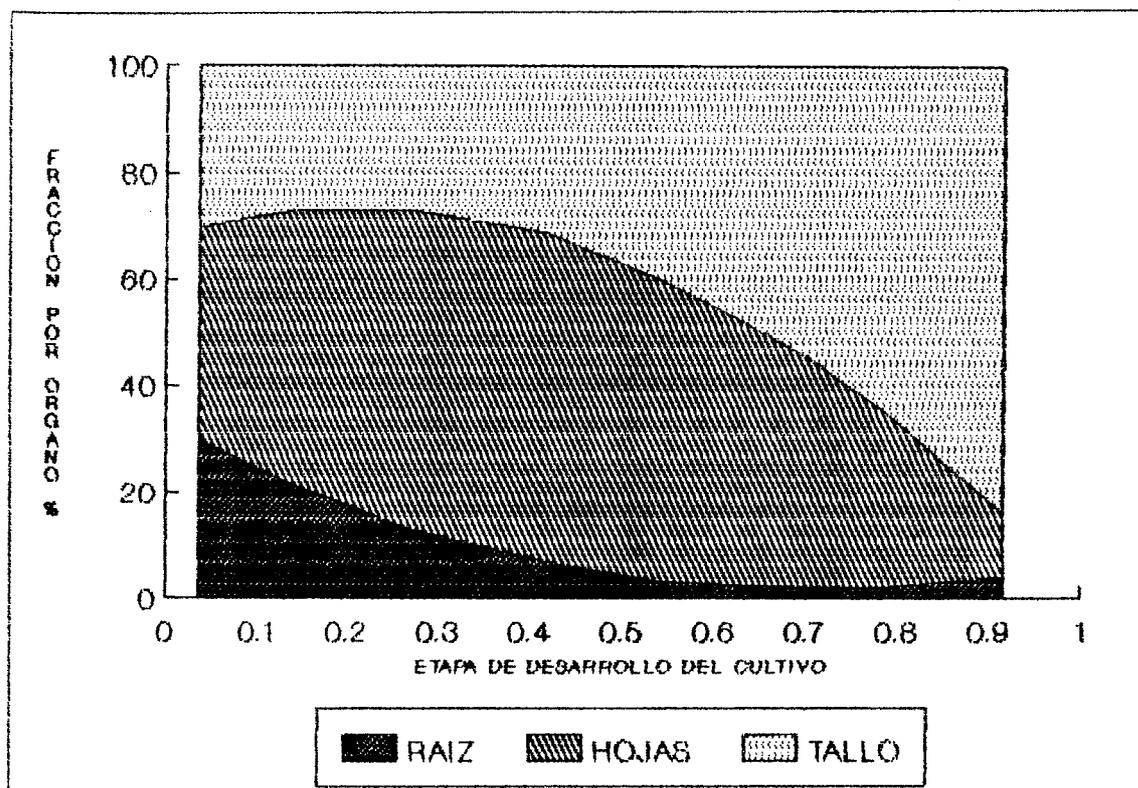


Figura 4.18. Fracción de incremento en el peso seco de raíz, hojas y tallo en el tratamiento de 75 por ciento de humedad aprovechable del suelo. UAAAN 1991.

Para la fracción de incremento relativo en el peso seco de tallo y hojas, el análisis de varianza de regresión resultó altamente significativo ($P = 0.01$) en los cuatro tratamientos evaluados, como se muestra en los cuadros A.20 a A.23, lo cual indica que el polinomio utilizado ajusta adecuadamente ya que los coeficientes de determinación fueron de 0.95, 0.99, 0.94 y 0.98 para el tallo (Cuadro A.25) y de 0.86, 0.88, 0.82 y 0.87 para las hojas (Cuadro A.26), los cuales concuerdan con la metodología de este modelo.

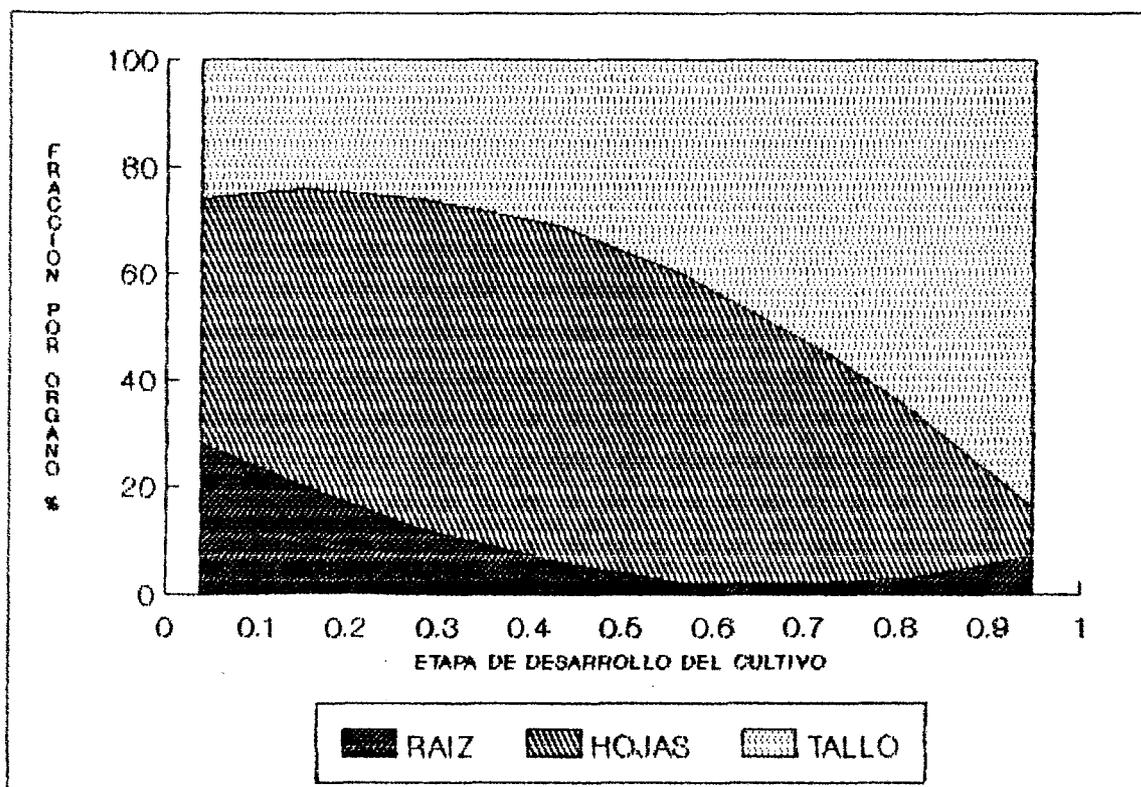


Figura 4.19. Fracción de incremento en el peso seco de raíz, hojas y tallo en el tratamiento de 50 por ciento de humedad aprovechable del suelo. UAAAN 1991.

Un análisis gráfico global de la distribución de materia seca en términos de incremento relativo en la raíz, hojas y tallo de los patrones de partición por tratamiento presentados en la Figuras 4.17. a 4.20., permite establecer que en emergencia las prioridades fueron de 27, 43 y 30 por ciento respectivamente, lo que hace evidente que la mayor actividad de crecimiento celular de la planta en esta etapa se localiza precisamente en las hojas.

Posteriormente, al crecer la planta y elongar el tallo (de emergencia a antesis), en la raíz se observó una tendencia generalizada a disminuir la fracción de incremento

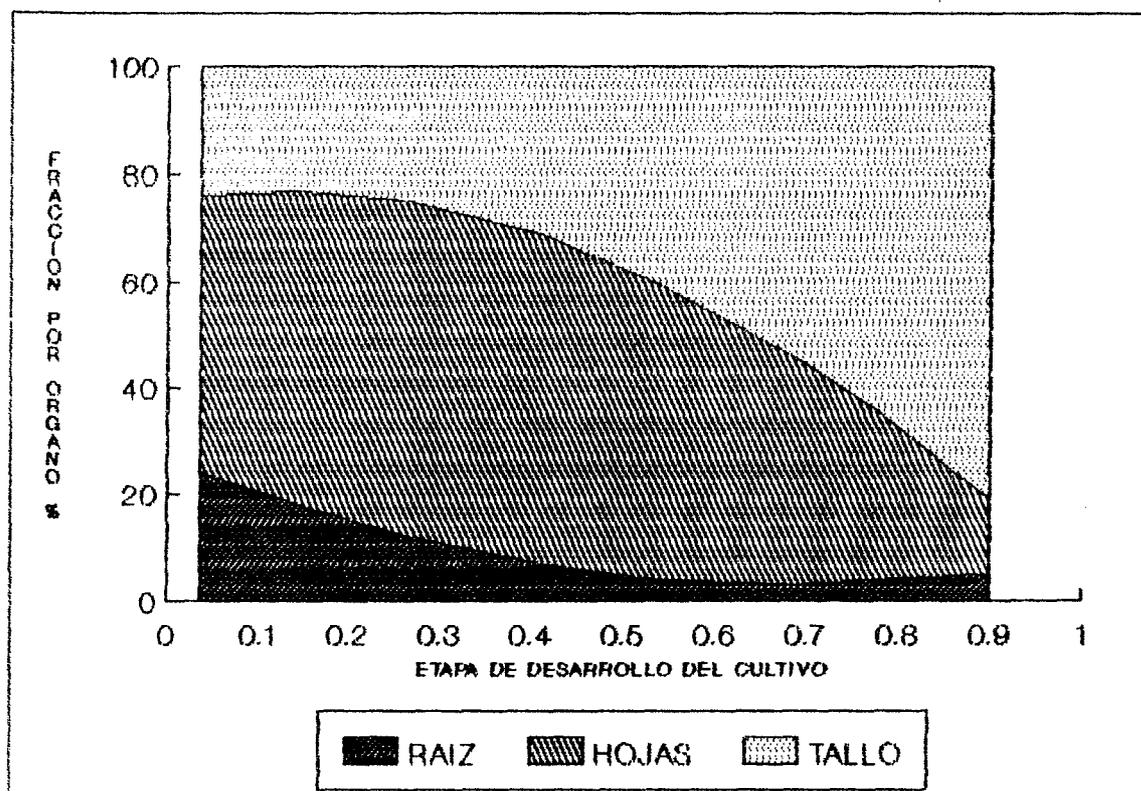


Figura 4.20. Fracción de incremento en el peso seco de raíz, hojas y tallo en el tratamiento de 25 por ciento de humedad aprovechable del suelo. UAAAN 1991.

relativo del peso seco, aunque sin presentar un comportamiento definido, lo que fue ocasionado por la falta de ajuste ya mencionado. En lo referente a hojas y tallo, los tratamientos ETM-REF, 75 y 50 por ciento de humedad aprovechable presentan un patrón de distribución de materia seca en términos relativos similar, ya que en todos ellos los máximos incrementos en el peso seco de hojas se presentaron en la etapa de desarrollo incremento y una tendencia generalizada a alcanzar cero en antesis; mientras que en el tallo el máximo incremento ocurrió justo antes de antesis, con valores que oscilaron entre 80 y 90 por ciento de incremento y una tendencia a 100 por ciento en ésta

última etapa. En tanto que para el tratamiento cuyo nivel de humedad aprovechable fue del 25 por ciento, el máximo incremento en hojas se presentó en la etapa fenológica 0.4, con un 60 por ciento y para el tallo fue inferior al 80 por ciento en la etapa fenológica 0.9.

Lo anterior permite establecer que al someter a la planta a condiciones de baja humedad del suelo la fijación de CO_2 decrece significativamente, ocasionando una disminución del área foliar y por consecuencia es afectada la cantidad de fotosintatos almacenados en los órganos de reserva, los cuales posteriormente son translocados a las partes reproductivas de la planta. Además en el presente estudio se observó que aquellos tratamientos con mayor humedad disponible en el suelo (ETM-REF y 50 por ciento de humedad aprovechable), alcanzaron más rápidamente la etapa fenológica de floración masculina o antesis (1), como es mostrado en el Cuadro A.4 del Apéndice.

Simulación

Una vez que se obtuvieron las tablas de partición de materia seca por tratamiento y con la ayuda del programa computacional realizado para mecanizar el modelo utilizado (Apéndice B), se procedió a correr dicho programa para cada condición de humedad del suelo evaluada en campo, mediante el uso de la información mostrada en los Cuadros A.3 y A.4.

Debido a que se manejaron alrededor de 50 variables, los resultados completos se presentan en los Cuadros C.1 a C.5 por tratamiento, de tal manera que aquí únicamente serán presentadas y discutidas la radiación solar, evaporación potencial de una superficie de agua libre, la condición del agua del suelo, transpiración, acumulación de materia seca por órgano, índice de área foliar, rendimiento de grano, rendimiento de rastrojo simulados y la capacidad de predicción del modelo utilizado.

Dentro de las variables que el modelo estima, se encuentran la radiación solar y la evaporación de una superficie libre, las cuales son básicas en los tres componentes principales de éste (ver Figuras A.5 y A.6), por lo que se realizó un análisis de las desviaciones entre los valores medidos y estimados, cuyos valores fueron de -0.360 Ly d^{-1} y -0.05 mm d^{-1} , resultando ser igual a cero ($\mu_D = 0$) con un nivel α de 0.05, mientras que la desviación estándar de la media de desviaciones fue de 34.170 Ly d^{-1} y 0.85 mm d^{-1} , de igual modo el intervalo de confianza en la que se localiza la media de desviaciones fue de -8.582 a 7.831 Ly d^{-1} para la radiación solar y de -0.260 a 0.161 para la evaporación de una superficie libre (Cuadro 4.15).

Los resultados anteriores permiten establecer que los valores estimados de radiación solar y evaporación no difieren significativamente de los datos medidos en la estación meteorológica.

adro 4.15. Prueba de t e intervalo de confianza para la media de desviaciones (\bar{D}) de los datos climáticos medidos y estimados. UAAAN 1991.

Estadísticos	Radiación solar ¹	Evaporación ²
	-0.360	-0.050
	34.170	0.850
calculada	-0.110	-0.630
hipótesis ⁻¹	$H_0: \mu = 0$	$H_0: \mu = 0$
t. Confianza	-8.552 $\leq \mu \leq$ 7.831	-0.260 $\leq \mu \leq$ 0.161

Expresada en Ly min^{-1} .

Expresada en mm d^{-1} .

Con α igual a 0.05 de probabilidad.

humedad del Suelo Simulada

La dinámica de la humedad del suelo simulada y servada durante el ciclo de cultivo en los distintos atamientos es mostrada en la Figura 4.21., en la que se serva que el modelo subestima significativamente la humedad del suelo durante los primeros 40 días del cultivo

los cuatro tratamientos, lo cual es ocasionado principalmente por las pérdidas evaporativas de la superficie del suelo, ya que en este periodo las demandas hídricas del cultivo son bajas (Protopapas y Bars, 1987), debido a que el índice de área foliar es menor a uno como se muestra en la Figura 4.26. y además el modelo supone que dichas demandas evaporativas son cubiertas con la humedad disponible en todo el perfil del suelo, lo cual no ocurre en realidad ya que la resistencia que ofrece el suelo a la evaporación está en función de sus propiedades físicas, como se observa en los datos medidos, los cuales se presentan por encima del 34 por ciento base volumen en el tratamiento

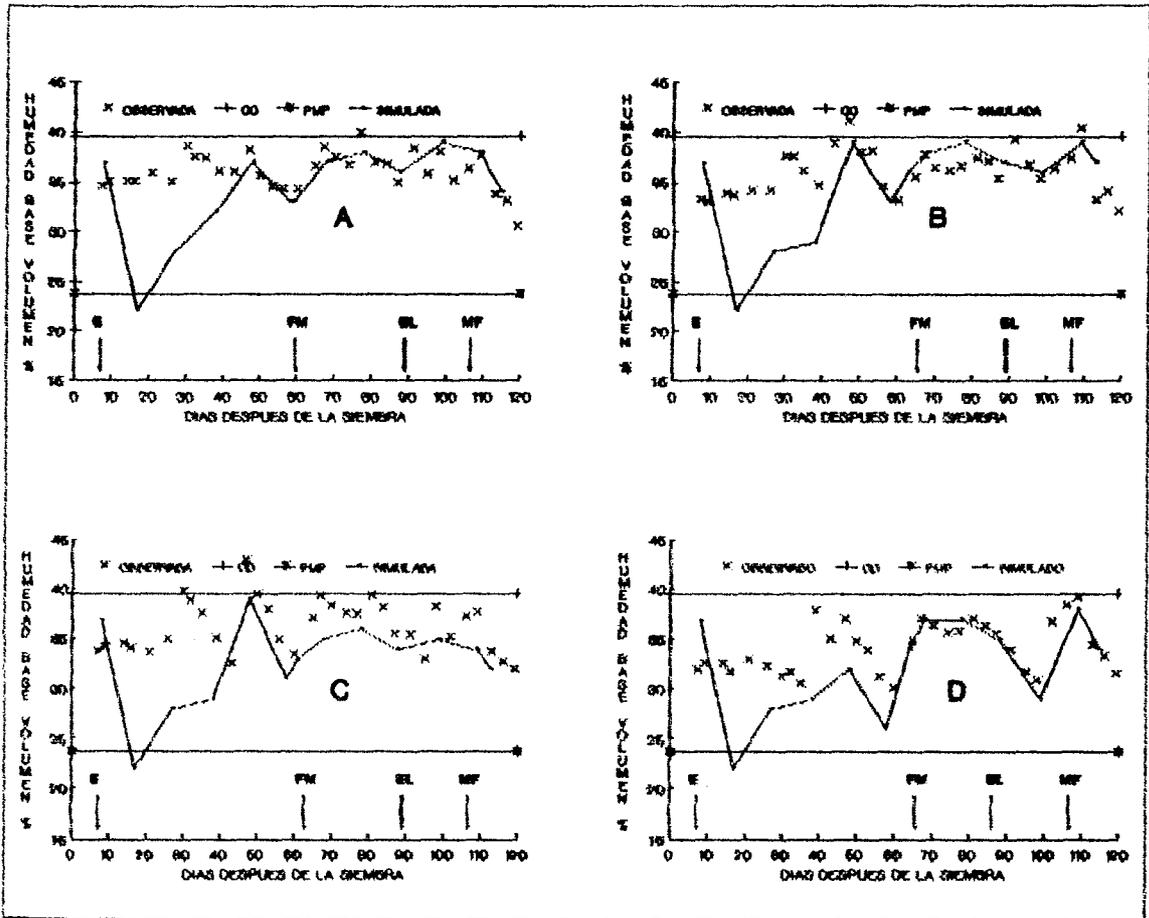


Figura 4.21. Humedad del suelo observada y estimada en los tratamientos ETm-REF (A), 75 (B), 50 (C) y 25 (D) por ciento de humedad aprovechable, en el ciclo del maíz, UAAAN 1991.

ETM-REF, 75 y 50 por ciento de humedad aprovechable, los cuales son referidos como un promedio del perfil considerado, ya anteriormente se presentaron y discutieron su comportamiento por estrato.

Después de los 40 días, una vez que el índice de área foliar fue mayor a la unidad y cubierta la superficie del suelo, los valores observados y simulados presentan una buena concordancia dado que la pérdida de agua es ocasionada principalmente por la extracción radicular. De acuerdo a lo

Cuadro 4.16. Prueba de t para los valores observados y simulados de la humedad del suelo y transpiración. UAAAN 1991.

Variable	Tratamiento de humedad del suelo			
	ETM-REF	75 H.A.S.	50% H.A.S.	25 % H.A.S.
Humedad suelo ¹				
\bar{D}	1.653	0.978	3.392	2.026
$S_{\bar{D}}$	4.045	4.231	3.510	3.854
t	1.529	0.865	3.616	2.142
Hipótesis ²	$H_0: \mu = 0$	$H_0: \mu = 0$	$H_0: \mu <> 0$	$H_0: \mu = 0$
Transpiración ³				
\bar{D}	0.487	0.173	0.315	-0.596
$S_{\bar{D}}$	2.320	2.358	2.471	1.516
t	0.664	0.232	0.403	-1.242
Hipótesis	$H_0: \mu = 0$	$H_0: \mu = 0$	$H_0: \mu = 0$	$H_0: \mu = 0$

1 Expresada en por ciento base volumen.

2 Con α igual a 0.05 probabilidad.

3 Expresada en mm d^{-1} .

anterior es evidente la necesidad de estudiar con más detalle el comportamiento de la humedad del suelo simulada cuando la superficie no ha sido cubierta por el cultivo y son estos resultados los que permiten además de validar el funcionamiento del modelo determinar sus limitaciones (Lascano *et al.*, 1987).

En base al análisis de las desviaciones las cuales son presentadas en el Cuadro 4.16, se observa que en los tratamientos ETM-REF, 75 y 25 por ciento de humedad aprovechable la media de las desviaciones (\bar{D}) es igual a cero ($\mu_D = 0$) con un nivel α de 0.05, sin embargo para el tratamiento de 50 por ciento de humedad aprovechable la \bar{D} es diferente de cero ($\mu_D <> 0$); lo cual indica la presencia de factores que limitan la predicción del contenido de humedad

Cuadro 4.17. Intervalo de confianza para la media de desviaciones (\bar{D}) de la humedad del suelo y transpiración. UAAAN 1991.

tratamiento	Humedad del suelo ¹	Transpiración ²
TM-REF	-1.09 $\leq \mu_D \leq$ 4.39	-1.48 $\leq \mu_D \leq$ 2.46
5% H.A.S.	-1.89 $\leq \mu_D \leq$ 3.84	-1.83 $\leq \mu_D \leq$ 2.18
0% H.A.S.		-1.78 $\leq \mu_D \leq$ 2.41
5% H.A.S.	-0.40 $\leq \mu_D \leq$ 4.82	-1.88 $\leq \mu_D \leq$ 0.69

Expresada en por ciento base volumen.

