



AgEcon SEARCH
RESEARCH IN AGRICULTURAL & APPLIED ECONOMICS

The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library

This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.

Help ensure our sustainability.

Give to AgEcon Search

AgEcon Search
<http://ageconsearch.umn.edu>
aesearch@umn.edu

*Papers downloaded from **AgEcon Search** may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.*



IBERO-AMERICAN PROGRAMME FOR SCIENCE, TECHNOLOGY AND DEVELOPMENT
IBERO-AMERICAN NETWORK OF BIOECONOMICS AND CLMATE CHANGE



3.4 The simulation models as efficient tool for the optimum water manage and fertilization in agricultural crops for different systems in Habana South.

Teresa, López Seijas, Ph.D.*; Felicita, González Robaina, Ph.D. †; Yoïma, Chaterlan Durruty, Ph.D. ‡; Greco, Cid Lazo, Ph.D. §; Graciela, Dueñas, Ph.D.**; Antonio, Casanova, Ph.D††.

Abstract

At the present works the experiences were resume with the simulation models used for climatic pedology conditions in the Cuba region, with the general objective to define strategies of optimal water manage and nitrogenous fertilization in economic importance crops.

The results were answers to studies that had as base a different experience of model validation for ground and climate conditions from the Habana South (López et al. 2000, 2003, 2006a, 2006b) where the field information was used that was disposal over different component of the system (ground, crops and climate).

Jel Classification: F:64; Q:24; Q:25; Q:57;Q:58

Keywords: Simulation Models; Ground; Water; Fertilization;

* Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje. Ave. Camilo Cienfuegos y 27. Arroyo Naranjo. Apdo. Postal 6090. C. Habana. Cuba. e-mail: teresa@iird.cu

† Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje. Ave. Camilo Cienfuegos y 27. Arroyo Naranjo. Apdo. Postal 6090. C. Habana. Cuba.. Email: felicita@iagric.cu

‡ Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje. Ave. Camilo Cienfuegos y 27. Arroyo Naranjo. Apdo. Postal 6090. C. Habana. Cuba.

§ Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje. Ave. Camilo Cienfuegos y 27. Arroyo Naranjo. Apdo. Postal 6090. C. Habana. Cuba.

** Instituto de Investigaciones de Suelos. C. Habana. Cuba.

†† Instituto de Investigaciones Hortícolas "Liliana Dimitrova". C. Habana. Cuba.





**PROGRAMA IBEROAMERICANO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO
RED IBEROAMERICANA DE BIOECONOMÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO**



3.4 Los modelos de simulación como herramienta eficaz en los estudios del manejo óptimo del agua y la fertilización en diferentes sistemas de cultivos agrícolas en el sur de la habana.

Teresa, López Seijas, Ph.D.*; Felicita, González Robaina, Ph.D. †; Yoíma, Chaterlan Durruty, Ph.D. ‡; Greco, Cid Lazo, Ph.D. §; Graciela, Dueñas, Ph.D.**; Antonio, Casanova, Ph.D††.

Resumen

En el presente trabajo se resumen las experiencias realizadas con la utilización de modelos de simulación para las condiciones edafoclimáticas de esta región de Cuba, con el objetivo general de definir estrategias de manejo óptimo del agua y la fertilización nitrogenada en cultivos de importancia económica.

Los resultados respondieron a estudios que tuvieron como base diferentes experiencias de validación del modelo para las condiciones de suelo y clima del sur de La Habana (López et al, 2000, 2003, 2006a, 2006b) y donde se utilizó la información de campo disponible sobre los diferentes componentes del sistema (suelo, planta y clima).

Jel Classification: Q:40; Q:54; Q:50; Q:57;

Palabras claves: Modelos de Simulación; Suelos; Agua; Fertilización;

* Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje. Ave. Camilo Cienfuegos y 27. Arroyo Naranjo. Apdo. Postal 6090. C. Habana. Cuba. e-mail: teresa@iird.cu

† Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje. Ave. Camilo Cienfuegos y 27. Arroyo Naranjo. Apdo. Postal 6090. C. Habana. Cuba. Email: felicita@iagric.cu

‡ Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje. Ave. Camilo Cienfuegos y 27. Arroyo Naranjo. Apdo. Postal 6090. C. Habana. Cuba.

§ Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje. Ave. Camilo Cienfuegos y 27. Arroyo Naranjo. Apdo. Postal 6090. C. Habana. Cuba.

** Instituto de Investigaciones de Suelos. C. Habana. Cuba.

†† Instituto de Investigaciones Hortícolas "Liliana Dimitrova". C. Habana. Cuba.



Introducción.

La utilización de modelos matemáticos para la simulación y predicción del movimiento del agua y los solutos en sistemas agrícolas, ha resultado en la actualidad una herramienta útil e indispensable para desarrollar soluciones de diferentes problemas de manejo agrícola y medioambiental. No obstante, la precisión de sus resultados puede estar afectada en gran medida por la simplificación que se asume en las representaciones de los balances de agua en el suelo dentro de los modelos (Antonopoulos, 2001, Barrales et al, 2004, De Paz y Ramos, 2000, Dust et al, 2000, Kumar y Singh, 2003, Singh y Datta. 2006).

Los modelos mecanicistas ó de base física, que resuelven en un esquema numérico las ecuaciones generales del flujo del agua en el suelo, han demostrado ser más eficientes al minimizar los errores en la predicción del balance de agua. En la actualidad el uso combinado de estos modelos junto a técnicas de sensores remotos y sistemas de información geográfica resultan una herramienta poderosa para la evaluación espacial y temporal de los requerimientos hídricos así como del transporte de solutos (nitratos, bromuros, pesticidas) hacia y fuera de la zona radical, información que permite sustentar un manejo adecuado del riego y la fertilización y un uso racional y sostenible de los recursos (Abbasi et al, 2003, Alí et al, 2000, Antonopoulos, 2001, Barrales et al, 2004, De Paz y Ramos, 2000, Dust et al, 2000, Kumar y Singh, 2003; Singh y Datta, 2006).

