

**FACULTAD DE
CIENCIAS NATURALES y AGROPECUARIAS**

**Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero
Agrónomo**

Título: Calibración del coeficiente K_p del tanque evaporímetro clase “A” para estimar la evapotranspiración de referencia en el área agropecuaria del municipio Mayarí provincia Holguín.

Autor: Reyber Morales Leyva.

Tutor: Juan Alejandro Villazón Gómez.

Holguín 2021

Pensamiento.

La agricultura es la madre fecunda que proporciona todas las materias primarias que dan movimiento a las artes y al comercio.

Manuel Bergano

Dedicatoria

Este trabajo de diploma se lo dedico a mis padres, a todas aquellas personas que de una manera u otra ayudaron a realizar este logro, a mi tutor Juan Alejandro Villazón Gómez y especial mente a mi mujer que me ha apoyado en toda la carrera y por ultimo a mi hija mi mayor inspiración.

RESUMEN

La determinación de la evapotranspiración de referencia resulta de suma importancia para un adecuado manejo del riego. Esta puede ser determinada por diferentes métodos, entre los cuales se encuentra el del tanque evaporímetro clase "A", que utiliza el coeficiente K_p para corregir las disimilitudes entre la evaporación desde una superficie libre de agua y dicha evapotranspiración de referencia. El trabajo se desarrolló con el objetivo de calibrar el coeficiente K_p del tanque evaporímetro clase "A" para el cálculo de la evapotranspiración de referencia decenal en áreas agropecuarias del municipio de Mayarí en la provincia de Holguín. Se utilizaron los datos observados en dos estaciones meteorológicas (Guaro y Pinares de Mayarí) entre 1975-2015. Con los años pares dentro de la serie temporal se calibró el coeficiente K_p , a partir de la ecuación del tanque evaporímetro; con los años impares se validó la ET_o obtenida por dicha ecuación comparándola, mediante un análisis de regresión simple y los índices de concordancia (d) y confianza (c) con la ET_o FAO Penman-Monteith. Los modelos de regresión con mejores coeficientes se obtuvieron con la ET_o estimada_1 con los coeficientes K_p calibrados a partir de la ecuación del tanque evaporímetro clase "A". Esta mostró índices de concordancia más cercanos a 1. Los índices de confianza de esta ET_o se clasificaron como *bueno* y *medio*, por lo que constituye un método óptimo, rápido y sencillo a utilizar como herramienta para el manejo del riego.

Palabras clave: Índices estadísticos; Manejo del riego; Tanque evaporímetro clase "A".

ABSTRACT

The determination of the reference evapotranspiration is of utmost importance for an adequate irrigation management. This can be determined by different methods, among which is that of the Class "A" pan, which uses the K_p coefficient to correct the dissimilarities between evaporation from a water-free surface and said reference evapotranspiration. The work was developed with the objective of calibrating the KP coefficient of the Class "A" pan for the calculation of the decennial reference evapotranspiration in agricultural areas of the municipality of Mayarí in the province of Holguín. The data observed in two meteorological stations (Guaro and Pinares de Mayarí) between 1975-2015 were used. With the even years within the time series, the KP coefficient was calibrated, from the equation of the Class "A" pan; with odd years the ET_o obtained by said equation was validated by comparing it, by means of a simple regression analysis and the concordance (d) and confidence (c) indexes with the FAO Penman-Monteith ET_o . The regression models with the best coefficients were obtained with the estimated $_1ET_o$ with the KP coefficients calibrated from the Class "A" pan equation. This showed concordance indexes closer to 1. The confidence indexes of this ET_o were classified as *good* and *intermediate*, which is why it is an optimal, fast and simple method to be used as a tool for irrigation management.

Keywords: Statisticals index; Irrigation management; Class "A" pan.

Contenido

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| Hipótesis: | 2 |
| Objetivo general | 2 |
| Objetivos específicos | 2 |
| REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 3 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 30 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 34 |
| CONCLUSIONES | 38 |
| BIBLIOGRAFÍA | 39 |

INTRODUCCIÓN

La ecuación de FAO Penman-Monteith es considerada el método estándar para la estimación de la evapotranspiración de referencia (Allen *et al.*, 2006; Martins *et al.*, 2014). Aunque ha demostrado un comportamiento adecuado de las predicciones en las regiones y condiciones climáticas más variadas (Puppo y García, 2009) tiene el inconveniente de necesitar una gran cantidad de datos climáticos no siempre disponibles (Sánchez, 2001).

Desde la década de 1970, se generalizó el uso del tanque evaporímetro clase “A” para determinar el momento de riego de diferentes cultivos, al ser la base para el pronóstico de riego por el método bioclimático (Bonet *et al.*, 2012). El método del tanque evaporímetro clase “A” tiene como ventaja su simplicidad, al medir los efectos integrados del clima a partir de una única medida: la evaporación de una superficie libre de agua. De la misma forma, los bajos costos de instalación y mantenimiento han propiciado su amplia utilización en proyectos y programaciones de riego (Sentelhas y Folegatti, 2003).

La evapotranspiración en las áreas cultivadas ocurre bajo el efecto de los mismos factores climáticos que propician la evaporación desde la superficie del tanque, pero una serie de elementos provocan diferencias, las cuales quedan corregidas al utilizar el coeficiente K_p (Puppo y García, 2009). Aunque este coeficiente, puede obtenerse con una ecuación indirecta empírica, es recomendable calibrar K_p a partir de la evapotranspiración obtenida por lisímetros o por la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006).

Por lo antes expuesto, el objetivo de este trabajo es calibrar el coeficiente K_p del tanque evaporímetro clase “A” para el cálculo de la evapotranspiración de referencia decenal en áreas agropecuarias del municipio de Mayarí en la provincia de Holguín.

Problema científico:

¿Cómo estimar la evapotranspiración de referencia a partir de la ecuación del tanque evaporímetro clase "A" en área agropecuaria del municipio de Mayarí en la provincia de Holguín?

Hipótesis:

La calibración del coeficiente K_p para la ecuación del tanque evaporímetro clase "A" permite estimar, de forma óptima, la evapotranspiración de referencia en áreas agropecuarias del municipio Mayarí provincia de Holguín.

Objetivo general

Calibrar el coeficiente K_p del tanque evaporímetro clase "A" para la estimación de la evapotranspiración de referencia en áreas agropecuarias del municipio de Mayarí en la provincia de Holguín.

Objetivos específicos

Determinar el coeficiente K_p del tanque evaporímetro clase "A" para la estimación de la evapotranspiración de referencia en áreas agropecuarias del municipio de Mayarí en la provincia de Holguín.

Determinar la evapotranspiración de referencia a partir de la ecuación del tanque evaporímetro clase "A"

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Características generales del tanque evaporímetro case "A"

El **tanque evaporímetro** Clase A fue desarrollado en los Estados Unidos por el Servicio Nacional del Clima es muy utilizado en zonas agrícolas para planificar la aplicación del agua de riego, debido a que mide el efecto integrado del clima, es de fácil lectura y es muy económico. (Doorenbos y Pruitt, 1977)

El tanque evaporímetro o tanque de evaporación mide la evaporación efectiva, es decir, la cantidad de agua que una masa líquida al aire libre pierde a través de su superficie por haberse convertido en vapor, durante un cierto periodo de tiempo. Dado que en los fenómenos de evaporación influyen entre otros, principalmente, el recorrido del viento, la temperatura, la humedad, la insolación, etc. un tanque debe instalarse en una estación al lado de un anemómetro de recorrido y un pluviómetro y, dentro del tanque, un termómetro de extremas.