Expresada en mm d^{-1} .

están relacionados con las suposiciones del modelo. Por otra parte la media de las desviaciones oscilaron entre .978 a 3.392 por ciento base volumen, lo que representa una subestimación generalizada de la humedad del suelo, además el rango de la desviación estándar de la \bar{D} considerando los tratamientos anteriores fue de 3.50 a 4.2 por ciento base volumen. Los intervalos de confianza para la \bar{D} de tal manera que ésta se encontrará entre -1.89 a 4.80 por ciento base volumen, lo cual se afirma con una confianza del 95 por ciento (Cuadro 4.17).

Transpiración Simulada

En la Figura 4.22., se muestran los valores observados y estimados para las diferentes condiciones de humedad en el suelo, en la que se observa que los valores simulados se ubican justo entre los datos medidos en campo, aunque muy alejados todos ellos de la línea estimada, es evidente que la mayor transpiración ocurrió entre los 60 a 0 días después de la siembra en ambos tipos de datos,

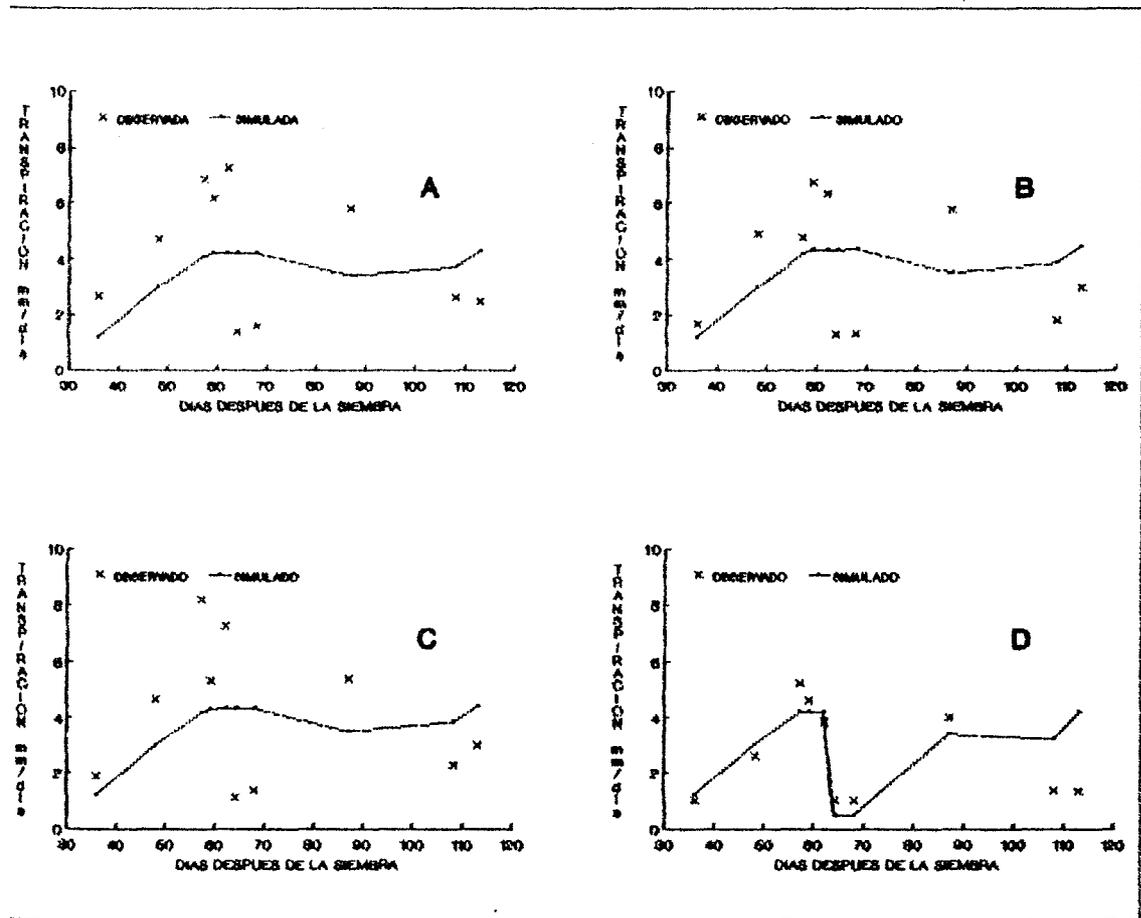


Figura 4.22. Transpiración observada y estimada en los tratamientos ETm-REF (A), 75 (B), 50 (C) y 25 (D) por ciento de humedad aprovechable, en el ciclo del maíz, UAAAN 1991.

ebido a que esta es directamente proporcional a la superficie foliar del cultivo.

Las discrepancias entre los datos del modelo y los medidos en campo fueron ocasionados principalmente porque los valores observados se midieron con el porómetro al momento en que la transpiración se encuentra en el punto máximo (12 a 14 hr), de tal manera que al realizar la conversión a tasas diarias y al realizar la comparación con valores decenales promedio estimados, su desviación es

considerable, por otro parte los valores estimados en los tratamientos ETM-REF, 75 y 50 por ciento de humedad aprovechable (A, B y D) mostraron una tendencia similar únicamente fue diferente al del 25 por ciento (D), en el cual la transpiración fue reducida significativamente a los 62 días después de la siembra lo cual influyó en la acumulación de materia seca.

El análisis de las desviaciones (Cuadro 4.16), indica sin embargo que la \bar{D} es igual a cero ($\mu_D = 0$) con un α de 0.05 en los cuatro tratamientos, con un rango de -0.596 a 0.487 mm d^{-1} , lo que manifiesta que se presentaron tanto valores subestimados como sobreestimados. La desviación estándar osciló entre 1.52 a 2.47 mm d^{-1} lo que permite establecer la variabilidad en las predicciones realizadas. El intervalo de confianza para la \bar{D} fue en forma general de -1.83 a 2.41 mm d^{-1} lo cual se establece con una confianza del 95 por ciento, como se muestra en el Cuadro 4.17.

De acuerdo a los resultados anteriores se establece que los valores estimados se ubican en una forma discreta entre los datos observados, aunque es importante considerar por un lado, que se tratan de valores obtenidos cada día los cuales se mantienen constantes durante este intervalo y por el otro las relaciones en el continuo suelo-planta-atmósfera son muy complejas y difíciles de modelar empíricamente y además un enfoque mecanista requiere del uso de varios ajustes durante cada simulación (Eavis y Taylor

1976), los cuales no son considerados en este modelo.

Materia Seca Simulada

En base a los supuestos del modelo y tomando en cuenta que la simulación permite reproducir la esencia de un sistema pero no el sistema en sí, los resultados que se presentan a continuación tratan de emular las condiciones reales de campo, reflejadas en parámetros y variables de respuesta que son aproximaciones a la realidad, pero que difícilmente serán idénticos a la naturaleza.

Bajo esta consideración la Figura 4.23., muestra los datos simulados con aquellos observados en campo del peso seco de la raíz, en los tratamientos ETM-REF, 75, 50 y 25 por ciento de humedad aprovechable (A, B, C, y D), en la que se observa una concordancia de las predicciones con los datos de campo únicamente hasta los 60 días después de la siembra, ya que posteriormente permanece constante en 0.223, 0.247, 0.233 y 0.228 ton ha^{-1} para cada tratamiento respectivamente, mientras que el peso seco de la raíz determinado en madurez fisiológica fue de 0.831, 0.981, 0.840 y 0.576 ton ha^{-1} .

Este comportamiento es causado principalmente por la fracción de incremento en el peso seco de este órgano ya que como fue presentado en el apartado de partición de materia seca, decrece rápidamente a medida que se acerca a antesis

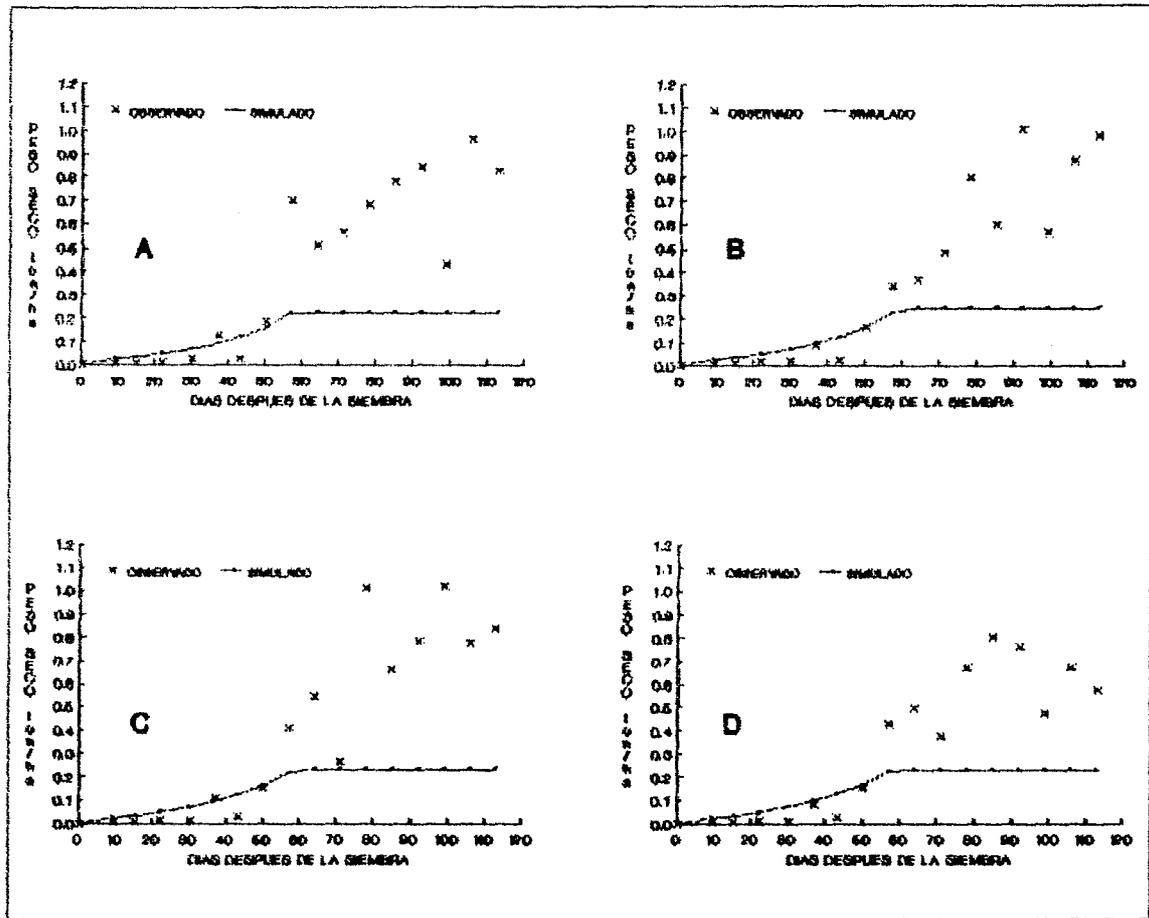


Figura 4.23. Materia seca en raíz observada y simulada en los tratamientos ETM-REF (A), 75 (B), 50 (C) y 25 (D) por ciento de humedad aprovechable, en el ciclo del maíz. UAAAN 1991.

el cultivo, de tal manera que influye en forma significativa sobre el peso seco de la raíz; lo cual a su vez se debe a la técnica utilizada en el muestreo como ya fue discutido anteriormente. Sin embargo por otra parte los datos de campo mostraron que después de la antesis, la raíz continúa incrementando su peso aunque no en la misma proporción como ocurre antes de esta etapa.

Evidentemente el comportamiento del modelo en la predicción del peso seco de la raíz permite establecer que

Cuadro 4.18. Prueba de t para los valores observados y simulados en los diferentes órganos de la planta de maíz. UAAAN 1991.

Variable	Tratamientos de humedad del suelo			
	ETM-REF	75% H.A.S.	50% H.A.S.	25% H.A.S.
Raíz¹				
\bar{D}	0.259	0.225	0.251	0.184
$S_{\bar{D}}$	0.288	0.300	0.319	0.231
t	3.600	3.005	3.148	3.174
Hipótesis ²	$H_0: \mu \neq 0$	$H_0: \mu \neq 0$	$H_0: \mu \neq 0$	$H_0: \mu \neq 0$
Tallo¹				
\bar{D}	-0.454	-0.470	-0.431	-0.076
$S_{\bar{D}}$	0.854	3.786	3.793	3.169
t	-2.127	-0.497	-0.454	-0.096
Hipótesis ²	$H_0: \mu = 0$	$H_0: \mu = 0$	$H_0: \mu = 0$	$H_0: \mu = 0$
Hojas¹				
\bar{D}	0.046	-0.193	-0.047	-0.073
$S_{\bar{D}}$	0.229	0.171	0.183	0.275
t	0.804	-4.521	-1.032	-1.061
Hipótesis ²	$H_0: \mu = 0$	$H_0: \mu = 0$	$H_0: \mu \neq 0$	$H_0: \mu = 0$
IAF³				
\bar{D}	-0.255	-0.682	-0.369	-0.468
$S_{\bar{D}}$	0.405	0.627	0.420	0.416
t	-2.516	-4.348	-3.515	-4.495
Hipótesis	$H_0: \mu \neq 0$	$H_0: \mu \neq 0$	$H_0: \mu \neq 0$	$H_0: \mu \neq 0$
Rastrojo¹				
\bar{D}	-0.281	-0.456	-0.314	0.067
$S_{\bar{D}}$	0.642	0.576	0.606	0.486
t	-1.747	-3.170	-2.073	0.550
Hipótesis ²	$H_0: \mu = 0$	$H_0: \mu = 0$	$H_0: \mu = 0$	$H_0: \mu = 0$
Grano¹				
\bar{D}	0.426	0.359	0.344	0.477
$S_{\bar{D}}$	0.555	0.423	0.457	0.677
t	3.073	3.398	3.019	2.860
Hipótesis	$H_0: \mu \neq 0$	$H_0: \mu \neq 0$	$H_0: \mu \neq 0$	$H_0: \mu \neq 0$

1 Expresado en ton ha^{-1}

2 Con α igual a $0.01_{\frac{1}{2}}$ de probabilidad.

3 Expresado en $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$.

la \bar{D} es diferente de cero ($\mu \neq 0$) con un nivel α de 0.05, es decir no hay asociación entre ambos pares de datos. En el Cuadro 4.18., se muestra la desviación por tratamiento, los

cuales manifiestan la subestimación en este órgano y son de 0.259, 0.225, 0.251 y 0.184 ton ha⁻¹. Además el peso seco de raíz simulado tiende a ser igual en los cuatro tratamientos de humedad debido a que las tablas de partición de materia seca presentan mínimas diferencias y además hasta los 60 días no se ocurrió un estrés hídrico significativo.

De ahí que este órgano requiere de un estudio más preciso, sobre todo de las fracciones de incremento y determinar en que momento concluye en forma significativa, para lo cual es necesario mantener un mayor control en su medición, por lo que se requiere del uso de ambientes controlados para recolectar este tipo de información como lo establece Waggoner (1984), aunque por otra parte existe la controversia de la aplicabilidad de la información generada en este tipo de ambientes a las condiciones de campo (Acock y Acock, 1991), sin embargo es la validación de los modelos lo que permite definir el sitio donde debe recolectarse los datos de entrada para probar el modelo.

En lo referente al peso seco de tallo observado y simulado, estos se presentan en la Figura 4.24., las cuatro condiciones de humedad, en la que se manifiesta la curva típica de crecimiento y desarrollo en sus tres fases (exponencial, lineal y asintótica), mostrando un comportamiento similar los tratamientos ETM-REF, 75 y 50 por ciento de humedad aprovechable, los cuales no registraron

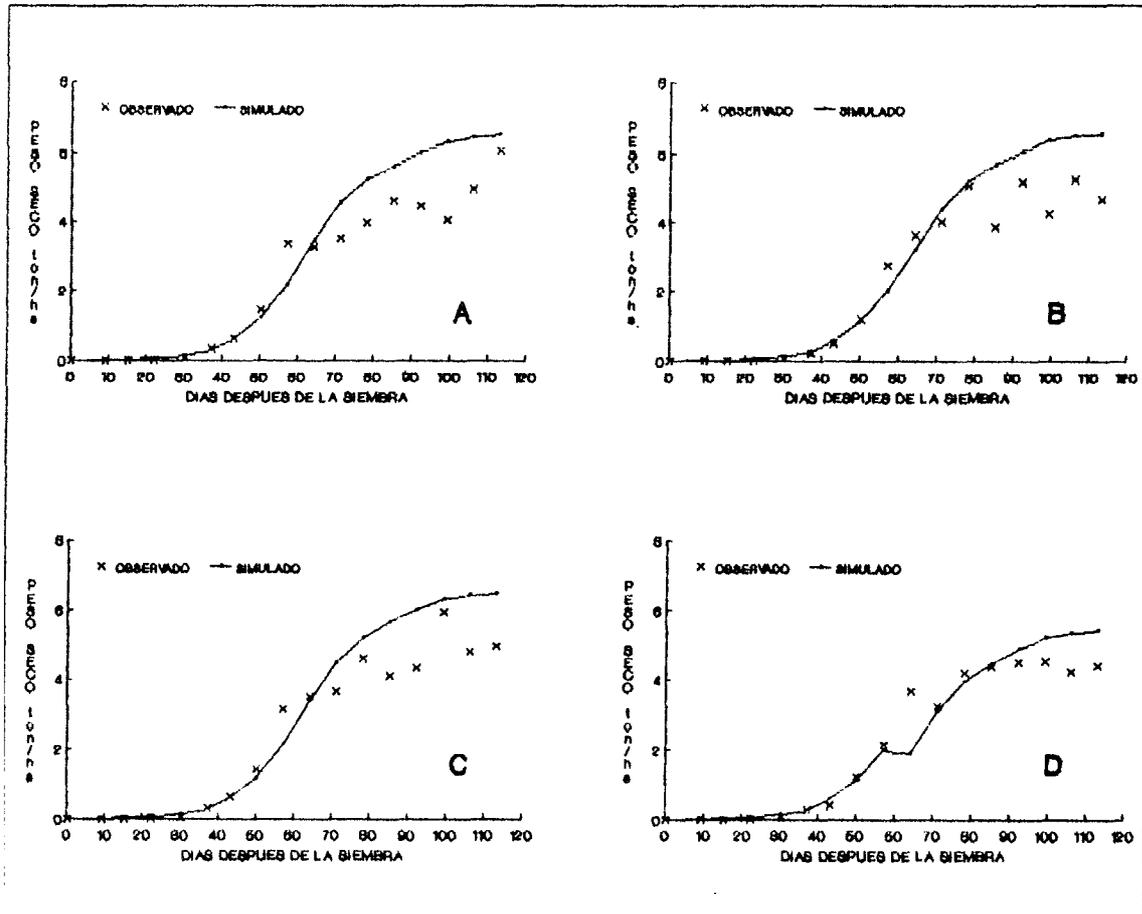


Figura 4.24. Materia seca en tallos observada y simulada en los tratamientos ETM-REF (A), 75 (B), 50 (C) y 25 (D) por ciento de humedad aprovechable, en el ciclo del maíz. UAAAN 1991.

le materia seca, en tanto que el tratamiento con 25 por ciento de humedad aprovechable fue afectado por la disponibilidad de agua a los 62 días después de la siembra, manifestándose en la reducción del peso seco del tallo. Además como se muestra en dicha figura, existe una concordancia entre los datos observados y estimados hasta la antesis, sin embargo después de esta etapa existe una tendencia generalizada a sobreestimar el peso seco del tallo, lo que hace evidente que la translocación de las sustancias de reserva hacia la mazorca no es de tipo lineal,

Cuadro 4.19. Intervalo de confianza para las medias de desviaciones en tallo, hojas y rastrojo de maiz, bajo los tratamientos de humedad evaluados. UAAAN 1991.

Tratamientos	Tallo ¹	Hojas ¹	Rastrojo ¹
ETM-REF	-0.985 - 0.078	-0.096 - 0.188	-0.681 - 0.119
75% H.A.S.	-2.827 - 1.886	-----	-0.928 - 0.016
50% H.A.S.	-2.792 - 1.930	-0.161 - 0.066	-0.691 - 0.063
25% H.A.S.	-2.049 - 1.896	-0.244 - 0.098	-0.235 - 0.369

1 Expresado en ton ha⁻¹

ya que el modelo considera que en ántesis es de uno y en madurez fisiológica de cero.

El análisis estadístico realizado para este órgano (Cuadro 4.18), indicó que en los cuatro tratamientos hubo sobreestimación en su peso, tal como lo indican las medias de las desviaciones que fueron de -0.454, -0.470, -0.431 y -0.076 ton ha⁻¹ para los tratamientos ETM-REF, 75, 50 y 25 por ciento de humedad aprovechable, resultando ser igual a cero ($\mu_D = 0$) con un nivel α de 0.05 en todos ellos. Sin embargo la desviación estándar fue de 0.854, 3.786, 3.793 y 3.169 ton ha⁻¹, lo cual refleja la sobreestimación que hace el modelo principalmente después de la ántesis. El intervalo de confianza de la \bar{D} para los distintos tratamientos tiene un rango de -2.827 a 1.930 ton ha⁻¹, lo que significa que dicha media se localiza dentro de éste con una confianza del 95 por ciento (Cuadro 4.19).