En Cuba, se ha trabajado en la evaluación y validación de diferentes modelos de simulación de transferencias hídricas, fundamentalmente para las condiciones edafoclimáticas de la región de la sabana Habana-Matanzas, donde los suelos del agrupamiento Ferralsol (clasificación FAO UNESCO) ocupan más del 70% del área agrícola y en ellos se cultiva alrededor del cuarenta por ciento de la producción de granos, viandas y hortalizas del país. Por tanto el manejo eficiente del agua y los fertilizantes en éstos para obtener rendimientos agrícolas óptimos, constituye una cuestión de vital importancia para la economía cubana.

En el presente trabajo se resumen las experiencias realizadas con la utilización de modelos de simulación para las condiciones edafoclimáticas de esta región del país, con el objetivo general de definir estrategias de manejo óptimo del agua y la fertilización nitrogenada en cultivos de importancia económica.

Primeramente, se discuten los resultados de la utilización del modelo de simulación STICS (Brisson et al, 1997) en la determinación de la combinación óptima de agua y nitrógeno para los cultivos de Maíz y Fríjol sobre un suelo Ferralsol. Ese modelo (STICS) simula el funcionamiento del sistema suelo-planta-atmósfera a un paso de tiempo diario. Los principales procesos de la evolución del sistema se dan en ecuaciones de forma simple: *balance de carbono, balance de agua y de nitrógeno*.

Estos resultados responden a estudios que tuvieron como base diferentes experiencias de validación del modelo para las condiciones de suelo y clima del sur de La Habana (López et al, 2000, 2003, 2006a, 2006b) y donde se utilizó la información de campo disponible sobre los diferentes componentes del sistema (suelo, planta y clima).

Por otra parte, se presentan también en los resultados de la utilización del modelo determinístico de base física, MACRO (Jarvis, 1996), validado para las condiciones del suelo en estudio (Rodríguez y López, 2000), que permitió definir relaciones para corregir la simulación de STICS del flujo del agua y la lixiviación de los nitratos (López et al, 2006a).

Se resumen, además los principales resultados obtenidos hasta el momento en la utilización del modelo STICS para la predicción del comportamiento del cultivo del tomate en condiciones protegidas (López et al, 2002). Este último trabajo está relacionado con un proyecto del ministerio de la agricultura cubano para la búsqueda e implementación de herramientas que faciliten la evaluación y definición del tipo de casa de cultivo óptima para las condiciones de Cuba, en función de los ambientes climáticos que en ellos se generan y su influencia sobre el rendimiento óptimo de los cultivos hortícolas.

Materiales y Métodos.

Resumen de las características de los modelos utilizados y las evaluaciones de los mismos para las condiciones de suelo y clima del sur de La Habana.

Modelo de simulación MACRO (Jarvis, 1996, versión 3.2): considera el régimen no permanente del flujo de agua y el transporte de solutos en un suelo estratificado. Este modelo es capaz de simular un balance completo del agua, incluyendo el tratamiento de la precipitación (lluvia y riego), evapotranspiración, extracción de agua por las raíces del cultivo,

percolación profunda y flujo horizontal hacia un dren soterrado. El modelo puede trabajar considerando uno o dos dominios de flujo (micro y macro poros) lo que permite una evaluación cuantitativa del impacto del flujo preferencial por las grietas y fisuras del suelo en los procesos de transporte de solutos. Para el caso de un solo dominio (suelos considerados “rígidos”) el modelo se reduce a la resolución de la ecuación de Richards para el flujo del agua en el suelo y las ecuaciones de convección-dispersión para el flujo de solutos (Jarvis, 1996).

Rodríguez y López (2000), realizaron una validación y un análisis de sensibilidad sobre sus variables más significativas para lo que utilizaron datos obtenidos en una prueba de Drenaje Interno realizada sobre un Ferralsol en una zona del sur de la Habana.

Se obtuvo una excelente correspondencia entre los perfiles de contenido de agua en el suelo y los flujos de drenaje interno medidos en el campo y simulados. Del análisis de sensibilidad realizado se obtuvo que MACRO presentó mayor sensibilidad a las humedades volumétricas frontera y residual, dos de los parámetros que definen las funciones hidráulicas del suelo.

Modelo de simulación de crecimiento de cultivo STICS (Brisson et al, 1997, versión 3.2): predice el funcionamiento del sistema suelo-planta-atmosfera a un paso de tiempo diario (eventualmente por decenas). Los principales procesos de la evolución del sistema se dan en ecuaciones de forma simple: *balance de carbono*, *balance de agua y de nitrógeno*. Las plantas simuladas son herbáceas anuales con una cosecha única al final del ciclo, el sistema suelo (sin cultivo) puede ser simulado también y pueden simularse rotaciones de cultivos a partir del modulo de encadenamiento de simulaciones.

López et al (2000, 2002), evaluaron la simulación con STICS para las condiciones de suelo y clima del sur de La Habana con énfasis en el balance hídrico y de nitrógeno para el cultivo del Maíz y el Fríjol sobre un Ferralsol. Para este estudio se utilizó toda la información disponible de experimentos de campo realizados en la Estación Experimental del Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje y la Estación Experimental de Suelos “La Renée”, ambas situadas en el sur de la Habana.

La comparación entre los valores observados y simulados demostró la efectividad del modelo para predecir los consumos de agua totales y el rendimiento de ambos cultivos en estudio. El trabajo de optimización permitió definir los parámetros de los ficheros para cada cultivo analizado (Tabla 1).

No obstante, se detectaron deficiencias del modelo STICS en la predicción del crecimiento del frente radical y de la humedad del suelo durante algunos periodos del ciclo del cultivo, en este sentido se presentan diferencias significativas para los períodos de poca actividad radical donde el flujo de redistribución del agua en el suelo toma valores considerables y el esquema simplificado de balance hídrico del modelo no puede tenerlo en cuenta. La optimización de los parámetros de la función de crecimiento del frente radical se resume en la Tabla 2.

