

**VALIDACIÓN DEL MODELO EPIC, PARA SIMULAR LA
MEDICIÓN DE RASGOS AGRONÓMICOS EN EL CULTIVO DE
MAÍZ BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE HUMEDAD EN
EL SUELO**

Orlando Segundo Téllez Obregón
Raúl Rodríguez García
Diana Jasso Cantú
Edmundo Peña Cervantes

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

RESUMEN

Este estudio se realizó con el objetivo de evaluar la capacidad del modelo de simulación EPIC propuesto por Williams *et al.* (1984), para predecir índice de área foliar, la acumulación de materia seca y nitrógeno, el rendimiento de grano en el cultivo de maíz bajo tres condiciones de humedad de suelo o tratamientos. Los resultados de simulación indicaron que el modelo simuló adecuadamente el índice de área foliar y la acumulación de materia seca, las desviaciones entre valores observados y simulados en su mayoría se encontraron dentro de un rango $\pm 15\%$. En el caso de la acumulación de nitrógeno, el 50 % de las observaciones tuvieron desviaciones fuera del rango $\pm 20\%$. El modelo subestimó el rendimiento de grano en un rango del 35 al 50 % .

Palabras clave: Simulación, *Zea mays* L., maíz, riego, niveles de humedad, materia seca, rendimiento de grano, nitrógeno en la planta.

ABSTRACT

Validation of the EPIC model, to simulate the measuring of some agronomic traits in maize under different conditions of soil moisture. This assay was performed in order to evaluate the prediction capacity of the EPIC model proposed by Williams *et al.* (1984) to predict leaf area index, dry matter and nitrogen accumulation and grain yield of maize under three different soil moisture conditions or treatments. The simulation results indicated

that the model simulated correctly the leaf area index, and the dry matter accumulation deviations among the observed and the simulated values were found in a range of $\pm 15\%$. As to the nitrogen accumulation and grain yield the deviations were out of the rank $\pm 20\%$ for nitrogen. For grain yield the model underestimated the yield in a rank between 35 to 50%.

Key words: Simulation, *Zea mays* L., maize, irrigation, moisture levels, dry matter, grain yield and plant nitrogen.

INTRODUCCIÓN

El maíz es un cultivo importante dado que constituye la base de a dieta para gran parte de la población humana, la cual lo consume en forma directa. En forma indirecta los productos y subproductos del maíz, son utilizados por la población urbana y rural, para el consumo humano, animal, transformación industrial y otros.

En los países en vías de desarrollo, en donde existe gran urgencia por aumentar la capacidad de producción del cultivo de maíz en forma sustentable, y en donde a la vez suele haber recursos limitantes para la persecución de investigación agrícola, existe un gran potencial para el uso beneficioso de las tecnologías de simulación agrícola. Dado que existen simuladores para este cultivo, y que la adaptación del modelo usado requiere tan solo un microcomputador y unas cuantas temporadas de crecimiento para recolectar datos y calibrarlos al ambiente correspondiente.

Generalmente los modelos de simulación se dividen en icónicos, empíricos o correlativos, analógicos y mecanistas o exploratorios; los primeros son una representación física a escala, los segundos describen las relaciones entre cultivo y ambiente sin referirse a un seguimiento biológico o físico que existe entre las variables gobernantes del crecimiento y desarrollo del cultivo, el tercero se basa en la analogía entre los sistemas, en tanto que los mecanistas se basan en conocimientos detallados del funcionamiento del sistema (Whisler *et al.*, 1986).

Objetivo General

Evaluar la capacidad del modelo EPIC para simular razonablemente el índice de área foliar, la acumulación de materia seca y nitrógeno y rendimiento de grano en el cultivo de maíz, bajo diferentes calendarios de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

Esta investigación se llevó a cabo en terrenos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en Buenavista, municipio de Saltillo, Coah. y cuyas coordenadas geográficas son 25° 21' 20" de latitud norte y 101° 01' 30" de longitud oeste y a una altitud msnm de 1743 m.

Material Genético

El material genético utilizado fue el híbrido AN-447, cuyas características agronómicas principales son: altura de planta 2.8 m, altura de mazorca 1.3 m, floración masculina de 75 a 80 días, de 140 a 150 días a madurez fisiológica, el color de la hoja es verde claro, la forma de la mazorca es cilíndrica y el tipo de grano es blanco, semidentado.