En madurez fisiológica, el error encontrado entre los datos estimados y observados del peso seco de tallo fue de 0.448, 1.874, 1.504 y 1.020 ton ha⁻¹ a favor de la

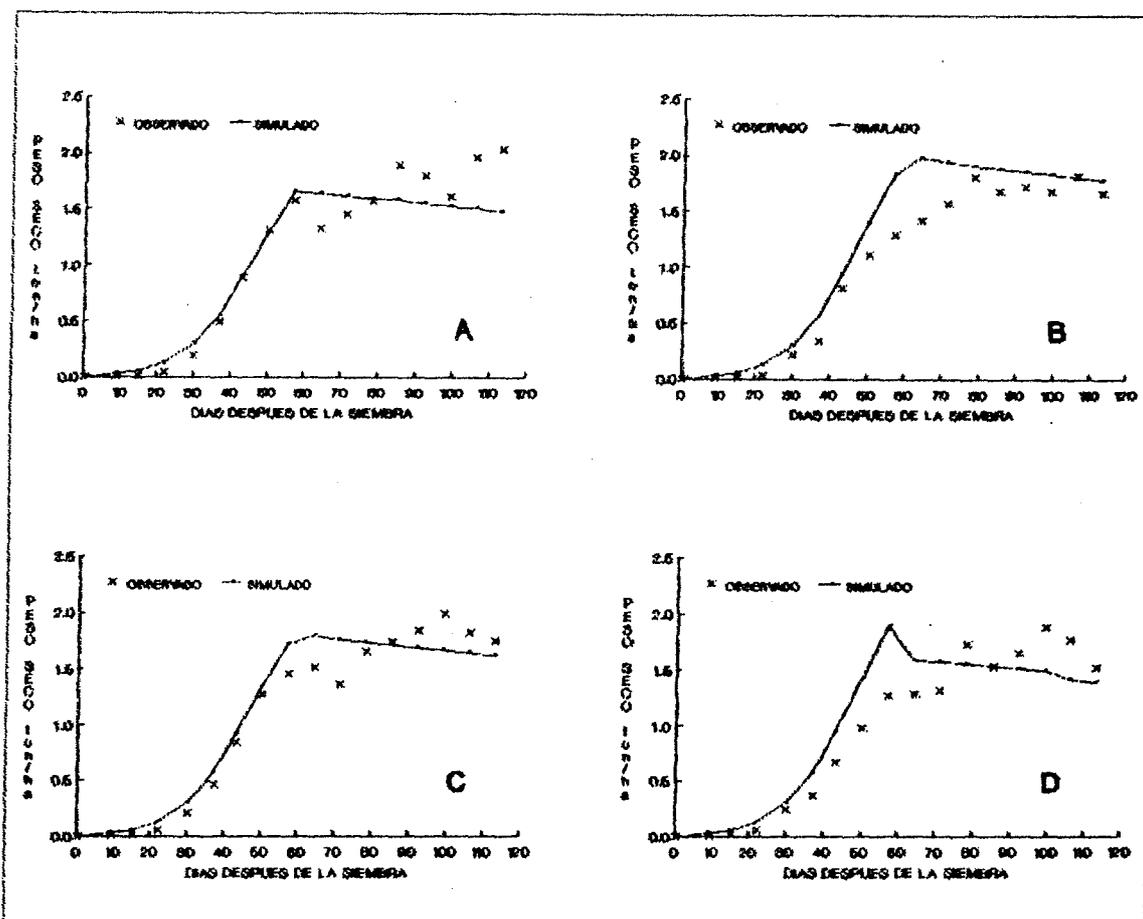


Figura 4.25. Materia seca en hojas observada y simulada en los tratamientos ETM-REF (A), 75 (B), 50 (C) y 25 (D) por ciento de humedad aprovechable, en el ciclo del maíz. UAAAN 1991.

predicción del modelo.

La Figura 4.25., se presenta la acumulación de materia seca en las hojas bajo las diferentes condiciones de humedad en el suelo, en la que se observa una relación estrecha entre los datos de campo y los estimados, no obstante que es evidente una sobreestimación en los tratamientos de 75 y 25 por ciento de humedad aprovechable, debido a que la fracción de incremento que asignaron a las hojas es mayor que en el resto de tratamientos y aunado a

esto la tasa de asimilación bruta en este período es alta por las condiciones de radiación solar, se incrementa considerablemente el peso seco de las hojas. Las tendencias en los primeros tres tratamientos (A, B y C) es similar, únicamente el tratamiento con mayor déficit hídrico (D) redujo su área foliar por efecto de la falta de humedad en el suelo a los 62 días después de la siembra.

El análisis de las desviaciones (Cuadro 4.18) indicó que únicamente los tratamientos ETM-REF, 50 y 25 por ciento de humedad aprovechable (A, C y D) fue igual a cero ($\mu_D = 0$) con un α de 0.05, en tanto que el de 75 por ciento (B) la media de sus desviaciones es diferente de cero ($\mu_D \neq 0$). Los valores promedio de las desviaciones fueron 0.046, -0.047, -0.073 y -0.193 ton ha⁻¹, con una desviación estándar de 0.229, 0.183, 0.275 y 0.0.171 ton ha⁻¹ respectivamente. Además el intervalo de confianza (Cuadro 4.19) para los tratamientos cuya media fue igual a cero osciló entre -0.244 a 0.188 ton ha⁻¹ con un 95 por ciento de probabilidad. Por lo que es factible establecer que para este órgano el modelo presenta una capacidad de predicción aceptable.

En lo referente al índice de área foliar se encontró de acuerdo a las tendencias presentadas en la Figura 4.26., una situación similar al peso seco de hojas simuladas, sólo que en esta variable hubo una respuesta generalizada a sobreestimar este índice en los cuatro tratamientos de

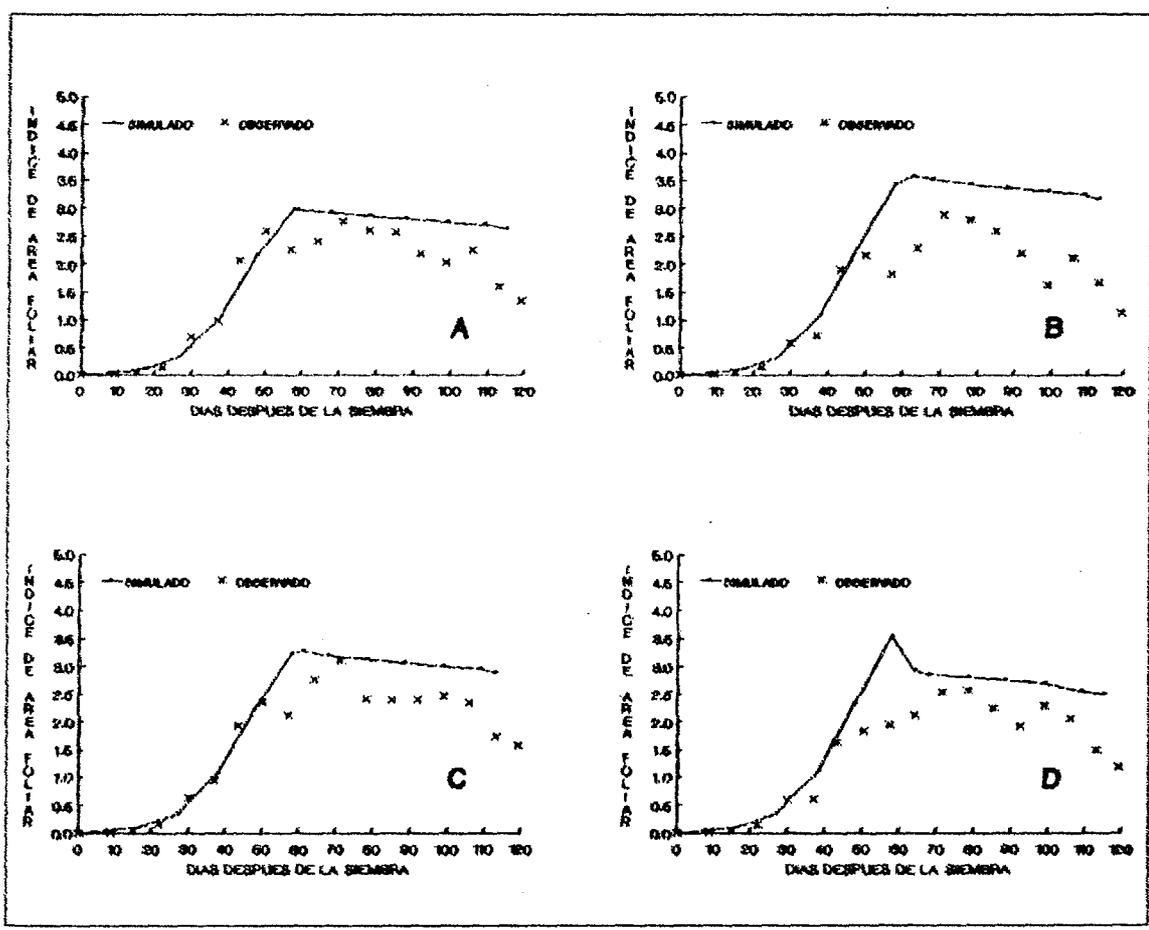


Figura 4.26. Índice de área foliar observado y simulado en los tratamientos ETM-REF (A), 75 (B), 50 (C) y 25 (D) por ciento de humedad aprovechable, en el ciclo del maíz. DAAAN 1991.

humedad evaluados, lo que se acentuó más en aquellos donde fue mayor el error en la estimación del peso de hojas, debido a que la estimación del índice de área foliar es en función del peso seco de la hoja, lo que permite inferir que la constante específica de área foliar utilizada ($18 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$) es la principal causa de error en los datos estimados, lo que sugiere un ajuste de dicha constante, los valores observados en campo son presentados en el Cuadro A.10 del Apéndice.

La media de las desviaciones por tratamiento fue de -0.255, -0.682, -0.369 y -0.468 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$, resultando ser diferente de cero ($\mu_D \neq 0$) en todos los casos y con un nivel de α de 0.05, mientras que la desviación estándar fue de 0.405, 0.627, 0.420 y 0.416 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ para los tratamientos ETM-REF, 75, 50 y 25 por ciento de humedad aprovechable (Cuadro 4.18).

Finalmente lo que es de interés en cualquier cultivo es el rendimiento económico (grano y rastrojo), es decir aquella parte que es de utilidad al hombre; en este sentido el peso de rastrojo observado y simulado se presenta en la Figura 4.27., en la que se observa una tendencia sigmoidea para los tratamientos ETM-REF, 75 y 50 por ciento de humedad aprovechable sobresaliendo ligeramente el de 75 por ciento (B) con un mayor peso seco acumulado. Nuevamente el tratamiento con 25 por ciento de humedad aprovechable fue el que presentó un decremento en el peso seco de rastrojo debido al déficit hídrico registrado a los 62 días después de la siembra.

Esta variable fue estimada por el modelo con mayor aproximación y presentó más concordancia con los datos de campo, lo que se confirma con la media de las desviaciones que fueron de -0.281, -0.456, -0.314 y 0.067 ton ha^{-1} para cada tratamiento (Cuadro 4.18), resultando ser igual a cero ($\mu_D = 0$) con un α de 0.05, mientras que la desviación estándar fue de 0.642, 0.576, 0.606 y 0.486 ton ha^{-1} , además

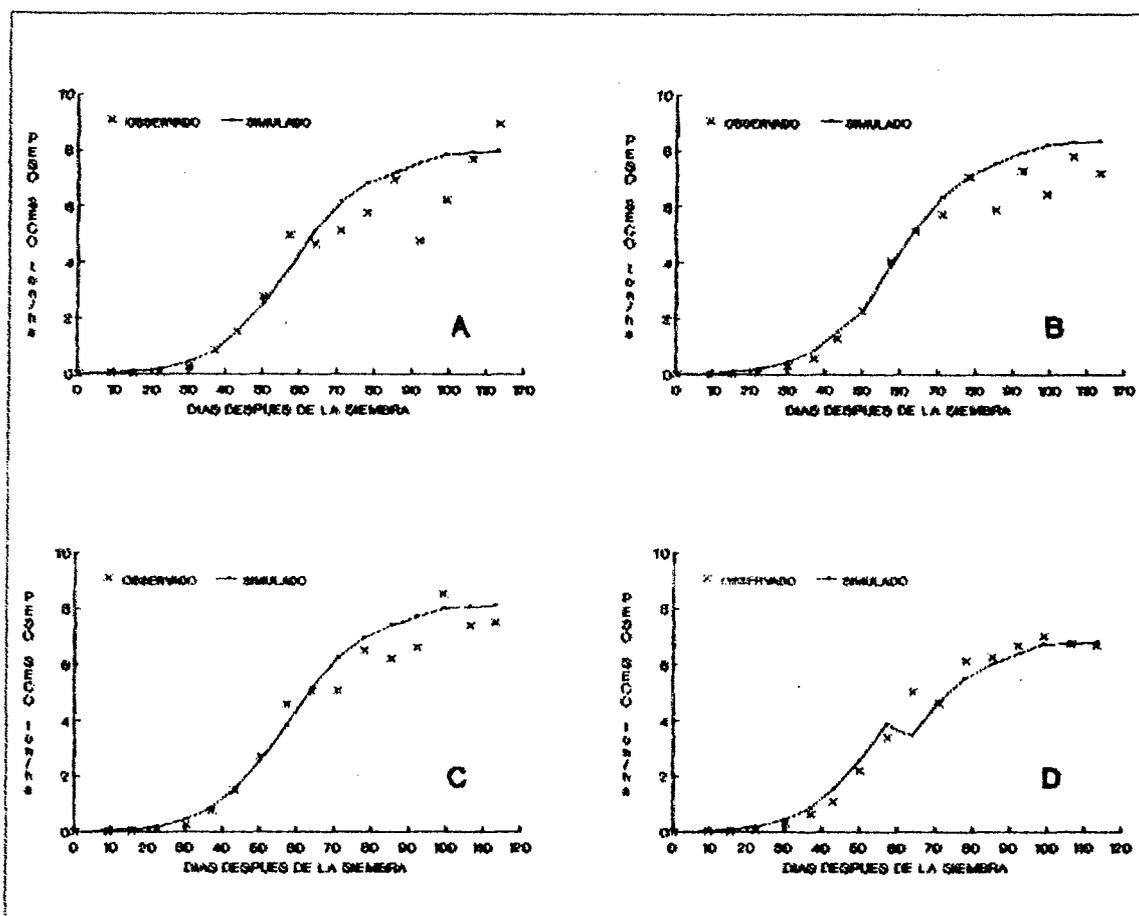


Figura 4.27. Peso seco de rastrojo observado y simulado en los tratamientos ETM-REF (A), 75 (B), 50 (C) y 25 (D) por ciento de humedad aprovechable, en el ciclo del maíz. UAAAN 1991.

la \bar{D} se encuentra dentro del intervalo de -0.928 a 0.369 ton ha^{-1} en forma general para las diferentes condiciones de humedad (Cuadro 4.19).

En madurez fisiológica el error encontrado en el peso de rastrojo fue de 0.537 , 1.050 , -1.213 y 0.045 ton ha^{-1} , lo que en cierta medida refleja la capacidad de predicción del modelo.

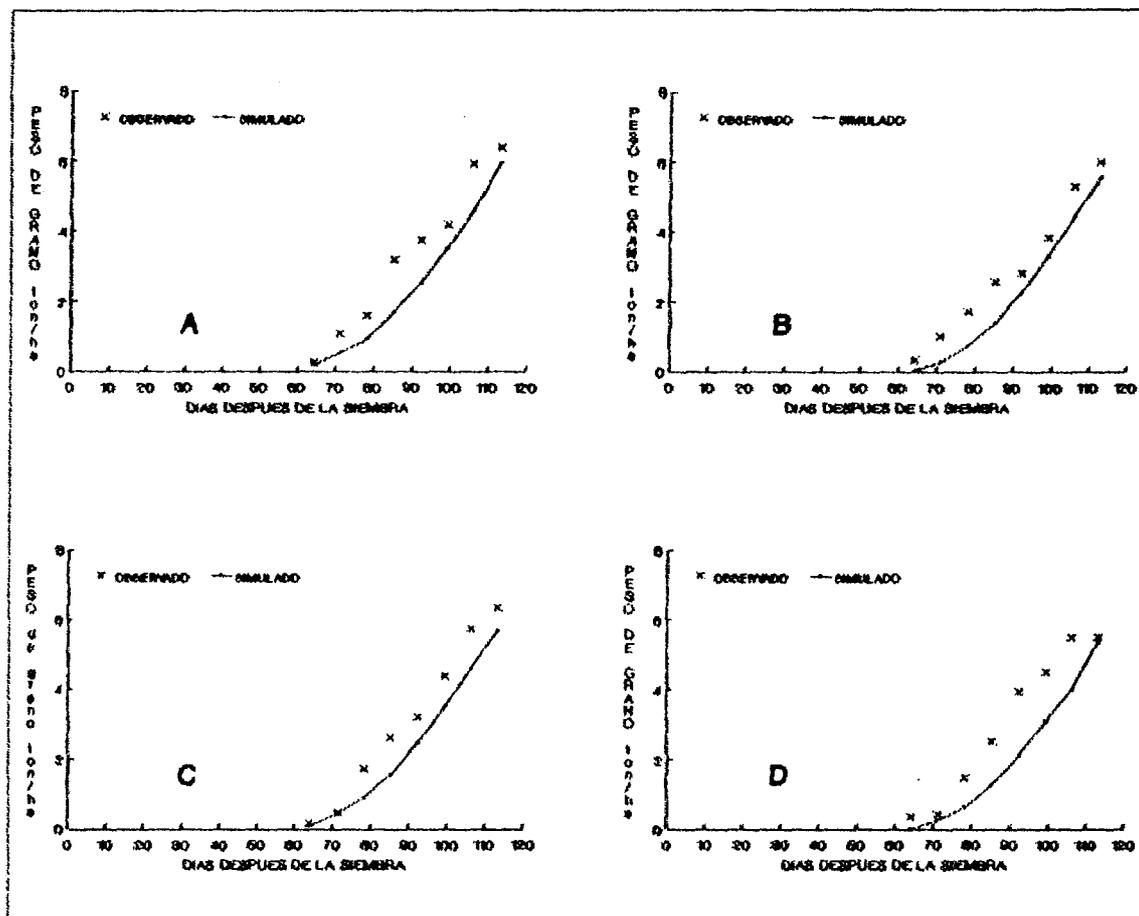


Figura 4.28. Rendimiento de grano observado y simulado en los tratamientos ETM-REF (A), 75 (B), 50 (C) y 25 (D) por ciento de humedad aprovechable, en el ciclo del maíz. UAAAN 1991.

En lo referente al rendimiento de grano, el comportamiento del modelo así como los datos obtenidos en campo son presentados en la Figura 4.28., en la que se observa una sobrestimación generalizada en todos los tratamientos evaluados, acentuándose en aquel cuyo nivel de humedad aprovechable fue del 25 por ciento, lo cual está influenciado básicamente por la dinámica de traslocación de las sustancias de reserva hacia el grano y en las que influye la aclimatación, las condiciones edáfico-ambientales que determinan la acumulación de peso seco en el grano.

El análisis de las desviaciones indicó que la media es diferente de cero ($\mu \neq 0$) con un α de 0.05, lo que permite establecer que el rendimiento estimado de grano difiere significativamente de los valores observados, las medias de desviación por tratamiento fueron de 0.426, 0.359, 0.344 y 0.477 ton ha⁻¹ a favor de los datos de campo, mientras que la desviación estándar de estas medias fue de 0.555, 0.423, 0.457 y 0.677 ton ha⁻¹ para los tratamientos ETM-REF, 75, 50 y 25 por ciento de humedad aprovechable (Cuadro 4.18). Esto muestra entonces que aunque no se encontró una relación estrecha entre ambos pares de datos, la variación tanto en la media como en la desviación estándar es aceptable si se compara con los errores de estimación obtenidos en otros modelos que relacionan a la evapotranspiración con el rendimiento (Stewart *et al.*, 1977; Kallsen *et al.*, 1981), además que la validación en la mayoría de los modelos se realiza comparando el rendimiento final y no se le da seguimiento durante el ciclo de cultivo tal como se realizó en el presente estudio.

Los rendimientos de grano estimados fueron de 5.929, 5.556, 5.666 y 5.326 ton ha⁻¹, mientras que los obtenidos en campo son de 6.387, 6.011, 6.329 y 5.493 ton ha⁻¹, lo que equivale a un error en la predicción de 7, 8, 10 y 3 por ciento en los tratamientos ETM-REF, 75, 50 y 25 por ciento de humedad aprovechable respectivamente, lo que concuerda con lo encontrado por Castro *et al.* (1988), aunque las predicciones realizadas por estos investigadores fue hecha

con otro modelo de simulación y bajo condiciones medioambientales distintas. Lo que permite establecer que las predicciones efectuadas con el modelo utilizado en este trabajo son aceptables, dada la gran diversidad de factores que afectan a los cultivos bajo condiciones reales, no obstante que es necesario validar este modelo en un mayor número de localidades.

De acuerdo al comportamiento del modelo es factible afirmar que en términos generales la capacidad de predicción del modelo de Van Keulen y Wolf (1986) es del 95 por ciento, excepto en lo referente al peso de raíz, índice de área foliar y peso de grano. Por lo que no es posible aceptar la hipótesis planteada en relación a la capacidad de predicción del modelo.