El tanque de evaporación es un recipiente circular de chapa galvanizada o de acero inoxidable, colocado sobre una tarima de madera que tenga aberturas para una buena ventilación. Le acompañan, como accesorios principales: el sistema medidor compuesto de un pozo tranquilizante y un tornillo con gancho (tornillo milimétrico), enroscado en su armadura y apoyado sobre el pozo tranquilizante. Su diámetro es de 1.20 m. y su altura de 25 cm.

Una vez elegida la ubicación del tanque, se coloca en su interior el pozo tranquilizador y se le llena de agua limpia hasta el nivel que lleva marcada el tanque (a 5 cm y 7,5 cm de su borde superior. En la superficie del agua se coloca un termómetro de extremas provisto de un flotador para que no se hunda, pero de tal modo que haya al menos 1 centímetro de agua entre el termómetro y el nivel del agua. El pluviómetro se instalará al lado del tanque, a 1,50 m del suelo, pero siempre que este a menos de unos dos metros de distancia del tanque. El anemómetro de recorrido se coloca en una esquina de la tarima, con sus cazoletas a 60 cm. del suelo. (Bhagwati, 2012)

Para realizar las lecturas de evaporación se debe seguir este orden:

1º Nivel de agua en el tanque.

2º Precipitación en el pluviómetro.

3º Recorrido del viento.

4º Temperatura máxima y mínima.

Las lecturas se hacen una vez cada 24 horas y siempre a la misma hora del día. Por lo general a las 06Z.

Nivel de agua en el tanque.

La superficie del agua debe quedar en lo posible, entre las marcas que lleva por su interior el aparato, a 5 cm y 7,5 cm de su borde superior, por lo cual, después de cada observación se debe RELLENAR cuando el agua quede próxima a la marca inferior y ALVIAR, cuando se sobrepase la marca superior, anotando estas incidencias en la hoja de observación. El nivel leído se obtiene de la siguiente manera: Se introduce en el pozo tranquilizador el tornillo milimétrico, centrado y apoyando su armadura en el borde de aquél, de forma que la punta del gancho quede sumergida. Se actúa sobre la pieza giratoria hasta que la punta del gancho suba a nivel del agua, en cuyo momento se forma un pequeño hoyo en el agua sobre la punta sumergida. (Monteith 2006).

A continuación se realiza la lectura en el vástago del tornillo. Cada paso de rosca del tornillo equivale a 2 mm .y el limbo circular (que señala las décimas) va graduado de 0 a 20 décimas. La lectura se hace sumando las muescas del tornillo con la medida reflejada en el limbo circular. El mantenimiento del tanque debe comprobarse periódicamente, por lo menos una vez cada 15 días, cuidando de que el agua permanezca limpia y no se forme verdín en las paredes o el fondo del mismo; retirando con cuidado hojas o cualquier otro objeto extraño para que no se provoquen pérdidas involuntarias de agua. (Monteith 2006)

Empleo del tanque evaporímetro tipo “A” en Cuba.

En el uso del evaporímetro como método para la programación durante la operación de los sistemas de riego se ha logrado gran experiencia en Cuba debido a su sencillez y factibilidad de aplicación en las condiciones de la producción; los más recientes

estudios sobre la evapotranspiración de los cultivos recomiendan la aplicación del método basado en la evapotranspiración de referencia (ET_o), la cual se obtiene a partir de una fórmula sugerida por expertos de la FAO y elaborada por Penman-Monteith, sin embargo, se considera que el método del evaporímetro es aceptable para el cálculo de la evapotranspiración de referencia siempre que se utilice en condiciones apropiadas. El empleo del método del evaporímetro implica la determinación de un coeficiente de evaporímetro (K_p), el cual es valorado a partir de la información disponible sobre la evapotranspiración de referencia (ET_o) estudiada por el Instituto de Meteorología y la evaporación de evaporímetro (E_{pan}) medida en condiciones experimentales durante el estudio de la evapotranspiración del cultivo de la piña; asimismo, se estudia también el coeficiente de evaporímetro con el empleo de la metodología sugerida por la FAO en base a las condiciones de instalación del evaporímetro, la humedad relativa y la velocidad del viento; como resultado del estudio por ambas vías se obtienen valores de K_p que difieren entre sí, sugiriéndose el empleo de los valores obtenidos con el empleo de la información de ET_o ya conocida, los cuales resultaron de 0,58 para el período seco y 0,65 para el período húmedo. (Chai 2014)

El uso del evaporímetro clase A adquiere un gran impulso como método para la determinación del momento de riego de los cultivos agrícolas en Cuba a partir de la década del 70, como base de lo que entonces se llamó el pronóstico de riego por el método bioclimático. El principio de dicho método se basó en la relación entre la evaporación de un evaporímetro y la evapotranspiración del cultivo a través de un coeficiente llamado coeficiente bioclimático, característico para cada cultivo y fase de desarrollo. (Bidyut y Bhagwati, 2012)

La fundamentación del método estuvo basada en el hecho de que las variables climáticas que actúan sobre la evapotranspiración del cultivo (temperatura, velocidad del viento, radiación solar, humedad relativa), lo hacen también sobre una superficie libre de agua, de manera que si puede establecerse la relación entre ambos factores mediante un coeficiente, puede entonces utilizarse la información obtenida mediante la evaporación para pronosticar la evapotranspiración del cultivo (Doorenbos y Kassan, 1979).

Estudios realizados en Cuba por Rey et al. (1979) permitieron comprobar que el método del evaporímetro se ajustaba mejor a nuestras condiciones climáticas que otros métodos empíricos. Los resultados obtenidos en la explotación de los sistemas de riego durante muchos años dieron la razón a los autores del referido trabajo, el método resultó suficientemente práctico para ser introducido en las condiciones de nuestras unidades productivas. (Carmen. 2012)

Estudios realizados en distintos países condujeron a la recomendación por la FAO del método de Penman modificado para el cálculo de la evapotranspiración, sin embargo, por su sencillez y factibilidad de aplicación, en la práctica productiva el método del evaporímetro siguió contando con la atención preferente de los especialistas vinculados a la explotación de los sistemas de riego en nuestro país. (Doorenbos y Pruitt, 1975)

Los avances en las investigaciones y la disponibilidad de cálculos más precisos sobre el uso del agua por los cultivos han indicado la necesidad de actualizar las metodologías para el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos. En consulta de expertos realizada por la FAO en 1990 (Allen et al, 2006). Se encontró que el método de Penman modificado producía sobreestimaciones del valor de la evapotranspiración, mientras otros métodos recomendados por la FAO, como los métodos de radiación, Blaney-Criddle y el método del tanque evaporímetro, mostraron una correspondencia variable con respecto a la evapotranspiración de un cultivo de referencia (Allen et al., 2006).

El panel de expertos recomendó la adopción del método combinado Penman-Monteith como el nuevo procedimiento estándar para la determinación de la evapotranspiración de referencia. Respecto al método basado en el tanque evaporímetro, los expertos de la FAO plantean que aunque responde de una manera similar a las mismas variables climáticas que afectan la transpiración del cultivo, varios factores producen diferencias significativas en la pérdida de agua de una superficie libre de agua y de una superficie cultivada, sin embargo, a pesar de la diferencia en los procesos ligados a la evaporación del tanque y la evapotranspiración de superficies cultivadas, la FAO considera que el uso de la evaporación del tanque para predecir la evapotranspiración de referencia para períodos de 10 días puede ser considerado confiable si se usa correctamente (Allen 2006).

