

Zonificación de las reservas de humedad del suelo disponibles para los cultivos.

Autores: OSCAR J. SOLANO OJEDA, CÉSAR J. MENÉNDEZ GARCÍA, FRANCÉS J. VÁZQUEZ MONTENEGRO Y JORGE AGUSTÍN MENÉNDEZ GINORIO.

Departamento de Meteorología Agrícola, Instituto de Meteorología, E-mail: agromet@met.inf.cu

Resumen

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. El método más conocido para calcular ese consumo es el balance hídrico del suelo y su importancia radica en que permite estimar diferentes aspectos de interés agrometeorológico tales como la reserva de humedad del suelo, los déficits y los excesos hídricos y el agua evapotranspirada y también, el período de tiempo en que ocurren. Con las distribuciones espaciales de la precipitación efectiva y la evapotranspiración de referencia normales de cada una de las 36 décadas del año se calcularon las reservas de humedad del suelo disponibles para los cultivos para los mismos períodos. Con estos resultados y con la aplicación de sistemas de Información geográfica, se confeccionaron mapas nacionales a escala 1:1 000 000 de la zonificación de las reservas de humedad del suelo disponibles para los cultivos y se determinó la tendencia general de sus variaciones temporales y espaciales entre las diferentes regiones del país.

Palabras clave: Agroclimatología, zonificación, reservas de humedad del suelo.

Introducción.

Cuba ha sido tradicionalmente un país productor de cultivos, ganado y otros recursos extraídos de los bosques. Muchos cultivos y plantaciones son sembrados en condiciones sostenibles y después de su establecimiento en el campo, se mantienen en condiciones de secano.

Con excepción de la luz que proporciona la radiación solar, el suelo reserva las sustancias nutritivas asimilables, el agua que necesita para su desarrollo y el oxígeno. La cantidad de agua aprovechable por la planta que un suelo puede almacenar está determinada por sus propiedades físicas y según la cantidad reservada se conoce el tiempo que puede estar una planta sin recibir agua adicional. El agua es uno de los factores esenciales en la producción de alimentos y en una agricultura de secano la precipitación es el factor que determina la disponibilidad de agua y el tiempo en que las plantas pueden hacer uso de ella.

El agua de lluvia penetra en el suelo y permanece durante cierto tiempo a disposición de las raíces. Las precipitaciones, la evaporación, la infiltración, la percolación profunda, la escorrentía, el ascenso capilar y lógicamente, el consumo de las plantas hacen aumentar o disminuir el agua acumulada en la zona de las raíces.

La mayoría de las plantas son más eficientes tomando el agua del suelo si el contenido de humedad es suficientemente alto. En estas condiciones el agua tiene una gran energía potencial para moverse relativamente libre y es fácilmente asimilada por las raíces de las plantas para satisfacer la demanda evaporativa de la atmósfera. En la medida en que el contenido de humedad disminuye, la tensión de humedad se incrementa, el agua tiene entonces una energía potencial menor y es retenida más fuertemente por las fuerzas de capilaridad y absorción de la matriz del suelo; en ocasiones, las plantas no pueden extraer la humedad que necesitan para desarrollar un crecimiento máximo. Cuando el contenido de humedad se encuentra por debajo de un valor umbral, conocido como límite productivo, el agua no puede transportarse con facilidad para responder a la demanda transpirativa y se dice que el cultivo está en estrés hídrico. Los efectos del estrés hídrico son descritos por Allen et al (1998) a través del coeficiente de estrés hídrico. Si el contenido de humedad está en el punto de marchitez permanente o cerca de él durante un período prolongado, es posible que el cultivo se pierda totalmente. Aún cuando el cultivo se recobre, sin serias afectaciones, las pérdidas en el tiempo de crecimiento máximo ya influyeron negativamente en los posibles rendimientos (United States Department of Agriculture, 1964).

Existen diferentes métodos para determinar el contenido de humedad del suelo. Las mediciones del contenido de agua del suelo utilizando técnicas complejas (método gravimétrico, uso de lisímetros, tensiómetros, sondas de neutrones, etc.) son muy eficientes, pero resultan demasiado costosas. Sin embargo, existen métodos indirectos de balance hídrico como el agroclimático que resultan mucho más económicos y constituyen hoy en día una de las herramientas más útiles y poderosas no sólo en la Agrometeorología Operativa, sino en la zonificación agroclimática (Solano, Vázquez y Menéndez, 1998).

La importancia del balance hídrico agroclimático del suelo radica en que permite estimar diferentes aspectos de interés agrícola tales como la reserva de humedad del suelo, los déficit y los excesos hídricos y el agua evapotranspirada y también el periodo de tiempo en que ocurren.