Para validar el modelo aquí probado en otros genotipos de maíz, es necesario conocer los requerimientos de calor expresados en grados día⁻¹ para las etapas fenológicas de emergencia, floración masculina o antesis y madurez fisiológica, mediante lo cual es posible determinar el ciclo vegetativo del cultivo.

5. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos y para las condiciones de suelo y clima del área de estudio se establece lo siguiente:

Los tratamientos de humedad evaluados difirieron entre sí únicamente dentro del estrato control (0 a 40 cm), ya que fuera de éste el contenido de humedad estuvo en función de las láminas de riego aplicadas más que de la frecuencia con que fueron aplicados.

Las plantas en los tratamientos ETM-REF, 75 y 50 por ciento de humedad aprovechable del suelo fueron sometidas a condiciones contrastantes de déficit hídrico en la etapa vegetativa, no así durante la etapa de floración masculina y llenado de grano.

Se detectaron tres períodos máximos de transpiración en los distintos tratamientos, los cuales disminuyeron su magnitud conforme se alcanzó la madurez del cultivo, reflejando con ello la actividad fotosintética de la planta en sus distintas etapas de desarrollo.

El peso seco de la raíz a través de ciclo fue mayor en el tratamiento con mayor humedad disponible en el suelo, considerando la profundidad de muestreo de este órgano.

La parte de la planta en la que se detectó mayor efecto de los tratamientos evaluados fue el tallo, lo que permite establecer que cuando es sometida la planta a déficit hídrico este órgano es el más sensible reduciendo su peso, siempre y cuando la intensidad de déficit sea significativo.

El comportamiento en la acumulación de peso seco de hojas durante el periodo de crecimiento vegetativo y el rendimiento de grano observados, guardaron el mismo orden, lo que permite establecer que este último es definido durante la fase vegetativa de la planta.

Aunque no se detectaron efectos significativos de los niveles de humedad evaluados sobre el rendimiento de grano de maíz y sus componentes medidos a la cosecha, es importante señalar que los rendimientos más altos de grano correspondieron a los tratamientos ETM-REF y 50 por ciento de humedad aprovechable con 6.387 y 6.329 ton ha⁻¹ respectivamente.

La distribución de materia seca en términos de incremento relativo para la raíz, tallo y hojas en los tratamientos ETM-REF, 75 y 50 por ciento de humedad

aprovechable en el período de emergencia a antesis, presentaron un patrón similar el cual fue diferente únicamente del tratamiento de 25 por ciento de humedad aprovechable.

El modelo utilizado subestimó el contenido de humedad del suelo en las cuatro condiciones de humedad durante el período en el cual la superficie no ha sido cubierta por el cultivo, lo que se atribuye principalmente a los supuestos del modelo.

Las tasas de transpiración estimadas se ubicaron en forma discreta entre los datos observados, lo que hace necesario medir esta variable con instrumentos que integren las pérdidas de agua por la planta en forma diaria.

La estimación del peso seco de raíz y el índice de área foliar difieren significativamente de los valores observados en campo, causado esencialmente por la técnica utilizada en el muestreo del primero y por la constante específica de conversión de área foliar del segundo.

La predicción de la acumulación de materia seca en hojas, tallo y rastrojo resultó estadísticamente igual a los datos observados en campo, es decir la capacidad de predicción de modelo en este órgano fue del 95 por ciento.

La capacidad de predicción del modelo en el rendimiento de maíz grano osciló entre 90 y 97 por ciento, el cual difiere significativamente de los datos reales de campo.

Se requiere modificar la subrutina que ejecuta el balance hídrico, sobre todo en lo referente a la evaporación de la superficie del suelo ya que es ahí donde se pierde la humedad en forma significativa de acuerdo a los supuestos del modelo.

Es necesario validar el modelo con el uso del patrón de materia seca obtenido mediante el experimento de campo, para evaluar su comportamiento en diversos ambientes.

6. RESUMEN.

El uso de modelos de simulación para predecir el comportamiento de un cultivo, es una herramienta importante de investigación, de tal manera que puede hacerse más corto este proceso, aunque lógicamente los modelos no sustituyen a los experimentos de campo. El objetivo de este estudio fue determinar la dinámica de partición de materia seca por órgano en términos de incremento durante el ciclo del cultivo en función del grado de estrés hídrico y evaluar la capacidad de predicción del modelo propuesto por Van Keulen y Wolf (1986), en la simulación de acumulación de materia seca y rendimiento de grano en maíz. El trabajo experimental se realizó en terrenos de la Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro", en suelo migajón arcilloso, con siembra mecánica y genotipo H-204 (abril 23, 1991), utilizando 25 kg ha⁻¹; el tratamiento de fertilización empleado fue 160-80-00, aplicándose fraccionado. Se evaluaron cuatro condiciones de humedad en el suelo: 1) sin restricciones de humedad durante el ciclo del cultivo utilizado como referencia, 2) 75, 3) 50 y 4) 25 por ciento de humedad aprovechable en el suelo, distribuidos en el campo en bloques al azar con cuatro repeticiones, la unidad experimental de 80 m² y la útil de 19.2 m². Dentro de las

variables evaluadas fueron: acumulación y fracción de materia seca por órgano, área foliar, fenología, transpiración y humedad del suelo. La simulación se efectuó en forma decenal, utilizando para ello datos promedio de temperatura, humedad relativa, precipitación, insolación, viento y las constantes térmicas para las etapas de emergencia, antesis y madurez fisiológica. El modelo fue alimentado con datos de partición de materia seca obtenidos en campo. De acuerdo a las condiciones climáticas durante el ciclo de cultivo se aplicaron siete, cinco, cuatro y tres riegos de auxilio en cada condición de humedad, sin embargo únicamente se presentaron dos condiciones contrastantes de humedad; el órgano más sensible al estrés hídrico fue el tallo, la acumulación de materia seca en hojas durante la etapa de desarrollo vegetativo y el rendimiento de grano guardaron el mismo orden. Además el incremento en peso seco de raíz, tallo y hojas fueron similares en aquellos tratamientos cuyo nivel de humedad aprovechable se mantuvo por encima del 50 por ciento. A la cosecha no se detectaron diferencias estadísticas para el rendimiento económico y los componentes evaluados. Los resultados de la simulación, indicaron que el peso seco de raíz, índice de área foliar y rendimiento de grano estimados difieren significativamente de los datos observados en campo; mientras que el contenido de humedad del suelo, transpiración, peso seco de hojas, tallos y rastrojo resultaron estadísticamente igual a los datos observados, con un α de 0.05 de probabilidad.

6. BIBLIOGRAFIA

- Acock, B. and C.M. Acock 1991. Potential for using long-term field research data to develop and validate crop simulators. *Agronomy Journal*. Vol. 83:56-61.
- , D.E. Charles and S. Sawyer. 1979. Potential Crop Production. *Ann. Bot. (London)*. Vol. 44:281-300.
- , and L.H. Allen Jr. 1985. In. "Direct effects of CO₂ on vegetation." Chapter 4. U.S. Dept. Energy Washington, D.C. Pags. 147-17
- Arkin, G.F., S.J. Mass and C.W. Richardson. 1980. Forecasting grain sorghum yields using simulated weather data and updating techniques. *TRANSACTIONS of the ASAE*. Vol. 23(3):676-680.
- Baker, D. N., J.R. Lambert and J.M. McKinion. 1983. *Tech Bull. S-C Agric. Exp. Stn.* 1089.
- Bavel, C.H.M. 1966. Potential evapotranspiration combination concept and experiment verification *Water Resour. Res.* Vol. 2:455-467.
- Castro, V.M., López J.H., Ramírez E.H. y Castillo A.R. 1988. El uso de un modelo de simulación y producción de maíz bajo condiciones de riego y temporal en Durango. In. *Resúmenes XXII Congreso de Fitogenética*. Pag. 68
- Comisión Nacional de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1976. Saltillo. Carta Edafológica 614C33 Escala 1:50000. México.
- Cowan, I.R. 1968. Mass, heat and momentum exchange between stands of plants and their atmospheric environmental. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* Vol. 94:523-544.

- Choudhury, B.J. and J.L. Monteith. 1988. A four layer model for the heat budget of homogeneous hard surfaces. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* Vol. 94:523-544.
- Denmead, O.T. 1964. Evaporation source and apparent diffusivities in a forest canopy. *Appl. Meteorol.* Vol. 3:383-389.
- , and R.H. Shaw. 1960. The effect of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn. *Agronomy Journal* 52: 272-274.
- de Wit, C.T. 1958. Transpiration and crop yields. Institute of Biological and Chemical Research on Fields Crops and Herbage. Wageningen. The Netherlands, Verso-Landbouw, order Z. No. 64. 6-S. Gravenhage.
- Doorenbos, J. and W.O. Pruitt. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage. Paper No. 24. Rome, Italy.
- , y A.H. Kassam. 1979. Efecto del agua sobre los cultivos. FAO. Riego y Drenaje 33. Roma. pp.
- Driessen, P.M. 1986. The water balance of soil. In. Modelling of agricultural production: weather, soils and crops (van Keulen, H. Wolf J. (Eds)). Simulations Monographs. Pp 76-115. Pudoc, Wageningen, Netherlands.
- Eavis, B.W. and H.M. Taylor. 1979. Transpiration of soybeans as related to leaf area, root length and soil water content. *Agronomy Journal.* Vol. 71:441-445.
- Eck, H.V. 1986. Effects of water deficits on yield, yield components, and water use efficiency of irrigated corn. *Agronomy Journal.* Vol. 78:1035-1040.
- Feyen, J.C. Belmans and D. Hillel. 1980. Comparison between measured and simulated plant water potential during soil water extraction by potted Ryegrass. *Soil Science.* Vol 129(3):180-185.

- Erere, M. and G.F. Popov. 1979. Agrometeorological crop monitoring and forecasting. FAO Plant Production and Protection. Pap. No. 17. Rome, Italy.
- Frey, N.M. 1982. Dry matter accumulation in kernels of maize Crop Sci. Vol. 21:118-122.
- Fuentes, M. O. A. y Martínez A. P. 1988. Introducción los métodos numéricos aplicados a la hidráulica Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. S.A.R.H México. 192 p.
- Gándara, R.E. 1989. Respuesta del maíz (Híbrido AN-430R) a diferentes niveles de sequía inducida, en tres etapas fenológicas del desarrollo. Tesis de Maestría. UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coah. México. 86 p.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Adaptado a las condiciones climáticas de la República Mexicana. Instituto de Geografía - UNAM. México. 264 p.
- Grant, R.F. 1989. Simulation of maize phenology. Agronomy Journal. Vol. 81:451-457.
- _____, B.S. Jackson, J.R. Kiniry and G.F. Arkin 1989. Water deficit timing effects on yield components in maize. Agronomy Journal. Vol. 81:61-65.
- Hansen, S. and H.E. Jensen. 1968. Spatial variability of soil water and evapotranspiration. Word Hydrology Vol. 17:261-268.
- Hall, W.A. y J.A. Dracup. 1974. Ingeniería de sistemas en recursos hidráulicos. Trad. de la Primera edición inglesa. C.E.C.S.A. México.
- Hanks, R.J. 1974. Model for predicting plant yield as influenced by water use. Agronomy Journal. Vol 66:660-665.
- _____, and R.W. Hill. 1980. Modeling crop responses to irrigation. In Relation to soils climate and salinity. Printed in Israel by Keterpress Enterprises, Jerusalem. 65 p.

- Hatfield, J.L. 1988. Research priorities in ET: Evolving Methods. TRANSACTIONS of the ASAE. Vol. 31(2):490-494.
- Hawley, M.E., T.J. Jackson and R.H. McCuen. 1983. Surface soil moisture variation on small agricultural watersheds. Journal of Hidrology. Vol. 62:179-200.
- Hayhoe, H. 1981. Analysis of diffusion model for plant root growth and aplication to plant soil water uptake. Soil Science. Vol. 131(6):334-343.
- Herkelrath, W.N., E.E. Miller and W.R. Gardner. 1977. A water uptake by plants: II The root contact model. Soil Science Society of American Journal. Vol. 41:1039-1044.
- Hillel, D. and H. Talpaz. 1976. Simulation of root growth and its effect on the pattern of soil water uptake by nonuniform root system. Soil Science. Vol. 121:307-312.
- Hodges, T. and E.T. Kanemasu. 1977. Modeling daily dry matter production of winter Wheat. Agronomy Journal. Vol. 69:974-978.
- Huck, M.G. and D. Hillel. 1983. A model of root growth and water uptake accounting for photosynthesis, respiration, transpiration and soil hydraulics. In Adv. Irrig. Vol. 2:273-278.
- Jagtap, S.S. and J.W. Jones. 1989. Evapotranspiration model for developing crops. TRANSACTIONS of the ASAE. Vol. 32(4):1342-1350.
- Jensen, M.E., D.C.N. Robb and C.E. Franzoy. 1970. Scheduling irrigation using climate-crop-soil data. J. Irrig. and Drain. Div. ASCE. Vol. 96:25-38.
- Kaliappa, R., S. Venkatachalam, K.M. Nachappan, K.V. Selvaja and S. Rajaran. 1976. Studies on water requerimient of maize. Field Crop Abstracts. Vol 30(3): 158. London.
- Kallsen, C.E., W.T. Sammis and E.J. Gregory. 1981. Water-use production functions of selected agronomic crops in Northwestern New Mexico. Phase I. Partial Technical Completion Report. New Mexico Water Resource Research Institute. N M C H 84 - 1

- Karlen, D.L., Sadler E. J. and Camp C.R. 1987. Dry matter nitrogen, phosphorus and potassium accumulation rate by corn on Norfolk loamy sand. *Agronomy Journal*. Vol 79:649-656.
- Keulen, H. Van. 1986. Production situations. I: Optimum supply of water, nitrogen and minerals. In: *Modelling of agricultural production: weather, soils and crop* (van Keulen, H. Wolf J. (Eds)). *Simulation Monographs*, Pudoc, Wageningen.
- and J. Wolf. 1986. *Modelling of Agricultural production weather, soils and crop*. *Simulation Monographs*. Pudoc, Wageningen, Netherlands. 474 p.
- Lascano, R.J., C.H.M. Van Bavel. J.L. Hatfield and D.R. Upchurch. 1987. Simulation and measurements of water use by cotton in a semiarid climate. *Soil Science Soc. Am. J.* Vol. 51:1113-1121.
- Mayaki, W.C., I.D. Teare and L.R. Stone. 1976. Top and root growth of irrigated and nonirrigated soybeans. *Crop Science*. Vol. 16(1):92-94.
- Molz, F.J. and I. Remson. 1971. Application of an extraction tem model to the study of moisture flow to plant roots. *Agronomy Journal*. Vol. 63:72-77.
- Monteith, J.L. 1965. Evaporation and environment. In *Fogg G.E. (Ed). The state and movement of water in living organisms*. Cambridge University Press. London.
- Naylor, H.T., J.L. Balintfy, S.D. Burdick and K. Chu. 1980. *Técnicas de simulación en computadoras*. Sexta reimpresión. Ed. LIMUSA. México. 390 p.
- Palacios, S.J.E. 1980. Respuesta del cultivo del maíz (*Zea mays* L.) a diferentes niveles de humedad en el suelo entre etapas fenológicas. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Chapingo. 76 p. México.
- Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Royal Soc. London Ser. A.* Vol. 193:120-145.

- _____, 1963. Vegetation and hidrology. Common wealt Boureau of soil. Harpenden, Technical Communications No. 53 124 p.
- Protopapas, A.L. and R.L. Bras. 1987. A model for wate uptake and development of root system. Soil Science Vol. 144:5(352-366).
- Ritchie, J. T. 1972. Model for predicting evaporation from row crop with incomplete cover. Water Resour. Re Vol. 8:1204-1213.
- _____. 1973. Influence of soil status a metorological conditions on evaporation from a co canopy. Agronomy Journal. Vol. 65:893-897.
- _____, and S. Otter. 1985. Description and performan of CERES-Wheat: A user-oriented wheat yield model. ARS wheat yield project. U.S.S. Dept. of Agricultur ARS-38.
- Rodriguez, G.M.A. 1985. Efecto del stress de humedad sobre desarrollo, rendimiento y evapotranspiración del ma (*Zea mays* L.). Tesis de Licenciatura. UAAA Buenavista, Saltillo, Coah. México.
- Robbins, J.S. and C.E. Domingo. 1953. Some effects of sever soil moisture deficits at specific growth stages i corn. Agronomy Journal. Vol. 45:618-621.
- Robinson, J.M. and K.G. Hubbard. 1990. Soil water assessme model for several crops in the high plain Agronomy Journal. Vol. 82:1141-1148.
- Rojas, G.M. 1972. Fisiología vegetal aplicada. Segund edición. Ed. McGraw-Hill. México. 120 p.
- Stewart, J.I., R.E. Danielson, R.J. Hanks, E.B. Jackson R.M. Hagan, W.O. Pruitt, W.T. Franklin, and J.P. Riley. 1977. Optimizing crop production throug control of water and salinity levels in the soil Utah Water Research Lab. PR 151-1. Logan, Utah. 19 p.

- _____, R.D. Misra, W.O. Pruitt, and R.M. Hagan
1975. Irrigations corn and grain sorghum with
deficit water supply. TRANSACTIONS of the ASAE. Vc
18(2): 270-280.
- Stinson, D.L, G.F. Arkin, T.A. Homel, C.W. Richardson an
J.R. Williams. 1981. Modeling grain sorghum rate o
cropping and associated runoffsediments losses
TRANSACTIONS of the ASAE. Vol 24(3): 631-635.
- Shuttleworth, W.J. and J.S. Wallace. 1985. Evaporation fro
sparse crpos-An energy combination theory. Quarte J
Roy. Met. Soc. Vol. 111:838-855.
- Tanner, C.B. and M.A. Jury. 1976. Estimating evaporation a
transpiration from a row crop during incomplete cove
Agronomy Journal. Vol. 61:239-243.
- Tollenar, M. and T.W. Bruulsema. 1988. Efficiency of maiz
dry matter production during periods of complete lea
area expansion. Agronomy Journal. Vol. 80:580-585.
- Tollner, E.W. and F.J. Molz. 1983. Simulating plant wate
uptake in moisture ligher texture soils
TRANSACTIONS of the ASAE. Vol 27(4): 1027-1033.
- Troxler Electronics Inc., 1983. Depth moisture gauges. Mode
3320. First Edition. Research Triangle Park, N.C
27709 U.S.A. 47 p.
- Vanderlip, R.L. and G.F. Arkin. 1977. Simulating accumulati
and distribution of dry matter in grain Sorghu
Agronomy Journal. Vol. 69: 917-923.
- Villalobos, F.J. and E. Fereres. 1990. Evaporatio
mesurements beneath corn, cotton, and sunflowe
canopies. Agronomy Journal. Vol. 82:1153-1159.
- Villalpando, I.F. 1985. Metodología de la investigación e
agroclimatología. Documento de circulación interna
Instituto Nacional de Investigaciones Agrícola:
(INIA). S.A.R.H. México. 183 p.
- Waggoner, P.E. 1984. Agriculture and carbon dioxide. Am. Sc:
Vol. 72:171-184.

_____, and W.E. Reifsnyder. 1968. Simulation of the temperature, humidity and evaporation profiles in a leaf canopy. *J. Apply. Meteorol.* Vol. 7:400-409.

Wilkerson, G.G., J.W. Jones, K.J. Boote, K.T. Ingram and J.W. Mishoe. 1981. *Proc. ASAE Pap.* 81-4014.

Whisler, F.D., B. Acock, D.N. Baker, R.E. Fye, H.F. Hodges, J.R. Lambert, H.E. Lemmon, J.M. McKinion and V.R. Reddy. 1986. Crop simulation models in agronomic systems. *Advances in Agronomy.* Vol. 40:141-208.