Por su parte, el balance de nitrógeno en el suelo quedó ajustado a partir de la optimización de los parámetros que intervienen en la función de velocidad de mineralización del nitrógeno orgánico en el suelo (Tabla 2), no obstante la predicción de la lixiviación de nitratos se ve afectada también por las simplificaciones del esquema de balance de agua del modelo.

Tabla 1. Resumen de los parámetros de cultivo optimizados para la conformación de los ficheros de entrada de los cultivos de maíz y frijol en las variedades estudiadas (López et al, 2000).

Nombre parámetro	Significado	Cultivo		Variable salida para optimización
		Maíz	Frijol	
stdrpsen	unidades de desarrollo entre los estados DRP (comienzo llenado del grano) y SEN (comienzo senescencia neta).	525	250	Datos experimentales de duración de fases fenológicas.
Stsenfir	unidades de desarrollo entre los estados SEN y FIR (fin de aumento índice de cosecha).	250	300	
stfirmat	unidades de desarrollo entre los estados FIR y MAT (madurez fisiológica).	0	0	

Nombre parámetro	Significado	Cultivo		Variable salida para optimización
		Maíz	Frijol	
tcmx	Temperatura máxima de crecimiento	42	35	
tcopt	Temperatura óptima de crecimiento	25	15	
cgrain	Número granos producidos por g de materia seca por día durante el período de latencia precedente al estado DRP.	100	100	materia seca y potranspiración
Cgrainv0	Número de granos producidos a velocidad de crecimiento nula.	50	0	
h2Ograin	Cantidad de agua del grano a la cosecha.	0,20	0,30	
pgrainmaxi	Peso máximo de un grano para la variedad estudiada.	0,40	0,30	

Tabla 2. Resumen de los parámetros de crecimiento radical y función de mineralización del nitrógeno en el suelo optimizados para la conformación del fichero de parámetros generales del modelo STICS (López et al, 2000, 2002).

Nombre parámetro	Significado	Valor optimizado	Variable salida para optimización
CROIRAC	Velocidad de crecimiento del frente radical.	0.15	Profundidad frente radical.
ZPENTE	Profundidad del nivel al que la densidad radical se reduce a la mitad con respecto a la superficie para el perfil de referencia.	70	
ZPRLIM	Profundidad máxima del perfil radical para el perfil de referencia.	80	

Nombre parámetro	Significado	Valor optimizado	Variable salida para optimización
FTEM	Parámetro de la función temperatura/ velocidad de mineralización.	0,13	Contenido de nitrógeno en las capas del perfil.
FHUM	Parámetro de la función humedad/ velocidad de mineralización	0,101	
TREF	Temperatura de referencia para la función del factor de corrección temperatura para el cálculo de la mineralización del humus.	13,899	
FMIN1	Parámetro de la velocidad potencial de mineralización.	0,299	
FMIN2	Idem, efecto del contenido de arcilla.	10,397	
FMIN3	Idem, efecto del contenido de calcio.	30,0	

Un análisis comparativo de estos dos modelos (López et al, 2002), demostró que el modelo de base física MACRO es más eficiente en la predicción de la dinámica de la humedad del suelo y la lixiviación de nitratos que el modelo funcional STICS, no obstante, este último resulta de mayor utilidad práctica para la predicción del rendimiento de los cultivos debido a su menor complejidad de manejo y a un menor requerimiento de información de entrada fundamentalmente de propiedades del suelo.

Se realizó, por tanto un trabajo de simulación con el modelo MACRO para definir relaciones para la predicción de las pérdidas de agua y nitratos en este tipo de suelos (López et al, 2006) que pudieran ser utilizadas para corregir los valores simulados por el modelo STICS y facilitar así su uso para la predicción de estrategias de riego y fertilización nitrogenada en estas condiciones de suelo, clima y cultivos (Tabla 3).

Tabla 3. Ecuación definida a partir de la simulación con el modelo MACRO para predecir las pérdidas de nitratos lixiviados en el fondo del perfil en suelos Feralsoles (López et al, 2002, 2006).

Variables	Parámetros	valor	R2	Error Std	Durbin Watson
Agua Total	a	0,584	0,963	13,170	1,77
N total	b	0,606			

Modelo: $Q_{les} = a * \text{AguaTotal} + b * N \text{ total}$.

Donde: Q_{les} - cantidad de nitratos lixiviados en Kg/ha; Agua total – cantidad total de ingresos por riego y precipitación, en mm; N total – cantidad total de nitrógeno aplicado por fertilización, en KgN/ha.

La conformación del fichero de parámetros del suelo se hizo a partir de la información de las propiedades hidrofísicas del suelo característico de la zona de estudio determinadas en trabajos anteriores (Tabla 4).

Para la conformación del fichero de parámetros del clima se utilizaron valores diarios de temperaturas máximas y mínimas (OC), radiación global (MJ/m²/día), evapotranspiración de referencia (mm/ día) y precipitación (mm).

Para el fichero de parámetros de itinerarios técnicos se definieron entregas de agua de 15 mm cada dos días; de 25 mm semanales, de 50mm cada 15 días y no riego, lo cual cubre desde el riego de alta frecuencia hasta el secano. No se analizó una condición de anegamiento ya que en estos suelos de alta permeabilidad no es una condición real en la práctica productiva. Estas dosis de riego se combinaron con diferentes cantidades de fertilizante nitrogenado: 50%, 100%, 150 % y 200% de la norma establecida para cada cultivo.

Como resultado del *trabajo de simulación* se tuvieron 36 ficheros de salida de las corridas del modelo STICS para cada cultivo (Maíz y Frijol).