La ecuación general del balance hídrico del suelo en la rizosfera normalmente es expresada como:

$$W_i = W_{e_i} + W_{s_i} + W_{i,i}$$

donde W_i es el contenido de humedad del suelo en la rizosfera al final del periodo de tiempo i

W_{e_i} es la entrada de agua al suelo durante el periodo de tiempo i . En este aspecto son considerados la precipitación, la irrigación, el ascenso capilar hacia la zona de las raíces (cuando el nivel freático se encuentra alto) y la escorrentía (superficial y subsuperficial) que entra a la superficie proveniente de los alrededores.

W_{s_i} es la salida de agua al suelo durante el periodo de tiempo i . Aquí son tomados en cuenta la evapotranspiración, la percolación desde la rizosfera hacia las capas inferiores y la escorrentía (superficial y subsuperficial) que sale de la superficie hacia los lugares vecinos.

$W_{i,i}$ es la reserva de agua del suelo al final del periodo de tiempo anterior (un día, una década, etc.).

Las precipitaciones atmosféricas proporcionan el agua en forma de lluvia. Las lluvias suministran al suelo una determinada cantidad de agua durante un periodo de tiempo dado o una parte del agua de lluvia se infiltra en el suelo, según su permeabilidad y sólo una porción de la lluvia total caída es utilizada por las plantas. El agua que realmente puede infiltrarse en el suelo y almacenarse en él constituye uno de los elementos de partida para efectuar el balance hídrico y es conocida como precipitación efectiva. Esto depende de muchos factores, por ejemplo, cuando la lluvia es intensa o sucede en un periodo prolongado de tiempo su eficacia puede ser baja debido a la escorrentía superficial y a la percolación más

allá de la capa de suelo donde se encuentran las raíces. Si la lluvia es ligera e intermitente pero con periodos prolongados entre una y otra también puede dar lugar a que una parte de la misma sea interceptada por el follaje y no llegue al suelo.

La precipitación efectiva también depende de otros factores relacionados con el suelo (textura, pendiente, estructura, contenido de humedad y de la vegetación que se encuentra establecida en el lugar. Científicos de diferentes países han intentado resolver empíricamente este problema y han desarrollado métodos que van desde la selección de valores umbrales de lluvia diaria hasta el uso de coeficientes de efectividad o pérdidas basados en condiciones agrohidrológicas.

Para determinar la precipitación efectiva son empleados diferentes criterios, algunos de ellos toman un porcentaje de la lluvia total para periodos estacionales, mensuales o decadales. En la India, por ejemplo, no toman en consideración las precipitaciones diarias inferiores a 5 mm y las superiores a 75 mm, tampoco las lluvias superiores a 125 mm en una década; en Birmania se considera no efectiva la precipitación diaria inferior a 12 mm y la superior a 12 mm se considera efectiva sólo el 80 % del total. En Viet Nam, se considera no efectiva la lluvia diaria inferior a 5 mm y superior a 50 mm (Appa, 1986).

Otros métodos empíricos toman en cuenta distintos factores, por ejemplo, el método Ogrosky y Mockus (Aguilera y Martínez, 1980) establece un coeficiente de efectividad según la relación el cociente evapotranspiración/precipitación; el método del Servicio de Conservación del Suelo del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica, (citado por Doorembos y Pruitt, 1977), toma en cuenta de forma muy general el almacenamiento de agua en el suelo; el método de Blaney-Cridle (Aguilera y Martínez, 1980), en el cual es usado un coeficiente de efectividad por cada 25 mm de lámina de precipitación registrada que va disminuyendo a medida que la precipitación aumenta; el método de Savo (Rey y de la Hoz, 1979), el cual toma en cuenta la pendiente del terreno, las características del suelo, la profundidad radicular y las precipitaciones. Pacheco *et al.*, 1995, al analizar diferentes coeficientes de pérdidas para la lluvia total del ciclo vegetativo, obtenidos por Gutiérrez y Vidal, señalan que como tendencia se observa que el método de Savo, que resulta más completo por tener en cuenta incluso la pendiente del terreno, es el que reporta los coeficientes de aprovechamiento relativamente más bajos, y resulta el más difundido entre los especialistas que se dedican a las actividades de proyectos de riego y drenaje en Cuba. Estos métodos empíricos más complejos fueron diseñados para la obtención de coeficientes para sumas de precipitación men-

suales, no utilizables para plazos más cortos. En la aplicación agrícola un mes es un periodo muy largo, por lo que se recomienda para su implementación en la práctica (Frère, Rijks y Rea, 1978; Rojas, 1985 y Eldin, 1986), que el cómputo se haga para periodos menores, como una solución intermedia entre la necesidad de determinar la influencia de la distribución de la precipitación en los días del mes y la sencillez del cálculo.

