

MODELO AGROCLIMATICO DE BALANCE HIDRICO DEL SUELO. FORMULACIÓN Y REPRESENTACIÓN ESPACIAL.

Oscar Solano, Ransés Vázquez, Jorge A. Menéndez y María E. Martín.

Instituto de Meteorología, Apdo. 17032, C.P. 11700, Habana 17. Ciudad de La Habana. Cuba

Teléfono: (537) 8670714

Fax: (537) 338010

E-mail: agromet@met.inf.cu

RESUMEN

Hoy día el balance hídrico agrometeorológico es una de las herramientas más útiles y poderosas para la investigación científica y los servicios operativos dirigidos a la agricultura, con el fin de calcular el consumo de agua por las plantas, evaluar las reservas de humedad productiva y diferentes aspectos de interés agrometeorológico. El objetivo general de este trabajo fue utilizar los conocimientos agrometeorológicos más novedosos de la literatura internacional, adaptarlos a las condiciones de Cuba y formular el desarrollo teórico y los algoritmos necesarios que simulen el efecto producido por las condiciones climáticas sobre la vegetación de las plantas, utilizando para ello técnicas avanzadas de procesamiento de datos y los Sistemas de Información Geográfica, con el fin de aplicar estos conocimientos en las investigaciones y los servicios operativos a la agricultura. Se describen los métodos empleados para calcular diferentes términos que intervienen en el balance hídrico del suelo y se presenta un modelo de balance hídrico simplificado del suelo generado para ser aplicado en la investigación y el servicio agrometeorológico operativo a la agricultura. Se describen también los métodos usados para calcular los índices agroclimáticos estrechamente relacionados con las condiciones de vegetación y los rendimientos finales de los cultivos. Se muestran los formularios para el cálculo de elementos de entrada al balance y de otros índices de cálculos intermedios y finales, la representación de los índices agroclimáticos obtenidos y un ejemplo de la aplicación de sus resultados en la vigilancia de condiciones de peligro de ocurrencia de incendios en la vegetación.

Palabras clave: Balance hídrico del suelo.

ABSTRACT

An efficient use of water is one of the most important aspects of sustainable agriculture, therefore is necessary to know the water consumed by the crop. The soil water balance is the well known method to calculate that consum, because it allows to estimate different interesting agrometeorological aspects, such as soil moisture reserves, deficits or excess of water and the evapotranspirated water and the period in which it happens. Today, agrometeorological water balance is one of the most useful and powerful agrometeorological tools. In order to use the

agroclimatological water balance in the operative work, with the purpose to assess the agrometeorological conditions of vegetation, the crop yield assessment and forecast, the agrometeorological conditions of moisture reserve for sowing forecast, the agricultural drought monitoring and forecast, among others aspects, a simplified model of soil agroclimatic water balance is described. This model is being used in the operative agrometeorological service. In addition the used methods to calculate the effective precipitation, the reference evapotranspiration, the crop coefficients, the crop evapotranspiration, the total available water fraction in the roots zone, the readily available water, the soil moisture reserve, the water deficits and excess, the evapotranspiration and some other indexes closely related with the vegetation conditions and the final crop yields are described. The practical experience in the application of the obtained models balance, allows to show, the forms for the calculation of in, intermediate and out elements of the balance, also show their space representation; and one example in the application of the results, like the surveillance of danger conditions to occurrence of forest fires.

Key words: Soil water balance.

INTRODUCCIÓN

Las frecuentes anomalías climáticas presentadas durante las tres últimas décadas han traído como resultado disponer con más frecuencia de cantidades limitadas de agua. Esto ha incidido en la modificación del sistema de vigilancia agrometeorológica, en la necesidad de desarrollar servicios de apoyo a la toma de decisiones de los agricultores y en la emisión de avisos tempranos de alerta al sector agropecuario. A mediados de la década de los años 90, los autores de este trabajo, junto a otros expertos, generaron varios modelos para evaluar y conocer con suficiente antelación las condiciones de vegetación de las plantas (Solano y Vázquez, 1998; Solano *et al.* 2001), la evolución de la sequía agrícola, (Solano y Vázquez, 1999a y 1999b), el pronóstico de las reservas de humedad para la siembra (Solano y Vázquez 1999c; Solano *et al.* 1999) y más adelante, las condiciones de peligro de incendios en la vegetación, utilizadas por Solano (2001).

Uno de los aspectos fundamentales de la agricultura sostenible es hacer un uso eficiente del agua y para ello es necesario conocer el agua consumida por los cultivos. Según Allen *et al* (1998) el consumo de agua por un cultivo depende de algunos elementos meteorológicos del tiempo atmosférico, el tipo de cultivo, su variedad y la fase de desarrollo en que se encuentre, las características de las condiciones ambientales que les rodea, la advección, la altitud, la fertilidad, la humedad del suelo, la salinidad, los métodos y prácticas de cultivo y de riego que se utilicen.

El método más conocido para calcular el agua que consume un cultivo es el balance hídrico del suelo y éste se define como la suma de todas las entradas y salidas de agua en la rizosfera, tomando en consideración los cambios netos de almacenamiento en un período de tiempo dado. El balance hídrico es, en esencia, la aplicación de la Ley de la Conservación de la Materia a los diversos procesos

que conforman el ciclo del agua, y puede definirse de modo muy general estipulando que en un sistema cualquiera, para un período dado, la variación en la cantidad de agua que posee el sistema será igual a la diferencia entre las entradas y las salidas de agua en el sistema. La importancia del balance hídrico radica en que permite estimar diferentes aspectos de interés agrícola tales como la reserva de humedad productiva del suelo, los déficits y los excesos hídricos, el agua evapotranspirada y también el período de tiempo en que ocurren.

OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo fue utilizar los conocimientos agrometeorológicos más novedosos de la literatura internacional, adaptarlos a las condiciones de Cuba y formular el desarrollo teórico y los algoritmos necesarios que simulen el efecto que producen las condiciones climáticas sobre la vegetación de las plantas, utilizando para ello técnicas avanzadas de procesamiento de datos y los Sistemas de Información Geográfica, con el fin de aplicar estos conocimientos en las investigaciones y los servicios operativos a la agricultura.