A P E N D I C E A

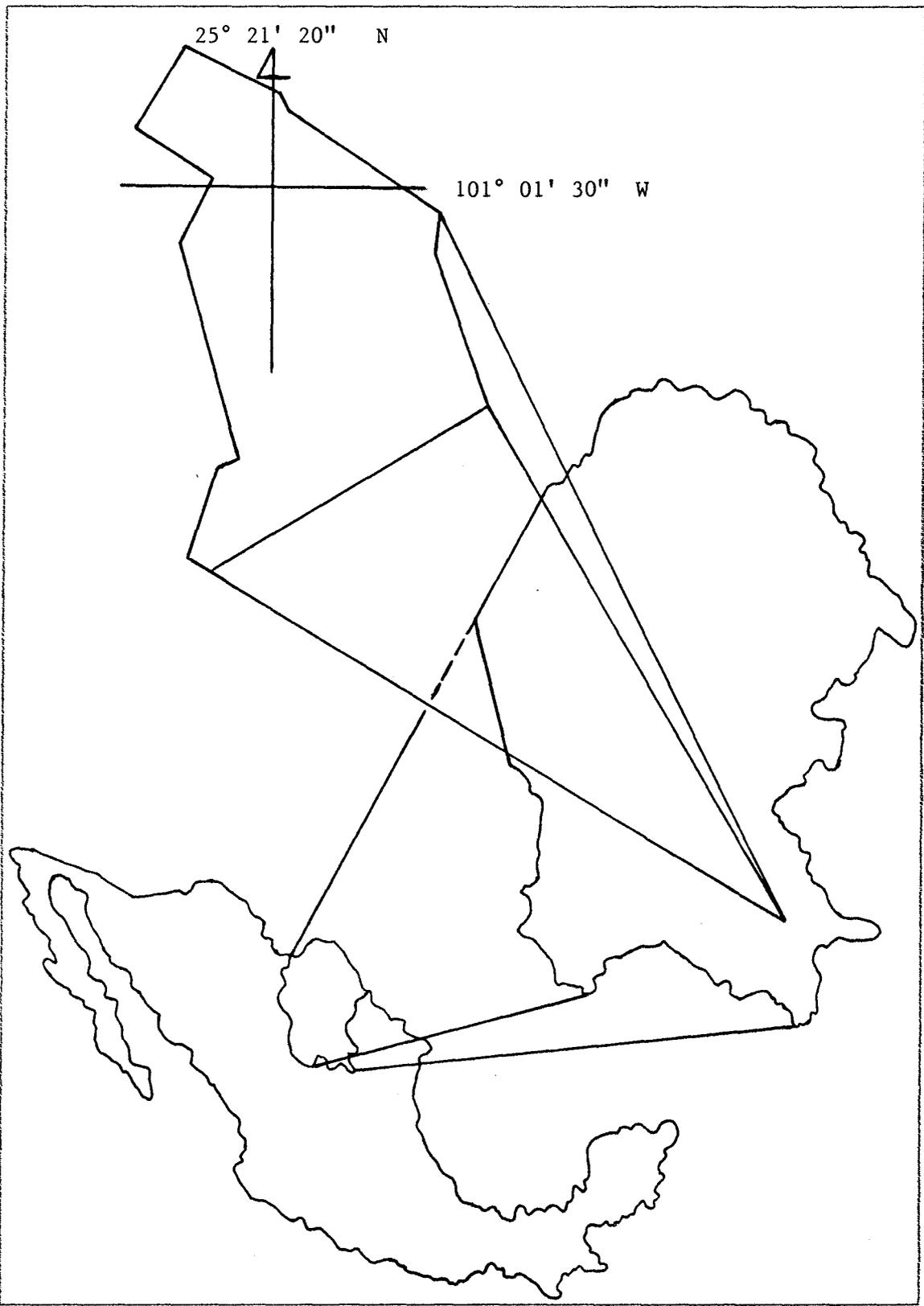


Figura A.1. Localización geográfica del sitio experimental donde se realizó el experimento de campo. UAAAN 1991.

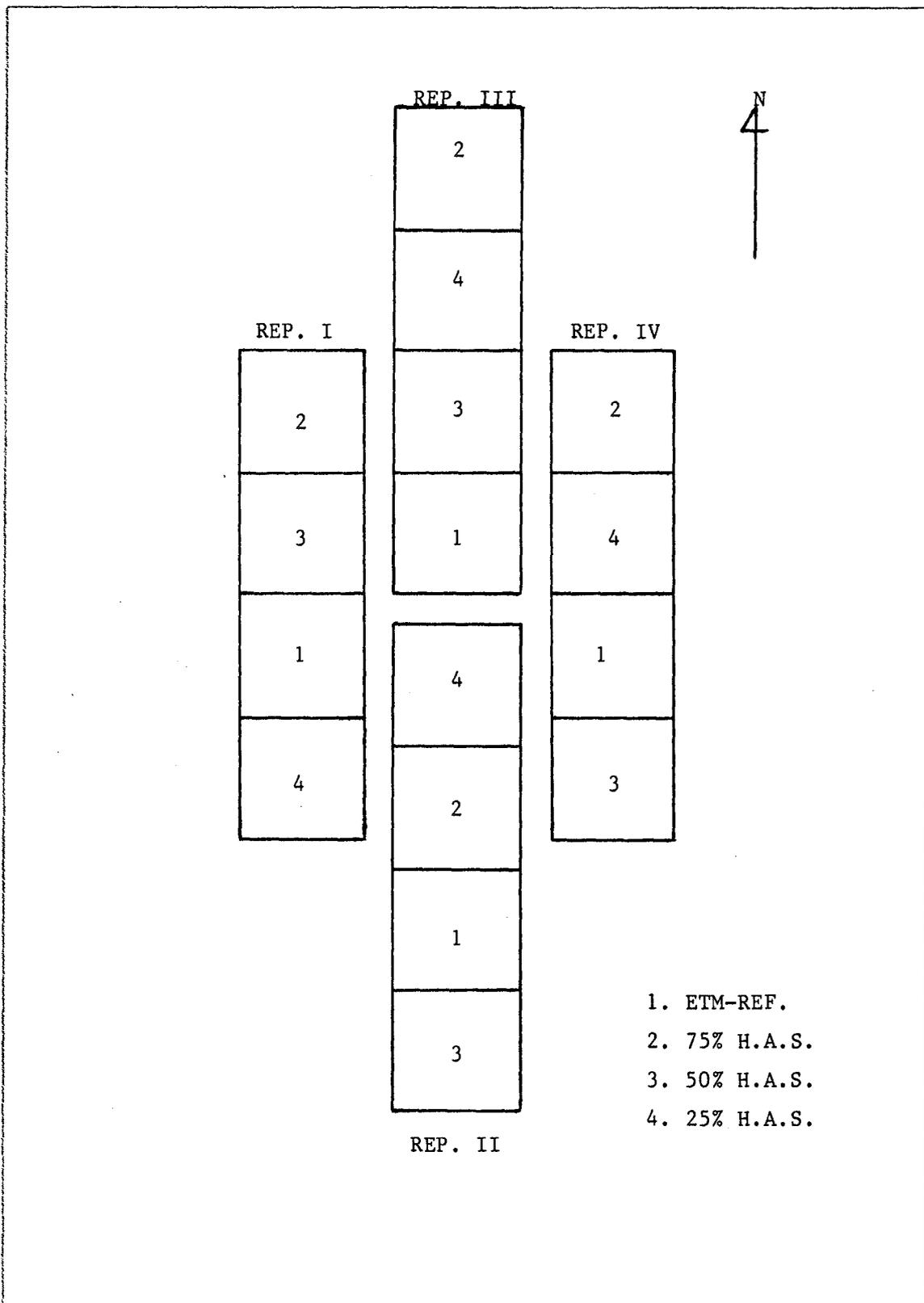


Figura A.2. Croquis de la distribución de los tratamientos de humedad del suelo evaluados. UAAAN 1991.

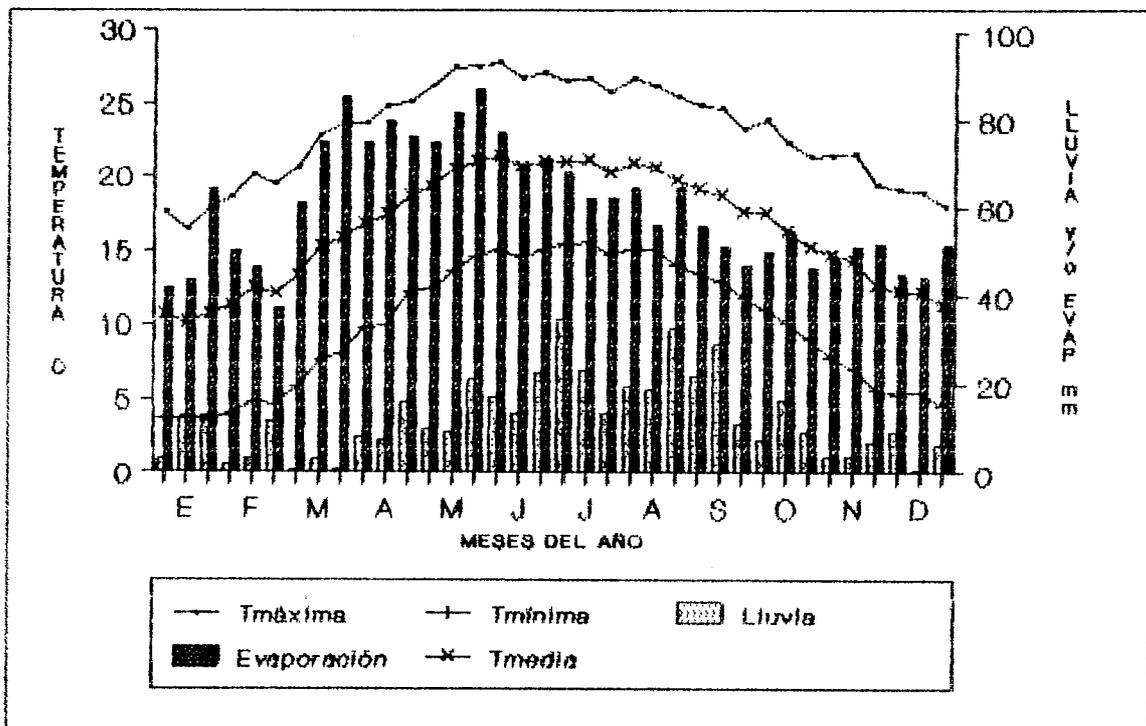


Figura A.3. Climograma de la estación meteorológica de Buenavista, Saltillo, Coahuila, del período 1980-1991. UAAAN 1991.

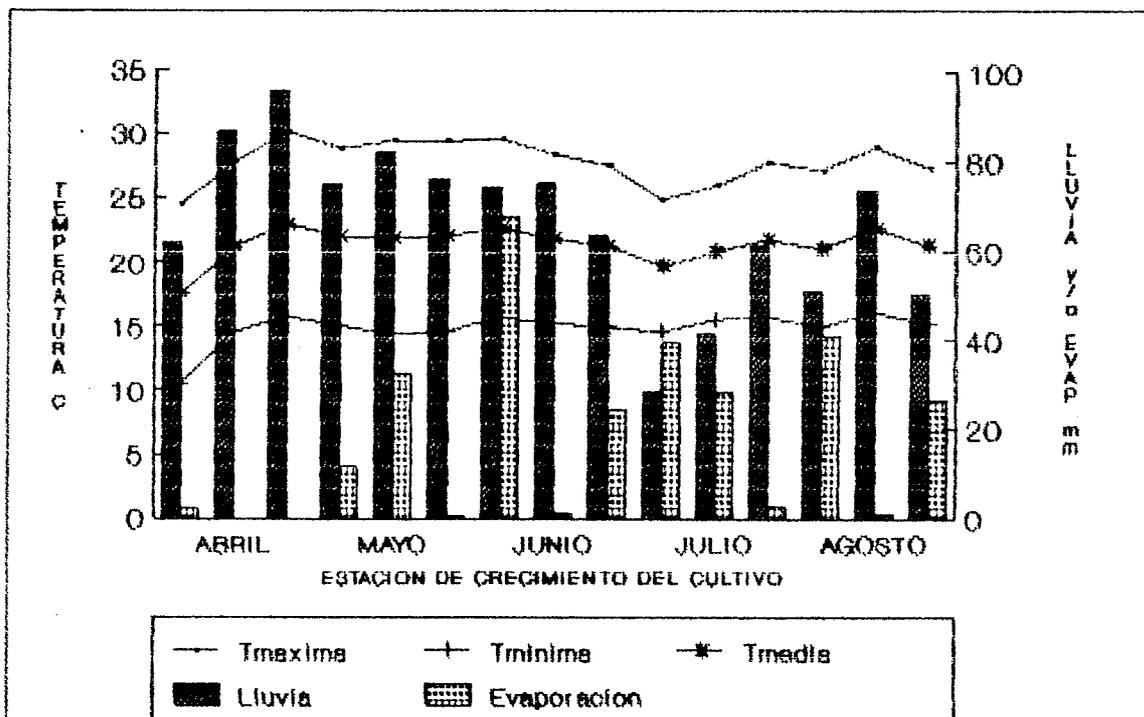


Figura A.4. Condiciones climáticas prevalecientes durante el ciclo de crecimiento del maíz. UAAAN 1991.

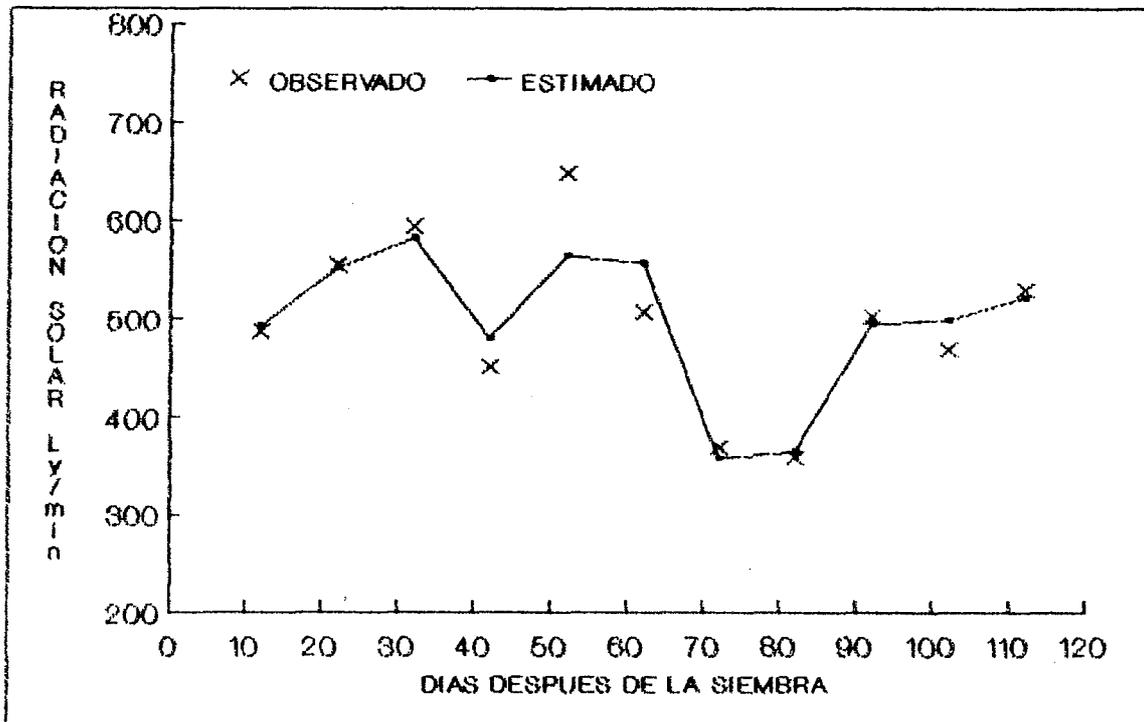


Figura A.4. Radiación solar medida y estimada para el período de crecimiento del cultivo. UAAAN 1991.

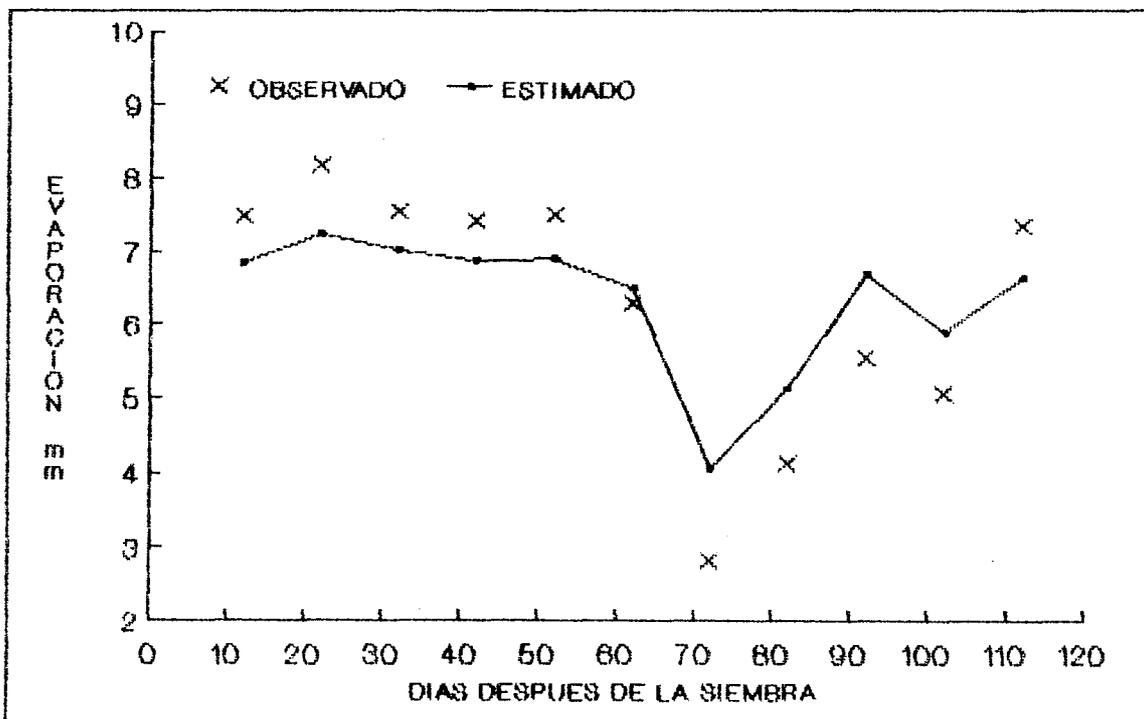


Figura A.6. Evaporación potencial de una superficie de agua libre medida y estimada para el período de crecimiento del cultivo. UAAAN 1991.

Cuadro A.1. información climatológica mensual promedio de 1980 a 1990 de la estación de Buenavista, Saltillo, Coah. UAAAN 1991.

MES	Temperatura (°C)			Lluvia (mm)	Evaporación (mm)
	Máxima	Mínima	Media		
ENERO	17.29	3.70	10.50	28.14	148.75
FEBRERO	19.43	4.48	11.96	16.96	133.33
MARZO	22.42	7.21	14.81	4.40	220.96
ABRIL	24.56	10.73	17.64	31.06	230.23
MAYO	27.10	13.57	20.34	40.13	242.62
JUNIO	27.29	14.92	21.11	53.55	217.86
JULIO	26.46	15.32	20.89	71.67	191.69
AGOSTO	26.26	14.80	20.53	70.86	184.59
SEPTIEMBRE	24.36	12.80	18.58	62.56	153.65
OCTUBRE	22.72	10.17	16.44	32.68	151.05
NOVIEMBRE	21.04	6.91	13.97	14.53	151.55
DICIEMBRE	18.81	5.17	11.99	15.99	140.62
ANUAL	23.14	9.98	16.56	442.53	2166.91

Fuente: Departamento de Agrometeorología UAAAN 1991.

Cuadro A.2. Análisis físico químico del suelo donde se estableció el experimento. UAAAN 1991.

Características Físico-químicas	Estratos del perfil (cm)				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Materia orgánica (%)	5.20	5.30	4.90	5.80	5.90
Nitrógeno Aprov. (%)	0.26	0.26	0.24	0.29	0.29
Fósforo Aprov. kg/ha	64.50	67.00	38.00	48.10	48.10
Potasio Inter. kg/ha	337.00	382.00	81.00	13.00	81.00
pH	8.68	8.62	8.12	8.27	8.54
Carb. tot. (meq lt ⁻¹)	23.80	23.20	26.40	37.30	23.20
C.E. (mmhos cm ⁻¹)	0.75	0.87	0.55	0.61	0.61
PSI (%)	2.10	1.44	1.50	1.60	1.54
CC (%)	31.93	32.27	35.60	37.97	38.97
PMP (%)	18.79	19.35	21.97	21.56	24.04
Da (gr cm ⁻³)	0.98	1.06	1.17	1.38	1.01
Arena (%)	28.00	30.00	26.00	34.00	14.00
Limo (%)	34.80	30.80	32.80	36.80	48.80
Arcilla (%)	37.20	39.20	41.20	29.20	37.20
Textura	1	1	1	1	2

Fuente: Laboratorio de Salinidad y Calidad de Aguas. Departamento de Riego y Drenaje UAAAN 1991.

1: Migajón arcilloso.

2: Arcilloso.

Cuadro A.3. Distribución del riego y lluvia a nivel decenal durante el ciclo de crecimiento del maíz. UAAAN 1991.

Decena del Año	Láminas de riego aplicadas (mm)				Lluvia mm
	REF-ETM	75% H.A.S.	50% H.A.S.	25% H.A.S.	
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
13	0.0	0.0	0.0	0.0	11.40
14	0.0	0.0	0.0	0.0	32.70
15	138.07	103.07	103.07	92.63	0.30
16	35.0	113.04	80.60	0.0	67.60
17	35.0	0.0	0.0	0.0	1.00
18	80.85	84.47	75.10	109.75	24.20
19	0.0	0.0	0.0	0.0	39.30
20	0.0	0.0	0.0	0.0	28.10
21	107.34	55.40	80.85	0.0	2.60
22	0.0	52.87	0.0	110.10	40.70
23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.80
TOTAL	396.26	405.85	339.62	342.48	248.70

Cuadro A.4. Requerimientos de calor (grados día) por tratamiento en función de la fecha de siembra, para los niveles de humedad evaluados. UAAAN 1991.

Tratamiento	Etapas Fenológicas			
	E	FM	EL	MF
ETM-REF	105	722	1002	1347
75% H.A.S.	105	770	1023	1323
50% H.A.S.	105	747	1022	1323
25% H.A.S.	105	782	1081	1347

* Se consideró una temperatura base de 10 °C.

E Emergencia, FM floración masculina, EL estado lechoso y MF madurez fisiológica.

Cuadro A.5. Contenido de humedad promedio en base volumen para el estrato 0 - 20 cm de profundidad, durante el ciclo de cultivo. UAAAN 1991.