Según Doorembos y Pruitt (1977); cuando no hay estratos impermeables, la influencia del nivel de las aguas subterráneas en el ascenso capilar hacia la zona de las raíces se reduce a menos de 1 mm d⁻¹ entre 0.50 y 0.90 m de profundidad en los suelos de texturas fina y gruesa y de 1.20 a 1.25 m en la mayoría de los suelos de textura media. Según Pacheco y Alonso (1995), el ingreso de humedad por capilaridad no es muy frecuente en Cuba por estar el manto freático a una profundidad media mayor de 3 m, que es considerada la profundidad crítica a partir del cual el aporte es nulo.

Cuando la lluvia es intensa y el suelo se ha humedecido, se reduce la absorción del suelo. La cantidad de agua que no puede infiltrarse se desliza por la superficie y se pierde por escorrentía. La gran intensidad de la lluvia en las regiones montañosas origina la erosión del suelo. Sin llegar a esta fase extrema, la escorrentía ocurre rápidamente, reduce la infiltración y, por ende, el almacenamiento de agua en el suelo.

El agua que se infiltra en el suelo puede llegar a humedecer la zona de absorción de las raíces hasta determinado límite, conocido como capacidad de campo, por encima del cual el agua que continua infiltrándose comienza a salir de la zona radical, atraída por la fuerza de gravedad. Las pérdidas de agua por este concepto, que no podrá ser utilizada por las plantas, recibe el nombre de percolación profunda.

La evapotranspiración es un proceso combinado por el cual el agua es transferida desde la superficie de la tierra a la atmósfera; evaporación de agua líquida o sólida más la transpiración de las plantas (OMM, 1987). Según Perrier (1988), el uso del agua por una planta (evapotranspiración máxima) está condicionado por la demanda climática y por factores biológicos. Debido a que cada planta tiene su propia evapotranspiración máxima, que depende de la demanda climática local, la FAO y la Comisión Internacional de Riego y Drenaje (Allen, et al, 1994) propusieron una definición para la evapotranspiración de un cultivo de referencia (ET_o), que es la tasa de evapotranspiración de un pasto hipotético de referencia, al que no le falta agua, de 0.12 m de altura, con albedo de 0.23 y resistencia de superficie de cultivo de 70 s m⁻¹.

La evapotranspiración del cultivo depende del tipo de cultivo que se trate, de sus características y estadio de desarrollo en que se encuentre, de las condiciones climáticas y especialmente durante la fase inicial del crecimiento, la frecuencia de las lluvias, la magnitud de los eventos húmedos y el poder de evapotranspiración de la atmósfera.

La humedad del suelo depende de varios factores y cambia constantemente. En una misma región, con igual régimen de precipitación, la humedad es desigual. Esta diferencia está determinada, fundamentalmente, por el gasto de agua del suelo mediante la evapotranspiración. Según Hillel (1984); el contenido de agua de un volumen dado de suelo no puede aumentar sin un aporte proveniente del exterior (por infiltración o aporte capilar, por ejemplo) y no puede disminuir a menos que el agua sea transportada hacia la atmósfera por evapotranspiración, o hacia las profundidades por percolación.

Materiales y métodos.

Los materiales para realizar este estudio consistieron en las distribuciones espaciales de la altura de la lámina de precipitación a 50 % de probabilidad (Solano et al, inédito b) y de la evapotranspiración de referencia media para las 36 décadas el año (Solano et al, inédito a), normales para el periodo 1961-1990; la distribución espacial de la composición mecánica de los suelos y la distribución espacial de la hipsometría (Academia de Ciencias de Cuba, 1989) y como herramienta básica para el cálculo de la reserva hídrica del suelo, el balance hídrico agroclimático (Solano, Vázquez y Menéndez, 1998). La escala temporal usada fue la década.

El balance hídrico del suelo se calculó siguiendo el método tradicional de la FAO, se simplificó para su uso en el trabajo operativo y además, se calibraron los cálculos de algunos de sus elementos principales. Para ello se plantearon algunas hipótesis, las cuales se describen en el análisis de cada elemento.

En este modelo se asume que el ingreso de agua por ascenso capilar es muy pequeño al compararse con otros términos del balance y por ende no es considerado en el mismo.

Para simplificar el balance no se consideran movimientos laterales de agua. No obstante, es considerada la fracción de la precipitación que se pierde por la escorrentía superficial ya descrita en el análisis de la precipitación y el mismo modelo considera las pérdidas por escorrentía, junto con la percolación profunda a partir del momento en que la humedad del suelo alcance el valor de la capacidad de campo y la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración máxima del período sea positiva.

El balance hídrico simplificado se modeló para condiciones de cultivo en seco, o sea, no hay suministro de agua por irrigación y la única entrada es la precipitación.

Se asume que el agua almacenada en el suelo durante un período (un día, una década, etc.) se encuentra disponible en su totalidad para el período siguiente, sin importar su cantidad.

La ecuación simplificada del balance hídrico se expresa como:

$$W_i = P_{e_i} - NH_i + W_{i-1}$$

Los datos de entrada al balance son la precipitación efectiva (P_{e_i}), la necesidad hídrica (NH_i) en la década de análisis i y el almacenaje de agua del suelo al final de la década anterior (W_{i-1}).