Los objetivos específicos fueron:

- Obtener un modelo de balance hídrico del suelo que calcule por métodos objetivos, diferentes índices de interés para la agricultura, en una escala adecuada para fines exploratorios.
- Aplicar los resultados obtenidos en el servicio agrometeorológico operativo a la agricultura y en la generación futura de una base de datos que permita desarrollar nuevas investigaciones agrometeorológicas y estudios de riesgos.

MATERIALES Y METODOS

El balance hídrico del suelo en la rizosfera se diseñó siguiendo el método tradicional de la FAO. Los datos de entrada al balance son la altura de la lámina de precipitación, suministrados por la red meteorológica del Instituto de Meteorología y la red informativa del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos y la evapotranspiración de referencia, calculada a partir de la información suministrada por la red de estaciones del Instituto de Meteorología. El balance hídrico se simplificó para su uso en el trabajo operativo y además, se calibraron los cálculos de algunos de sus elementos principales. (Solano et al., 2003a)

El cálculo de la ETo fue programado en una hoja de cálculo de Microsoft Excel 97, donde se introducen los valores (diarios, decadales, mensuales) de la temperatura máxima media, de la temperatura mínima media, de la velocidad del viento media, de la duración efectiva de la insolación media y la humedad relativa media y se obtienen los valores medios (diarios, decadales, mensuales) de la ETo en $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ para todas las estaciones meteorológicas seleccionadas.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) poseen diversas herramientas que permiten múltiples y complejas operaciones con los mapas, al organizar la información a manera de capas; entre ellas las operaciones básicas utilizadas fueron: la vectorización, interpolación, la reclasificación, la tabulación cruzada, la sobreposición y el mapeo temático.

Se emplearon herramientas de los SIG para obtener la información vectorial del contorno de Cuba, la división político - administrativa, la hipsometría y la composición mecánica de los suelos. Los mapas sacados del Nuevo Atlas Nacional De Cuba (ACADEMIA DE CIENCIAS DE CUBA, 1989), fueron escaneados (técnica de barrido óptico), georeferenciados y digitalizados (vectorizados). Para utilizar la información en formato de cuadrícula (raster), se generó una rejilla cuyos límites en décimas de minutos son los siguientes: -84.97 y -74.11 de longitudes extremas y 19.81 y 23.23 de latitudes extremas. La cuadrícula (pixel) así generada es de 0,01 décimas de minuto de lado (aproximadamente 1 km²). El método de interpolación utilizado fue el kriging con variograma lineal y efecto de nodo cero.

La escala espacial de trabajo, mostrada en los ejemplos expuestos, se determinó que fuera 1:1 000 000. Esta escala es adecuada para la exploración al nivel nacional de diversos parámetros agrometeorológicos y es utilizada en la investigación y el servicio de vigilancia operativa de diferentes índices de interés agrometeorológico (como la evapotranspiración de referencia y la precipitación, entre otros).

No existen mediciones de la humedad del suelo en condiciones de campo para comparar los resultados del modelo de balance hídrico simplificado del suelo con datos reales, sin embargo, la experiencia práctica sobre su utilidad en la determinación de otros índices agroclimáticos más complejos, muestra resultados muy alentadores. En este trabajo se muestra su aplicación en la determinación de las condiciones de peligro de incendios en la vegetación, que depende de las condiciones de humedad en que se encuentran la vegetación viva y muerta.

RESULTADOS

Se diseñó un modelo simplificado de balance hídrico del suelo en la rizosfera para su uso operativo en el servicio de vigilancia y en la investigación agrometeorológica, siguiendo el método tradicional de la FAO. En este modelo fueron incorporadas las técnicas más novedosas propuestas por expertos de la FAO, la CIRD, la OMM y de otros expertos en la actividad de riego y drenaje, y fueron calibrados algunos cálculos de sus elementos principales.

En el desarrollo del modelo se asumieron algunas hipótesis, las cuales se describen a continuación:

- El ingreso de agua por ascenso capilar es muy pequeño al compararse con otros términos del balance y por tanto, no es considerado en el mismo.
- En superficies de suelo horizontales toda la lluvia contribuye al balance hídrico y no se produce escorrentía lateral, ya que las pérdidas por este concepto son muy pequeñas al compararse con los otros términos del balance. En superficies inclinadas se asume que una fracción de la precipitación se pierde por la escorrentía superficial.

- No se consideran pérdidas por percolación profunda mientras que la humedad del suelo no alcance el valor de la capacidad de campo y la diferencia entre la precipitación efectiva y la evapotranspiración del cultivo, en el período, sea positiva. En estas condiciones, el modelo elaborado realiza el cálculo de las pérdidas de agua por escorrentía y percolación profunda.
- El agua almacenada en el suelo durante un período (un día, una década, un mes, etc.) se encuentra disponible en su totalidad para el período siguiente, sin importar su cantidad.

Si se toman en cuenta las hipótesis anteriormente planteadas, la ecuación simplificada del balance hídrico expresada en términos del agotamiento de agua en la rizosfera al final de un día, década, mes, etc., se expresa como:

$$Ar_i = Ar_{i-1} - Pe_i - I_i + ETca_i$$

Los datos de entrada al balance son la precipitación efectiva, la irrigación y la evapotranspiración de cultivo ajustada en el período temporal de análisis (i) y el agotamiento de agua en la rizosfera al final del período temporal de análisis anterior (i -1).

Si el balance hídrico del suelo se realiza en condiciones de agricultura sostenible y de secano, la ecuación simplificada toma la forma:

$$Ar_i = Ar_{i-1} - Pe_i + ETca_i$$

El proceso se repite para todas las décadas siguientes $i + 1$, $i + 2$, ... , $i + n$.

Se diseñaron tres hojas de cálculo con formularios especiales sustentados en métodos de avanzada y ajustados a las condiciones de Cuba, en un tabulador electrónico programado (Excel 97), que permite calcular, por métodos objetivos, diferentes índices agrometeorológicos de importancia inestimable para conocer las condiciones actuales, presentes y futuras del tiempo atmosférico y del clima, que afectan a la agricultura.

Un fragmento, en ambiente Windows, de la primera hoja electrónica creada para el cálculo de la evapotranspiración de referencia se muestra en la Figura 1, en la cual se introducen como variables de entrada (para cualquier punto y período temporal determinado), las temperaturas máxima y mínima del aire, la rapidez del viento, la humedad relativa y la duración efectiva de la insolación. El modelo permite calcular los índices de temperatura media del aire, y la evapotranspiración de referencia.