Tratamientos Evaluados

El estudio consistió en evaluar tres condiciones de humedad de suelo, con la finalidad de someter a la planta a diferentes grados de estrés hídrico durante su ciclo vegetativo, para así evaluar el índice de área foliar, la acumulación de materia seca y nitrógeno en la parte aérea de la planta, y rendimiento de grano. Estos tratamientos fueron:

Tratamiento 1. Tratamientos EIM-RE F (evapotranspiración máxima del cultivo-referencia), en el cual el cultivo se desarrolló bajo condición de menor déficit hídrico en el suelo, con la finalidad de satisfacer las necesidades máximas de consumo de agua por la planta, para lo cual se aplicaron 9 riegos durante el desarrollo del cultivo, en el Cuadro 1, se presenta la distribución de los riegos durante el ciclo del cultivo y la cantidad de agua aplicada al momento del riego.

Tratamiento 2. Se aplicaron 6 riegos durante el desarrollo del cultivo, la distribución de riegos durante el ciclo del cultivo y la cantidad aplicada se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Calendario de riegos de auxilio aplicados a los tratamientos evaluados.

N° Riegos	DDS	Etapas (Nomenclatura)	Lámina de riego (mm)
Tratamiento 1			
1	17	V5	30.00
2	20	V6	30.00
3	39	V10	32.00
4	58	V14	72.00
5	70	V15	84.50
6	79	VT	43.10
7	91	R1	41.00
8	104	R1	32.00
9	110	R2	20.00
Tratamiento 2			
1	16	V5	20.00
2	20	V6	20
3	46	V12	23
4	59	V14	52.00
5	65	V15	96.70
6	77	VT	34.50
Tratamiento 3			
1	16	V5	20
2	35	V8	20.00
3	59	V14	70.00
4	72	V15	80.50

Tratamiento 3. Se aplicaron 4 riegos durante el ciclo del cultivo, la distribución de riegos y cantidad de agua aportada se presenta en el Cuadro 1.

A los tres tratamientos se les aplicó un riego con lámina igual de 13 cm antes de

la siembra. Se aplicaron riegos durante el desarrollo del cultivo, 5 riegos en la etapa vegetativa, 4 riegos en el período comprendido en el estado VT (floración), se aplicaron 4 riegos distribuidos en las etapas vegetativas.

Manejo del cultivo

El día 16 de junio se efectuó el aclareo de plantas, dejando 6 plantas por metro lineal para una población de 70, 200 p1/ha.

La labor de apoque se efectuó el día 3 de julio, cuando el cultivo se encontraba en la etapa de 11 hojas (V11), previo a la labor se realizó la segunda incorporación de fertilizante con la dosis 100-0-40, como fuente el sulfato de amonio (20.5-0-0) y el sulfato de potasio (0-0-50).

Medición de la humedad

Se determinaron las constantes de humedad del suelo capacidad de campo y punto de marchitez permanente por estrato mediante el método de las ollas de presión.

Para la medición del contenido de humedad del suelo, se utilizó el método del aspersor de neutrones (Troxler-4300).

Anteriormente se realizó la calibración del aparato, para esto se instalaron dos tubos de aluminio, enterrándose a una profundidad de 120 cm, en una superficie de 1 m² por tubo, uno de los tubos se encontraba en condiciones de capacidad de campo (punto húmedo), el otro tubo se encontraba en punto de marchitez permanente (punto seco). Se tomaron medidas de humedad con el aspersor de neutrones y con el método gravimétrico en

estrato de 20 en 20 cm hasta llegar a los 120 cm, con estos puntos se realizó una regresión lineal para calibrar el aparato, de tal manera que permitió detectar las constantes de capacidad de campo y punto de marchitez permanente para el suelo del área experimental. Se obtuvieron dos ecuaciones, una donde representa al primer estrato (0 - 20 cm) y la otra ecuación representa a los demás estratos (20-40, 40-60, 60-80, 80-100, 100-120 cm).