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

En este modelo se asume que 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 y este valor es calculado por el método propuesto por Rojas (1983), citado por Martelo (1997) que toma en cuenta la textura del suelo y la pendiente de su superficie. Estos dos factores son obtenidos a partir de los mapas de composición mecánica de los suelos e hipsométrico del Nuevo Atlas Nacional de Cuba (Academia de Ciencias de Cuba, 1989).

La necesidad hídrica (evapotranspiración máxima) de un cultivo específico (NH) durante un período de tiempo dado se obtiene multiplicando la evapotranspiración de referencia (ET_o) de ese mismo período (calculada por el método Penman-Monteith ajustado para las condiciones de Cuba, según Menéndez, Solano y Vázquez 1999, por los coeficientes de cultivo (que relacionan Allen et al, 1998).

$NH = K_c \cdot ET_o$, para condiciones estándar (cultivos bien abastecidos de agua)

$NH = (K_c \cdot ET_o) K_s$, para condiciones no estándar (con ajustes en el suministro de agua)

donde K_c es el coeficiente de cultivo y K_s el coeficiente de estrés hídrico, según Allen et al (1998).

Por el carácter general de este estudio, es considerado un cultivo tipo que consume el agua a una velocidad potencial, por tanto el coeficiente de cultivo K_c es igual a uno y las necesidades hídricas serán

iguales a la evapotranspiración de referencia en condiciones estándar por el coeficiente de estrés, por tanto,

$$NH = ET_o \cdot K_s.$$

El almacenaje máximo (W_x) se define como la reserva máxima de humedad del suelo que está disponible para los cultivos, o sea, el volumen de agua que se encuentra entre la capacidad de retención de humedad de suelo o capacidad de campo (W_{cc}) y el punto de marchitez permanente (W_{pmp})

$$W_x = W_{cc} - W_{pmp}$$

El volumen de agua que se encuentra en el suelo a la capacidad de campo se calcula multiplicando la fracción volumétrica de agua aprovechable por los cultivos (f_{vaa}) por la profundidad radicular efectiva (Pr_e), asumida en este caso como 0.5 m.

$$W_{cc} = f_{vaa} \cdot Pr_e$$

La fracción volumétrica de agua aprovechable se obtiene calculando el valor medio entre los resultados obtenidos para esta variable por el nomograma de Kramer (1983) y por el triángulo textural, para las texturas de suelo según el mapa de composición mecánica de éstos del nuevo Atlas Nacional de Cuba (Academia de Ciencias de Cuba, 1989).

El punto de marchitez permanente representa el agotamiento de la reserva de agua disponible para los cultivos. El suelo en estas condiciones aún almacena cierto contenido de humedad (agua higroscópica), pero no puede ser extraída por los cultivos.

La escala espacial de trabajo se determinó que fuera 1:1 000 000, la cual es adecuada para la exploración al nivel nacional de diversos parámetros agrometeorológicos, fue solicitada por el financista de la investigación y utilizada por los autores en las zonificaciones de la evapotranspiración de referencia y de la precipitación.

Se emplearon diversas herramientas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) que permitieron múltiples y complejas operaciones con los mapas, al organizar la información a manera de capas, entre ellas las operaciones básicas fueron: la vectorización, interpolación, la reclasificación, la tabulación cruzada y la sobreposición.

Para obtener la información vectorial del contorno de Cuba, la división político-administrativa, la hipsometría y la composición mecánica de los suelos, se utilizó el MAPINFO 5.0. Los mapas sacados del Nuevo Atlas Nacional de Cuba (1989), fueron escaneados, referenciados y digitalizados.

Para utilizar la información en formato de rejilla (raster) se usó el IDRISI 2.0 para Windows. 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).

Para realizar la distribución espacial de los parámetros agrometeorológicos que intervienen en el cálculo del balance hídrico del suelo simplificado y que son medidos en estaciones meteorológicas o estaciones pluviométricas (ETo, lluvia), se utilizó el SURFER 7.0. El método de interpolación utilizado fue el kriging con variograma lineal y efecto de nodo cero, lo que lo hace un interpolador exacto.

Para calcular la precipitación efectiva se resta del valor de la altura de la lámina de lluvia reportado por cada estación pluviométrica, el valor del coeficiente de pérdidas de lluvia (Tabla 1) citado por Martelo (1997), modificado de Rojas (1983).

Tabla 1. Coeficientes de pérdidas de lluvia (kp), según la pendiente y la textura del suelo.