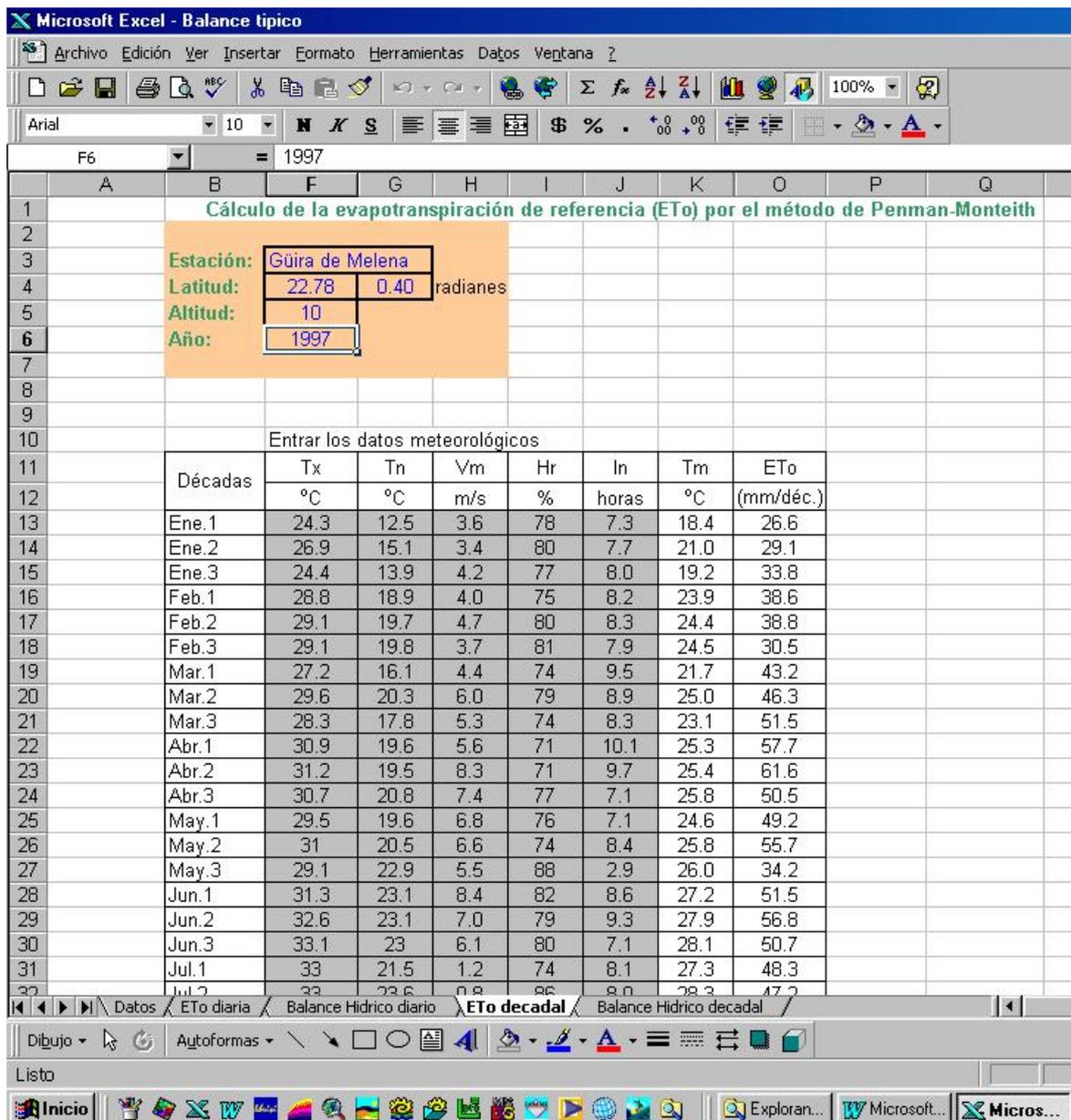


Figura 1. Fragmento en ambiente Windows de la hoja electrónica utilizada para el cálculo de la evapotranspiración de referencia.

En la Figura 2 se muestra un fragmento, en ambiente Windows, de la segunda hoja electrónica creada para el cálculo del balance hídrico del suelo en la rizosfera. En ella se introducen como variables de entrada (para cualquier punto y período temporal determinado), las características agrohidrológicas del suelo: capacidad de campo, punto de marchitez permanente, textura, inclinación de la pendiente y coeficiente de pérdidas, la evapotranspiración de referencia, la altura de la lámina de precipitación caída, la altura de la lámina de agua suministrada por irrigación, la profundidad de la rizosfera y el coeficiente de cultivo. El modelo permite calcular la entrada efectiva de agua al suelo, la evapotranspiración del cultivo, el agua total disponible para las plantas, el agua fácilmente disponible, el agotamiento del agua en la rizosfera al final del período anterior, el coeficiente de estrés, la

evapotranspiración del cultivo ajustada, el agotamiento de agua en la rizosfera al final del período que se evalúa, el contenido de humedad del suelo, los excesos y déficit hídricos, el déficit de evapotranspiración relativa, el índice de satisfacción de la evapotranspiración del cultivo y el índice de disponibilidad hídrica.

BALANCE HIDRICO SIMPLIFICADO DEL SUELO

Características hidráulicas del suelo:

PMP =	0.15
CDC =	0.29
Saturación =	0.54
Textura =	5
Pendiente =	0.15
Coef. Perd. Hid. =	0.30