Considerando la experiencia acumulada en nuestro país en el uso del tanque evaporímetro como método para la programación del riego, así como la sencillez de su empleo, resulta apropiada su utilización en aquellos casos en los cuales sea posible determinar los correspondientes coeficientes de tanque (K_p).

Funcionamiento del tanque evaporímetro clase “A”

El evaporímetro es un sensor totalmente electrónico para medir la evaporación del agua en un decantador instalado en ambiente neutral. El dato medido puesto en relación con los parámetros de temperatura, radiación solar, humedad relativa del aire y velocidad del viento al suelo, permite obtener información acerca de la concentración del agua en el suelo y las necesidades consiguientes. Tratase por lo tanto de un dato esencial para predisponer las estrategias de intervención ambiental sobre el territorio con especial referencia al sector agrícola.(Camargo 1997)

Dotado de un extraordinariamente preciso sensor ultrasónico, se monta en un pocillo tranquilizador para medir la alta de la capa superficial de agua en el tanque, obteniendo la cantidad de agua evaporada entre diferentes lecturas, pudiendo detectar variaciones de altura de decimas de milímetros. Dispone de un sistema de relleno automático del tanque, controlado por nuestra estación metrológica digital, permitiendo realizarlas lecturas siempre en el mismo rango de altura. (Doorenbos,y Pruitt, 1977)

Evaporímetro:

Instrumento destinado a medir el ritmo a que tiene lugar la evaporización en el son de la atmosfera. Se divide en dos tipos: aquellos en los que la evaporación tiene lugar en la superficie libre del agua y aquellos otros en los que la evaporación ocurre sobre una superficie de papel poroso o material cerámico, empapado en agua. Los del primer grupo disponen de un tanque de casero galvanizado, casi lleno de agua e introducido en el suelo de modo que sus bordes sobresalgan unos centímetros; la evaporación se expresa por la altura del agua evaporada, deduciéndola mediante lectura diarias del nivel, prevé corrección por la cantidad de agua cada en forma de precipitación cuando esta tenga lugar. Los del segundo tipo corresponden al modelo ideal, entre otros, por Piche que es bastante más sencillo aunque de menor precisión. (Chai 2014)

Como se mide la evaporización

La estimación de la evaporación de extensiones de agua libre o de superficies terrestres, así como de la transpiración de la vegetación, es de gran importancia para los estudios hidrológicos. Por ejemplo, la estimación de la evaporación puede ser decisiva en la determinación de la factibilidad de un sitio de embalse y es de utilidad para determinar los procedimientos ordinarios de operación de un sistema de embalses. La evaporación y la evapotranspiración son también elementos importantes en cualquier estudio del balance hídrico. Los modelos conceptuales en hidrología requieren valores promedios estimados de la evapotranspiración en cuencas.(Matyac, R. 2002).En la actualidad es imposible medir directamente la evaporación o la evapotranspiración de grandes superficies. Sin embargo, se han establecido diversos métodos indirectos que dan resultados aceptables. Este capítulo versa sobre los tanques de evaporación y lisímetros que se utilizan en las redes. En los embalses existentes, las parcelas y las cuencas pequeñas, las estimaciones pueden hacerse basándose en el balance hídrico, en el balance energético y en métodos aerodinámicos. Estas técnicas se analizan en el presente capítulo únicamente desde el punto de vista de los instrumentos y de las necesidades de observación. En los capítulos 37 y 38 se examina minuciosamente el cálculo de la evaporación y de la evapotranspiración, respectivamente, de extensas superficies terrestres y de agua por diversos métodos indirectos. Para calcular la evaporación de lagos y embalses se utilizan frecuentemente los registros de evaporación obtenidos por medio de tanques de evaporación. Existen numerosos modelos de tanques de evaporación: unos son cuadrados y otros circulares; unos están instalados por encima del nivel del suelo, y otros están enterrados de forma que el nivel de agua coincida aproximadamente con el del terreno. Los tanques o finas de evaporación se instalan a veces sobre plataformas flotantes en lagos o masas de agua.(Hamilton, Y. 2013)

Entre los variados tipos de tanques de evaporación utilizados hay tres que merecen especial atención: el tanque de evaporación clase A de Estados Unidos y el tanque GG1-3 000 y el de 20 m² de la ex Unión Soviética. El primero fue recomendado por la OMM y la Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas (AICH) como instrumento

de referencia. El rendimiento de este tanque se ha estudiado en condiciones climáticas muy diversas y en latitudes y altitudes muy diferentes. El tanque de evaporación GO 1-3 000 y el de 20 m² se utilizan en Rusia y algunos otros países con diferentes condiciones climáticas. Poseen cualidades operativas dignas de confianza, así como una relación extraordinariamente estable con los elementos meteorológicos que determinan la evaporación. La OMM patrocinó en varios países un programa de observaciones de comparación [1] entre el tanque de evaporación clase A, el tanque GO 1-3 000 y el tanque de 20 m². Este programa condujo a algunas recomendaciones operativas sobre la conveniencia de estos tanques en diversas condiciones climáticas y fisiográficas.(Hernández, K. 2014)

Además del tanque, se emplean los siguientes instrumentos en las estaciones evaporimétricas:

- a) un anemógrafo integrado o anemómetro, situado a uno o dos metros por encima del tanque, para determinar el movimiento del viento sobre el tanque
- b) un pluviómetro no registrador
- c) termómetros o termógrafos que proporcionan las temperaturas máxima, mínima y media del agua en el tanque
- d) termómetros o termógrafos de máxima y mínima para medir las temperaturas del aire, o un higrotermógrafo o psicrómetro si se desea conocer la temperatura y la humedad del aire.

El emplazamiento para ubicar el tanque debe ser un terreno nivelado y libre de obstrucciones. Si las condiciones climáticas y del terreno no permiten mantener una capa vegetal, debe hacerse lo posible para que la superficie del suelo se asemeje a la superficie natural y a los alrededores. Los obstáculos, como árboles, edificios, arbustos o garitas meteorológicas, deben estar a una distancia igual o superior a cuatro veces la altura del objeto por encima del tanque de evaporación. En ningún caso, deberá colocarse el tanque de evaporación o la garita de instrumentos sobre una losa o pedestal de concreto ni sobre asfalto ni capas de grava. Los instrumentos deben instalarse en la estación de evaporación de modo que no proyecten sombras sobre el

tanque. El tamaño mínimo de la parcela debe ser de 15 X 20 m y debe estar cercada para proteger los instrumentos e impedir que los animales beban el agua. La cerca o valla debe construirse de manera que no modifique la estructura del viento sobre el tanque de evaporación. (Hamilton 2013)

En regiones deshabitadas, especialmente en regiones áridas y tropicales, con frecuencia es necesario proteger los tanques de evaporación de pájaros y animales pequeños, para lo cual se puede utilizar:

a) repelentes químicos. En ese caso, hay que tomar precauciones para no contaminar en absoluto el agua del tanque de evaporación; o

b) una pantalla de tela metálica de tipo corriente colocada encima del tanque de evaporación.

Para estimar el error introducido por el efecto de la pantalla de la tela , metálica sobre el régimen del viento y sobre las características térmicas del tanque, deben compararse las lecturas del tanque protegido con las obtenidas por medio de un tanque estándar en la estación más próxima que tenga características similares.