Cada fichero de salida comprende las siguientes variables para cada día del ciclo del cultivo: índice de área foliar, LAI (m²/m²), materia seca aérea, masec (t/ha), materia seca del grano, masecgrain (t/ha), contenido de agua en cada capa del perfil del suelo, HR1- 20cm, HR2- 40cm, HR3- 60cm y HR4- 80 cm (% peso suelo seco), lámina de agua almacenada a la profundidad de 40cm, resmes (mm), flujo de agua drenada por debajo de la zona radical, drain (mm), evaporación real desde la superficie del suelo, es (mm), evapotranspiración, et (mm), profundidad radical efectiva, zrac (cm), temperatura de la superficie del cultivo, tcult (°C), contenido de N de cada capa del perfil del suelo, AZ1, AZ2, AZ3 y AZ4 (Kg/ha), cantidad de nitratos lixiviados en el fondo del perfil, Q_{les} (Kg/ha), cantidad de N en la planta, $Q_{nplante}$ (Kg/ha).

Se utilizaron los valores obtenidos de cada variable para realizar un análisis de correlación y regresión no lineal. Las funciones (f) trabajadas con los valores totales de las variables pueden resumirse en las siguientes:

- Función rendimiento- agua consumida total: **masecgrain = f (et)**
- Función rendimiento- agua consumida por fases del cultivo: **masecgrain = f (et₁, et₂).**
- Función eficiencia uso del agua – agua consumida: **masecgrain/ et = f (et).**
- Función lixiviación de nitratos- flujo de drenaje y contenido medio de nitrógeno en la zona radical: **Qles = f (drain, AZ_{0-40cm}).**
- Función lixiviación de nitratos- contenidos medios de agua y nitrógeno en la zona radical: **Qles = f (HR_{0-40cm}, AZ_{0-40cm}).**
- Función lixiviación de nitratos- contenidos medios de agua y nitrógeno en la zona radical: **Qles = f (HR_{0-40cm}, AZ_{0-40cm}).**
- Función contenido de nitrógeno en planta- contenidos medios de evapotranspiración y nitrógeno en la zona radical: **Qnplante = f (et, AZ_{0-40cm}).**

Tabla 4. Parámetros del suelo Ferralsol definidos para el trabajo con el modelo STICS (Lopez et al, 2000).

Parámetro	Unidad	Significado	Prof. (cm)	Valor
No	-	Número que identifica al suelo	-	254
argi %	%	Contenido de arcilla capa superficial	30	58,4
calc %	%	Contenido de calcio capa superficial.	30	0,60
Norg %	%	Contenido de nitrógeno orgánico capa superficial.	30	0,20
albédo	-	Albédo superficie del suelo en el estado seco.		0,17
Q0 mm	mm	Límite de evaporación del suelo fase potencial.		25

Parámetro	Unidad	Significado	Prof. (cm)	Valor
profhum, cm	cm	Profundidad equivalente de humificación.		30
ep cm	cm	Espesor de la capa de suelo.	20;40;60 80	20 60
hcc %p.	% peso	Humedad a capacidad de campo en % de peso de suelo seco ponderada hasta cada profundidad	20 40 60 80	31,3 36,5 37,3 37,5
h min %p.	% peso	Humedad al límite de marchitez permanente en % de peso de suelo seco ponderada hasta cada profundidad.	20 40 60 80	26,9 28,7 26,9 27,4
da	g/cm3	Densidad aparente de cada capa del suelo.	20 40 60 80	1,18 1,20 1,20 1,20
Identificador du sol	-	Identificación del suelo.	-	havane

Resumen de las características del trabajo de simulación con el modelo STICS en el cultivo del tomate en condiciones protegidas (casas de cultivo).

Experiencia de campo.

Los experimentos de campo se ejecutaron en la Unidad de cultivo protegido del Instituto de Investigaciones Hortícolas “Liliana Dimitrova, en La Habana, sobre un suelo Ferralsol, con los siguientes tratamientos: A1- Instalación protegida modelo Tropical A-12 con efecto “sombriлла” (casa abierta) y A2- Instalación protegida modelo Tropical A-12 con efecto

“invernadero” (casa cerrada). El cultivar de tomate utilizado comprendió el híbrido HA 3105 (Comercial, indeterminado y tolerante al TYLCV) de la época de plantación primavera-verano.

Evaluaciones del cultivo:

Fenológicas: Fechas de siembra del semillero, trasplante, apertura de la primera flor, inicio de la floración, inicio de la maduración, primera cosecha, cosechas sucesivas y última cosecha y ciclo vegetativo. Morfológicas: altura de la planta, grosor del tallo y No. de hojas, medición de ancho y largo de hojas para la cuantificación del Índice de área foliar, para ello se utilizó para la evaluación del área foliar ecuaciones definidas en la literatura para el mismo tipo de cultivar, evaluaciones de la producción de materia seca y del fruto en las plantas seleccionadas en cada parcela, porcentaje de fructificación en los cuatro primeros racimos. Todas estas evaluaciones se hicieron en cada fase fenológica del cultivo y se empleo un tamaño de muestra de 5 plantas por parcela por cada réplica.

Evaluaciones climáticas: en cada uno de los tipos de casa evaluados se realizaron mediciones diarias de las variables climáticas siguientes: Temperatura máxima, Temperatura mínima, Radiación global y Velocidad del viento. Las mediciones se realizaron en dos momentos del día (mañana y tarde) y a tres alturas diferentes: 1m, 1.5m y 2.2 metros.

Trabajo de simulación.

Este trabajo comprendió la definición de los siguientes ficheros de entrada del modelo STICS:

- Fichero de Parámetros Generales. En estos se incluyen las modificaciones definidas en los trabajos anteriores de validación del modelo para la función de crecimiento radical y para la función de mineralización del N en el suelo.
- Fichero de Parámetros del Suelo. Se utiliza el fichero ya definido anteriormente para el trabajo con cultivos al aire libre por ser el mismo tipo de suelo, Ferralsol.
- Ficheros de Parámetros del Clima. Se conforman a partir de la información climática de la zona de estudio recopilada en la etapa del trabajo experimental y se construyen para dos condiciones climáticas diferentes: Casa Cerrada y Casa Abierta.