décadas	año	ETo (mm)	Pr (mm)	I (mm)	Pe (mm)	Pe + I (mm)	Zr (m)	PMP	CDC	Kc	ETc (mm)	ATD (mm)	AFD (mm)	Dr _{i-1} (mm)	Ks	ETca (mm)	Dr _i (mm)
1	2000	26.7	5.0	5.0	3.5	8.5	0.50	0.15	0.29	1	26.7	70.0	31.5	0.0	1.00	26.7	18.2
2E	2000	29.3	10.0	5.0	7.0	12.0	0.50	0.15	0.29	1	29.3	70.0	31.5	18.2	1.00	29.3	35.5
3	2000	33.9	20.0	5.0	14.0	19.0	0.50	0.15	0.29	1	33.9	70.0	31.5	35.5	0.82	27.8	44.3
1	2000	38.7	30.0	5.0	21.0	26.0	0.50	0.15	0.29	1	38.7	70.0	31.5	44.3	0.61	23.6	41.9
2F	2000	38.9	40.0	5.0	28.0	33.0	0.50	0.15	0.29	1	38.9	70.0	31.5	41.9	0.67	26.0	34.9
3	2000	30.6	50.0	5.0	35.0	40.0	0.50	0.15	0.29	1	30.6	70.0	31.5	34.9	0.83	25.4	20.3
1	2000	43.3	20.0	5.0	14.0	19.0	0.50	0.15	0.29	1	43.3	70.0	31.5	20.3	1.00	43.3	44.6
2M	2000	46.4	30.0	5.0	21.0	26.0	0.50	0.15	0.29	1	46.4	70.0	31.5	44.6	0.60	27.8	46.5
3	2000	51.5	10.0	5.0	7.0	12.0	0.50	0.15	0.29	1	51.5	70.0	31.5	46.5	0.56	28.9	63.3
1	2000	57.8	10.0	5.0	7.0	12.0	0.50	0.15	0.29	1	57.8	70.0	31.5	63.3	0.16	9.2	60.6
2A	2000	61.6	5.0	5.0	3.5	8.5	0.50	0.15	0.29	1	61.6	70.0	31.5	60.6	0.22	13.6	65.6
3	2000	50.5	5.0	5.0	3.5	8.5	0.50	0.15	0.29	1	50.5	70.0	31.5	65.6	0.10	5.1	62.2
1	2001	49.2	5.0	5.0	3.5	8.5	0.50	0.15	0.29	1	49.2	70.0	31.5	62.2	0.19	9.4	63.0
2M	2001	55.7	5.0	5.0	3.5	8.5	0.50	0.15	0.29	1	55.7	70.0	31.5	63.0	0.17	9.5	64.0
3	2001	34.2	69.0	5.0	48.3	53.3	0.50	0.15	0.29	1	34.2	70.0	31.5	64.0	0.14	4.8	15.5
1	2001	51.5	78.0	5.0	54.6	59.6	0.50	0.15	0.29	1	51.5	70.0	31.5	15.5	1.00	51.5	7.4
2J	2001	56.8	78.0	5.0	54.6	59.6	0.50	0.15	0.29	1	56.8	70.0	31.5	7.4	1.00	56.8	4.6
3	2001	50.7	1000.0	5.0	700.0	705.0	0.50	0.15	0.29	1	50.7	70.0	31.5	4.6	1.00	50.7	0.0
1	2001	48.3	100.0	5.0	70.0	75.0	0.50	0.15	0.29	1	48.3	70.0	31.5	0.0	1.00	48.3	0.0

Figura 2. Fragmento en ambiente Windows de la hoja electrónica utilizada para el cálculo del balance hídrico del suelo en la rizosfera.

La tercera hoja electrónica creada para el cálculo del balance hídrico simplificado del suelo en la rizosfera, por cuadrícula, para la confección de los diferentes mapas temáticos, se muestra en la Figura 3. Los datos de entrada, de cálculos intermedios y de salida son semejantes a los de la Figura 2, pero se refieren sólo a la década de análisis, para todas las cuadrículas del mapa.

Cada una de las variables introducidas en el tabulador electrónico programado y las calculadas por él, pueden ser representadas en el espacio con la ayuda de los sistemas de información geográfica. En la Figura 4, como ejemplo de una variable de entrada al balance hídrico se muestra la distribución espacial de la precipitación efectiva durante la tercera década de febrero de 2003. En ella puede observarse a simple vista las zonas del país donde los suelos recibieron mayor o menor cantidad de agua.

Microsoft Excel - Balance tipico por pixels

Archivo Edición Ver Insertar Formato Herramientas Datos Ventana ?