El nivel del agua del tanque debe medirse con exactitud antes y después de añadir agua. Esto puede hacerse de dos maneras:

a) el nivel del agua se puede determinar por medio de un aforador de gancho que consta de una escala móvil y de un vernier dotado de un gancho dentro de una cámara de agua tranquila montada en el tanque. Se puede usar también un flotador. Se utilizará un recipiente calibrado para añadir o quitar agua al hacer la observación, volviendo a situar el nivel del agua a la altura del punto fijo;

b) el nivel del agua se puede determinar usando el siguiente procedimiento:

i) se coloca encima de una señal de referencia, hecha en el tanque por debajo de la superficie del agua, un recipiente de diámetro pequeño dotado de una válvula;

ii) se abre la válvula hasta que el nivel del agua contenida en el recipiente sea igual con el nivel del agua del tanque;

iii) se cierra la válvula y se determina con exactitud el volumen de agua contenido en el recipiente mediante una probeta de medida;

iv) la altura del nivel del agua por encima de la señal de referencia se determina a partir del volumen de agua contenida en el recipiente y de las dimensiones del mismo.

La evaporación diaria se calcula evaluando la diferencia entre los niveles del agua en el tanque en días sucesivos, teniendo en cuenta las precipitaciones durante el período considerado. El volumen de evaporación entre dos observaciones del nivel del agua en el tanque se determina mediante la fórmula:

$$E = P \pm \Delta d$$

Donde P es la altura de las precipitaciones producidas durante el período entre las dos mediciones y Δd la altura del agua añadida (+) o sustraída (-) del tanque.

Actualmente se utilizan varios tipos de tanques automáticos de evaporación. El nivel del agua en el tanque se mantiene automáticamente constante gracias a un sistema que vierte agua en el tanque desde un tanque de almacenamiento o elimina el agua sobrante en caso de precipitación. Se anota la cantidad de agua añadida o eliminada. (Sentelhas y Folegatti 2003)

Tanque evaporímetro tipo “A” como unidad de medida

Se mide el volumen de agua necesario para mantener el nivel constante, en la unidad de tiempo, que puede ser 6, 12 o 24 horas. El volumen de agua consumido se transforma en mm de agua evaporada por unidad de tiempo. Varios investigadores han determinado fórmulas empíricas relacionando la evaporación medida en un evaporímetro con la evapotranspiración de diversos cultivos. Según FAO (para condiciones ambientales mundiales promedio), el coeficiente K_{ps} varía entre 0.40 y 0.85 (Allen et al., 2006), en tanto que, para el Servicio Nacional del Clima (para el territorio de los Estados Unidos), el coeficiente K_p varía entre 0.40 y 0.87 (Grismer 2002).

Medida de la Evaporización

La medida de la evaporación de las capas de agua libre y del suelo, así como la transpiración de la vegetación, revisten una gran importancia en los estudios agronómicos e hidrometeorológicos, así como en el estudio de los proyectos y explotación de embalses y sistemas de riego y avenamiento, especialmente en las zonas áridas y semiáridas. Desgraciadamente resulta difícil obtener medidas que sean verdaderamente representativas de las condiciones naturales y, por otra parte, los instrumentos de que se dispone actualmente no pueden considerarse como plenamente satisfactorios. Por esta razón, los métodos meteorológicos para la estimación de la evaporación despiertan un interés considerable. (Silva, J. O. 2015)

Unidades de medida

El índice de evaporación se define como la cantidad de agua evaporada desde una unidad de superficie durante una unidad de tiempo. Puede expresarse como la masa o volumen de agua líquida evaporada a partir de una unidad de superficie durante la unidad de tiempo, y habitualmente se representa como la altura equivalente de agua líquida evaporada por unidad de tiempo en toda la superficie considerada. La unidad de tiempo es normalmente un día y la altura puede expresarse en milímetros o centímetros. (Folegatti 2003)

Factores que afectan a la evaporación

Los factores que afectan al índice de evaporación procedente de cualquier cuerpo o superficie pueden dividirse en dos grupos: factores meteorológicos y factores superficiales, cualquiera de los cuales puede limitar el índice de evaporación. Los factores meteorológicos pueden a su vez subdividirse en parámetros energéticos y parámetros aerodinámicos. La energía es necesaria para que el agua pase de la fase líquida a la fase vapor y en la naturaleza esa energía la suministra en gran medida la radiación solar y terrestre. Los parámetros aerodinámicos, tales como la velocidad del viento en la superficie y la diferencia de presión de vapor entre la superficie terrestre y la atmósfera inferior, controlan la magnitud de la transferencia del vapor de agua evaporado. (Grismar 2005)

Conviene distinguir entre las situaciones en las que el agua libre está presente en la superficie de aquellas en las que no lo está. Entre los factores importantes figuran la

cantidad y estado del agua y también las características de la superficie que afectan al proceso de transferencia al aire o a través de la superficie del cuerpo de que se trate. La resistencia a la transferencia de humedad a la atmósfera depende por ejemplo de la rugosidad de la superficie; en las zonas áridas y semiáridas, el tamaño y forma de la superficie de evaporación es también extremadamente importante. La transpiración procedente de la vegetación, además de depender de los factores meteorológicos y superficiales ya citados, está en gran parte determinada por las características de las plantas y sus reacciones. Entre las mismas figuran, por ejemplo, el número y tamaño de estomas y el hecho de que estos estomas estén abiertos o cerrados. La resistencia de las estomas a la transferencia de humedad indica que existe una reacción diurna, pero esa resistencia también depende considerablemente de la humedad del suelo de que dispone el sistema de raíces. (Matsuura 2011)

Evaporímetros

El término «evaporímetro» se aplica a cierto número de instrumentos (el atmómetro entre ellos) mediante los cuales se mide la pérdida de agua en una superficie normal saturada. Estos instrumentos no miden directamente ni la evaporación procedente de las superficies naturales de agua ni tampoco la evapotranspiración real (es decir, pérdida total de agua debida a la evaporación procedente del suelo y a la transpiración de las plantas) o la evaporación potencial (es decir, la que se produciría si el suelo estuviera ampliamente provisto de agua). Por consiguiente los valores obtenidos no pueden utilizarse sin un ajuste para llegar a una estimación correcta de la evaporación de los lagos o de la evapotranspiración real y potencial en las superficies naturales. (Bhagwati 2012).

Debe insistirse en que no se obtienen resultados comparables cuando se utilizan diferentes evaporímetros. Sólo pueden lograrse esos resultados comparables utilizando instrumentos idénticos con exposiciones similares e incluso así los valores no son necesariamente comparables con otros resultados. La relación entre las escalas de los distintos instrumentos rara vez es útil, a menos que los instrumentos sean del mismo tipo y se utilicen de la misma manera. (Smith 2006)

Atmómetros

Un atmómetro es un instrumento que mide la pérdida de agua en una superficie porosa mojada. Las superficies mojadas están constituidas por esferas porosas de cerámica, o por cilindros o láminas o por discos de papel de filtro saturados de agua. El atmómetro de Livingstone comprende como elemento de evaporación, una esfera de cerámica de unos cinco centímetros de diámetro, conectada con una botella de reserva de agua mediante un tubo de vidrio o de metal. La presión atmosférica que actúa sobre la superficie del agua del depósito mantiene la esfera saturada de agua. El atmómetro de Bellani consiste en un disco de cerámica sujeto en la parte alta por un embudo de cerámica barnizada, dentro del cual llega el agua procedente de una bureta que actúa como depósito e instrumento de medida. El evaporímetro de Piche tiene como elemento de evaporación un disco de papel de filtro unido a la parte baja de un tubo cilíndrico graduado e invertido, cerrado por un extremo, que suministra agua al disco. Las medidas sucesivas del volumen de agua que queda en el tubo graduado darán la cantidad perdida por evaporación en determinado tiempo. (Silva 2016)