- Ficheros de Parámetros de Itinerarios Técnicos. Para éstos se utilizan los datos experimentales de entrega de agua, fertilizante así como los días de cada fase del cultivo (trasplante, floración, fructificación, cosecha).
- Ficheros de Parámetros del Cultivo. Para la conformación de éstos se utilizaron las dos funciones fundamentales que definen el crecimiento y la producción del cultivo en cada condición climática analizada, que son la función de Índice de Área Foliar y de Producción de Materia Seca Aérea y en el Fruto. Para este trabajo se siguió el siguiente procedimiento:
 - Se trabajó primeramente con una condición climática dada para optimizar los parámetros del modelo referidos al cultivo.
 - Posteriormente se utilizó la información experimental de la segunda condición climática para validar los mismos en función de la comparación de las variables de salida siguientes: LAI (m²/m²), masec (t/ha), masecgrain (t/ha), HR1- 20cm, HR2- 40cm, HR3- 60cm y HR4- 80 cm (% peso suelo seco), resmes (a 40cm, en mm), drain (mm), et (mm).

Para la evaluación del modelo se realizó una prueba de t- Students para muestras dependientes para un 95% de confiabilidad. Por su parte la optimización de parámetros se realizó utilizando el módulo de Optimización del modelo STICS que utiliza como criterio el del error cuadrado medio.

Resultados y Discusión.

Resultados de los trabajos de simulación en los cultivos de Maíz y Frijol.

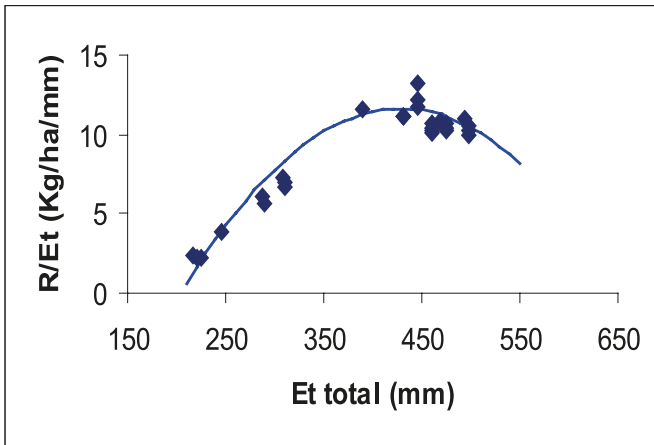
Para mostrar la eficacia del modelo de crecimiento STICS en la simulación del manejo del agua y la fertilización nitrogenada en los cultivos de Maíz y Fríjol resumimos y analizamos aquí los principales resultados alcanzados. Todas las funciones obtenidas con sus parámetros fundamentales y sus estadígrafos se pueden encontrar en los trabajos de López et al (2001, 2002, 2003).

Para encontrar el consumo óptimo de cada cultivo se analizó el incremento de la eficiencia en la utilización del agua consumida (**Rend/et total**) con respecto al incremento del consumo de agua. Para el Maíz

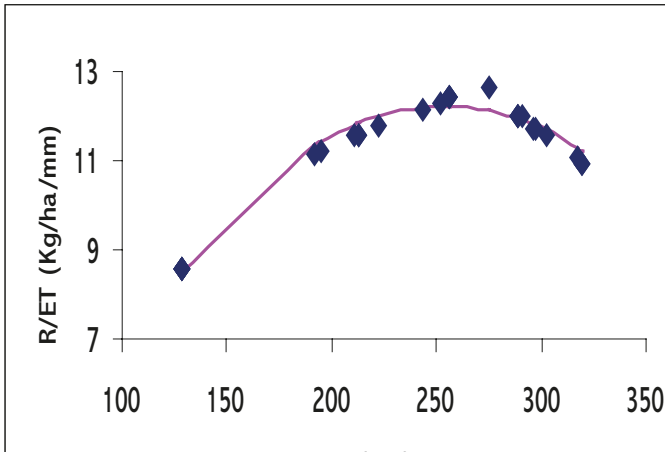
se definió un consumo óptimo de **480 mm** mientras que para el Frijol es de **254 mm**. Estos valores de evapotranspiración total permiten definir las normas de riego óptimas para cada uno de estos cultivos y las mismas también fueron definidas por fases fenológicas del cultivo.

La relación entre el rendimiento y las dosis y consumo de agua y las dosis de nitrógeno total aplicadas para cada cultivo muestran para ambos cultivos que el rendimiento se hace máximo para los valores óptimos de consumo de agua por el cultivo, aumentando ligeramente en este rango con el aumento de las dosis de nitrógeno aplicadas.

No obstante, al analizar la relación de la eficiencia de ese rendimiento en relación al consumo de agua y la dosis de nitrógeno aplicada (rendimiento/et/ N total) se puede observar que esta se hace máxima para el rango de consumos óptimos de agua combinado con una dosis de nitrógeno total entre los 100 y 150 KgN/ ha para ambos cultivos (Figuras 1 y Tablas 5 y 6).



A



B

Figura 1. Funciones Eficiencia uso del agua – Agua total consumida obtenidas con el trabajo de simulación para los cultivos de: A- Maíz y B- Frijol en las condiciones de suelo y clima del sur de La Habana.

Tabla 5. Resumen de los parámetros de los modelos encontrados para las funciones eficiencia uso del agua – agua total consumida para los cultivos de Maíz y Frijol en las condiciones de suelo y clima del sur de La Habana.

Cultivo	Modelo	Parám.	Valor	R	% Var. Expl.
Maíz	$R/ Et = a + b*Et + c*Et^2$ Et max = 480 mm R= 5.22 t/ha	a	-3.0699	0.950	90.18
		b	0.0197		
		c	-0.000023		
Frijol	$R/ Et = a + b*Et + c*Et^2$ Et max = 254 mm R= 3.04 t/ha	a	-2.9926	0.979	98.06
		b	0.1199		
		c	-0.00024		

Tabla 6. Parámetros y estadígrafos de las relaciones entre la eficiencia del rendimiento en relación al consumo de agua y la dosis de nitrógeno aplicada (rendimiento/ t_e/N total) para ambos cultivos en estudio.