Arial 10

A1 = xgeo

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1	sgco	ggeo	Prov	Dec	Mes	Año	CfPd	Fvaa	Textura	ETo	Pr	I	Pe	Pe+I	Zr	PMP	CDC	Ke	ETe	ATD	AFD	Dr,i-1	Ks	ETea	Dr,i	t
2	-84.863	218747	PR	3	2	2003	0	8	8	28.8	11.1	0.0	11.1	11.1	0.50			1	28.8			41.2	1.00	28.8	59.0	
3	-84.767	218634	PR	3	2	2003	0	8	8	28.5	10.9	0.0	10.9	10.9	0.50			1	28.5			50.3	1.00	28.5	67.8	
4	-84.672	218634	PR	3	2	2003	0	8	8	28.1	9.8	0.0	9.8	9.8	0.50			1	28.1			61.8	1.00	28.1	80.1	
5	-84.576	218634	PR	3	2	2003	0	0.164	4	27.8	9.1	0.0	9.1	9.1	0.50	0.18	0.38	1	27.8	99.0	44.6	64.9	0.57	15.9	71.7	
6	-84.576	220521	PR	3	2	2003	0	8	8	27.8	12.8	0.0	12.8	12.8	0.50			1	27.8			62.5	1.00	27.8	77.6	
7	-84.48	218747	PR	3	2	2003	0	0.119	3	27.7	8.7	0.0	8.7	8.7	0.50	0.16	0.34	1	27.7	98.0	39.6	62.6	0.48	13.3	67.2	
8	-84.48	218634	PR	3	2	2003	0	0.164	4	27.7	8.5	0.0	8.5	8.5	0.50	0.18	0.38	1	27.7	99.0	44.6	72.3	0.45	12.5	76.3	
9	-84.48	220521	PR	3	2	2003	0	8	8	27.8	12.0	0.0	12.0	12.0	0.50			1	27.8			63.8	1.00	27.8	79.6	
10	-84.384	218747	PR	3	2	2003	0	0.164	4	27.6	8.7	0.0	8.7	8.7	0.50	0.18	0.38	1	27.6	99.0	44.6	61.3	0.63	17.4	70.1	
11	-84.384	218634	PR	3	2	2003	0	0.119	3	27.8	9.1	0.0	9.1	9.1	0.50	0.16	0.34	1	27.8	98.0	39.6	59.5	0.54	15.0	65.4	
12	-84.384	220521	PR	3	2	2003	0	8	8	28.0	13.5	0.0	13.5	13.5	0.50			1	28.0			54.3	1.00	28.0	68.8	
13	-84.384	222295	PR	3	2	2003	0.002	0.089	2	28.0	20.9	0.0	20.8	20.8	0.50	0.11	0.22	1	28.0	54.0	24.3	31.5	0.69	19.3	30.0	
14	-84.384	223182	PR	3	2	2003	0	0.089	2	27.7	14.7	0.0	14.7	14.7	0.50	0.11	0.22	1	27.7	54.0	24.3	41.5	0.38	10.5	37.3	
15	-84.289	218634	PR	3	2	2003	0	0.119	3	27.9	8.4	0.0	8.4	8.4	0.50	0.16	0.34	1	27.9	98.0	39.6	55.1	0.62	17.3	64.0	
16	-84.289	220521	PR	3	2	2003	0	0.064	1	28.3	13.3	0.0	13.3	13.3	0.50	0.02	0.06	1	28.3	20.0	9.0	20.0	0.00	0.0	6.7	
17	-84.289	221408	PR	3	2	2003	0	0.064	1	28.6	17.7	0.0	17.7	17.7	0.50	0.02	0.06	1	28.6	20.0	9.0	15.0	0.42	12.0	9.3	
18	-84.289	222295	PR	3	2	2003	0.01	0.119	3	28.5	22.9	0.0	22.6	22.6	0.50	0.16	0.34	1	28.5	99.0	39.6	35.0	1.00	28.5	40.9	
19	-84.289	223182	PR	3	2	2003	0.01	0.119	3	28.0	22.4	0.0	22.2	22.2	0.50	0.16	0.34	1	28.0	98.0	39.6	47.7	0.76	21.3	46.9	
20	-84.289	224068	PR	3	2	2003	0.022	0.119	3	27.4	27.9	0.0	27.3	27.3	0.50	0.16	0.34	1	27.4	98.0	39.6	49.6	0.73	20.0	42.4	
21	-84.289	224955	PR	3	2	2003	0	0.089	2	27.0	44.3	0.0	44.3	44.3	0.50	0.11	0.22	1	27.0	54.0	24.3	39.5	0.45	12.2	7.4	
22	-84.193	218634	PR	3	2	2003	0	0.119	3	28.1	1.8	0.0	1.8	1.8	0.50	0.16	0.34	1	28.1	98.0	39.6	63.2	0.47	13.2	74.6	
23	-84.193	220521	PR	3	2	2003	0	0.064	1	28.8	13.7	0.0	13.7	13.7	0.50	0.02	0.06	1	28.8	20.0	9.0	20.0	0.00	0.0	6.3	
24	-84.193	221408	PR	3	2	2003	0	0.064	1	29.5	20.1	0.0	20.1	20.1	0.50	0.02	0.06	1	29.5	20.0	9.0	12.6	0.61	18.0	10.5	
25	-84.193	222295	PR	3	2	2003	0.006	0.164	4	29.4	29.8	0.0	29.6	29.6	0.50	0.18	0.38	1	29.4	99.0	44.6	23.2	1.00	29.4	23.0	
26	-84.193	223182	PR	3	2	2003	0.019	0.164	4	28.3	28.2	0.0	27.7	27.7	0.50	0.18	0.38	1	28.3	99.0	44.6	40.1	1.00	28.3	40.8	
27	-84.193	224068	PR	3	2	2003	0.01	0.164	4	27.4	36.5	0.0	36.1	36.1	0.50	0.18	0.38	1	27.4	99.0	44.6	46.4	0.89	24.4	34.7	
28	-84.193	224955	PR	3	2	2003	0.061	0.119	3	26.9	51.7	0.0	48.5	48.5	0.50	0.16	0.34	1	26.9	98.0	39.6	61.3	0.51	13.7	26.5	
29	-84.193	225842	PR	3	2	2003	0.002	0.089	2	26.7	44.0	0.0	43.9	43.9	0.50	0.11	0.22	1	26.7	54.0	24.3	33.9	0.62	16.6	6.6	
30	-84.097	218634	PR	3	2	2003	0	0.119	3	28.0	9.8	0.0	9.8	9.8	0.50	0.16	0.34	1	28.0	98.0	39.6	51.4	0.69	19.3	60.9	
31	-84.097	220521	PR	3	2	2003	0	0.064	1	28.8	17.0	0.0	17.0	17.0	0.50	0.02	0.06	1	28.8	20.0	9.0	9.9	0.84	24.2	17.2	
32	-84.097	221408	PR	3	2	2003	0	0.203	6	29.9	26.4	0.0	26.4	26.4	0.50	0.24	0.40	1	29.9	79.5	35.8	39.2	1.00	29.9	33.7	
33	-84.097	222295	PR	3	2	2003	0.001	0.203	6	29.9	79.9	0.0	79.8	79.8	0.50	0.24	0.40	1	29.9	79.5	35.8	0.0	1.00	29.9	0.0	
34	-84.097	223182	PR	3	2	2003	0.124	0.164	4	28.2	40.6	0.0	38.6	38.6	0.50	0.18	0.38	1	28.2	99.0	44.6	30.5	1.00	28.2	23.1	
35	-84.097	224068	PR	3	2	2003	0.026	0.164	4	27.1	39.4	0.0	38.3	38.3	0.50	0.18	0.38	1	27.1	99.0	44.6	39.0	1.00	27.1	27.8	
36	-84.097	224955	PR	3	2	2003	0.025	0.164	4	26.7	41.3	0.0	40.2	40.2	0.50	0.18	0.38	1	26.7	99.0	44.6	43.7	1.00	26.7	30.2	
37	-84.097	225842	PR	3	2	2003	0.009	0.089	2	26.7	38.9	0.0	38.6	38.6	0.50	0.11	0.22	1	26.7	54.0	24.3	25.7	0.87	23.2	10.3	
38	-84.001	220521	PR	3	2	2003	0	0.064	1	28.1	12.3	0.0	12.3	12.3	0.50	0.02	0.06	1	28.1	20.0	9.0	0.0	1.00	28.1	15.8	
39	-84.001	221408	PR	3	2	2003	0.088	0.064	1	28.6	32.9	0.0	30.0	30.0	0.50	0.02	0.06	1	28.6	20.0	9.0	0.0	1.00	28.6	0.0	
40	-84.001	222295	PR	3	2	2003	0.135	0.119	3	28.1	41.0	0.0	35.5	35.5	0.50	0.16	0.34	1	28.1	98.0	39.6	31.5	1.00	28.1	24.1	
41	-84.001	223182	PR	3	2	2003	0.132	0.164	4	26.8	39.9	0.0	34.6	34.6	0.50	0.18	0.38	1	26.8	99.0	44.6	42.3	1.00	26.8	34.5	
42	-84.001	224068	PR	3	2	2003	0.147	0.164	4	26.3	44.1	0.0	37.6	37.6	0.50	0.18	0.38	1	26.3	99.0	44.6	46.0	0.89	23.4	31.8	

Balance Hídrico decadal

Figura 3. Fragmento, en ambiente Window, de la hoja electrónica creada para el cálculo del balance hídrico simplificado del suelo, en la rizosfera, para la confección de los mapas.