Aunque frecuentemente se considera que los atmómetros dan una medida relativa de la evaporación en la superficie de las plantas, en realidad sus medidas no mantienen ninguna relación sencilla con la evaporación en las superficies naturales. Aunque los atmómetros tienen el atractivo de ser económicos y fáciles de manejar, la normalización de su exposición presenta considerables dificultades debido al hecho de que, con frecuencia, los efectos que ejercen las diferencias de exposición en las medidas de evaporación son grandes. Sus lecturas se ven gravemente afectadas por los depósitos de polvo o arena en las superficies porosas. Las lecturas de los evaporímetros de Piche, con exposiciones cuidadosamente normalizadas, se han venido utilizando con algún éxito para deducir los valores del recorrido del viento y del déficit de presión de vapor saturado que se necesitan para la estimación de la evaporación. (Andrade 2006)

Mientras que puede ser posible relacionar en forma empírica las pérdidas procedentes de los atmómetros con las correspondientes a las superficies naturales, cabe esperar que exista una relación diferente para cada tipo de superficie y para climas diferentes. Por consiguiente, aun cuando los atmómetros continuarán probablemente siendo útiles

para los estudios que se realicen a pequeña escala, su utilización no es recomendable en el caso de estudios sobre recursos hídricos, a menos de que no se disponga de otros datos.(Miranda 2006)

Evaporímetros de cubeta y tanques de evaporación

La evaporación se mide observando el cambio de nivel de la superficie libre del agua en una cubeta o tanque. Estos instrumentos que constituyen el tipo de evaporímetro más ampliamente utilizado, sirven de base a distintas técnicas para estimar la evaporación y la evapotranspiración de superficies naturales cuyas pérdidas de agua ofrecen interés. (Figueiredo 2016)

Exposición

Se utilizan principalmente dos tipos de exposición para las cubetas y tanques:

- a) Enterrados, en donde la mayor parte del tanque está por debajo del nivel del terreno, quedando la superficie de evaporación al mismo nivel o muy cerca de la superficie del terreno circundante;
- b) Por encima del terreno, de modo que la totalidad de la cubeta y la superficie de evaporación estén situadas a baja altura por encima del terreno.

En cualquier caso, conviene que el tanque sea de material inoxidable y que las juntas sean de tal tipo que se reduzca al mínimo el riesgo de que el tanque tenga pérdidas por falta de estanqueidad. Las cubetas situadas por encima del terreno son baratas y fáciles de instalar y mantener. Permanecen más limpias que las cubetas enterradas ya que la suciedad no las salpica mucho ni la arrastra el aire hasta el agua de los alrededores. Cualquier pérdida de agua que se produzca después de la instalación resulta fácil de detectar y corregir. Sin embargo, la cantidad de agua evaporada es mayor que en las cubetas enterradas, principalmente a causa de la energía radiante adicional que incide en las paredes laterales. Estos efectos perjudiciales de las paredes laterales pueden evitarse parcialmente utilizando una cubeta aislada, aunque esto encarece el costo del aparato.(Allen 2006)

Al enterrar la cubeta se eliminan parcialmente los efectos perjudiciales, tales como la radiación en las paredes laterales y el intercambio de calor entre la atmósfera y la propia cubeta. Sin embargo, las desventajas son; a) más impurezas acumuladas en la cubeta que dificultan la limpieza; b) las pérdidas de agua no pueden ser fácilmente detectadas y corregidas, y c) la altura de la vegetación que rodea a la cubeta plantea un problema importante. Por otra parte, se produce un intercambio apreciable de calor entre la cubeta y el suelo, y ello depende de numerosos factores y, en particular, del tipo de suelo, de su contenido de agua y del manto de vegetación. Un tercer tipo de instalación y exposición consiste en colocar una cubeta flotante sobre la superficie de un lago. Este tipo de instalación permite obtener valores de la evaporación del lago más correctos que los que se consiguen con la cubeta de evaporación instalada en la orilla, por encima o por debajo del nivel del terreno, aunque las propiedades de acumulación de calor de la cubeta flotante son distintas de las del lago. De todos modos, una cubeta flotante sufre la influencia de las características particulares del lago donde se halla instalada y no constituye necesariamente un buen indicador de la evaporación del lago. Las dificultades de observación son considerables y, por otra parte, las salpicaduras que penetran en la cubeta falsean con frecuencia los datos del instrumento. El costo de instalación y explotación de este tipo de cubeta resulta también elevado. (Doorenbos 2006)

Evaporímetro estadounidense de cubeta de Clase A

El evaporímetro estadounidense de cubeta de Clase A está compuesto de un cilindro de 25,4 cm de profundidad y 120,7 cm de diámetro. El fondo de la cubeta se coloca a una altura de tres a cinco centímetros por encima del nivel del terreno, sobre un marco de madera que actúa de plataforma y que permite al aire circular por debajo de la cubeta, manteniendo el fondo de la misma por encima del nivel del agua estancada sobre el terreno en caso de lluvia. Esta instalación permite asimismo inspeccionar la base de la cubeta sin dificultad. La cubeta misma está construida de hierro galvanizado de 0,8 mm de espesor, o de cobre o metal monel que habitualmente se deja sin pintar. La cubeta se llena hasta cinco centímetros por debajo del borde (nivel que se considera de referencia). El nivel del agua se mide

mediante una escala en forma de gancho o un punto fijo de referencia. La escala de gancho consiste en una escala móvil y un nonio dotado de un gancho, cuyo extremo toca la superficie del agua cuando la escala está correctamente ajustada. Un tubo estabilizador de unos diez centímetros de diámetro y 30 cm de profundidad, dotado de un orificio en el fondo, elimina cualquier ondulación que pueda formarse en la superficie del agua del tanque y sirve además de soporte a la escala de gancho durante las observaciones. La cubeta se debe volver a llenarse cuando el nivel del agua, indicado por la escala, descienda más de 2,5 cm por debajo del nivel de referencia.(Bonet Pérez 2012)

La escala de punto fijo comprende una varilla de latón puntiaguda fijada en un tubo estabilizador, de modo que su extremo quede a unos seis o siete centímetros por debajo del borde del tanque de evaporación. Se utiliza un recipiente aforado para añadir o quitar agua en el momento de la observación con objeto de que el nivel del agua coincida con el punto fijo. Es preferible utilizar una escala de punto fijo que una escala de gancho, ya que es menos onerosa y permite mantener el agua de la cubeta a un nivel constante. El funcionamiento del evaporímetro estadounidense de cubeta de Clase A ha sido estudiado en condiciones climáticas muy diversas y en una amplia gama de latitudes y elevaciones muy diferentes; actualmente se dispone de relaciones muy útiles que permiten evaluar la evaporación de un lago en función de la evaporación de la probeta. También es posible estimar las pérdidas de agua de este evaporímetro a partir de datos climáticos, cuestión que reviste cierta importancia cuando, por ejemplo, se han extraviado los registros o durante un período del año bastante largo persisten temperaturas por debajo de cero grado. Este instrumento ha sido recomendado como instrumento normalizado para las redes de observación.(Brown Manrique 2012)