Control de Riegos

Los riegos se aplicaron una vez que se presentaron las condiciones de humedad permitidas para los tratamientos, los estratos de 0-20 cm hasta llegar a 120 cm se utilizaron como indicador de riego. Para determinar la lámina de riego a aplicar, se utilizó la siguiente ecuación:

donde:

L_r = es la lámina de riego por aplicar (cm)

l = número de estratos (6 de 0 a 120 cm)

CC_i = contenido de humedad en el por ciento volumen a capacidad de campo en el estrato i

Hr_i = Contenido de humedad en por ciento volumen en el momento de muestreo en el estrato i

P_i = Profundidad del estrato i (20 cm)

Los riegos se efectuaron por aspersión; cada parcela contaba con 4 aspersores colocados en las esquinas de la parcela, y regaban sectorialmente en un ángulo de 90° , el alcance de cada aspersor era de 10 m. Se colocaron pluviómetros en el interior de la parcela para llevar un mejor control de la cantidad de agua aportada por los aspersores.

Variables para validar el modelo

Las variables del cultivo para validar el modelo fueron: índice de área foliar, acumulación de materia seca, y nitrógeno en la parte aérea y rendimiento de grano, el procedimiento para determinar cada una de las variables es el siguiente: del día 21 DDS hasta el día 158, se realizaron 12 muestreos de plantas a un intervalo promedio de 11 días. En cada muestreo se colectaron 6 plantas por tratamiento y se identificó la etapa de desarrollo, del cultivo (número de hojas y aparición de otros órganos).

Las plantas fueron llevadas al laboratorio donde se separaron las hojas, se midió el área de cada hoja en un integrador automático marca Denko, modelo AAM-7. Una vez conocida el área foliar por planta, se sumó el de las 6 plantas y se dividió entre 0.85 m^2 , que es el área ocupada por ellas en el campo, el resultado representa el índice de área foliar (IAF) del cultivo.

Posteriormente, a la medición del área foliar, las plantas completas se introdujeron a la estufa a una temperatura de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 48 horas, para luego pesarlas y obtener el peso seco o contenido de materia seca por planta.

Una vez que se obtuvo la materia seca, se molieron las muestras y se procedió a determinar el contenido de nitrógeno en por ciento, por el método de Kjeldhal.

Para evaluar el rendimiento de grano, de las parcelas se recolectaron separadamente las mazorcas en una superficie de 2 m^2 , representando cada área una superficie de (5). Posteriormente se desgranó 1 mazorca, se pesó el grano, se le determinó el contenido de humedad y se corrigió el peso, a un contenido de humedad en el grano de 14%.

Entradas de Datos al modelo

EPIC simula una gran cantidad de números de diferentes fenómenos, pero como un resultado requiere un gran número de entradas de datos del cultivo y datos de suelos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Simulación

Índice de área foliar simulado

En cuanto al Índice de área foliar para las tres condiciones, la tendencia de los valores simulados y observados que se presentan en la Figura 2, la magnitud de las desviaciones superiores a 20 % , son para valores menores de IAF, que corresponden al inicio del cultivo, para valores observados y simulados que se encuentran dentro de un rango de ± 15 %, y en su mayoría no sobrepasan el 20 % , al final del ciclo las desviaciones entre el IAF simulado y observado fue de un ± 10.74 % para el Tratamiento 1, de un ± 14.93 % y ± 3.44 % para los Tratamientos 2 y 3 respectivamente

Cabelguenne *et al.* (1986) citan que una desviación de ± 15 %, es el limite de la variabilidad corriente en experimentación agrícola, y que este rango de desviación, debe ser considerado como un límite confiable de simulación.

Es importante señalar que durante el desarrollo del experimento se presentaron tres granizadas, que afectaron a las plantas, provocando el rasgamiento de las hojas, y por lo tanto al crecimiento de las plantas, y dificultó la medición del área foliar en las hojas

rasgadas. La primera granizada ocurrió a los 28 DDS, esta podría ser una de las causas que motivaron que al inicio del cultivo, se presentaron las mayores desviaciones en por ciento, aunque, en valor absoluto no sean muy representativas por el tamaño de la planta. Tomando en cuenta lo anterior se puede considerar que el modelo simuló convenientemente el IAF, hasta los 130 DDS.