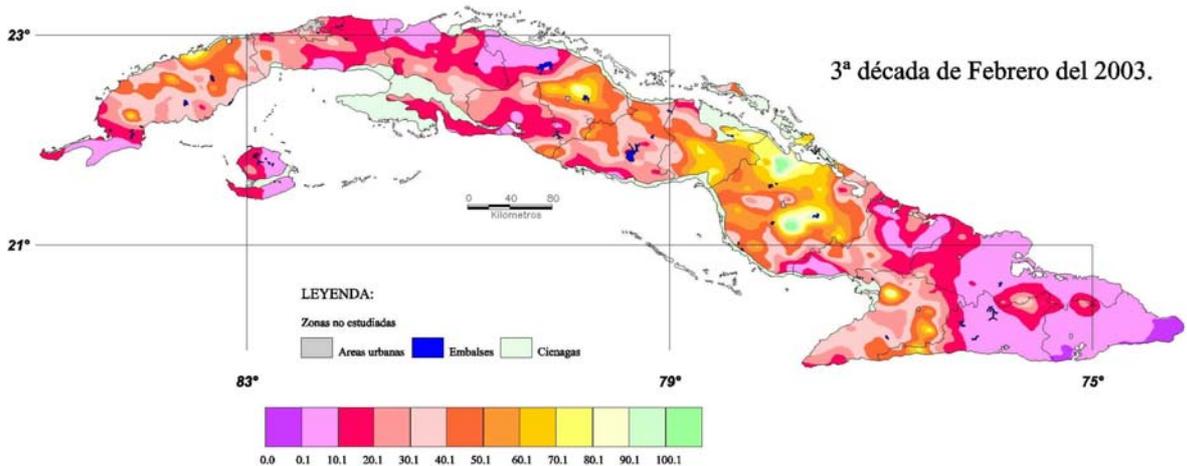


Figura 4. Distribución espacial de la precipitación efectiva (mm), en Cuba, durante la tercera década de febrero de 2003.

En la Figura 5 se puede observar la distribución espacial del agua total disponible para la vegetación, en la rizosfera del suelo, como ejemplo de una variable de cálculo intermedio. En ella se observan las zonas del país donde se almacenan las mayores y menores cantidades de agua en el suelo, disponible para las plantas.

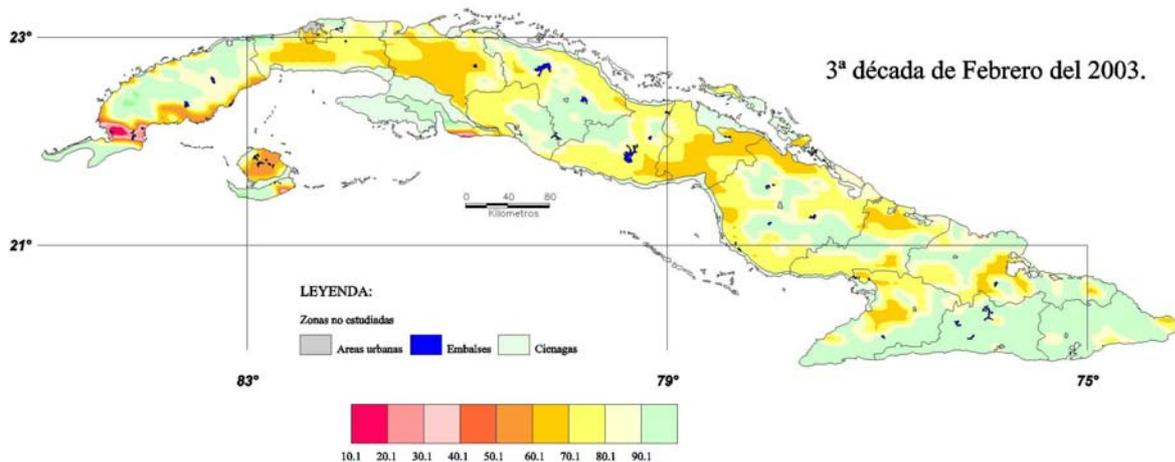


Figura 5. Distribución espacial del agua total disponible para la vegetación, en la rizosfera del suelo (mm).

En la Figura 6 se muestra la distribución espacial de la reserva de humedad productiva del suelo en la rizosfera, durante la tercera década de febrero de 2003, como ejemplo de una variable de salida al balance hídrico del suelo en la rizosfera. En ella pueden verse las zonas del país con las mayores disponibilidades de agua o con las menores disponibilidades de agua para las plantas.

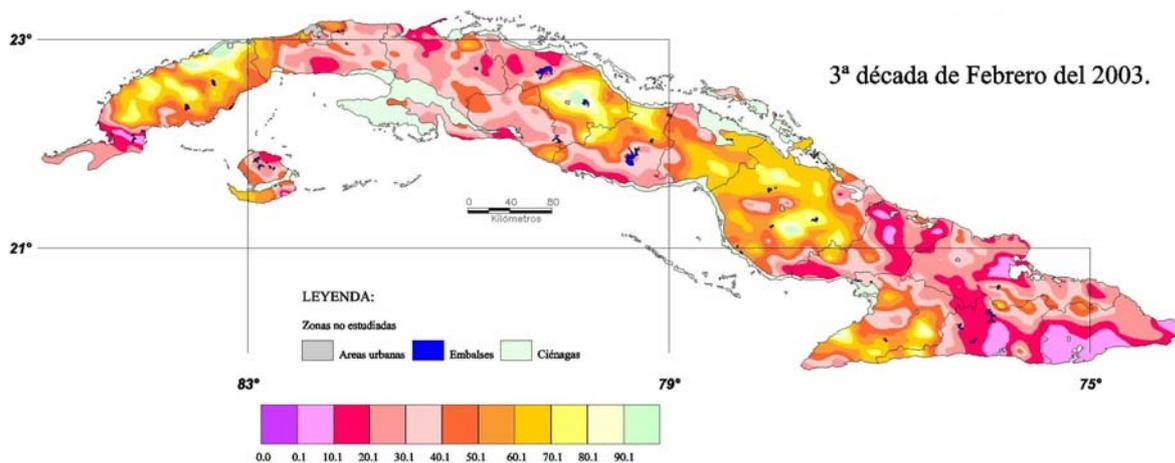


Figura 6. Distribución espacial de la reserva de humedad productiva del suelo (mm).