Evaporímetro soviético de cubeta GGI-3000

El evaporímetro soviético de cubeta GGI-3000 tiene forma cilíndrica, una superficie de 3000 cm², y una profundidad de 60 cm. El fondo de la cubeta es cónico. Este tanque se instala en el suelo, y su borde queda a 7,5 cm sobre el terreno. En el centro del tanque existe un índice en forma de tubo metálico sobre el cual se instala

una bureta volumétrica cuando se realizan las observaciones de evaporación. La bureta tiene una válvula que se abre para que el nivel del agua del interior se iguale con el nivel del agua del tanque. A continuación, se cierra la válvula y se mide con precisión el volumen del agua en la bureta. La altura del nivel del agua por encima del tubo metálico que actúa de índice se determina a partir del volumen de agua que hay dentro de la bureta y de las dimensiones de la misma. Una aguja unida al tubo metálico que actúa de índice muestra la altura a la cual se debe ajustar el nivel de agua de la cubeta. El nivel de agua debe mantenerse de tal modo que no descienda más de cinco milímetros por debajo ni ascienda a más de diez milímetros por encima de la punta de la aguja. Habitualmente se instala un pluviómetro GGI-3000 con un colector que tiene un área de 3000 cm², próximo al evaporímetro GGI-3000. El evaporímetro GGI-3000 ha sido recomendado como evaporímetro normalizado de red. (Duarte Díaz 2012)

Tanque soviético de 20 m²

Este tanque tiene una superficie de 20 m² y un diámetro de aproximadamente 5 m; es de forma cilíndrica con fondo plano y su profundidad es de dos metros. Construido de palastros soldados de cuatro a cinco milímetros de espesor, se instala en el suelo de manera que el borde quede a 7,5 cm sobre el terreno. Las superficies interiores y exteriores del tanque se pintan de blanco. El tanque está dotado de un depósito de llenado y de un tubo de estabilización en el que se ha instalado un índice tubular sobre el cual se coloca la bureta volumétrica en el momento de medir el nivel de agua del tanque. Dentro del tubo de estabilización, cerca del tubo índice, hay una pequeña varilla que termina en una punta afilada que indica la altura a que se debe ajustar el nivel del agua. Ese nivel nunca debe descender más de cinco milímetros por debajo de la punta de la aguja ni elevarse en más de diez milímetros por encima de dicha punta. Un tubo lateral de vidrio con graduaciones, unido al tanque de llenado, indica la cantidad de agua añadida al tanque y permite verificar de manera aproximada la medida de la bureta. El tanque de 20 m² se emplea corrientemente en la URSS y en algunos otros países en

condiciones climáticas muy diversas. Se ha recomendado su adopción como evaporímetro internacional de referencia.(Silva, T. B. S. da. 2016)

Comparación de evaporímetros

Con el fin de establecer procedimientos normalizados para la medida de la evaporación, la Organización Meteorológica Mundial y la Asociación Internacional de Hidrología Científica adoptaron el evaporímetro estadounidense de cubeta de Clase A como instrumento de referencia para el Año Geofísico Internacional, y en varios países se instó a los servicios meteorológicos nacionales a que instalaran dicho evaporímetro por lo menos en una de sus principales estaciones para el AGI. La OMM ha llevado a cabo toda una serie de comparaciones entre el evaporímetro estadounidense de Clase A y el tanque soviético GGI-3000 de 20 m². Los resultados de las medidas se han comparado con las estimaciones meteorológicas de la evaporación en la superficie libre del agua (Eo) calculada a partir de un balance combinado de la energía y de la ecuación aerodinámica, denominada ecuación de combinación o ecuación de Penman. Los resultados de estas comparaciones demostraron que si las estimaciones de la evaporación a partir del tanque de 20 m² son aceptables como norma, pueden predecirse, con un margen considerable de seguridad a partir de las lecturas de cualquiera de los evaporímetros pequeños. Utilizando la relación general deducida de los datos procedentes de 18 estaciones, la evaporación media mensual del tanque de 20 m² pudo estimarse a partir de las lecturas del evaporímetro de Clase A con una desviación típica del 10 por ciento durante los meses en que la lluvia fue despreciable, y del 17 por ciento durante los meses de lluvias significativas. Asimismo se obtuvieron estimaciones a partir de las lecturas del evaporímetro GGI-3000 con desviaciones típicas del 12 por ciento y del 13 por ciento, respectivamente. (OMM, 1976)

Así, pues, en cualquier otro lugar se pueden estimar valores mensuales de Eo a partir de las lecturas del evaporímetro de Clase A, utilizando la relación general deducida a partir de las 18 estaciones, con una desviación típica del 21 por ciento durante los meses de lluvia despreciable, y del 23 por ciento en los meses con lluvias significativas. Los valores mensuales de Eo estimados a partir de las lecturas del

evaporímetro GGI-3000 tendrán desviaciones típicas del 26 por ciento y del 25 por ciento, respectivamente, mientras que las estimaciones mensuales de E_o obtenidas a partir de las lecturas del tanque de 20 m² tendrán desviaciones típicas del 20 por ciento y del 24 por ciento para los dos casos de lluvia mencionados. Cabe observar que los gastos de instalación y mantenimiento del tanque de 20 m² son probablemente mayores que los correspondientes a la obtención de estimaciones mediante la ecuación de combinación.(OMM, 1976)

Evaporímetros registradores

Actualmente existen varios tipos de evaporímetros automáticos de cubeta en uso. El nivel del agua de la cubeta se mantiene constante dejando que le entre agua desde un tanque de almacenamiento o sacando agua de la cubeta cuando se produce precipitación. La cantidad de agua añadida o retirada queda registrada. En algunos tanques o cubetas, el nivel del agua se registra también permanentemente mediante un flotador situado en el tubo de estabilización. Ese flotador acciona un aparato registrador. También se utilizan pequeños evaporímetros en los cuales el peso del agua contenida en una pequeña cubeta se registra automáticamente, pero como tienen que estar instalados dentro de una garita y, por consiguiente al abrigo de la radiación solar, no se les considera instrumentos seguros. (Allen 2006)

Método de observación

La evaporación diaria se calcula evaluando la diferencia del nivel del agua en la cubeta en días sucesivos, y teniendo en cuenta al mismo tiempo la altura de la precipitación, si la ha habido, durante el período considerado. En zonas donde la relación entre la precipitación y la evaporación es grande, es aconsejable obtener la medida de la precipitación a partir de un pluviómetro enterrado al nivel del suelo. El nivel de la superficie del agua en el evaporímetro reviste gran importancia. Si el evaporímetro está demasiado lleno, hasta un 10 por ciento (o quizá más) de la lluvia caída puede salpicar fuera, lo cual conduce a una estimación por exceso de la evaporación. Si el nivel del agua es demasiado bajo, se producirá una reducción del índice de evaporación (de aproximadamente 2,5 por ciento por cada centímetro por debajo del nivel de referencia de 5 cm, en las zonas templadas), como consecuencia de la sombra y protección

excesivas a que se halla sometida la boca del evaporímetro. Si la profundidad del agua es demasiado escasa, aumenta el índice de evaporación debido al mayor calentamiento de la superficie del agua. (Doorenbos 2006)

Es aconsejable restringir la gama de niveles de agua permisibles, bien por métodos automáticos, o ajustando el nivel tras cada lectura, o bien tomando medidas para sacar agua cuando el nivel alcance su límite superior o añadiéndola cuando alcance el límite inferior. Además de las medidas del nivel del agua de la cubeta, se deben efectuar observaciones de la velocidad del viento en un radio de un metro alrededor de la cubeta, de la lluvia, de la humedad relativa del aire, de la temperatura del agua en la cubeta y de la temperatura del aire así como también de los valores máximos y mínimos de estos parámetros obtenidos durante la observación anterior (Monteith 2006)