Pendiente	Permeables (livianos)	Semi-permeables (medio)	Impermeables (pesados)
menor 8 %	0.10	0.15	0.20
8 % - 20 %	0.20	0.30	0.40
Mayor 20 %	0.40	0.50	0.60

Para la construcción del mapa de coeficientes de pérdidas hídricas, en IDRISI, a partir del mapa vectorial de la hipsometría, se generó el modelo digital de elevación, de éste se derivó el mapa de pendientes y se reclasificó según los rangos dados en la Tabla 1. El mapa de textura también se reclasificó de acuerdo a los rangos de permeabilidad necesarios y con ambos se ejecutó una tabulación cruzada, asignándole finalmente a cada cuadrícula de cruce el valor de pérdida de lluvia coincidente. Posteriormente se aplicó el álgebra de mapas y se calculó la precipitación efectiva mediante la siguiente ecuación:

$$Pe_i = Pr_i - (Pr_i * kp)$$

donde:

Pe_i: precipitación efectiva para la década i.

Pr_i: lluvia generada a partir de los valores de la mediana como medida de tendencia central de la muestra de lluvia de las estaciones pluviométricas para la década i.

kp: coeficiente de pérdidas de lluvia.

El mapa de la textura presenta un porcentaje de arcilla determinado para cada polígono textural. Para cada uno de los rangos porcentuales de arcilla se obtienen dos valores diferentes de la fracción volumétrica de agua aprovechable (cm/cm), uno por

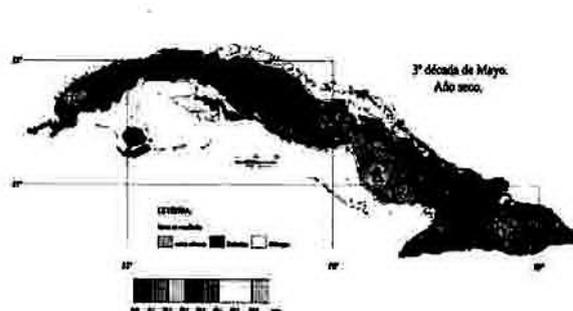
el triángulo textural (FAO) y otro por el nomograma de Kramer (1983). Se aplica la media entre estos dos métodos y ese valor es el que se le da en reclasificación al mapa de la textura y finalmente al multiplicar por la profundidad media de las raíces absorbentes del cultivo, se obtuvo el mapa de almacenaje máximo W_x.

Teniendo en cuenta que el módulo del álgebra de mapas de los SIG utilizados, no permiten el análisis de la información con «Si condicionales, anidados o no» de modo complejo, se exportó la información temática de cada cuadrícula necesaria para la construcción de los balances hídricos agrometeorológicos del suelo para su procesamiento en DEASE (sistema de base de datos). Finalmente la información de la disponibilidad hídrica del suelo obtenida para cada cuadrícula fue mapeada en SURFER 7.0, donde también se practicó el acabado cartográfico.

Resultados.

A partir de los resultados obtenidos en la modelación por métodos objetivos y la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica se obtuvo una base de datos digital donde cada cuadrícula de 1 km² posee información de la reserva hídrica del suelo decadal. La Figura 1 muestra las distribuciones espaciales de las reservas de humedad del suelo disponibles para los cultivos para la tercera década de mayo durante un año normal y un año seco.

La recarga de humedad de los suelos depende del comportamiento local de las precipitaciones en los períodos estacionales conocidos como lluvioso y poco lluvioso. Así pues, el valor mínimo de la reserva de humedad del suelo disponible para los cultivos, al nivel nacional, ocurre en la segunda década de abril. En esta década sólo una limitada zona al este de la parte septentrional de la zona montañosa de Baracoa, provincia Holguín, reserva una pequeña cantidad de agua adherida fuertemente por las fuerzas de capilaridad y absortividad de la matriz del suelo en la capa desde la superficie hasta 0.50 m de profundidad.



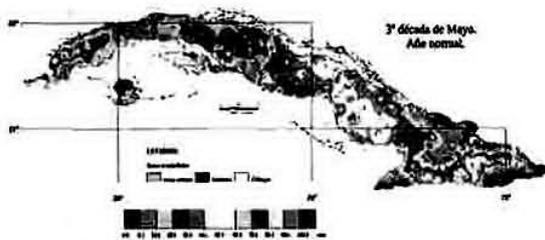


Figura 1. Distribución espacial de las reservas de humedad del suelo.

A partir de la tercera década de abril comienza la recarga de agua de los suelos, favorecida por el inicio de las precipitaciones en algunas localidades montañosas de los macizos Sierra Maestra y Nipe-Sagua-Baracoa. La recarga hídrica del suelo se inicia también en otras zonas montañosas, entre ellas, porción de las montañas de Guamuhaya en la provincia Cienfuegos y la parte occidental de la Cordillera de Guaniguanico, provincia Pinar del Río, en la primera década de mayo. A mediados de este mes el humedecimiento de los suelos comienza a extenderse en estas mismas regiones y además, al sur de la provincia Camagüey, sureste de la provincia Las Tunas, zona central de la provincia Sancti Spíritus y al este de la parte central de la provincia Matanzas. Aún así, predomina la ausencia de humedad del suelo, lo cual impide el crecimiento de cultivos agrícolas y pastos en condiciones de agricultura de secano.