Resulta muy difícil probar en la práctica los resultados de la aplicación del modelo obtenido para el cálculo del balance hídrico del suelo, sin embargo, pueden mostrarse ejemplos alentadores en la evaluación de las condiciones de la vegetación para el cálculo de las condiciones de peligro potencial de incendios en la vegetación, uno de los cuales se describe a continuación.

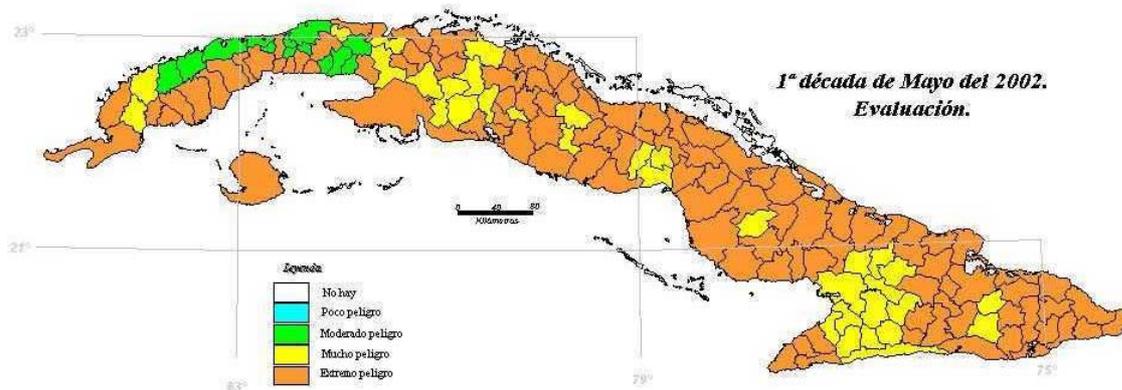


Figura 7. Evaluación de condiciones de peligro para la ocurrencia de incendios en la vegetación durante la primera década de mayo de 2002.

Solano (2001) determinó un índice agrometeorológico para evaluar condiciones de peligro potencial de explosión de incendios en la vegetación, el cual se sustenta en el análisis de los índices de humedecimiento y de la sequía agrícola, calculados por los resultados del balance hídrico simplificado del suelo. Este índice fue utilizado por Solano *et al.* (2003) para describir el sistema de vigilancia de las condiciones agrometeorológicas de peligro de incendios en la vegetación utilizado en el servicio agrometeorológico cubano.

La Figura 7 muestra las condiciones de peligro de ocurrencia de incendios en la vegetación para la primera década de mayo de 2002, evaluadas por el modelo que utiliza el índice de humedecimiento. La Figura 8 muestra los municipios en los cuales fueron reportados incendios forestales durante la primera década de 2002.

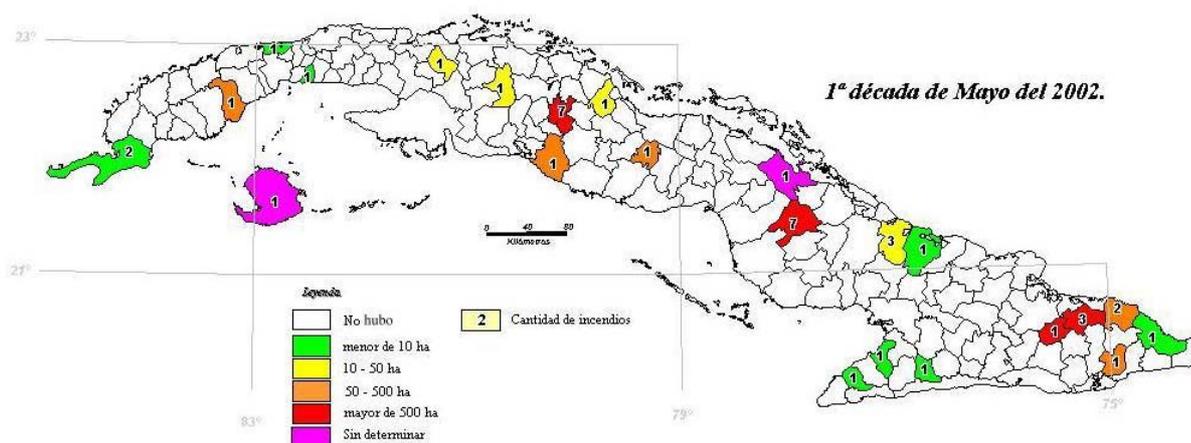


Figura 8. Incendios ocurridos durante la primera década de mayo de 2002.

En total se registraron 41 incendios en ese período, los cuales ocurrieron en 23 municipios del país. El número que aparece en el interior del municipio indica la cantidad de incendios ocurridos y el color de fondo indica los daños ocasionados

por la suma de todos ellos, en hectáreas. Los municipios con reportes de incendios durante la primera década de mayo de 2002 se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Municipios con reportes de incendios durante la primera década de mayo de 2002.

Categoría de peligro	Municipios con incendios	área incendiada (ha)
Moderado	1	< 10
Mucho	4	2(< 10), (10-50), (>500)
Extremo	18	5(< 10), 3(10-50), 5(50-500), 3(>500), 2 SD

Nota: SD – No se pudo determinar el área afectada.