La Figura 1 también muestra que en los valores observados de IAF, la duración

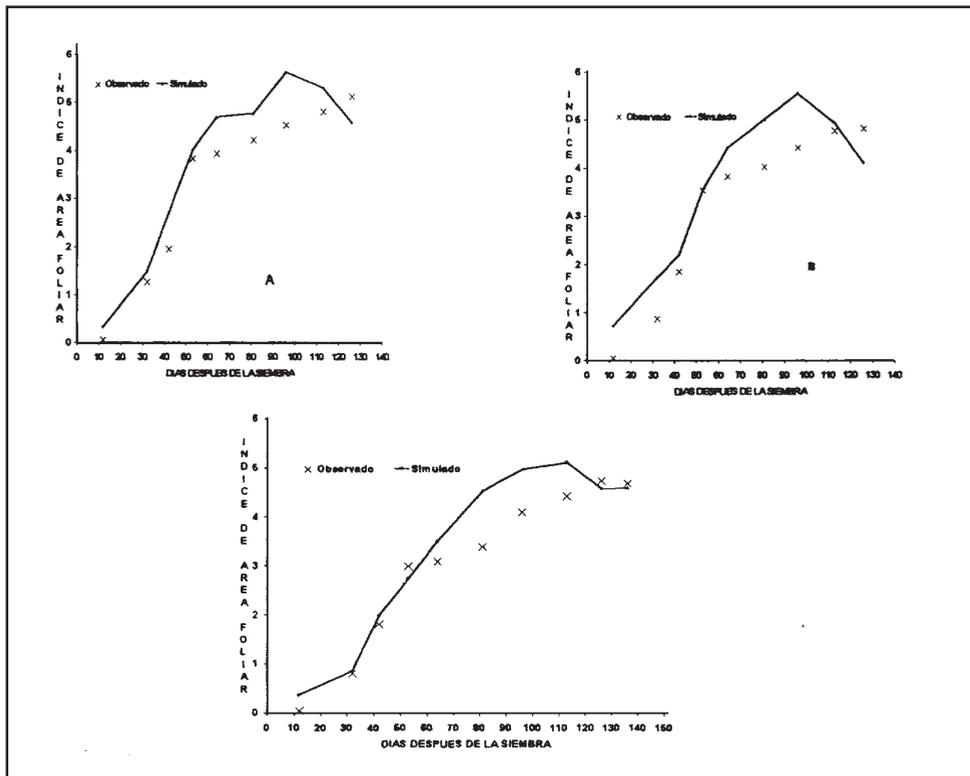


Figura 1. Índice de área foliar observado y simulado, en las tres condiciones de humedad de suelo, ETM-RE (A), T2 (B) y T3 (C), durante el desarrollo del cultivo.