Durante la tercera década de mayo la recarga de humedad de los suelos se extiende a casi todo el país, con la excepción de algunas regiones costeras y próximas a ellas en determinadas provincias, fundamentalmente en la porción oriental y sur de la provincia Guantánamo, sur de la provincia Granma, norte de las provincias Holguín y Las Tunas y norte de la porción oeste de la provincia La Habana y la porción este de la provincia Pinar del Río, en el límite entre ellas.

En junio continúa la recarga de humedad de los suelos y aparecen ya, desde la primera década, algunas localidades con los suelos a capacidad de campo.

Al analizar las reservas de agua disponibles para los cultivos durante todo el año, por provincias, en volumen de agua almacenada por unidad de área, se determinó que la provincia que más agua almacena en el año es Sancti Spíritus, seguida en orden decreciente por Cienfuegos, Matanzas y La Habana. La que menor cantidad de agua almacena resultó ser Holguín, seguida en orden creciente por Santiago de Cuba, Granma y Guantánamo. Los períodos de mayor disponibilidad de agua en el suelo para

los cultivos, desde el punto de vista nacional resultaron ser I - III décadas de junio y III década de setiembre - III década de octubre.

No obstante registrarse los mayores valores decadales de la precipitación en la tercera década de mayo en las cinco provincias más orientales y durante la primera década de junio en las provincias desde Pinar del Río hasta Camagüey, al determinar, por décadas, las reservas de agua disponibles para los cultivos en volumen de agua almacenada por unidad de área, se obtuvo que en el período I década de diciembre - II década de abril las mayores reservas se localizan en la provincia Guantánamo; en la III década de abril se localizan en Granma; I década de mayo, en Cienfuegos; II década de mayo, en Santiago de Cuba; III década de mayo, en Camagüey; I década de junio, en Ciego de Avila; II década de junio - I década de julio, en Sancti Spíritus; II década de julio - I década de agosto, en Matanzas; II década de agosto - II década de octubre, en Cienfuegos; y III década de octubre - III década de noviembre, en Sancti Spíritus.

Las reservas máximas de agua en el suelo, disponibles para los cultivos en todo el país, se observan en la segunda década de junio, ya en la tercera década estos niveles comienzan a disminuir. Es significativo que las zonas de déficit de humedad del suelo existentes en las regiones orientales próximas al litoral, a finales de mayo, comienzan a extenderse progresivamente en junio y a avanzar hacia el occidente del país por zonas próximas a la costa norte. Otras zonas de déficit hídrico próximas al litoral, fundamentalmente de la costa norte, sur de las provincias Pinar del Río y de la Isla de la Juventud, también ganan en extensión durante el mes de julio. En julio continúa también la disminución de las reservas hídricas del suelo producidas por el mínimo estival de las precipitaciones en muchas regiones del país. En la primera década de agosto es cuando se alcanza el mínimo estival de las reservas de agua del suelo. A partir de la segunda década de este mes, el suelo inicia nuevamente la recarga de humedad, fundamentalmente en las regiones occidental, central y mitad sur de las provincias Camagüey y Las Tunas (porción oeste).

Durante el mes de agosto la vegetación ha consumido la reserva de humedad del suelo en las cinco provincias más orientales y sólo perduran muy pequeñas zonas con agua disponible para los cultivos en las regiones montañosas. Gran parte de los suelos de regiones próximas al litoral norte no disponen de agua almacenada para los cultivos. Durante setiembre continúa la recarga de agua del suelo y disminuyen nuevamente las zonas afectadas por déficit extremo de humedad en el suelo.

En octubre ocurre un segundo máximo en la reserva hídrica del suelo producido por el incremento de las precipitaciones y en su primera década se alcanzan los valores máximos para este mes. Durante octubre la región oriental aumenta la reserva de agua para las plantas, aunque los suelos de amplias zonas próximas a las costas se mantienen sin reservas de humedad para los cultivos.

Noviembre es un mes de consumo de humedad del suelo por las plantas y comienzan ya a agotarse desde su primera década, las reservas de humedad para los cultivos, fundamentalmente en las cinco provincias más orientales, aunque se mantienen reservas de agua adecuadas en las montañas de la región de Baracoa.

Diciembre es también un mes de consumo de humedad del suelo por la vegetación y este mes finaliza sólo con reservas de humedad adecuadas para la vegetación en la región montañosa de Baracoa y con muy pequeñas cantidades de agua disponible para las plantas en la Sierra del Rosario, provincia Pinar del Río, montañas de Guamuhaya, en el límite entre las provincias Cienfuegos, Villa Clara y Sancti Spiritus y en la Sierra Maestra, provincia Granma y Santiago de Cuba.