DDS	ETM-REF	75% H.A.S.	50% H.A.S.	25% H.A.S.
7	25.15	24.09	25.19	24.69
9	27.31	22.82	26.28	29.10
14	28.88	27.09	28.56	28.09
16	30.95	28.23	28.01	28.66
21	32.46	29.40	30.31	30.89
26	29.50	29.86	29.22	27.75
30	38.40a	38.36a	39.21a	26.16b
32	35.12a	35.58a	35.96a	26.42b
35	36.29a	32.56ab	30.43b	23.12c
39	31.94b	28.86c	28.23c	38.50a
43	35.34b	39.35a	22.32d	31.43c
47	40.35bc	41.96ab	43.19a	38.50c
50	34.58b	37.39a	37.74a	34.45b
53	32.46a	35.18a	35.64a	31.54b
56	38.18a	29.46b	28.56bc	25.54c
60	31.64a	25.36b	25.64b	23.70b
65	37.01	35.30	36.21	37.27
67	40.59	37.80	39.39	40.35
70	36.75	34.23	36.95	37.21
74	38.40	36.55	38.62	37.45
77	38.86	37.35	37.84	37.88
81	39.00	39.25	43.41	37.66
84	37.64	39.43	39.55	39.39
87	32.70	32.48	31.82	31.82
91	40.51a	40.88a	30.81b	30.93b
95	34.31a	35.26a	28.11b	27.03b
98	38.26a	31.88b	38.52a	25.48c
102	33.57ab	35.46a	32.32b	36.47a
106	39.35	38.44	38.32	40.33
109	37.01b	36.47b	36.43b	41.42a
113	31.17	31.74	29.48	31.50
116	30.31	30.85	28.03	27.79
119	27.45	26.42	26.42	26.95

Medias seguidas por la misma literal son estadísticamente iguales al 0.05 de probabilidad, leídas en forma horizontal. DDS Días después de la siembra.

Cuadro A.6. Contenido de humedad promedio en base volumen para el estrato 20 - 40 cm de profundidad, durante el ciclo de cultivo. UAAAN 1991.

DDS	ETM-REF	75% H.A.S.	50% H.A.S.	25% H.A.S.
7	37.92	35.70	37.51	36.99
9	37.45	35.34	38.18	35.98
14	36.87	35.36	37.23	35.22
16	37.13	34.58	37.05	34.86
21	37.96	35.78	38.36	35.98
26	37.13	34.72	36.85	34.66
30	40.88ab	37.98b	41.56a	32.76c
32	39.63a	38.00a	40.19a	33.45b
35	39.59a	36.81a	38.24a	31.94b
39	37.03ab	33.91b	33.31b	40.39a
43	35.78b	41.24a	31.09c	37.01b
47	40.86b	43.09a	44.44a	40.29b
50	37.31	39.00	40.51	35.72
53	35.70	36.95	38.72	35.40
56	36.61a	33.89a	34.35a	30.89b
60	34.90a	31.62b	32.80ab	29.80b
65	38.42	36.49	38.82	39.41
67	40.74	38.50	41.90	42.27
70	39.77	37.70	40.05	39.31
74	37.84	35.98	38.40	38.32
77	39.00	38.06	39.93	39.23
81	37.23	38.44	41.44	40.88
84	38.50	36.51	39.81	38.64
87	35.76	35.74	36.75	36.75
91	40.61a	40.90a	35.72b	35.30b
95	38.00a	38.38a	32.48b	32.10b
98	40.62a	35.82b	41.20a	30.67c
102	37.43	37.90	36.65	40.27
106	38.64	40.29	41.12	41.72
109	38.18	40.59	38.90	42.79
113	34.09	34.88	34.58	35.52
116	34.07	33.53	33.15	34.35
119	29.84	32.08	32.26	31.48

Medias seguidas por la misma literal son estadísticamente iguales al 0.05 de probabilidad, leídas en forma horizontal. DDS Días después de la siembra.

Cuadro A.7. Contenido de humedad promedio en base volumen para el estrato 40 - 60 cm de profundidad, durante el ciclo de cultivo. UAAAN 1991.

DDS	ETM-REF	75% H.A.S.	50% H.A.S.	25% H.A.S.
7	36.93	34.76	37.23	33.15
9	37.51a	34.07ab	37.45a	32.72b
14	37.21	34.76	37.45	33.79
16	35.52	34.51	36.79	32.42
21	36.59	34.64	37.64	33.03
26	36.87	34.31	37.98	33.45
30	39.37a	36.57ab	40.31a	33.41b
32	37.72ab	37.33b	40.41a	33.25c
35	38.12ab	36.31b	40.33a	32.62c
39	37.51	35.78	38.44	37.51
43	36.95	37.47	36.21	35.86
47	38.52bc	39.95ab	43.09a	36.27c
50	37.07b	37.56ab	40.57a	35.14b
53	34.11b	37.31a	38.94a	34.41b
56	35.68	35.40	37.23	33.35
60	35.26	34.27	36.85	31.88
65	37.27	34.60	37.90	35.32
67	37.70	37.35	40.21	36.31
70	38.48	36.36	39.33	36.93
74	36.25	35.08	37.94	35.30
77	36.81	35.54	38.12	35.74
81	38.52	36.45	40.01	38.80
84	37.17	36.19	38.82	35.46
87	36.25	35.40	37.84	37.94
91	38.46	38.10	37.86	34.62
95	37.01	36.41	35.54	33.19
98	38.82ab	35.32bc	40.11a	32.68c
102	36.02	35.90	37.92	37.03
106	35.82	36.47	38.10	38.38
109	38.46	40.70	39.71	37.86
113	35.28	35.36	35.70	35.52
116	34.70	34.13	35.76	35.14
119	33.23	32.36	34.19	33.13

Medias seguidas por la misma literal son estadísticamente iguales al 0.05 de probabilidad, leídas en forma horizontal. DDS Días después de la siembra.

Cuadro A.8. Contenido de humedad promedio en base volumen para el estrato 60 - 80 cm de profundidad, durante el ciclo de cultivo. UAAAN 1991.

DDS	ETM-REF	75% H.A.S.	50% H.A.S.	25% H.A.S.
7	35.64	34.90	34.31	32.98
9	35.94	35.76	34.39	32.70
14	35.98	35.06	35.04	33.11
16	35.20	35.16	34.03	30.69
21	35.50	33.75	35.62	32.80
26	35.06	35.40	35.62	33.17
30	36.73	37.11	39.02	32.22
32	36.63	37.47	39.61	33.01
35	36.11	36.89	39.63	33.19
39	36.09	36.97	37.90	36.45
43	35.36	38.06	36.65	35.56
47	35.20b	41.02a	42.00a	35.80b
50	33.89b	39.25a	39.00a	34.51b
53	34.92	42.00	38.38	33.63
56	33.73	37.25	37.62	32.84
60	34.03	36.91	35.30	32.08
65	34.98	35.84	36.95	32.00
67	35.96	37.84	37.74	33.77
70	36.07	36.67	38.04	34.86
74	34.41	36.65	36.79	33.87
77	33.97	35.92	35.76	33.51
81	34.60	36.83	36.31	34.98
84	34.80	36.93	35.84	34.70
87	33.75	37.05	35.50	35.50
91	35.48	38.98	36.69	35.16
95	33.91	37.51	34.47	33.17
98	35.98	37.47	35.88	32.80
102	33.51	36.51	35.88	35.98
106	33.07	36.51	34.39	36.81
109	36.77	42.61	38.04	37.74
113	33.43	35.92	34.21	35.22
116	32.40	36.21	33.45	35.00
119	30.99	34.27	34.31	33.35

Medias seguidas por la misma literal son estadísticamente iguales al 0.05 de probabilidad, leídas en forma horizontal. DDS Días después de la siembra.

Cuadro A.9. Contenido de humedad promedio en base volumen para el estrato 80 - 100 cm de profundidad, durante el ciclo de cultivo. UAAAN 1991.

DDS	ETM-REF	75% H.A.S.	50% H.A.S.	25% H.A.S
7	36.69	36.33	34.21	31.68
9	36.65	36.55	34.56	32.08
14	36.11	36.61	34.09	32.46
16	36.59	35.79	34.49	31.41
21	36.95	36.53	26.26	31.72
26	36.25	36.17	35.14	32.32
30	37.05	37.88	39.02	31.58
32	38.14a	39.15a	38.00a	32.64b
35	36.67a	37.91a	39.25a	31.41b
39	37.39	37.33	37.29	36.47
43	36.39	37.99	36.63	35.22
47	35.74b	39.37ab	41.88a	34.23b
50	35.26b	36.93b	39.25a	34.03b
53	35.08b	39.04a	38.04a	34.49b
56	27.19	36.51	37.19	33.33
60	35.36	37.22	36.61	32.76
65	35.16	35.23	35.76	30.31
67	37.33	37.06	37.43	32.74
70	36.31	36.88	36.91	33.05
74	36.49	36.16	35.90	32.99
77	35.94a	36.08a	35.54a	32.28b
81	34.58	36.05	35.32	32.56
84	35.64	35.98	36.45	33.27
87	35.70	35.76	35.56	35.56
91	36.59	37.06	35.94	33.37
95	35.60	36.11	34.33	32.86
98	36.33	36.27	35.00	32.46
102	35.12	35.68	33.93	34.01
106	34.66	35.31	34.52	34.72
109	37.66	41.35	35.06	35.96
113	34.74	27.75	34.33	34.17
116	34.03	35.50	33.33	33.83
119	30.83	34.78	32.86	32.50

Medias seguidas por la misma literal son estadísticamente iguales al 0.05 de probabilidad, leídas en forma horizontal. DDS Días después de la siembra.

Cuadro 4.10. Índice de área foliar promedio por planta observado en campo, expresado en $m^2 m^{-2}$, durante el ciclo del maíz. UAAAN 1991.

DDS	ETM-REF	75% H.A.S.	50% H.A.S.	25% H.A.S.
9	0.015	0.016	0.014	0.016
15	0.046	0.051	0.043	0.043
22	0.139	0.140	0.160	0.143
30	0.702	0.583	0.612	0.583
37	0.991	0.710	0.937	0.596
43	2.066	1.887	1.931	1.626
50	2.593	2.163	2.352	1.822
57	2.254	1.824	2.111	1.939
64	2.399	2.297	2.763	2.113
71	2.753	2.886	3.104	2.526
78	2.602	2.788	2.417	2.561
85	2.574	2.592	2.396	2.237
92	2.201	2.198	2.408	1.923
99	2.033	1.618	2.468	2.297
106	2.623	2.117	2.358	2.043
113	1.592	1.671	1.736	1.484
119	1.337	1.134	1.573	1.179

DDS Días después de la siembra.

Cuadro A.11. Cuadrados medios y nivel de significancia del ANVA de regresión polinomial de segundo orden para las variables de acumulación de materia seca evaluadas en el tratamiento ETM-REF. UAAAN 1991.

Fuente de variación	g.l.	Cuadrados Medios				
		Raíz	Tallo	Hojas	Mazorca	Total
Regresión	2	262.4**	106.2**	116.9**	159.7**	112.4**
Error	15	10.1	1.5	1.7	2.4	1.0
Total	17					

** Significativo al 0.01 de probabilidad.

Cuadro A.12. Cuadrados medios y nivel de significancia del ANVA de regresión polinomial de segundo orden para las variables de acumulación de materia seca evaluadas en el tratamiento 75 por ciento de humedad aprovechable en el suelo. UAAAN 1991.

Fuente de variación	g.l.	Cuadrados Medios				
		Raíz	Tallo	Hojas	Mazorca	Total
Regresión	2	247.0**	104.0**	109.7**	148.9**	103.3**
Error	15	10.0	1.9	1.2	2.6	0.7
Total	17					

** Significativo al 0.01 de probabilidad.

Cuadro A.13. Cuadrados medios y nivel de significancia del ANVA de regresión polinomial de segundo orden para las variables de acumulación de materia seca evaluadas en el tratamiento 50 por ciento de humedad aprovechable en el suelo. UAAAN 1991.

Fuente de variación	g.l.	Cuadrados Medios				
		Raíz	Tallo	Hojas	Mazorca	Total
Regresión	2	314.5**	107.4**	115.8**	188.9**	114.9**
Error	15	11.3	1.5	1.1	0.9	0.5
Total	17					

** Significativo al 0.01 de probabilidad.

Cuadro A.14. Cuadrados medios y nivel de significancia de ANVA de regresión polinomial de segundo orden par las variables de acumulación de materia sec evaluadas en el tratamiento 25 porciento de humeda aprovechable en el suelo. UAAAN 1991.

Fuente de variación	g.l.	Cuadrados Medios				
		Raíz	Tallo	Hojas	Mazorca	Total
Regresión	2	157.2**	81.0**	96.4**	146.9**	89.7**
Error	15	6.2	1.6	1.3	2.1	0.9
Total	17					

** Significativo al 0.01 de probabilidad.

Cuadro A.15. Polinomios de segundo grado para el peso sec de raíz expresado en gr planta⁻¹ para los niveles d humedad evaluados. UAAAN 1991.

Tratamiento	Modelo	R ²
ETM-REF	$-2.7718 + 0.2266X - 0.0007X^2$	0.78
75% H.A.S.	$-4.9901 + 0.2497X - 0.0008X^2$	0.77
50% H.A.S.	$-4.1013 + 0.2050X - 0.0003X^2$	0.79
25% H.A.S.	$-5.1631 + 0.2753X - 0.2753X^2$	0.77

X = Días después de la siembra.

Cuadro A.16. Polinomios de segundo grado para el peso sec de tallo expresado en gr planta⁻¹ para los niveles d humedad evaluados. UAAAN 1991.

Tratamiento	Modelo	R ²
ETM-REF	$-28.3601 + 1.492X - 0.004X^2$	0.90
75% H.A.S.	$-33.6277 + 1.734X - 0.006X^2$	0.88
50% H.A.S.	$-30.3699 + 1.584X - 0.005X^2$	0.91
25% H.A.S.	$-31.4153 + 1.615X - 0.006X^2$	0.87

X = Días después de la siembra.

Cuadro A.17. Polinomios de segundo grado para el peso seco de hojas expresado en gr planta^{-1} para los niveles de humedad evaluados. UAAAN 1991.

Tratamiento	Modelo	R^2
ETM-REF	$-13.2818 + 0.877X - 0.0044X^2$	0.90
75% H.A.S.	$-14.2063 + 0.897X - 0.0047X^2$	0.93
50% H.A.S.	$-13.1428 + 0.862X - 0.0043X^2$	0.94
25% H.A.S.	$-12.9967 + 0.818X - 0.0042X^2$	0.91

X = Días después de la siembra.

Cuadro A.18. Polinomios de segundo grado para el peso seco de mazorca expresado en gr planta^{-1} para los niveles de humedad evaluados. UAAAN 1991.

Tratamiento	Modelo	R^2
ETM-REF	$-471.962 + 9.634X - 0.036X^2$	0.95
75% H.A.S.	$-298.425 + 5.695X - 0.015X^2$	0.94
50% H.A.S.	$-338.136 + 6.255X - 0.017X^2$	0.98
25% H.A.S.	$-492.257 + 10.022X - 0.034X^2$	0.95

X = Días después de la siembra.

Cuadro A.19. Polinomios de segundo grado para el peso seco total por planta expresado en gr planta^{-1} para los niveles de humedad evaluados. UAAAN 1991.

Tratamiento	Modelo	R^2
ETM-REF	$-44.015 + 1.842X + 0.0094X^2$	0.94
75% H.A.S.	$-44.605 + 1.848X + 0.0084X^2$	0.95
50% H.A.S.	$-34.502 + 1.318X + 0.0134X^2$	0.97
25% H.A.S.	$-46.174 + 1.901X + 0.0065X^2$	0.93

X = Días después de la siembra.

Cuadro A.20. Cuadrados medios y nivel de significancia de ANVA de regresión polinomial de segundo orden para la fracción por órgano en el incremento de materia seca en el tratamiento ETM-REF. UAAAN 1991.

Fuente de variación	g.l	Cuadrados Medios		
		Raíz	Tallo	Hojas
Regresión	2	0.0161NS	0.2617**	0.2297**
Error	6	0.0087	0.0049	0.0128
Total	8			

NS No significativo.

** Significativo al 0.01 de probabilidad.

Cuadro A.21. Cuadrados medios y nivel de significancia de ANVA de regresión polinomial de segundo orden para la fracción por órgano en el incremento de materia seca en el tratamiento 75 por ciento de humedad aprovechable en el suelo. UAAAN 1991.

Fuente de variación	g.l	Cuadrados Medios		
		Raíz	Tallo	Hojas
Regresión	2	0.0386NS	0.2791**	0.2077**
Error	6	0.0095	0.0012	0.0095
Total	8			

NS No significativo.

** Significativo al 0.01 de probabilidad.

Cuadro A.22. Cuadrados medios y nivel de significancia de ANVA de regresión polinomial de segundo orden para la fracción por órgano en el incremento de materia seca en el tratamiento 50 por ciento de humedad aprovechable en el suelo. UAAAN 1991.

Fuente de variación	g.l	Cuadrados Medios		
		Raíz	Tallo	Hojas
Regresión	2	0.0324NS	0.2728**	0.2177**
Error	6	0.0088	0.0055	0.0158
Total	8			

NS No significativo.

** Significativo al 0.01 de probabilidad.

Cuadro A.23. Cuadrados medios y nivel de significancia del ANVA de regresión polinomial de segundo orden para la fracción por órgano en el incremento de materia seca en el tratamiento 25 por ciento de humedad aprovechable en el suelo. UAAAN 1991.

Fuente de variación	g.l	Cuadrados Medios		
		Raíz	Tallo	Hojas
Regresión	2	0.0207NS	0.2945**	0.2272**
Error	6	0.0070	0.0022	0.0114
Total	8			

NS No significativo.

** Significativo al 0.01 de probabilidad.

Cuadro A.24. Polinomios de segundo grado para la fracción de incremento en el peso seco de la raíz para los niveles de humedad evaluados. UAAAN 1991.

Tratamiento	Modelo	R ²
ETM-REF	$0.2535 - 0.6574X + 0.4948X^2$	0.58
75% H.A.S.	$0.3320 - 0.8937X + 0.6334X^2$	0.58
50% H.A.S.	$0.3180 - 0.9067X + 0.6783X^2$	0.55
25% H.A.S.	$0.2648 - 0.6712X + 0.4855X^2$	0.50

X = Etapa de desarrollo (emergencia a antesis $0 \leq X \leq 1$).

Cuadro A.25. Polinomios de segundo grado para la fracción de incremento en el peso seco del tallo para los niveles de humedad evaluados. UAAAN 1991.

Tratamiento	Modelo	R ²
ETM-REF	$0.3117 - 0.4806X + 1.0639X^2$	0.95
75% H.A.S.	$0.3130 - 0.4718X + 1.1374X^2$	0.99
50% H.A.S.	$0.2696 - 0.3124X + 0.9636X^2$	0.94
25% H.A.S.	$0.2466 - 0.2448X + 0.9698X^2$	0.98

X = Etapa de desarrollo (emergencia a antesis $0 \leq X \leq 1$).

Cuadro A.26. Polinomios de segundo grado para la fracción de incremento en el peso seco de las hojas para los niveles de humedad evaluados. UAAAN 1991.

Tratamiento	Modelo	R ²
BTM-REF	$0.4347 + 1.1380X - 1.5587X^2$	0.86
75% H.A.S.	$0.3551 + 1.3655X - 1.7708X^2$	0.88
50% H.A.S.	$0.4124 + 1.2191X - 1.2191X^2$	0.82
25% H.A.S.	$0.4886 + 0.9160X - 1.4553X^2$	0.87

X = Etapa de desarrollo (emergencia a antesis $0 \leq X \leq 1$).

Cuadro A.27. Coeficientes de variación para los muestreos de planta realizados durante el ciclo de maíz. UAAAN 1991.