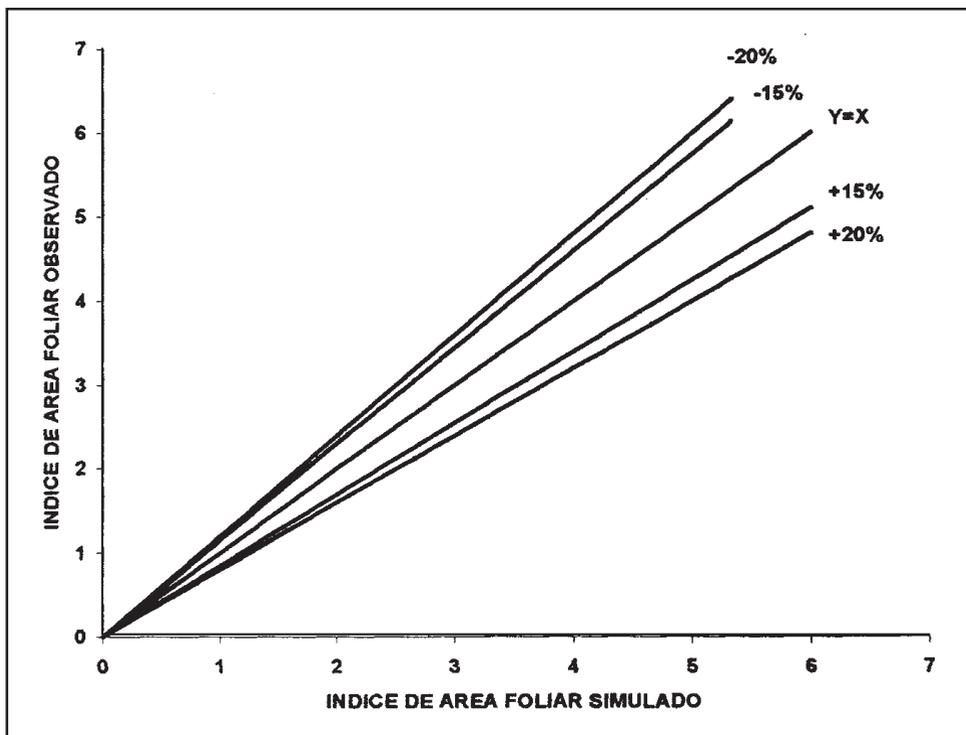


Figura 2. Capacidad de predicción del modelo en la variable índice de área foliar, en las tres condiciones de humedad evaluada, durante el desarrollo del cultivo.

de la superficie foliar fue mayor, por que hasta los 130 DDS, se denota que el cultivo mantiene un nivel alto de índice de área foliar; mientras que para los valores simulados, el decremento del IAF comienza alrededor de los 100 DDS.

El inicio del decremento del IAF en el modelo, está determinado por un parámetro denominado DLAI que, en el caso de la simulación, subestima el inicio de cuando el cultivo

comienza a declinar el índice de área foliar. Lo anterior nos indica que para trabajos futuros, se considere obtener los valores para esta variedad de los parámetros que definen la tasa de variación de IAF durante el desarrollo del cultivo, como es el caso del DLAI, y que en este trabajo no se efectuaron, debido a que el área foliar del cultivo fue afectada por las granizadas.

Materia seca simulada

De acuerdo a los supuestos del modelo, y tomando en cuenta que la simulación permite reproducir la esencia de un sistema, pero no el sistema en si, los resultados que se presentan a continuación tratan de simular 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.

En la Figura 4., se presentan las tendencias de la materia seca, tanto simuladas como observadas, en las tres condiciones de humedad de suelo, ETM-REF, 12 y T3 (A, B, y C, respectivamente).

Con la información de las variables observadas en el campo (índice de área foliar, materia seca, acumulación de nitrógeno en la planta), se procedió a compararlas con los valores simulados del modelo EPIC. La comparación se realizó para las tres condiciones de humedad de suelo (definidas por el número de riegos y las precipitaciones pluviales que se presentaron durante el ciclo del cultivo).

Para la materia seca, en la condición EIM-REF, la predicción del modelo sobreestima ligeramente los valores en el período de 88 a 120 días, esta situación no fue similar para las otras dos condiciones, en las cuales el ajuste del modelo fue mas preciso. En términos generales se puede decir que el modelo hace una buena simulación de la materia

seca a través del tiempo, en las diferentes condiciones del estudio, puesto que los valores observados tienen las mismas tendencia que los simulados, tal como se observa en la Figura 3.

Los valores máximos del peso seco observados en el campo en las condiciones ETM-RE, T2 y 13, fueron de 19, 17 y 15 ton/ha, los cuales muestran que el estrés hídrico a que fueron sometidos los Tratamientos 2 y 3 en las etapas de floración y formación del grano, influyeron en el rendimiento de materia seca y de grano, siendo el efecto del estrés hídrico mas acentuado en el tratamiento 3, que estuvo bajo condiciones más críticas