En enero desaparecen las pequeñas zonas con muy deprimidos volúmenes de agua almacenada y sólo se mantienen condiciones de humedad favorables para los cultivos de agricultura de secano en zonas montañosas próximas a Baracoa, provincias Holguín y Guantánamo. Estas condiciones continúan durante febrero y en marzo las reservas de humedad para los cultivos disminuyen a niveles críticos y así se mantienen hasta la segunda década de abril.

Con excepción de la provincia Guantánamo, la cual mantiene un mínimo de humedad del suelo disponible para los cultivos en la segunda y tercera décadas de abril, en las restantes provincias hay un período donde en uno de cada dos años el suelo carece de reservas de humedad para los cultivos. Esta información se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Inicio y fin de los periodos del año en que el suelo no dispone de humedad para probabilidades de precipitación de 50 %.

Provincia	Desde	Hasta
Pinar del Río	I febrero	III abril
La Habana	II enero	II mayo
Ciudad de la Habana	III diciembre	II mayo
Matanzas	II noviembre	I mayo
Cienfuegos	III enero	III abril
Villa Clara	III enero	III abril
Sancti Spiritus	III enero	III abril
Ciego de Avila	III diciembre	II mayo
Camagüey	II diciembre	I mayo
Las Tunas	II diciembre	III abril
Holguín	III marzo	II abril
Granma	I enero	II abril
Santiago de Cuba	III enero	II abril
Isla de la Juventud	III noviembre	II mayo

Los resultados del análisis temporal de la distribución espacial de las reservas de humedad del suelo muestran que durante el período poco lluvioso del año, para precipitaciones con probabilidades de ocurrencia de 50 % (uno de cada dos años) no hay existencia de humedad en el suelo que garantice un crecimiento adecuado de cultivos agrícolas y pastos en condiciones de secano, con la excepción de la ladera septentrional de la zona montañosa de Baracoa, por lo que resulta sumamente riesgoso cultivar en estas condiciones.

Para el mismo nivel de probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones, existen regiones del país donde las reservas de humedad son tan deprimidas que no es recomendable el establecimiento de cultivos en condiciones de secano en ninguna época del año. En estas zonas coinciden bajos niveles de precipitación y altos valores de evapotranspiración y están localizadas en la región meridional de la Sierra Maestra al sur de Granma, desde Cabo Cruz hasta el límite con la provincia Santiago de Cuba; zonas llanas al oeste de la Bahía de Santiago de Cuba, próximas al litoral; laderas meridionales de las montañas de Nipe-Sagua-Baracoa, próximas a la costa sur y oeste de la provincia Guantánamo, desde la ladera este de la Sierra Maestra hasta Punta de Maisí; región al este de las alturas de Maniabón, cercana a las bahías de Banes, Nipe y Sagua de Tánamo; desde Punta de Mulas provincia Holguín hasta las alturas que forman la ladera septentrional de las Montañas de Nipe y de la Sierra Cristal, hasta la Bahía de Sagua de Tánamo; llanuras del norte de Camagüey - Las Tunas desde la Bahía de Nuevitás, provincia Camagüey, hasta Punta de Mulas; zona próxima al litoral desde Bahía Honda, provincia Pinar del Río, hasta Bahía de Mariel, provincia La Habana.

Durante el período lluvioso, para el mismo nivel de probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones, las reservas de humedad son adecuadas para obtener cosechas económicamente aceptables desde Mantua, provincia Pinar del Río hasta la porción sur de la provincia Las Tunas, en el litoral del Golfo de Guacanayabo. Esta región se caracteriza por ser favorable el balance entre los aportes al suelo producidos por las precipitaciones y las pérdidas de humedad originadas por la evapotranspiración y por tanto, la de menor riesgo climático para la pérdida de cultivos en el período lluvioso del año.

Conclusiones

Se obtuvieron por primera vez para Cuba las distribuciones espaciales decadales de las reservas de humedad disponibles para los cultivos en condiciones de agricultura de secano, basadas en los re-

sultados de la modelación por métodos objetivos y la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica.

Se obtuvo una base de datos digital donde cada cuadrícula de 1 km² posee información de la reserva hídrica del suelo decadal.

Los resultados obtenidos en esta investigación tienen una gran importancia para la planificación agropecuaria, fundamentalmente en condiciones sostenibles y de secano.

Se obtuvieron 36 mapas de las distribuciones espaciales de las reservas de humedad disponibles para los cultivos en condiciones de secano, para cada década del año.

Los resultados muestran un método objetivo para evaluar el riesgo climático en la selección de que cultivo sembrar, donde establecerlo y cuando es el momento oportuno para lograr el éxito en su cosecha.