Mantenimiento

Debe realizarse una inspección al menos una vez al mes, dedicando especial atención a la detección de fugas de agua. Los evaporímetros deben limpiarse con la frecuencia necesaria para mantenerlos exentos de residuos vegetales del suelo, sedimentos, residuos flotantes y películas de aceite. Se recomienda añadir al agua una pequeña cantidad de sulfato de cobre u otro producto adecuado contra las algas, con el objeto de evitar su proliferación. Si el agua se congela, se deberá romper el hielo lateral del tanque y medir el nivel del agua mientras el hielo esté flotando. Siempre que se observe esta prescripción el hecho de que parte del agua esté congelada no afectará significativamente su nivel. Si el hielo es demasiado grueso para romperlo, se puede aplazar la medida hasta que pueda hacerse; la evaporación debe determinarse entonces en función del período de tiempo adicional determinado por a dicho aplazamiento. La fuerte lluvia y los vientos de gran intensidad suelen provocar salpicaduras del interior al exterior de las cubetas lo que invalida las medidas. (Allen 2006)

Emplazamiento de las estaciones evaporimétricas

Las estaciones evaporimétricas deben estar situadas en terrenos nivelados y exentos de obstáculos tales como árboles, edificios, arbustos o garitas de instrumentos. Los obstáculos deben estar como mínimo a una distancia equivalente a cuatro veces su altura sobre la cubeta del evaporímetro. Una parcela de tierra de seis metros de lado (36 m²) resulta adecuada excepto en las zonas de riego; la parcela debe ser suficientemente grande como para garantizar que las gotas arrastradas por el viento o los efectos marginales de la zona sometida a riego no afectan a las lecturas. Los efectos mencionados pueden hacerse sentir hasta una distancia de 40 m. La parcela debe estar cercada para proteger los instrumentos e impedir que los animales abreen falseando el nivel el agua. El cerco debe estar construido de tal manera que no afecte al régimen del viento sobre el evaporímetro. (Sentelhasm1997)

La superficie del terreno en la estación evaporimétricas debe mantenerse, en la mayor medida posible, en las mismas condiciones que la capa natural común de toda la zona. La hierba, matas, etc., deben segarse o cortarse con suficiente frecuencia para mantener su altura por debajo del nivel del borde de la cubeta del evaporímetro. En ningún caso debe situarse el instrumento sobre una superficie de cemento, asfalto, o sobre una capa de grava. No hay que proteger al evaporímetro del sol. (Camargo 1997)

En las estaciones sin personal, especialmente las que están situadas en las regiones áridas y tropicales, a menudo resulta necesario proteger el evaporímetro de los pájaros y otros pequeños animales. Para ello, pueden utilizarse:

- a) Repelentes químicos. Cuando se recurre a este tipo de protección, se debe de tener sumo cuidado de no alterar significativamente las características físicas del agua del evaporímetro.
- b) Una tela metálica sobre la cubeta del evaporímetro. Estas telas metálicas son habituales en numerosas regiones. Impiden las pérdidas de agua debidas a los pájaros y otros animales, pero también reducen las pérdidas originadas por la evaporación, impidiendo parcialmente el paso de la radiación solar hasta el agua y reduciendo el movimiento del viento sobre la superficie de la misma. Con el objeto de obtener una estimación del error derivado del efecto de la tela metálica sobre el campo de viento y sobre las características térmicas del evaporímetro, se aconseja

comparar las lecturas del evaporímetro protegido con las del evaporímetro normal de la estación más próxima que disponga de personal. Las pruebas realizadas con un cilindro de protección compuesto de una tela metálica de retícula hexagonal de 25 mm, de alambre de acero, sujeto por un marco de acero de 8 mm de sección han demostrado una consecuente reducción de un 10 por ciento del índice de evaporación en tres lugares distintos, durante un período de dos años.

Evapotranspirómetros (lisímetros)

Un evapotranspirómetro es una instalación en la que pueden medirse las pérdidas por evaporación de agua procedentes de un volumen conocido de suelo y vegetación. En las zonas en que la precipitación supera siempre a la evapotranspiración, esto puede lograrse sencillamente midiendo la precipitación que llega al área medida (preferentemente con un pluviómetro enterrado al nivel del suelo) y el agua obtenida por drenaje de dicha área. Así, pues, se supone que el volumen de agua acumulado dentro del suelo y el de la vegetación es constante. Estos instrumentos se conocen frecuentemente con el nombre de lisímetros o medidores del drenaje. El drenaje se efectúa habitualmente por gravedad y el agua puede recogerse en un hoyo del terreno para medir o registrar su volumen a intervalos regulares y, algunas veces, su composición. El agua también puede bombearse hasta la superficie a intervalos regulares para registrarla. Es aconsejable verificar al menos una vez al año que el evaporímetro no tenga fugas de agua lo que se logra cubriendo la superficie del mismo para impedir la evapotranspiración y observar si, en un período de varios días, el volumen del drenaje es igual a la cantidad de agua añadida a la superficie. (Souza, A. P 2015)

Incluso en las zonas áridas o estaciones secas del año se pueden utilizar los evapotranspirómetros de drenaje simple garantizando un flujo saliente de agua mediante riegos diarios, o incluso con mayor frecuencia. Para reducir al mínimo los efectos de la advección local, que pueden ser notables, es importante que la superficie en los alrededores del evapotranspirómetro esté cubierta de vegetación análoga a la de la zona circundante y que reciba el mismo tratamiento a todos los efectos, incluso el riego y su régimen, que el tratamiento a que está sometida la zona observada. Esta

zona de amortiguación o zona protegida debe tener una superficie de hasta 100 m² cuando se trata de vegetación alta o dispersa, especialmente en zonas áridas y ventosas, y no ser inferior a 40 m² cuando se trata de vegetación más baja en climas menos áridos. El tipo de suelo que ha de tener el contenedor y el tratamiento que ha de recibir también debe ser idéntico al de la zona protegida para garantizar así un desarrollo idéntico de las raíces y análogas propiedades térmicas e hidráulicas. Por los mismos motivos, excepto en suelos muy arenosos, es aconsejable colocar grandes piedras naturales dentro del contenedor. (Almeida, F. T 2015)

El área del evapotranspirómetro debe ser de al menos 3 m² para reducir al mínimo el efecto que ejerce el mismo contenedor sobre la vegetación y en el flujo de calor del suelo dentro del contenedor. Por la misma razón, su profundidad debe ser de 1 m por lo menos, e incluso más, si las características del suelo o de las raíces así lo requieren. Cuando interese más la evapotranspiración real que la potencial, es necesario pesar el contenedor para determinar las pérdidas de agua. Hay ciertas instalaciones capaces de realizar esa pesada, pero desgraciadamente el elevado costo limita en general su uso a los trabajos de investigación. En su forma más elaborada, estos lisímetros de pesada contienen una profunda capa de suelo sin perturbar, más las grandes piedras que le acompañan, y su temperatura básica y potencial de agua suelen ajustarse automáticamente para coincidir con los de las zonas circundantes, a la misma profundidad. Estos lisímetros pueden ser suficientemente grandes para soportar el crecimiento de árboles plenamente desarrollados, pero manteniendo al mismo tiempo una sensibilidad que permita registrar la aparición del rocío. (Arantes 2015)

Evaporación en superficies naturales

Como se especifica en el párrafo 8.1.3, el estudio de los factores que afectan a la evaporación indica que el índice de evaporación procedente de una superficie natural ha de diferir necesariamente de la que corresponde a un evaporímetro expuesto a las mismas condiciones atmosféricas, debido al hecho de que las características físicas de las dos superficies de evaporación no son idénticas. Como lo que interesa a los climatólogos, hidrólogos y agrónomos es la evaporación procedente de las superficies naturales, existe gran interés en establecer la relación que existe entre las pérdidas por evaporación del suelo y las que habitualmente se miden utilizando evaporímetros. La

determinación de esta relación exige una serie de estimaciones independientes y seguras del índice de evaporación de las superficies naturales que interesan. En los pocos casos en los que se conoce bien el régimen hidrológico de la superficie, resulta posible estimar la evaporación como el único término desconocido del balance hídrico de la zona. (Martim 2015)