DDS	Raíz	Tallo	Hojas	Mazorca	Total
9	33.37	24.25	29.11		22.06
15	26.18	21.58	21.38		12.53
22	25.26	19.72	34.32		19.93
30	22.29	34.41	25.02		25.72
37	29.25	14.96	17.40		15.37
43	27.30	29.37	13.88		24.08
50	28.49	22.15	17.26		20.04
57	32.74	13.23	8.61		10.70
64	35.19	22.61	19.99	36.66	30.69
71	31.78	19.94	15.56	33.10	33.82
78	33.10	12.08	10.45	34.95	35.88
85	33.52	14.13	17.38	16.12	18.71
92	37.64	17.51	16.97	24.91	21.15
99	31.11	17.37	15.12	12.78	11.65
106	28.43	12.65	18.94	29.25	26.74
113	35.38	17.65	17.85	11.62	11.15
119	29.81	16.24	9.43	22.98	10.70
125	29.17	16.51	21.45	20.32	20.90
\bar{X}	30.56	19.24	18.34	24.27	20.66

1 A.F. Área foliar por planta.

2 IAF Índice de área foliar por planta.

A P E N D I C E B

```

Program Modelo_Maiz;

Uses
  Funcion, Rutina, Crt, Printer;

const
  TCR      = 15.00;    { Tasa de crecimiento de la raíz de
                       emergencia a antesis }

  CEAF     = 18E-4;   { Constante específica de área
                       foliar para maíz expresado en m2/m2/kg de ms de
                       hojas}

  T_base   = 10.0;    { Temperatura base para el
                       crecimiento del maíz }

  max      = 20;

  Imay     = #73;     { Imay }
  Imin     = #105;    { Imin }
  Pmay     = #80;     { Pmay }
  Pmin     = #112;    { Pmin }
  Smay     = #83;     { Smay }
  Smin     = #115;    { Smin }
  Nmay     = #78;     { Nmay }
  Nmin     = #110;    { Nmin }
  Pitido   = 07;

type
  Resultados_Modelo = record

    periodo      : integer;
    dias         : integer;
    Temp, PP, Riego, Fgss, ETp, E,
    EDV, PGAS, DR, INF, Ema, Eaa,
    Tma, Taa, DSS, SSRR, SStt, dMra,
    dWra, Wra, SMra, Sra, Kra, Wra,
    AGAS, MRES, ASAGG, DMII, FRR,
    IWRTT, WRTT, FLL, IWLVV, DWLVV,
    WLDD, WLVV, FSS, IWSTT, WSTT,
    FGG, IWGRR, WGRR, LAI, TADWW,
    TWD, TWDLL, TDWDD, TSUMAA      : real

    end; {Resultados_Modelo}

  Datos_Salida   = Array #1..maxA of Resultados_Modelo;

  String25       = String #25A;

var
  Year,      mesSiembra,      diaSiembra,      mesEmergencia,
  diaEmergencia, mesAntesis, diaAntesis, mesMadurez, deln,
  diaMadurez, deFin, ndpp, ndde, nddias, decena, contador,
  nddAntesis, nddMadurez, decenaAntesis, j, k,
  nddEmergencia      : integer;

```

```

SMo, ce, So, Ab, S_Max, Ko, a, alfa, Ie, I, Latitud, Ep,
Emer, Antesis, Madurez, IAF, ETo, Rnl, Ko, P, IM, TSUM, Egs,
DVS, PGASS, RD, SSt, DS, SSR, Km, Ka, SMcc, SMpmp, Fi, SMr,
WRT, WST, WLW, WGR, Tm, T, dMr, Pr, dWr, Wr, Sr, Kr, Wnr,
Ta, AGASS, MRESP, ASAG, DMI, TDWD, TWDL, TADW, TDW, DWLV,
DVS_A, Temp_dec, Etapa, FR, FS, FL, FG, IWRT, IWST, IWLW,
IWGR, WLD, Pend, TSUMA : real;

```

```

condicion, Flag, segunda,
LlenadoGrano, Weather : boolean;

Resultados : Datos_Salida;

eleccion, opcion : char;

```

```

Textura, Situacion, Archivo: String25;

```

```

(*-----*)

```

```

{$I ENTRADA.INC}
{$I CLIMA.INC}
{$I INICIAL.INC}
{$I DAT_IN.INC}
{$I KPHENO.INC}
{$I ASIMILA.INC}
{$I ACUMULA.INC}
{$I BAL_HID.INC}
{$I GUARDA.INC}
{$I IMPRIME.INC}
{$I VIDEO.INC}

```

```

(*-----*)

```

```

Procedure Primer_Bloque;

```

```

begin

```

```

  Datos_Entrada(Latitud, SMr, SMO, ce, So, Ab, S_Max, Ko, a,
  alfa, SMcc, SMpmp, Emer, Antesis, Madurez, Ep, Fi, Pr, Wr,
  Wnr, Sr, Kr, Pend, condicion, year, mesSiembra,
  diaSiembra, Textura, Situacion, Archivo);

```

```

  Etapa_Pheno(deIn, deFin, ndpp, nddias, diaEmergencia,
  mesEmergencia, ndde, nddEmergencia, Ta, mesSiembra,
  diaSiembra, Emer, Archivo)

```

```

end; (* Primer_Bloque *)

```

```

(*-----*)

```

```

Procedure Paso_Uno;

```

```

begin

```

```

  Inicializacion(Emer, Antesis, Madurez, RD, WRT, WST, WLW,
  DWLV, WGR, AGASS, MRESP, ASAG, IAF, DVS, DVS_A, SSt, DS,

```

```
SSR, dMr, dWr, FR, FS, FL, FG, IWRT, IWST, IWLW, IWGR, DMI,
TDW, P, Ie, Egs, ETo, Eo, Tm, T, Em, Ea, PGASS, IM, TADW,
TDWD, TWDL, WLD, Ta, TSUMA, segunda, LLenadoGrano, nddias,
j, decena);
```

```
Primer_Bloque;      { Datos de entrada y decena inicial de
                    calculo }
```

```
Guarda(Resultados, j);
j:= j + 1
```

```
end; (* Paso_Uno *)
```

```
(*-----*)
```

```
Procedure Paso_Dos;
```

```
begin
```

```
Etapa:= Antesis;
TSUM:= 0.0;
TSUMA:= 0.0;
decena:= deFin;
Flag := false;
contador:= 0;
```

```
While TSUM < Etapa do
```

```
begin (* while *)
```

```
contador:= contador + 1;
if Flag then
```

```
begin
```

```
Ta:= Lectura(Archivo, 1, decena);
nddias:= Dec_Ten(decena);
Temp_dec:= nddias * (Ta - T_base);
TSUM:= TSUM + Temp_dec;
TSUMA:= TSUM;
if TSUM < Etapa then
```

```
begin
```

```
Datos_In(DVS, PGASS, ETo, Eo, Rnl, Wr, Wnr, P,
I, Ie, IM, Etapa, Latitud, IAF, TSUM, Ep, RD, Pr, condicion,
segunda, LLenadoGrano, decena, nddias, Archivo);
```

```
Balance_Hidrico(SMr, dMr, dWr, Wr, Sr, Kr,
Wnr, Tm, T, RD, Em, Ea, ETo, Eo, IAF, SMcc, SMPmp, Pr, IM,
SMo, ce, a, nddias, LLenadoGrano);
```

```
Asim_Actual(AGASS, MRESP, ASAG, DMI, TWDL,
PGASS, WRT, WST, WLW, WGR, T, Tm, LLenadoGrano);
Acum_MS(WRT, WST, WLW, DWLV, WGR, IAF, TADW, TDW, TWDL,
TDWD, DVS_A, FR, FS, FL, FG, IWRT, IWST, IWLW, IWGR, WLD,
DVS, DMI, T, Tm, nddias, LLenadoGrano);
```

```

Guarda(Resultados, j);
j:= j + 1;
decena:= decena + 1;
if contador > 1 then ndde:= ndde + nddias

end      (* then *)

else

begin

decena:= decena + 1;
j:= j + 1;
if contador > 1 then ndde:= ndde + nddias

end      (* else *)

end      (* Flag = true *)

else

begin

Temp_dec:= nddias * (Ta - T_base);
TSUM:= TSUM + Temp_dec;
TSUMA:= TSUM;

Datos_In(DVS, PGASS, ETo, Eo, Rnl, Wr,
Wnr, P, I, Ie, IM, Etapa, Latitud, IAF, TSUM, Ep, RD, Pr,
condicion, segunda, LlenadoGrano, decena, nddias, Archivo);

Balance_Hidrico(SMr, dMr, dWr, Wr, Sr, Kr,
Wnr, Tm, T, RD, Km, Ea, KTo, Eo, IAF, SMcc, SMPmp, Pr, IM,
SMo, ce, a, nddias, LLenadoGrano);

Asim_Actual(AGASS, MRESP, ASAG, DMI, TWDL,
PGASS, WRT, WST, WLW, WGR, T, Tm, LLenadoGrano);

Acum_MS(WRT, WST, WLW, DWLV, WGR, IAF,
TADW, TDW, TWDL, TDWD, DVS_A, FR, FS, FL, FG, IWRT, IWST,
IWLW, IWGR, WLD, DVS, DMI, T, Tm, nddias, LLenadoGrano);

Guarda(Resultados, j);
decena:= decena + 1;
j:= j + 1;
Flag:= true;
ndde:= nddias

end;      (* flag = flase *)

end;      (* While *)

if Flag = true then decena:= decena - 1;
if Flag = true then j:= j - 1;

```

185

```

Dif:= TSUM - Etapa;
TSUMA:= TSUMA - Dif;
ndpp:= round(Dif/(Ta - T_base));
if ((ndpp = 0) and (contador = 1)) then ndde:= ndde
      else  nddAntesis:= ndde - ndpp;

      diaAntesis:= Det_Dia(deFin, decena, diaEmergencia
mesEmergencia, nddAntesis);

      decenaAntesis:= decena;
      Ta:= Lectura(Archivo, 1, decena);
      nddias:= Dec_Ten(decena) - ndpp;
      Temp_dec:= nddias * (Ta - T_base);
      TSUM:= Etapa;

      Datos_In(DVS, PGASS, ETo, Eo, Rnl, Wr, Wnr, P, I, Ie
IM, Etapa, Latitud, IAF, TSUM, Ep, RD, Pr, condicion
segunda, LlenadoGrano, decena, nddias, Archivo);

      Balance_Hidrico(SMr, dMr, dWr, Wr, Sr, Kr, Wnr, Tm, T
RD, Em, Ea, ETo, Eo, IAF, SMcc, SMPmp, Pr, IM, SMO, ce, a
nddias, LLenadoGrano);

      Asim_Actual(AGASS, MRESP, ASAG, DMI, TWDL, PGASS, WRT
WST, WLW, WGR, T, Tm, LLenadoGrano);

      Acum_MS(WRT, WST, WLW, DWLV, WGR, IAF, TADW, TDW
TWDL, TDWD, DVS_A, FR, FS, FL, FG, IWRT, IWST, IWLW, IWGR
WLD, DVS, DMI, T, Tm, nddias, LLenadoGrano);

      Guarda(Resultados, j);
      j:= j + 1;
      segunda:= true
end; (* Paso_Dos *)

(*-----*)
Procedure Paso_Tres;
begin
      Etapa:= Madurez;
      TSUM:= 0.0;
      Flag := false;
      LlenadoGrano:= True;
      nddias:= ndpp;
      contador:= 0;

      While TSUM < Etapa do
            begin (* while *)

                  contador:= contador + 1;
                  if Flag then

```

```

begin

    Ta:= Lectura(Archivo, 1, decena);
    nddias:= Dec_Ten(decena);
    Temp_dec:= nddias * (Ta - T_base);
    TSUM:= TSUM + Temp_dec;
    TSUMA:= TSUMA + Temp_Dec;
    if TSUM < Etapa then

        begin

            Datos_In(DVS, PGASS, ETo, Eo, Rnl, Wr, Wnr,
P, I, Ie, IM, Etapa, Latitud, IAF, TSUM, Ep, RD, Pr,
condicion, segunda, LlenadoGrano, decena, nddias, Archivo);

            Balance_Hidrico(SMr, dMr, dWr, Wr, Sr, Kr,
Wnr, Tm, T, RD, Em, Ea, ETo, Eo, IAF, SMcc, SMpmp, Pr, IM,
SMo, ce, a, nddias, LLenadoGrano);

            Asim_Actual(AGASS, MRESP, ASAG, DMI, TWDL,
PGASS, WRT, WST, WLW, WGR, T, Tm, LLenadoGrano);

            Actum_MS(WRT, WST, WLW, DWLV, WGR, IAF, TADW,
TDW, TWDL, TDWD, DVS_A, FR, FS, FL, FG, IWRT, IWST, IWLW,
IWGR, WLD, DVS, DMI, T, Tm, nddias, LLenadoGrano);

            Guarda(Resultados, j);
            j:= j + 1;
            decena:= decena + 1;
            if contador > 1 then ndde:= ndde + nddias;

end      (* then *)

else

    begin

        decena:= decena + 1;
        j:= j + 1;
        if contador > 1 then ndde:= ndde + nddias

end      (* else *)

end      (* Flag = true *)

else

    begin

        Temp_dec:= nddias * (Ta - T_base);
        TSUM:= TSUM + Temp_dec;
        TSUMA:= TSUMA + Temp_Dec;
        Datos_In(DVS, PGASS, ETo, Eo, Rnl, Wr,
Wnr, P, I, Ie, IM, Etapa, Latitud, IAF, TSUM, Ep, RD, Pr,
condicion, segunda, LlenadoGrano, decena, nddias, Archivo);

```

```

Balance_Hidrico(SMr, dMr, dWr, Wr, Sr, Kr
Wnr, Tm, T, RD, Em, Ea, KTo, Eo, IAF, SMcc, SMPmp, Pr, IM
SMo, ce, a, nddias, LLenadoGrano);

```

```

Asim_Actual(AGASS, MRESP, ASAG, DMI, TWDL
PGASS, WRT, WST, WLW, WGR, T, Tm, LLenadoGrano);

```

```

Acum_MS(WRT, WST, WLW, DWLV, WGR, IAF
TADW, TDW, TWDL, TDWD, DVS_A, FR, FS, FL, FG, IWRT, IWST
IWLW, IWGR, WLD, DVS, DMI, T, Tm, nddias, LLenadoGrano);

```

```

Guarda(Resultados, j);
j:= j + 1;
decena:= decena + 1;
Flag:= true;
segunda:= false;
ndde:= nddias

```

```

end; (* flag = false *)

```

```

end; (* While *)

```

```

if Flag = true then decena:= decena - 1;
if Flag = true then j:= j - 1;
mesMadurez:= Busca_Mes(decena);
Dif:= TSUM - Etapa;
TSUMA:= TSUMA - Dif;
ndpp:= round(Dif/(Ta - T_base));

```

```

if ((ndpp = 0) and (contador = 1)) then ndde:= ndde
else nddMadurez:= ndde - ndpp;
diaMadurez:= Det_Dia(decenaAntesis, decena
diaAntesis, mesAntesis, nddMadurez);
Ta:= Lectura(Archivo, 1, decena);
nddias:= Dec_Ten(decena) - ndpp;
Temp_dec:= nddias * (Ta - T_base);
TSUM:= Etapa;

```

```

Datos_In(DVS, PGASS, ETo, Eo, Rnl, Wr, Wnr, P, I, Ie
IM, Etapa, Latitud, IAF, TSUM, Ep, RD, Pr, condicion
segunda, LlenadoGrano, decena, nddias, Archivo);

```

```

Balance_Hidrico(SMr, dMr, dWr, Wr, Sr, Kr, Wnr, Tm, T
RD, Em, Ea, ETo, Eo, IAF, SMcc, SMPmp, Pr, IM, SMO, ce, a
nndias, LLenadoGrano);

```

```

Asim_Actual(AGASS, MRESP, ASAG, DMI, TWDL, PGASS, WRT
WST, WLW, WGR, T, Tm, LLenadoGrano);

```

```

Acum_MS(WRT, WST, WLW, DWLV, WGR, IAF, TADW, TDW
TWDL, TDWD, DVS_A, FR, FS, FL, FG, IWRT, IWST, IWLW, IWGR
WLD, DVS, DMI, T, Tm, nddias, LLenadoGrano);

```

```

Guarda(Resultados, j);

```

```

k:= j

```

```

end; (* Paso_Tres *)

```

```

(* ##### PROGRAMA PRINCIPAL ##### *)
begin
  Paso_Uno;
  Paso_Dos;
  Paso_Tres;
  ClrScr;
  Pon_Cadena_Centrada('SIMULACION TERMINADA', 5, 3);
  writeln;
repeat
  Pon_Cadena_Centrada('RESULTADOS EN PANTALLA EPA y/o
  IMPRESORA #IA: ', 7, 3);
  eleccion:= ReadKey;
until ((eleccion = Imay) or (eleccion = Imin) or (eleccion =
  Pmay) or (eleccion = Pmin));

  if ((eleccion = Pmay) or (eleccion = Pmin)) then
    begin
      repeat
        Pantalla(Resultados, k);
        repeat
          Pon_Cadena_Centrada('VOLVER A PRESENTAR
RESULTADOS #S/NA: ', 12, 3);
          opcion:= ReadKey;

          if ((opcion <> Smay) and (opcion <> Smin) and
(opcion <> Nmay) and (opcion <> Nmin)) then
write(char(pitido));
          until ((opcion = Smay) or (opcion = Smin) or
(opcion = Nmay) or (opcion = Nmin));
          until ((opcion = Nmay) or (opcion = Nmin))

        end;

      if ((eleccion = Imay) or (eleccion = Imin)) then

        begin

          Pon_Cadena_Centrada('VERIFIQUE QUE LA IMPRESORA
ESTE EN LINEA Y PULSE CUALQUIER TECLA', 15, 3);
          repeat until Keypressed;
          Impresion(Resultados, k)

        end

      end.
(* Modelo_Maiz *)

```

NOTA.- EL PROGRAMA COMPLETO DE ESTE MODELO COMPILADO EN DISCO, ASI COMO LOS ARCHIVOS INCLUIDOS {\$I *.INC}, PUEDEN SER OBTENIDOS EN EL DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE DE LA UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO".

A P P E N D I C E C

Cuadro C.1. Datos climáticos relevantes de entrada al modelo de simulación de maíz. UAAAN 1991.

Decena	Ta	PP	I	Hr	U	Ko*	KTo*	Fgs*
12	23.0	0.0	10.1	45.2	4.0	---	---	---
13	22.0	11.4	8.3	59.8	4.0	6.85	5.84	391.50
14	21.9	32.7	9.8	58.3	3.8	7.25	6.10	415.50
15	22.1	0.3	10.6	64.6	3.5	7.03	5.77	439.20
16	22.7	67.6	8.0	59.7	3.5	6.88	5.86	392.60
17	21.9	1.0	10.2	64.2	3.3	6.91	5.68	434.90
18	21.3	24.2	10.0	68.1	3.5	6.51	5.31	434.20
19	19.8	39.3	4.9	83.2	2.5	4.06	3.24	344.50
20	20.9	28.1	5.1	68.8	2.9	5.12	4.32	341.20
21	21.8	2.6	8.5	59.5	2.9	6.70	5.61	394.30
22	21.1	40.7	9.2	68.4	3.0	5.91	4.81	387.30
23	22.7	0.8	9.8	64.0	3.3	6.65	5.51	397.50

* Estimados.

Cuadro C.2. Resultados de simulación de producción de materia seca para el tratamiento KTM-REF, durante el ciclo de cultivo. UAAAN 1991.

Decena	Tsuma	EDV	Tab	RD	Riego	IM	Em	Ea	Tm
12	0.0	0.00							
13	108.0	0.18	13.42	120	0.00	1.14	5.74	5.26	0.18
14	227.0	0.37	34.23	255	0.00	3.27	5.84	2.47	0.46
15	360.1	0.58	101.17	405	5.08	5.11	5.04	3.18	1.20
16	487.1	0.79	221.64	570	2.00	8.75	3.81	2.90	2.98
17	606.1	0.98	353.18	720	2.52	2.62	2.40	2.21	4.10
18	617.0	1.00	390.97	870	7.03	9.45	1.61	1.27	4.23
18	718.7	1.16	391.17	885	7.03	9.45	1.61	1.29	4.23
19	816.7	1.32	308.75	855	0.00	3.93	1.01	0.94	2.56
20	816.7	1.49	304.17	855	0.00	2.81	1.37	1.30	3.42
21	925.7	1.70	349.55	855	8.64	8.87	1.82	1.60	4.41
22	1055.5	1.88	341.44	855	0.00	4.07	1.60	1.59	3.75
23	1242.0	2.00	348.33	855	0.00	0.08	1.87	1.77	4.28

Cuadro C.2.continuación.

Decena	T	DS	SR	SSt	dMr	dWr	SMr	Wr
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	44.1
13	0.18	0.00	0.00	0.00	5.52	1.22	0.22	55.1
14	0.50	0.00	0.00	0.00	5.52	5.82	0.28	113.2
15	1.20	0.00	0.00	0.00	5.52	6.26	0.32	182.1
16	2.98	0.00	0.00	0.00	5.52	8.40	0.37	266.1
17	4.10	0.00	0.00	0.00	5.52	1.83	0.33	284.4
18	4.23	0.00	0.00	0.00	5.52	9.48	0.33	293.9
18	4.23	0.00	0.00	0.00	0.00	3.93	0.37	329.3
19	2.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43	0.38	333.6
20	3.42	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.91	0.36	314.5
21	4.41	0.00	0.00	0.00	0.00	2.86	0.39	345.9
22	3.75	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.27	0.38	333.3
23	4.28	0.00	0.00	0.00	0.00	-5.97	0.34	297.4

Cuadro C.2.continuación.

Decena	Sr	Kr	Wnr	Taa	Tmr	Adips	Cme
12	306	6E-4	323.84	0.00	0.00	0.00	0.0
13	70299	1E-5	274.16	13.42	1.88	11.54	7.5
14	7664	1E-5	218.96	34.23	3.54	30.69	19.9
15	1914	1E-5	158.24	101.17	8.53	92.64	60.2
16	286	6E-4	103.04	221.64	25.09	196.55	127.7
17	1467	1E-4	47.84	353.18	57.06	296.11	192.4
18	1216	1E-4	42.32	390.97	105.18	285.79	185.7
18	258	5E-4	42.32	391.17	43.93	347.24	225.7
19	210	9E-4	42.32	308.75	63.91	244.84	159.1
20	506	3E-4	42.32	304.17	79.50	224.67	146.0
21	113	2E-3	42.32	349.55	93.79	255.76	166.2
22	213	9E-4	42.32	341.44	111.76	229.68	149.2
23	1048	1E-4	42.32	348.33	126.39	221.94	144.2

Cuadro C.2.continuación.

Decena	Fr	Tipr	PSR	Fh	Tiph	DPH	TMH	PSH
12	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.0
13	0.18	1.35	37.19	0.54	4.07	0.00	0.00	61.6
14	0.11	2.16	58.81	0.63	12.60	0.00	0.00	187.6
15	0.05	3.26	94.63	0.62	37.10	0.00	0.00	595.7
16	0.04	5.11	145.73	0.47	60.27	0.00	0.00	1198.4
17	0.04	7.70	222.72	0.24	45.53	0.00	0.00	1653.7
18	0.00	0.60	223.32	0.02	3.28	0.00	0.00	1657.0
18	0.00	0.00	223.32	0.00	-3.68	0.00	33.14	1623.8
19	0.00	0.00	223.32	0.00	-3.25	0.00	32.48	1591.4
20	0.00	0.00	223.32	0.00	-3.18	0.00	31.83	1559.5
21	0.00	0.00	223.32	0.00	-2.84	0.00	31.19	1528.3
22	0.00	0.00	223.32	0.00	-3.06	0.00	30.57	1497.8
23	0.00	0.00	223.32	0.00	-4.99	0.00	29.96	1467.8

Cuadro C.2.continuación.