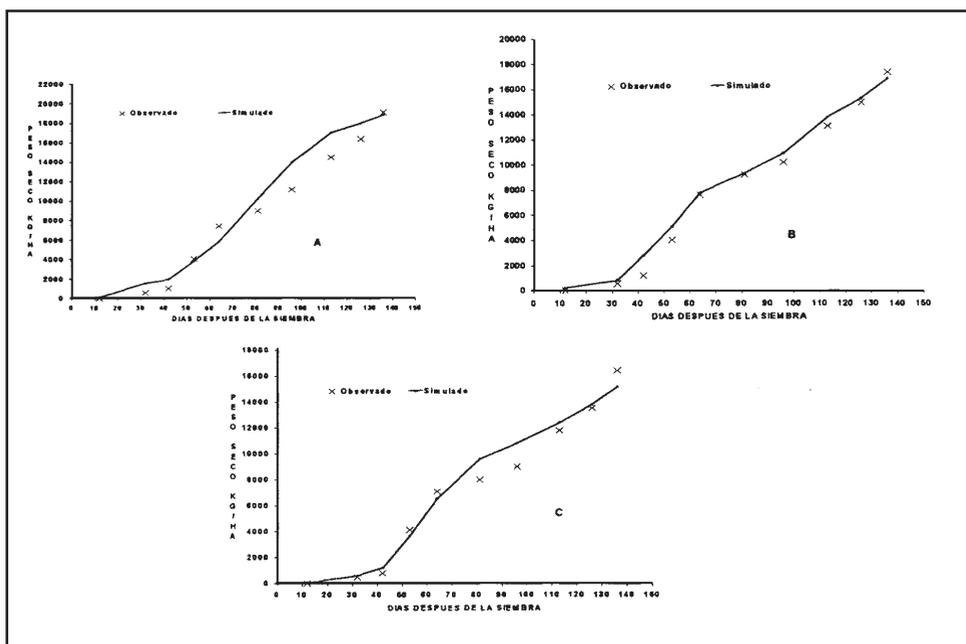


Figura 3, Acumulación de materia seca observada y simulada , en las tres condiciones de humedad de suelo, ETM-REF (A), 12 (B) y 13 (C), durante el desarrollo del cultivo.

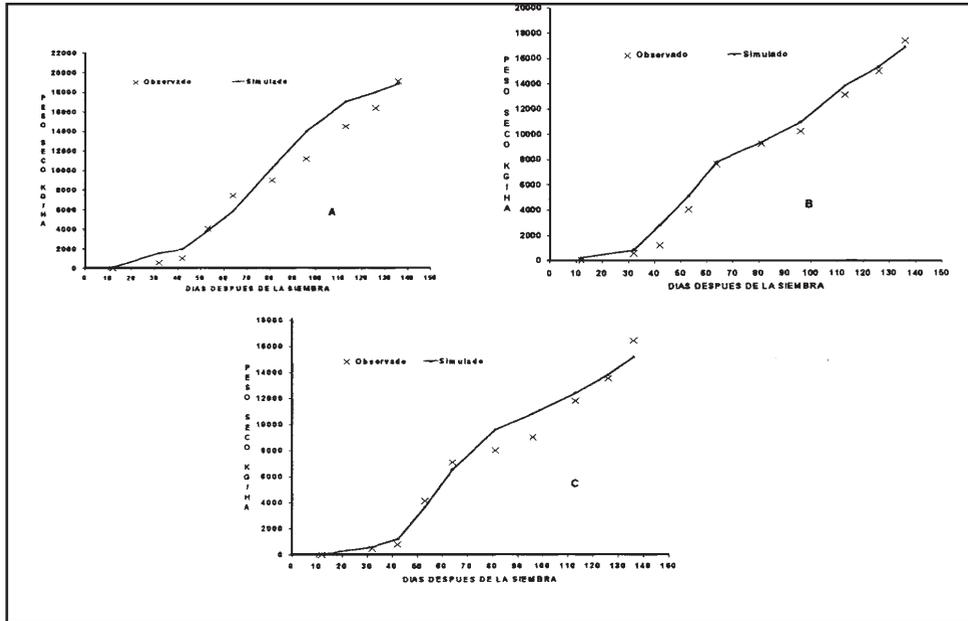


Figura 4. Capacidad de predicción del modelo en las tres condiciones de humedad de suelo evaluado, ETM-REF (A), T2 (B) y T3 (C), durante el desarrollo del cultivo.

de déficit de agua en el suelo. Respectivamente dichos valores son similares a los valores máximos que simuló el modelo. Los valores máximos de peso seco, en las tres condiciones, no son tan diferentes como se pudo haber esperado de acuerdo a los números de riegos, ya que las precipitaciones influyeron al no detectar diferencias más marcadas. Los valores altos de materia seca observados en el campo, se debieron principalmente a que el material de maíz sembrado presentó un buen vigor, elevada altura de planta (3.20 m en promedio) y un considerable número de hojas por planta (22 hojas por plantas aproximadamente).

Simulación de nitrógeno

La Figura 5 presenta los valores de nitrógeno acumulado y simulado, en función del tiempo. La cual denota que para los tres tratamientos los valores simulados se desvían fuertemente de los observados, en la Figura 6 se observan desviaciones entre las dos variables superiores a un $\pm 20\%$ en 50% de los datos.