Cultivo	Modelo	Parám.	Valor	R	% Var. Expl.
Maíz	Efic. = $a + b \cdot Et + c \cdot N_{Total}$ Efic. < Pr Efic. = $d + e \cdot Et + f \cdot N_{Total}$ Efic. > Pr	a	0.0031	0.978	95.8
		b	0.00096		
		c	-0.00033		
		Pr	0.309		
		d	0.0414		
		e	0.0025		
		f	-0.0024		
Frijol	Efic. = $a + b \cdot Et + c \cdot N_{Total}$ Efic. < Pr Efic. = $d + e \cdot Et + f \cdot N_{Total}$ Efic. > Pr	a	0.606	0.993	98.7
		b	-0.0002		
		c	-0.0006		
		Pr	0.406		
		d	1.355		
		e	-0.007		
		f	-0.0025		

Por otra parte, la **Figura 2** refleja la relación entre las pérdidas de nitratos lixiviados en el fondo del perfil (**Q_{les}**) en función de las cantidades de agua y nitrógeno total aplicadas. Como puede apreciarse estas aumentan linealmente con el aumento tanto de las cantidades de agua como de nitrógeno total aplicadas y se hacen máximas en ambos cultivos para valores de agua total aplicada superiores a los 700 mm o 30 riegos en las condiciones de estudio, que corresponden a los mayores valores de pérdidas de agua por debajo de la zona radical.

En ambos casos, también los valores máximos se alcanzan para cantidades totales de N aplicado superiores a los 500 KgN/ha, lo cuál para el cultivo del Frijol corresponde aproximadamente con el 200% de la norma establecida y para el Maíz con el 150% de esta norma.

No obstante, se obtienen valores de pérdidas de nitratos considerables (mayores a 300 KgN/ha) para altos valores de agua aplicada, aún para cantidades totales de N aplicado correspondientes a las normas

establecidas. Esto último resulta de gran interés a tener en cuenta para recomendaciones futuras de manejo de fertilizante nitrogenado en estos cultivos y bajo estas condiciones edafoclimáticas.

Estas relaciones resultan útiles para predecir la lixiviación de los nitratos en función de las cantidades totales de agua y nitrógeno aplicadas al perfil (**Tabla 6**), cuestión que constituye una de las afectaciones medioambientales principales que pueden provocar las prácticas inadecuadas de riego y fertilización nitrogenada en estos cultivos.

Por último, la relación de la acumulación de nitrógeno en planta (**Qnplante**) con las cantidades de agua consumidas (**Et**) y el contenido medio de nitrógeno en el perfil (**AZ_M**) para el Maíz y el Frijol respectivamente.

Para el caso del Maíz los valores más altos (130-145 Kg/ha) se observan para consumos de agua entre los 400-540 mm, coincidiendo con el rango de agua consumida donde se encuentran los rendimientos máximos y para estos valores aumenta significativamente con el aumento de **AZ_M** por encima de los 120 Kg/ha.

Para el Frijol el contenido de N acumulado en planta (**Qnplante**) presenta también mayores valores máximos (330-340 Kg/ha) para consumos de agua entre 250-270 mm, que coincide igualmente en este caso con el rango de agua consumida donde se tienen los máximos rendimientos, y un contenido medio de nitrógeno superior a 200 Kg/ha.

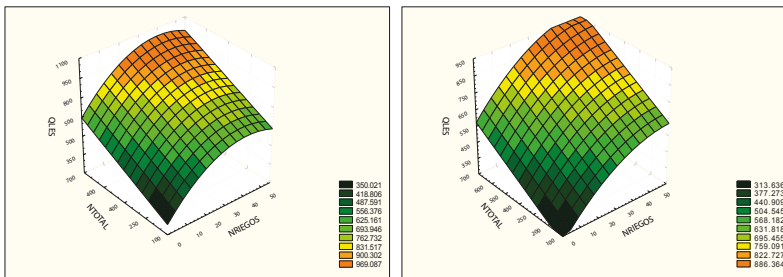


Figura 2. Relación entre las pérdidas de nitratos lixiviados en el fondo del perfil (**Qles**) en función de las cantidades de agua y nitrógeno total aplicadas para los cultivos de: A- Maíz y B- Frijol en las condiciones de estudio.

Resultados del trabajo de simulación en el cultivo de tomate bajo condiciones protegidas.

Primeramente, para caracterizar en síntesis los ambientes climáticos que se estudiaron hay que decir que las diferencias de las medias de las temperaturas y la radiación para todo el ciclo no son significativas, sólo las medias en las diferencias entre Tmax y Tmin difieren en alrededor de 1°C. No obstante, en las diferencias entre las medias para las tres fases generales del cultivo, este último parámetro (Tmax-Tmin) se diferencia sustancialmente para ambos tipos de casa en la fase de maduración cosecha, que abarca el periodo climático correspondiente a los meses de julio y agosto.

La diferencia de este parámetro para la casa cerrada con respecto a la abierta llega a ser en este periodo de 2,3 °C, lo que puede haber influido considerablemente en la afectación del rendimiento en este tipo de casa.

En la Tabla 7, se resumen los parámetros del modelo STICS optimizados a partir de los datos observados en la casa del tipo abierta. Como puede apreciarse estos se relacionan con la duración de los estados de desarrollo del cultivo, que originalmente en el modelo se definen en un esquema para plantas de granos (maíz, frijól, soya, trigo) y al utilizarlo para el cultivo del tomate se hace necesario modificarlo, desapareciendo la fase de meseta donde el LAI es máximo y constante (stlaxdrp=0) y la fase de llenado de vainas (stdrpsen=0). Por otra parte también se optimizaron dos de los parámetros fundamentales relacionados con la función de crecimiento del índice de área foliar y que a su vez inciden en la función de producción de materia seca (adens y vlaimax) así como el peso máximo que puede alcanzar un fruto (pgrainmaxi).