Referencias

- 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.
- Aguilera, M.R. y Martínez (1980):** Relaciones agua-suelo-planta-atmósfera. Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A. y Pereira, L.S. (1994):** «An Update for the calculation of reference evapotranspiration», International Commission on Irrigation and Drainage(ICID) Bulletin, Vol. 43 No. 2.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith (1998):** «Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements». FAO Irrigation and Drainagepaper 56. Rome. Italy. 300 p.
- Appa Rao, G. (1986):** «Mapas de probabilidad de sequías». CMAg Reporte No. 24. Ginebra, Suiza, 75 p.
- Doorembos, J. y W.O. Pruitt (1977):** Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO de Riego y Drenaje, Roma, Italia, 194 p.
- Eldin, M. (1986):** Variabilité climatique. Analyse et incidences sur l'établissement et l'utilisation des bilans hydriques pour le zonagr agri-pedo-climatique, pp 343-352.
- Frère, M., J.Q. Rijks y J. Rea (1978):** Estudio agroclimatológico de la Zona Andina. Nota técnica No. 161 de la OMM Ginebra, Suiza, 297 p.
- Hiller, D., (1984):** «L' Eau et le Sol. Principes et Processus Physiques». Cabay, Libraire Éditeur, Louvain-La-Neuve, Belgique. 288 p.
- Kramer, P. (1983):** Water relations of plants, Academic Press, New York, 487 p.
- Martelo, M.T. (1997):** Cálculo del balance hídrico, en Cursillo Regional de Expertos (ARIII) sobre Técnicas Agrometeorológicas en la Agricultura Operativa de América Latina. Paipa, Colombia, Ginebra, Suiza, pp 21-35.
- Menéndez, J.A., O. Solano y R. Vázquez (1999):** «Estimación de la evapotranspiración de referencia por el método de Penman Monteith». Memorias de la Convención Trópico'99 en el Congreso de Meteorología Tropical. Palacio de Convenciones de La Habana, Cuba. Ref. MT001, 5 p.
- OMM (1987):** Glosario de términos usados en la Meteorología. Informe CAgM No. 20, Ginebra, Suiza, 189 p.
- Pacheco, J., N. Alonso, P. Pujol y E. Camejo (1995):** Riego y Drenaje. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 414 p.
- Perrier, A. (1988):** «Bilan Hydrique et Energetique: Consommation en Eau des Cultures», en «Etudes sur les Transferts D» Eau dans le systeme Sol-Plante-Atmosphere», Institut National de la Recherche Agronomique. R. Calvet, Editeur, Paris, 362 p.
- Rey A.L. y de la Hoz (1979):** Manual de Régimen de riego de los principales cultivos de Cuba, Editorial Orbe, Ciudad de La Habana.
- Rojas, O.E. (1985):** «Estudios agroclimáticos y Zonificación agroecológica del cultivos: metodología y resultados». Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. OEA. San José, Costa Rica, 106 p.
- Solano, O., C.J. Menéndez, R.J. Vázquez y J.A. Menéndez (Inédito, a):** «Zonificación de la evapotranspiración de referencia en Cuba». Resultado parcial del resultado científico «Atlas agrometeorológico de disponibilidades hídricas para una agricultura de secano». Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba. 12 p, 4 Anexos, 102 mapas.
- Solano, O., R.J. Vázquez y J.A. Menéndez (1999):** «Modelo agroclimático de balance hídrico del suelo. Su importancia en el servicio agrometeorológico operativo cubano para una agri-

cultura de secano». Disco electrónico de las publicaciones de los trabajos en la Convención Trópico'99 en el Congreso de Meteorología Tropical. Palacio de Convenciones de La Habana, Cuba. Ref. MT002, 9 p.

Solano, O., C.J. Menéndez, R.J. Vázquez y J.A. Menéndez, T. de los R. Burgo, M. Osorio y M. González (Inédito, b): «Zonificación de la precipitación en Cuba». Resultado parcial del resultado científico «Atlas agrometeorológico de disponibilidades hídricas para una agricultura de secano». Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba. 17 p, 6 Anexos, 78 mapas.

United States Department of Agriculture (1964): «Soil-plant-water-relationships». Soil Conservation Service, U.S.A.

Abstract.

One of the fundamental aspects of the sustainable agriculture is to make an efficient use of the water and for it is necessary to know the water consumed by the crops. The better known method to calculate that consumption is the soil water balance and its importance resides in that allows to estimate different aspects of agrometeorological interest such as the reservation of soil humidity, the deficit and the excesses waters and evapotranspiration water and also, the period of time in that it happen. With the spatial distributions of the effective precipitation and the normal reference evapotranspiration of each one of the 36 decades of the year, the reservations of soil humidity available for crops were calculated for the same periods. With these results and the application of geographical information systems, national maps were made on scale 1:1 000 000 of the zonification of the reservations of soil humidity available for the crops and the general tendency of their temporary and space variations was determined between the different regions of the country.

Keywords: Agrocimatology, zonification, reservations of soil humidity.