Este resultado no puede ser atribuible únicamente al modelo que tiene baja

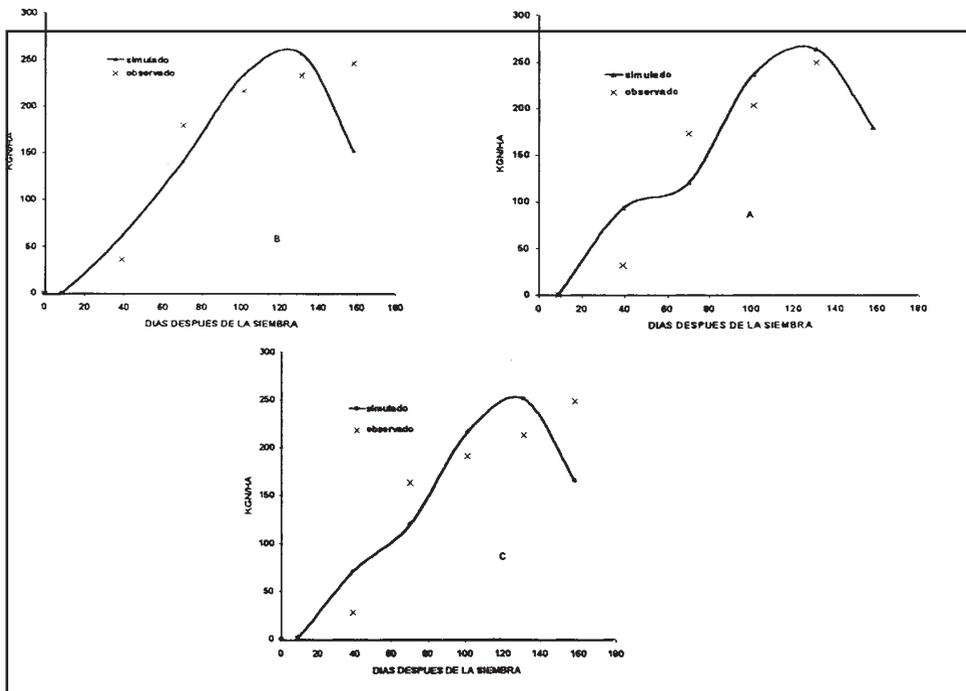


Figura 5. Acumulación de nitrógeno simulado y observado de los tratamientos ETM-REF (A), tratamiento 2 (B) y tratamiento 3 (C), durante el desarrollo del cultivo.

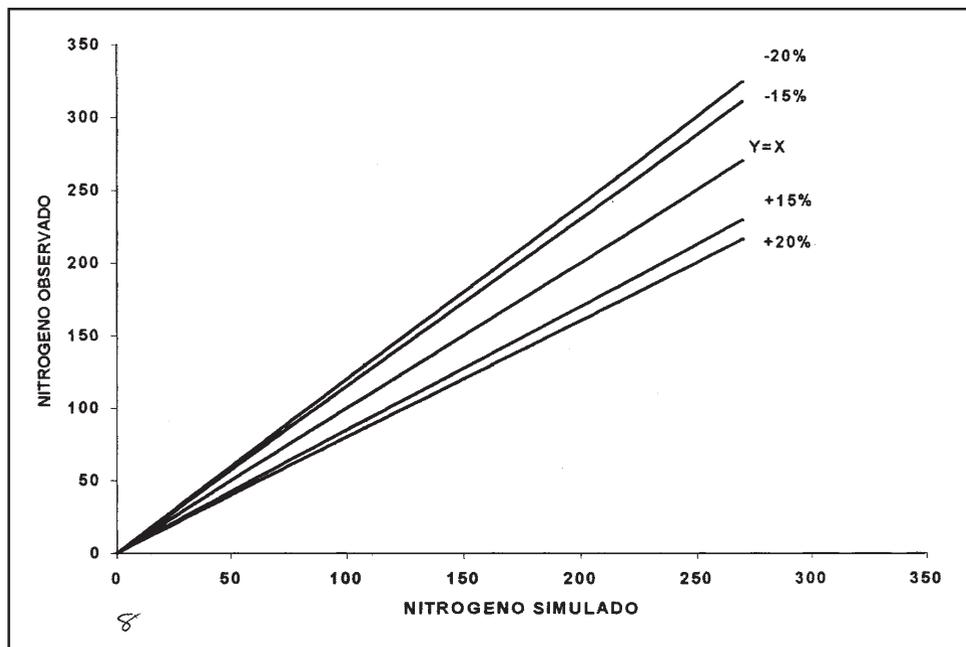


Figura 6. Capacidad de predicción del modelo en las tres condiciones de humedad de suelo evaluada, ETM-REF (A), T2 (B) y 13 (C), durante el desarrollo del cultivo.