Al evaluar la distribución de los incendios y afectaciones medias por categoría de peligro, en Cuba, de enero a julio de 2002, de 1290 casos evaluados en la condición “no hay peligro” para la ocurrencia de incendios forestales en la próxima década, fueron reportados 21 casos, por lo que el error, en este caso fue de 1,6%. No obstante, 86% de los casos ocurrió en la provincia Pinar del Río, donde la frecuencia de incendios originados por descargas eléctricas es la mayor del país. El área afectada media de los incendios originados en esta categoría (2 ha), mostrada en la Tabla 2 sugiere que los incendios tuvieron condiciones poco favorables para su propagación. De un total de 587 incendios forestales, 566 ocurrieron en las categorías de peligro 1 a 4, lo que equivale al acierto en 96% de los casos.

Tabla 2. Distribución de los incendios y afectaciones medias por categoría de peligro, en Cuba, de enero a julio de 2002.

Condición de peligro	INCENDIOS		Valor medio de las hectáreas afectadas por los incendios.
	Número	% del total	
0 No hay	21	3.6	2.0
1 Poco	40	6.8	14.1
2 Moderado	144	24.5	19.2
3 Mucho	96	16.4	65.5
4 Extremo	286	48.7	67.8
Total	587	100	

La aplicación del modelo agroclimático de balance hídrico simplificado del suelo, como herramienta teórica en la experiencia práctica, permitió mostrar un ejemplo de un gran número de evaluaciones con muy buenos resultados para la vigilancia de las condiciones de peligro de incendios en la vegetación.

CONCLUSIONES

Se diseñó un modelo simplificado de balance hídrico del suelo en la rizosfera para su uso operativo en el servicio de vigilancia y en la investigación agrometeorológica, siguiendo el método tradicional de la FAO. En este modelo fueron incorporadas las técnicas más novedosas propuestas por expertos de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, la Comisión Internacional para el Riego y el Drenaje la Comisión de Meteorología Agrícola de la Organización Meteorológica Mundial y de otros expertos en la actividad de riego y drenaje, y fueron calibrados algunos cálculos de sus elementos principales.

Se diseñaron tres hojas de cálculo con formularios especiales sustentados en métodos de punta y ajustados a las condiciones de Cuba, en un tabulador electrónico programado, que permite calcular, por métodos objetivos, diferentes índices agrometeorológicos de importancia inestimable para conocer las condiciones actuales, presentes y futuras del tiempo atmosférico y del clima, que afectan a la agricultura.

La aplicación del modelo agrometeorológico de balance hídrico simplificado del suelo diseñado, provee información digital a las bases de datos agrometeorológicos por cada cuadrícula de 1 km² y sus resultados contribuyen a la representación gráfica de una selección de índices agrometeorológicos para una localidad y para representar la distribución espacial de un índice en el país o en una región determinada del mismo.

El modelo agrometeorológico de balance hídrico del suelo en la rizosfera, su formulación, aplicación y representación gráfica, dentro del servicio y la investigación dirigido al sector agrícola, mostrado en este resultado, se ha convertido en una valiosa herramienta y tiene una gran importancia para evaluar y pronosticar importantes índices agrometeorológicos.

La aplicación práctica del modelo de balance hídrico simplificado del suelo permitió evaluar adecuadamente las condiciones de vegetación en la vigilancia de las condiciones de peligro de incendios en la vegetación durante el período de mayor frecuencia de ocurrencia de incendios forestales, lo cual es una buena muestra de su efectividad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACADEMIA DE CIENCIAS DE CUBA. 1989: "Nuevo Atlas Nacional de Cuba". Editado por el Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba y por el Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía.

Allen R., L. Pereira, D. Raes y M. Smith. 1998: "Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crops Requirements". in FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. Italy, 301 p.

Solano O. y R. Vázquez. 1998: "Sistema de Seguimiento Agrometeorológico Decadal del Índice de Humedecimiento para los Cultivos". Disco compacto de las

Memorias del X Congreso Brasileño de Meteorología y VIII Congreso de la FLISMET. Área de Agrometeorología Ref. AG-98034 5 p.

Solano O. y R. Vázquez. 1999a: "Modelo agrometeorológico de evaluación de la sequía agrícola". Disco Compacto de las Memorias de la Convención Trópico' 99, en el Congreso de Meteorología Tropical. Palacio de Convenciones de La Habana, Cuba, Ref. MT 026, 4 p.

Solano O. y R. Vázquez. 1999b: "Sistema de seguimiento agrometeorológico decadal de la sequía agrícola". Disco Compacto de las Memorias de la Convención Trópico' 99, en el Congreso de Meteorología Tropical. Palacio de Convenciones de La Habana, Cuba, Ref. MT 009, 5 p.

Solano O. y R. Vázquez. 1999c: "Pronóstico de condiciones agrometeorológicas de reservas de humedad para la siembra en una agricultura de secano". Disco Compacto de las Memorias de la Convención Trópico' 99, en el Congreso de Meteorología Tropical. Palacio de Convenciones de La Habana, Cuba, Ref. MT 006, 4 p.

Solano O., R. Vázquez y J. A. Menéndez. 2001: "El índice de humedecimiento modificado y su aplicación en el servicio de vigilancia y emisión de avisos tempranos de alerta para los agricultores cubanos". Disco compacto de las memorias del XI Congreso Nacional de Meteorología, 2001. Boca del Río, Veracruz, México. 10p.

Solano O., R. Vázquez, J. A. Menéndez y A. Planas. 1999: "Pronóstico de condiciones agrometeorológicas de reservas de humedad para la plantación de cafetos en una agricultura sostenible". Trabajo presentado en el Congreso Internacional de Café y Cacao, Guantánamo, 1999, 7 p.

Solano O. 2001: "Informe final de consultoría sobre prevención de incendios forestales del Proyecto FAO TCP/CUB/0066(A)" "Diseño de una estrategia para el combate de incendios forestales". La Habana, Cuba, 53 p. 24 a.

Solano O., R. Vázquez, J. A. Menéndez y M. E. Martín. 2003a: "Modelo agroclimático de balance hídrico del suelo. Formulación y representación espacial". Informe científico técnico de investigación. Instituto de Meteorología. 27p.

Solano O., R. Vázquez, E. Pérez y M. Figueredo. 2003: "La Vigilancia de las Condiciones Agrometeorológicas de Peligro de Incendios en la Vegetación". Disco compacto de las memorias del X Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología, II Congreso Cubano de Meteorología y II Simposium Internacional de Ciclones Tropicales "Padre Benito Viñes S.J. in Memoriam" Hotel Nacional de Cuba. La Habana, 3 – 7 de marzo de 2003. 10 p.