Las principales variables de salida analizadas en la evaluación del modelo con los parámetros de cultivo optimizados para el tipo de casa abierta definieron una excelente correspondencia entre los valores simulados y observados tanto para el LAI como para la materia seca aérea y del fruto (Figura 3).

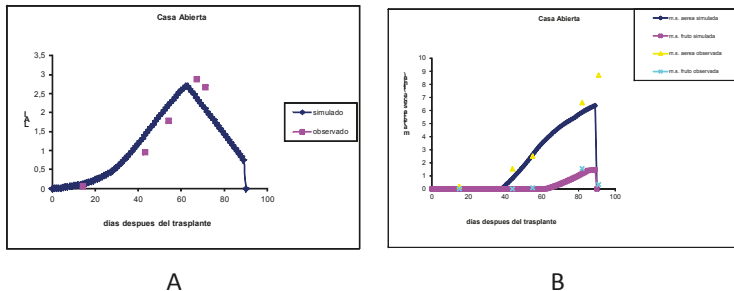


Figura 3. Comportamiento de los valores simulados y observados de las variables: A- LAI y B- materia seca aérea y del fruto para el ciclo del cultivo del tomate en el tipo de casa abierta.

Tabla 7. Parámetros del modelo STICS optimizados con los datos observados en la casa del tipo abierta para el cultivo del tomate que definen el fichero de planta (tomateP.plt).

Parámetro	definición	valor	Reducción Criterio optimización (error cuadrado medio)	
			antes	después
Duración estados de desarrollo				
stlevanf	Fase de establecimiento	171	0,8602	0,4259
stamflax	Final de establecimiento hasta índice foliar máximo.	90		
stlaxdrp	Máximo crecimiento foliar hasta inicio de fructificación.	0,01		
stdrpsen	Fase de llenado de vainas hasta comienzo de senescencia.	0,01		
stsenfir	Maduración	493		
stfirmat	Cosecha final	304		
Parámetros función LAI y materia seca				
adens	Parámetro función LAI	-1,03	0,6863	0,3389
vlaimax	Velocidad máxima de crecimiento foliar.	1,504		
pgrainmaxi	Paso máximo del grano.	400		

La validación de los parámetros optimizados del modelo para el cultivo del tomate en condiciones protegidas se realizó con los datos de las observaciones de la casa del tipo cerrada. La Figura 4 refleja estos resultados. Como puede apreciarse existe una excelente correspondencia entre los valores observados y simulados, lo cual se corroboró con los resultados del análisis estadístico.

Si se compara con los resultados de la casa de tipo abierta se puede apreciar que se tiene para el caso de la casa cerrada mayores valores de LAI y producción de materia seca aérea, o sea el crecimiento foliar es mayor por unidad de área en este tipo de casa que en la abierta. Sin embargo la producción de materia seca del fruto se ve realmente afectada, alargándose el momento de comienzo de la maduración y reduciéndose los valores en más del 50%. Esto está relacionado con las diferencias en las variables climáticas, como se analizó anteriormente, en específico con la diferencia Tmax-Tmin, que para el caso de la casa cerrada se hace mucho

menor (2,3 C menor como media) para el periodo comprendido en la fase de maduración-cosecha del cultivo.

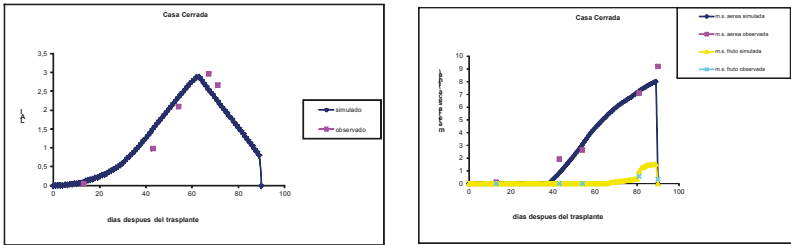


Figura 4. Comportamiento de los valores simulados y observados de las variables: A- LAI y B- materia seca aérea y del fruto para el ciclo del cultivo del tomate en el tipo de casa cerrada.

Consideraciones finales.

- Los resultados de los trabajos de investigación que aquí se resumen, en primer lugar, definen la factibilidad del modelo de simulación de crecimiento STICS, para ser utilizado en la predicción del comportamiento de los cultivos de Maíz y Frijol, ante manejos de riego y fertilización y en condiciones edafoclimáticas similares a los del estudio. Para ello deben ser utilizados los ficheros de cultivo creados a partir de los parámetros optimizados, así como la corrección a partir de la relación definida utilizando el modelo MACRO para la cuantificación tanto de las pérdidas por drenaje en función de la humedad precedente y los ingresos diarios como de las pérdidas de nitratos lixiviados en el fondo del perfil en función de la cantidad total de agua y nitrógeno aplicadas.
- Por otra parte, estos resultados permitieron además demostrar la utilidad de los modelos de simulación como una herramienta para definir estrategias óptimas del manejo del riego y la fertilización nitrogenada, tanto desde el punto de vista de la máxima eficiencia en el uso del agua y el nitrógeno por el cultivo, como en la no afectación al medio por pérdidas excesivas de agua y lixiviación de nitratos. En este sentido se dan las normas de riego óptimos totales y parciales, para los cultivos estudiados, así como los manejos del agua y la fertilización nitrogenada que implican mayores valores tanto de pérdidas de agua como de lixiviación de nitratos.