Decena	Ft	Tipt	PST	Eg	Tipg	PSG*	IAE
12	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.0
13	0.26	1.98	42.80	0.00	0.00	0.00	0.1
14	0.26	5.19	94.67	0.00	0.00	0.00	0.3
15	0.33	19.86	313.13	0.00	0.00	0.00	1.0
16	0.49	62.53	938.40	0.00	0.00	0.00	2.1
17	0.72	139.24	2330.84	0.00	0.00	0.00	2.9
18	0.98	181.89	2512.72	0.00	0.00	0.00	2.9
18	0.85	191.74	4238.38	0.15	33.96	305.67	2.9
19	0.61	97.31	5211.47	0.39	61.84	924.03	2.8
20	0.42	61.59	5827.36	0.58	84.44	1768.47	2.8
21	0.25	41.85	6287.74	0.75	124.39	3136.80	2.7
22	0.12	17.48	6462.51	0.88	131.81	4454.92	2.7
23	0.03	4.49	6489.47	0.97	139.77	5293.55	2.6

* Para convertir a forma comercial multiplicar por 1.12.

Cuadro C.2.continuación.

Decena	Msa	Mst	PSTV	PSTM
12	50.00	75.00	75.00	0.00
13	104.45	141.64	141.64	0.00
14	282.31	341.13	341.13	0.00
15	908.87	1003.50	1003.50	0.00
16	2136.84	2282.57	2282.57	0.00
17	3984.58	4207.30	4207.30	0.00
18	4169.74	4393.06	4393.06	0.00
18	6167.93	6391.25	6358.10	33.14
19	7726.90	7950.21	7884.60	65.62
20	9155.40	9378.72	9281.27	97.45
21	10952.92	11176.24	11047.60	128.64
22	12415.25	12638.57	12479.36	159.20
23	13250.87	13474.19	13285.03	189.19

Cuadro C.3. Resultados de simulación de producción de materia seca para el tratamiento de 75 por ciento de humedad aprovechable, durante el ciclo de cultivo UAAAN 1991.

Decena	Tsuma	EDV	Tab	RD	IM	Riego	Km	Ka	Tm
12	0.0	0.0							
13	108.0	0.16	13.42	120	0.00	1.14	5.74	5.26	0.1
14	227.0	0.34	34.52	255	0.00	3.27	5.84	2.47	0.4
15	360.1	0.54	101.32	405	3.79	3.27	5.04	3.18	1.2
16	487.1	0.73	223.37	570	6.44	13.20	3.79	2.57	3.0
17	606.1	0.91	361.17	720	0.00	0.10	2.27	2.27	4.1
18	665.0	1.00	403.59	870	7.35	9.77	1.35	1.09	4.3
18	721.5	1.10	407.14	945	7.35	9.77	1.27	1.13	4.3
19	819.5	1.28	321.82	945	0.00	3.93	0.80	0.77	4.4
20	928.5	1.48	317.50	945	0.00	2.81	1.09	1.07	2.6
21	1058.3	1.71	365.40	945	4.76	5.00	1.46	1.34	3.5
22	1169.3	1.91	357.44	945	5.00	9.07	1.28	1.13	4.6
23	1217.0	2.00	365.19	945	0.00	0.08	1.51	1.51	3.9

Cuadro C.3.continuación.

Decena	T	DS	SR	SSt	dMr	dWr	SMr	Wr
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	44.1
13	0.18	0.00	0.00	0.00	5.52	1.22	0.22	55.1
14	0.50	0.00	0.00	0.00	5.52	5.82	0.28	113.2
15	1.20	0.00	0.00	0.00	5.52	4.97	0.29	167.9
16	3.00	0.00	0.00	0.00	5.52	13.15	0.39	299.4
17	4.19	0.00	0.00	0.00	5.52	-0.84	0.33	291.0
18	4.36	0.00	0.00	0.00	5.52	9.84	0.36	340.2
18	4.40	0.00	0.00	0.00	0.00	4.24	0.38	361.4
19	2.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.39	366.4
20	3.56	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.82	0.37	348.1
21	4.60	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.95	0.36	337.7
22	3.92	0.00	0.00	0.00	0.00	4.02	0.39	377.9
23	4.48	0.00	0.00	0.00	0.00	-5.91	0.37	354.3

Cuadro C.3.continuación.

Decena	Sr	Kr	Wnr	Taa	Tmr	Adips	Cme
12	306	6E-4	323.84	0.00	0.00	0.00	0.00
13	70299	1E-5	274.16	13.42	1.88	11.54	7.50
14	7658	1E-5	218.96	34.52	3.54	30.98	20.10
15	4588	1E-5	158.24	101.32	8.87	92.75	60.20
16	100	3E-3	103.04	223.37	25.15	198.22	128.80
17	1114	1E-4	47.84	361.17	57.55	303.62	197.30
18	422	4E-4	20.24	403.59	106.89	296.70	192.80
18	166	1E-3	20.24	407.14	52.40	354.75	230.50
19	131	2E-3	20.24	321.82	63.53	258.29	167.80
20	300	6E-4	20.24	317.50	79.93	237.57	154.40
21	467	3E-4	20.24	365.40	94.99	270.41	175.70
22	100	3E-3	20.24	357.44	113.95	243.49	158.20
23	229	8E-4	20.24	365.19	129.41	235.78	153.20

Cuadro C.3.continuación.

Decena	Fr	Tipr	PSR	Fh	Tiph	DPH	TMH	PSH
12	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.0
13	0.17	1.31	36.79	0.55	4.13	0.00	0.00	82.1
14	0.12	2.32	60.00	0.62	12.58	0.00	0.00	187.9
15	0.06	3.65	100.20	0.63	37.74	0.00	0.00	603.0
16	0.04	5.15	151.74	0.52	66.92	0.00	0.00	1272.2
17	0.04	7.89	230.68	0.32	62.91	0.00	0.00	1901.2
18	0.02	3.22	246.76	0.09	17.69	0.00	0.00	1989.7
18	0.00	0.00	246.76	0.00	-7.96	0.00	39.79	1949.9
19	0.00	0.00	246.76	0.00	-3.90	0.00	39.00	1910.9
20	0.00	0.00	246.76	0.00	-3.82	0.00	38.22	1872.7
21	0.00	0.00	246.76	0.00	-3.40	0.00	37.45	1835.2
22	0.00	0.00	246.76	0.00	-3.67	0.00	36.71	1798.5
23	0.00	0.00	246.76	0.00	-8.99	0.00	35.97	1762.5

Cuadro C.3.continuación.

Decena	Ft	Tipt	PST	Fg	Tipg	PSG*	IAF
12	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.0
13	0.26	1.95	42.54	0.00	0.00	0.00	0.1
14	0.26	5.24	94.89	0.00	0.00	0.00	0.3
15	0.31	18.90	302.77	0.00	0.00	0.00	1.0
16	0.45	57.54	878.17	0.00	0.00	0.00	2.2
17	0.64	126.55	2143.68	0.00	0.00	0.00	3.4
18	0.89	171.94	3003.40	0.00	0.00	0.00	3.5
18	0.90	208.13	4044.07	0.10	22.45	112.26	3.5
19	0.68	114.01	5184.17	0.32	53.88	651.04	3.4
20	0.45	69.60	5880.17	0.55	84.82	1499.23	3.3
21	0.25	44.64	6371.22	0.75	131.13	2941.61	3.3
22	0.10	16.32	6534.42	0.90	141.95	4361.08	3.2
23	0.02	3.38	6547.95	0.98	149.87	4960.57	3.1

*Para convertir a forma comercial multiplicar por 1.12.

Cuadro C.3.continuación.

Decena	Msa	Mst	PSTV	PSTM
12	50.00	75.00	75.00	0.00
13	104.72	141.50	141.50	0.00
14	282.86	342.86	342.86	0.00
15	905.83	1006.02	1006.02	0.00
16	2150.39	2302.13	2302.23	0.00
17	4044.95	4275.63	4275.63	0.00
18	4993.14	5239.90	5239.90	0.00
18	6106.27	6353.03	6313.24	39.79
19	7746.15	7992.91	7914.23	78.89
20	9252.13	9498.89	9381.88	117.01
21	11148.09	11394.85	11240.39	154.47
22	12694.06	12940.83	12749.65	191.17
23	13271.11	13517.88	13290.73	227.14

Cuadro C.4. Resultados de simulación de producción de materia seca para el tratamiento de 50 por ciento de humedad aprovechable, durante el ciclo de cultivo. UAAAN 1991.

Decena	Tsuma	EDV	Tab	RD	Riego	IM	Em	ka	Tm
12	0.0	0.00							
13	108.0	0.17	13.42	120	0.00	1.14	5.74	5.26	0.18
14	227.0	0.35	34.38	255	0.00	3.27	5.84	2.47	0.46
15	360.1	0.56	101.25	405	3.79	3.82	5.04	3.18	1.20
16	487.1	0.76	222.55	570	4.59	11.35	3.80	2.58	2.99
17	606.1	0.94	357.43	720	0.00	0.10	2.33	2.31	4.15
18	642.0	1.00	398.04	870	6.53	8.95	1.47	1.09	4.30
18	721.1	1.14	399.64	915	6.53	8.95	1.44	1.13	4.32
19	819.1	1.31	315.66	915	0.00	3.93	0.90	0.79	2.62
20	928.1	1.50	311.20	915	0.00	2.81	1.23	1.10	3.50
21	1057.9	1.72	357.90	915	6.73	6.96	1.64	1.36	4.51
22	1168.9	1.91	349.85	915	0.00	4.07	1.44	1.26	3.84
23	1218.0	2.00	357.17	915	0.00	0.08	1.69	1.41	4.38

Cuadro C.4.continuación.

Decena	T	DS	SR	SSt	dMr	dWr	SMr	Wr
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	44.16
13	0.18	0.00	0.00	0.00	5.52	1.22	0.22	55.10
14	0.50	0.00	0.00	0.00	5.52	5.82	0.28	113.22
15	1.20	0.00	0.00	0.00	5.52	4.97	0.29	167.95
16	2.99	0.00	0.00	0.00	5.52	11.31	0.39	281.00
17	4.15	0.00	0.00	0.00	5.52	-0.84	0.31	272.64
18	4.30	0.00	0.00	0.00	5.52	9.08	0.33	299.89
18	4.32	0.00	0.00	0.00	0.00	3.50	0.35	324.42
19	2.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	0.36	329.69
20	3.50	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.78	0.34	311.85
21	4.51	0.00	0.00	0.00	0.00	1.09	0.35	323.82
22	3.84	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.02	0.34	313.57
23	4.38	0.00	0.00	0.00	0.00	-5.72	0.32	290.71

Cuadro C.4.continuación.

Decena	Sr	Kr	Wnr	Taa	Tmr	Adips	Cme
12	306	6E-4	323.84	0.00	0.00	0.00	0.00
13	70299	1E-5	274.16	13.42	1.88	11.54	7.50
14	7661	1E-5	218.96	34.38	3.54	30.84	20.05
15	4587	1E-5	158.24	101.25	8.55	92.70	60.25
16	116	2E-3	103.04	222.55	25.12	197.43	128.33
17	2381	1E-5	47.84	357.43	57.32	300.11	195.07
18	1424	1E-4	31.28	398.04	106.09	291.95	189.77
18	523	3E-4	31.28	399.64	48.13	351.51	228.48
19	417	4E-4	31.28	315.66	63.76	251.90	163.74
20	881	1E-4	31.28	311.20	79.78	231.43	150.43
21	536	3E-4	31.28	357.90	94.47	263.43	171.23
22	821	1E-4	31.28	349.85	112.96	236.88	153.97
23	2042	1E-5	31.28	357.17	128.03	229.14	148.94

Cuadro C.4.continuación.

Decena	Fr	Tipr	PSR	Fh	Tiph	DPH	TMH	PSH
12	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.0
13	0.18	1.33	36.98	0.55	4.10	0.00	0.00	61.9
14	0.11	2.24	59.43	0.63	12.59	0.00	0.00	187.8
15	0.06	3.46	97.53	0.62	37.43	0.00	0.00	599.5
16	0.04	5.13	148.86	0.50	63.72	0.00	0.00	1236.7
17	0.04	7.80	226.89	0.28	54.50	0.00	0.00	1781.7
18	0.01	1.97	232.78	0.06	10.81	0.00	0.00	1814.1
18	0.00	0.00	232.78	0.00	-5.18	0.00	36.28	1777.8
19	0.00	0.00	232.78	0.00	-3.56	0.00	35.56	1742.3
20	0.00	0.00	232.78	0.00	-3.48	0.00	34.85	1707.4
21	0.00	0.00	232.78	0.00	-3.10	0.00	34.15	1673.3
22	0.00	0.00	232.78	0.00	-3.35	0.00	33.47	1639.8
23	0.00	0.00	232.78	0.00	-8.20	0.00	32.80	1607.0

Cuadro C.4.continuación.

Decena	Ft	Tipt	PST	Fg	Tipg	PSG*	IAE
12	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.0
13	0.26	1.96	42.67	0.00	0.00	0.00	0.1
14	0.26	5.21	94.79	0.00	0.00	0.00	0.3
15	0.32	19.36	307.74	0.00	0.00	0.00	1.0
16	0.47	59.94	907.17	0.00	0.00	0.00	2.2
17	0.68	132.77	2234.90	0.00	0.00	0.00	3.2
18	0.93	176.99	2765.88	0.00	0.00	0.00	3.2
18	0.87	199.12	4159.72	0.13	29.36	205.52	3.2
19	0.64	104.16	5201.30	0.36	59.58	801.31	3.1
20	0.43	64.15	5842.80	0.57	86.28	1664.09	3.0
21	0.24	41.56	6299.95	0.76	129.67	3090.42	3.0
22	0.10	15.38	6453.72	0.90	138.60	4476.39	2.9
23	0.02	3.24	6466.70	0.98	145.70	5059.19	2.8

* Para convertir a forma comercial multiplicar por 1.12.

Cuadro C.4.continuación.

Decena	Msa	Mst	PSTV	PSTM
12	50.00	75.00	75.00	0.00
13	104.59	141.57	141.57	0.00
14	282.60	342.03	342.03	0.00
15	907.30	1004.83	1004.83	0.00
16	2143.92	2292.78	2292.78	0.00
17	4016.61	4243.50	4243.50	0.00
18	4580.02	4812.80	4812.80	0.00
18	6143.09	6375.87	6339.59	36.28
19	7744.91	7977.69	7905.85	71.84
20	9214.34	9447.12	9340.43	106.69
21	11063.68	11296.46	11155.63	140.83
22	12569.95	12802.74	12628.43	174.30
23	13132.93	13365.71	13158.61	207.10

Cuadro C.5. Resultados de simulación de producción de materia seca para el tratamiento de 25 por ciento de humedad aprovechable, durante el ciclo de cultivo. UAAAN 1991.

Decena	Tsuma	EDV	Tab	RD	Riego	IM	Km	Ka	Tm
12	0.0	0.00							
13	108.0	0.16	13.42	120	0.00	1.14	5.74	5.26	0.18
14	227.0	0.34	34.59	255	0.00	3.27	5.84	2.47	0.46
15	360.1	0.53	101.36	405	3.41	3.44	5.04	3.18	1.20
16	487.1	0.72	223.80	570	0.00	6.76	3.79	2.48	3.01
17	606.1	0.90	363.05	720	0.00	0.10	2.24	1.72	4.21
18	677.0	1.00	406.17	870	9.55	11.97	1.29	0.74	4.39
18	722.2	1.08	389.29	960	9.55	11.97	1.65	1.36	4.21
19	820.2	1.25	307.22	960	0.00	3.93	1.03	0.94	2.55
20	929.2	1.45	302.62	960	0.00	2.81	1.40	1.30	3.40
21	1059.0	1.68	347.72	960	0.00	0.24	1.86	1.61	4.39
22	1170.0	1.87	339.59	960	10.57	12.93	1.63	1.06	3.73
23	1242.0	2.00	342.08	960	0.00	0.08	1.99	1.99	4.21

Cuadro C.5.continuación.

Decena	T	DS	SR	SSt	dMr	dWr	SMr	Wr
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	44.16
13	0.18	0.00	0.00	0.00	5.52	1.22	0.22	55.10
14	0.50	0.00	0.00	0.00	5.52	5.82	0.28	113.23
15	1.20	0.00	0.00	0.00	5.52	4.58	0.29	163.72
16	3.01	0.00	0.00	0.00	5.52	6.80	0.32	231.68
17	4.21	0.00	0.00	0.00	5.52	-0.31	0.26	228.57
18	0.48	0.00	0.00	0.00	5.52	16.27	0.34	326.19
18	4.21	0.00	0.00	0.00	0.00	6.40	0.37	351.78
19	2.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	0.37	356.20
20	3.40	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.89	0.35	337.27
21	4.39	0.00	0.00	0.00	0.00	-5.76	0.29	273.88
22	3.25	0.00	0.00	0.00	0.00	8.63	0.38	360.14
23	4.21	0.00	0.00	0.00	0.00	-6.12	0.34	323.42

Cuadro C.5.continuación.

Decena	Sr	Kr	Wnr	Taa	Tmr	Adips	Cme
12	306	6E-4	323.84	0.00	0.00	0.00	0.00
13	70299	1E-5	274.16	13.42	1.88	11.54	7.50
14	7656	1E-5	218.96	34.59	3.54	31.05	20.18
15	5932	1E-5	158.24	101.36	8.58	92.78	60.30
16	1766	1E-5	103.04	223.80	25.17	198.64	129.11
17	13794	1E-5	47.84	363.05	57.67	305.38	198.50
18	916	1E-4	14.72	44.06	107.30	-63.24	-41.11
18	326	5E-4	14.72	389.29	37.34	351.94	228.76
19	270	7E-4	14.72	307.22	46.17	261.05	169.68
20	592	2E-4	14.72	302.62	62.82	239.80	155.87
21	6342	1E-5	14.72	347.72	78.09	269.62	175.25
22	227	8E-4	14.72	295.77	97.07	198.70	129.16
23	1019	1E-4	14.72	342.08	109.10	232.98	151.44

Cuadro C.5.continuación.

Decena	Fr	Tipr	PSR	Fh	Tiph	DPH	TMH	PSH
12	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00
13	0.17	1.30	36.69	0.55	4.15	0.00	0.00	62.31
14	0.12	2.36	60.30	0.62	12.57	0.00	0.00	188.05
15	0.06	3.75	101.60	0.63	37.89	0.00	0.00	604.88
16	0.04	5.16	153.24	0.53	68.59	0.00	0.00	1290.79
17	0.04	7.94	232.64	0.34	67.35	0.00	0.00	1964.29
18	0.02	-0.82	227.73	0.11	-4.50	310.89	0.00	1626.42
18	0.00	0.00	227.73	0.00	-8.13	0.00	32.53	1593.89
19	0.00	0.00	227.73	0.00	-3.19	0.00	31.88	1562.01
20	0.00	0.00	227.73	0.00	-3.12	0.00	31.24	1530.77
21	0.00	0.00	227.73	0.00	-2.78	0.00	30.62	1500.15
22	0.00	0.00	227.73	0.00	-3.00	58.08	30.00	1412.07
23	0.00	0.00	227.73	0.00	-4.71	0.00	28.24	1383.83

Cuadro C.5.continuación.

Decena	Ft	Tipt	PST	Fg	Tipg	PSG*	IAF
12	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.04
13	0.26	1.94	42.47	0.00	0.00	0.00	0.11
14	0.26	5.25	94.94	0.00	0.00	0.00	0.34
15	0.31	18.66	300.17	0.00	0.00	0.00	1.09
16	0.44	56.28	862.95	0.00	0.00	0.00	2.32
17	0.62	123.21	2095.03	0.00	0.00	0.00	3.54
18	0.87	-35.79	1880.28	0.00	0.00	0.00	2.93
18	0.92	211.17	2724.94	0.08	17.60	70.39	2.87
19	0.71	121.19	3936.83	0.29	48.50	555.35	2.81
20	0.48	75.06	4687.46	0.52	80.81	1363.41	2.76
21	0.28	49.25	5229.24	0.72	126.00	2749.43	2.70
22	0.13	16.43	5393.50	0.87	112.73	3876.73	2.54
23	0.03	4.98	5423.40	0.97	146.45	4755.44	2.49

*Para convertir a forma comercial multiplicar por 1.12.

Cuadro C.5.continuación.

Decena	Msa	Mst	PSTV	PSTM
12	50.00	75.00	75.00	0.00
13	104.78	141.47	141.47	0.00
14	282.99	343.29	343.29	0.00
15	905.05	1006.64	1006.64	0.00
16	2153.74	2306.98	2306.98	0.00
17	4059.32	4291.96	4291.96	0.00
18	3506.69	3734.43	3423.54	310.89
18	4389.22	4616.95	4273.54	343.42
19	6054.19	6281.92	5906.63	375.30
20	7581.64	7809.37	7402.83	406.54
21	9478.82	9706.55	9269.40	437.15
22	10682.30	10910.04	10384.80	525.23
23	11562.67	11790.41	11236.93	553.48