capacidad de predecir en contenido de nitrógeno, es importante considerar que el nitrógeno es un parámetro que no es fácil de evaluar cuantitativamente en el campo, y en la planta por la variabilidad existente, requiriéndose para estudios futuros llevar un mejor control del contenido de nitrógeno en el suelo y del aportado por otras fuentes.

Rendimiento de Grano simulado y observado

En el Cuadro 2 Se presentan los valores de rendimiento de grano observado y simulado y las desviaciones

Cuadro 2. Rendimiento de grano observado y simulado en kg/ha y la desviación entre ellos en kg/ha y en por ciento del valor observado.

Tratamiento	R. observado	R. simulado	
Desviaciones	kg/ha	kg/ha	kg/ha
%			
1	10554	6502.3	-4051.7
-38.3			
2	9612	6227.3	3384.7
-35.2			
3	8740	4284.0	4456.0
-50.9			

Los resultados muestran que el modelo subestima el rendimiento en un 38.3; 35.2 y 50.9 % para los Tratamientos 1, 2 y 3 respectivamente, siendo la desviación elevada, indicando con esto, que el modelo no simuló convenientemente el rendimiento.

Como se citó anteriormente, el rendimiento al momento de la cosecha es calculado en base a un índice de cosecha (IC), multiplicado por la materia seca total en ese momento.

Consideramos que el comportamiento de la variable índice de área foliar, fue una de las causales, para que el modelo simulara el rendimiento de grano inferior al observado, siendo necesario en trabajo futuros determinar para esta variedad los parámetros que definen la tasa de variación del índice de área foliar (DLAI, DLAP y RLAP) para que el modelo simule convenientemente el rendimiento de grano.

CONCLUSIONES

- El modelo EPIC simuló correctamente el índice de área foliar en parte del desarrollo del cultivo, así como la acumulación de materia seca, las desviaciones entre valores simulados y observados en su mayoría se encuentran en un rango de ± 15 %.
- El modelo no simula convenientemente la acumulación del nitrógeno, desviaciones fuera del rango ± 15 % son detectadas en el 50 % de las observaciones. Siendo difícil separar las faltas del modelo, de aquellas proporcionadas por los datos con que se alimenta éste, así como posibles errores de muestreo en los datos observados se considera que, para mejorar el grado de precisión es necesario perfeccionar los procedimientos de muestreos para esta variable.
- El modelo subestima el rendimiento de grano en un 38.3 % , 35.2 % y 50.9 % para los Tratamientos 1, 2 y 3 respectivamente. Como se citó en el caso anterior es difícil separar los errores del modelo de aquellos ocasionados por los datos con que se alimenta el modelo. Pero en este caso hemos detectado que una de las posibles causas que influyen en que el modelo subestime el rendimiento, es debido a que el IAF, al final del ciclo del cultivo subestime la acumulación de materia seca y el índice de cosecha, ya que el IAF determina estas dos variables. Correcciones en las variables que definen la tasa del IAF en el tiempo como son DLAI, DLAP y RLAD son necesarias efectuar a un futuro.
- Muchos procesos quedan por cumplir en el caso de la simulación de maíz, tanto en la adquisición de conocimientos como en la simulación. La respuesta del cultivo a

diferentes condiciones de manejo y ambiente son poco comprendidas, ofreciendo grandes perspectivas para la simulación como una herramienta de simulación que permita comprender el comportamiento de la planta bajo diferentes situaciones.

LITERATURA CITADA

- Cabelguenne M., Charpentreau J.L. Jones C.A., Marty J.R. Rellier J.P. 1986. Conduite des systemes de grande culture et prevision des rendements: tentative de modelization. II. Etalonnage du modele: resultats et perspectives.-C.R. Acade. Agric. Fr. 72, p. 125-1 32
- Whisler, F. D. 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. Adv. Agron. 40: 141-208
- Williams, J.R., C. A., Jones and T. Dyke 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil product. Trans. Of the ASAE 129-1 44.