- De los resultados analizados se concluye también que el modelo STICS puede ser utilizado eficazmente para la simulación del crecimiento y producción del cultivo del tomate en condiciones protegidas. El análisis de los resultados obtenidos para los tipos de casa analizados permite concluir también que el ambiente climático producido en la casa de tipo cerrada va a influir negativamente en el comportamiento de la producción del cultivo del tomate para el periodo climático analizado (junio-agosto) debido fundamentalmente a la disminución de las diferencias entre temperaturas máximas y mínimas, lo que se agudiza en el periodo de maduración-cosecha del cultivo. Este último aspecto evidencia las potencialidades del modelo de crecimiento de cultivo STICS como herramienta para la definición del prototipo de casa óptima para las condiciones de Cuba, en función de los ambientes climáticos que en éstas se generan y su influencia sobre el rendimiento del cultivo.

Referencias bibliográficas.

- Abbasi F. Mohammad Mahmodian Shoostari y Jan Feyen. (2003). Evaluation of Various Surface Irrigation Numerical Simulation Models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 129, No. 3, May/June 2003, pp. 208-213.
- Alí R., R. L. Elliott, J. E. Ayars y E. W. Stevens. (2000). Soil Salinity Modeling Over Shallow Water Table. I: Validation of LEACHC. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 126, No. 4, July/August, pp. 223-233
- Antonopoulos, V. Z. (2001). Simulation of Water and Nitrogen Balances of Irrigated and Fertilized Corn-Crop Soil. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 127, No. 2, March/April pp. 77-83.
- Barrales V. L., I. Peña R. y P. Fernández de la Reguera. (2004). VALIDACIÓN DE MODELOS: UN ENFOQUE APLICADO. *Agríc. Téc.* v.64 n.1 Chillán ene.
- Brisson Nadine, Bruno Mary y colaboradores. (1997). Notice utilisateur. *Modele STICS*. INRA. AGPM-Agrotransferts-CETIOM-CIRAD-ITCF.
- DE PAZ, J. M. y RAMOS C. (2000). Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas por nitrato con un acople sig – modelo de simulación de nitrógeno en suelos agrícolas. *Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente*. Valencia 2000. AIH-GE.
- Dust, M.; N. Baran; G. Errera; J.L. Hutson; C. mouvet; H. Schafer; H. Vereecken; A. Walker. (2000). Simulation of water and solute transport in field soils with the LEACHIP model. *Agricultural Water Management* 44: 225-245.
- Franco J.A.; J.M. Abrisqueta; A. Hernansáez y F. Moreno. (2000). Water balance in a young almond orchard under drip irrigation with water of low quality. *Agricultural Water Management* 43: 75-98.
- Jarvis, N. (1996). The MACRO Model (Version 3.2)- Technical Description and Sample Simulation. Monograph 19. Depart. Soil Sci., Swedish Univ. Agric. Sci., Uppsala, 51pp.
- Jarvis, N.J.; C.D. Brown; E. Granitza. (2000). Sources of error in model predictions of pesticide leaching: a case study using the MACRO model. *Agricultural Water Management* 44: 247-262.
- Kumar R. y Singh J. (2003). Regional Water Management Modeling for Decision Support in Irrigated Agriculture *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 129, No. 6, November/December pp. 432-439.
- López Teresa. (2002). Caracterización del movimiento del agua en suelos irrigados del sur de La Habana: contribución metodológica al procedimiento actual para la determinación de los Balances Hídricos. Tesis Doctorado. INIFAT. Cuba.
- López Teresa, Felicita González y G. Cid. (2000). Factibilidad del uso de modelos de simulación de crecimiento en la definición de estrategias para el riego deficitario en los cultivos de Maíz y Frijol en suelo Ferralítico del sur de La Habana. Informe final del Proyecto 06-02 del P.R. Riego y Drenaje. MINAG.
- López, Teresa; Felicita González, G. Cid y Graciela Dueñas. (2003). Informe final del SubProyecto 11-06: Mejoramiento del manejo del agua y la fertilización nitrogenada en suelos Ferralíticos del sur de La Habana. Fondo Inst. Inv. Riego y Drenaje. Cuba.
- López Teresa; G. Cid; Felicita González; Graciela Dueñas; H. Ozier-Lafontaine y J. Sierra. (2006a.) Predicción de pérdidas de agua y lixiviación de nitratos en suelos Ferralíticos Rojos cultivados bajo riego en el sur de La Habana. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*. Vol. 15 (3): 1-6.
- López Teresa, Felicita González, Graciela Dueñas, Yoima Chaterlán, G. Cid, J. Sierra y H. Ozier-Lafontaine. (2006b.) Modelación del manejo óptimo del agua en suelos Ferralíticos del sur de La Habana. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*. Vol. 15 (4): 37-41.

- Rodríguez, JA y Teresa López. (2000). Validación y Análisis de Sensibilidad del Modelo MACRO en un Suelo Orthic Ferrasol del Sur de la Habana. Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetales. España. Vol. 15 (1-2): 47-55.
- Peat D.M.W.; G.P. Mathews; P.J. Worsfold y S.C. Jarvis. (2000). Simulation of water retention and hydraulic conductivity in soil using a three-dimensional network. European J. of Soil Sci. 51(1): 65-80.
- Rodrigues, L.N., F.F. Pruski; D. D. da Silva; M. A. Martinez. (2001). GEOPIVO: modelo para simulação do desempenho de sistemas de irrigação tipo pivô central. Rev. bras. eng. agríc. ambient. vol.5 no.3 Campina Grande Sept./Dec.
- Rodríguez, JA y Teresa López. (2000). Validación y Análisis de Sensibilidad del Modelo MACRO en un Suelo Orthic Ferrasol del Sur de la Habana. Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetales. España. Vol. 15 (1-2): 47-55.
- Singh, R. M. y B. Datta. (2006). Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 11, No. 2, March/April, pp. 101-109,
- Skaggs, TH, T. J. Trout, J. Simunek y P. J. Shouse. (2004). Comparison of HYDRUS-2D Simulations of Drip Irrigation with Experimental Observations. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 130, No. 4, July/August, pp. 304-.