Con mayor frecuencia se utiliza el método del balance de energía para estimar el índice de evaporación. Al aplicar este método, la energía resultante disponible en la superficie (que se ha obtenido a partir de las medidas de su balance de radiación y de los cambios del almacenamiento de calor por debajo de la superficie y del calor de la advección a través de ella) se divide en calor latente y calor sensible que se intercambian con el aire. La proporción en que se hace esta división se obtiene a partir de los gradientes de temperatura y humedad del aire dentro de la capa límite próximo a la superficie de evaporación. La determinación de estas relaciones con suficiente precisión exige una resolución de $0,01^{\circ}\text{C}$ para las medidas separadas del gradiente térmico del termómetro húmedo y del termómetro seco. (Silva 2015)

Otro método para estimar el intercambio de calor latente, es el denominado método de correlación del flujo turbulento, que exige todavía mayor exactitud en las medidas; las fluctuaciones de la humedad específica del aire y de la componente vertical del viento han de registrarse utilizando sensores de muy rápido tiempo de respuesta, y se ha de disponer de un ordenador capaz de sumar también a gran velocidad sus desviaciones referidas al valor medio. Varios centros se han comprometido a diseñar equipo adecuado y relativamente robusto para utilizar en el terreno durante largos períodos, y que resulte todavía suficientemente preciso y rápido para poder incluir el flujo de agua que transportan los torbellinos pequeños y rápidos que se producen cerca de la superficie de evaporación. (Souza 2015)

Es difícil obtener estimaciones zonales precisas de la evaporación en regiones cuya superficie presenta una gran variedad de características y en donde se aplican diferentes métodos de cultivo, incluso si los factores climáticos, incluida la precipitación, son uniformes en toda la zona. La dificultad se plantea porque hay que prever

discontinuidades amplias y abruptas en el índice de evaporación, causadas por los cambios de las características de la superficie, mientras que al mismo tiempo resulta difícil y oneroso obtener estimaciones puntuales precisas. Un sistema que algunas veces ha dado buenos resultados consiste en estimar la evaporación zonal como término desconocido de un balance del agua atmosférica, en el cual el cambio de contenido en agua de la atmósfera sobre la zona de interés se deduce a partir de los datos de radio sondeos. (Almeida 2015)

Evaporación en los lagos

La evaporación de los evaporímetros de cubeta expuestos dentro o sobre el terreno depende de las características del instrumento. Estos evaporímetros tienen una capacidad calorífica inferior a la de los lagos y tienden a experimentar un ciclo anual de evaporación distinto, produciéndose los valores extremos en el evaporímetro a principios de la estación. Se pueden obtener estimaciones seguras de la evaporación anual de los lagos aplicando el correspondiente coeficiente lago-evaporímetro a la evaporación anual del instrumento. Para determinado instrumento el coeficiente lago-evaporímetro se obtiene comparándolo con la evaporación procedente de un lago real, o con menor perfección, comparando la evaporación del instrumento con la de un evaporímetro de cubeta lo suficientemente grande como para que simule un lago. El coeficiente para un evaporímetro específico depende también del régimen climático; es distinto según que las condiciones sean áridas o húmedas por ejemplo. Para que un evaporímetro de cubeta sirva como índice válido de la evaporación de un lago, ha de estar dispuesto de tal modo que evite los efectos ambientales del lago. Este tipo de disposición se podría lograr cerca del lago, pero en la orilla enfrentada a la dirección dominante del viento. No sería conveniente instalar el instrumento en una isla. Las comparaciones hechas sobre el terreno con grandes evaporímetros y en distintas condiciones climáticas, utilizando evaporímetros GGI-3000 y tanques de 20 m², dan coeficientes evaporímetro-lago que varían entre 0,75 y 1,00. Se han utilizado factores de corrección empírica teniendo en cuenta el tamaño del lago, su profundidad, la salinidad del agua y el grado de cobertura de la vegetación acuática. (Martim, C. C 2015)

Un segundo método para estimar la evaporación de un lago consiste en ajustar la evaporación del evaporímetro en función de la ganancia o pérdida de calor que se produce a través de las paredes y el fondo de la cubeta del instrumento. Un ejemplo de este método es la técnica que consiste en estimar la evaporación utilizando datos del evaporímetro de cubeta de Clase A. En las estaciones húmedas del año y en climas también húmedos, la temperatura del agua del evaporímetro de Clase A es mayor que la temperatura del aire y el coeficiente evaporímetro-lago puede llegar a ser de 0,80 o más. En las estaciones secas del año y en regiones áridas, la temperatura del agua del evaporímetro es inferior a la temperatura del aire y el coeficiente puede ser de 0,60 o incluso menos. Se considera que debe aplicarse un coeficiente de 0,70 cuando la temperatura del aire y del agua son iguales. Se han elaborado nomogramas para estimar la evaporación de los lagos partiendo de los datos del evaporímetro de Clase A, donde se tiene en cuenta la variación del coeficiente del evaporímetro producida por la transferencia de calor a través de la cubeta del instrumento. Para más detalles puede consultarse la Guía de Prácticas Hidrológicas de la OMM. (OMM1976)

Evaporación de la nieve

La evaporación de la nieve puede producirse como sublimación directa de sólido a vapor o bien a través de la fase líquida. La evaporación de la nieve es un proceso autolimitativo, porque la evaporación enfría la nieve y reduce el gradiente de presión de vapor en la capa situada inmediatamente por encima de ella. Inversamente, durante la condensación que se produce sobre la nieve, la presión de vapor en la superficie de la nieve no puede ser mayor que la correspondiente al punto de fusión de la nieve, lo cual puede mantener el gradiente inverso de presión de vapor. En consecuencia, el índice de condensación es ordinariamente mucho mayor que el de evaporación. En general, se estima que durante los períodos invernales la evaporación se produce a partir de una superficie típica de la nieve a un ritmo comprendido entre cero y 20 mm por mes. Durante los períodos de fusión de la nieve, tiende a prevalecer la condensación que se produce a razón de cantidades comprendidas entre cero y hasta casi diez milímetros de condensación por día. (Puppo, L 2009)

Cuando la temperatura del aire es inferior a 0°C y el cielo está despejado, es posible que la nieve se funda debido a la radiación solar y después se evapore. Cuando existe el debido equilibrio entre calor y humedad, la evaporación iguala a la fusión, de modo que se produce entonces la sublimación de la nieve. Es difícil medir la evaporación de la superficie de la nieve y probablemente no resulta más precisa que el cálculo de la evaporación. Los evaporímetros de polietileno o de plástico incoloro se utilizan en muchos países para la medida de la evaporación de la superficie de la capa de nieve. Sólo se efectúan observaciones si no está nevando. Se puede estimar la evaporación de la capa de nieve a partir de las observaciones de la humedad del aire y de la velocidad del viento a uno o dos niveles por encima de la superficie de la nieve y en la superficie de la capa de nieve, utilizando la ecuación de difusión turbulenta. Las estimaciones son más seguras cuando los valores de evaporación se calculan para períodos de cinco días o más. (García Petillo, M. 2009)

Evaporación de las superficies cubiertas de vegetación

La evaporación en las superficies vegetales se denomina transpiración, o evapotranspiración si se incluye también la pérdida de agua por evaporación que se produce en la superficie subyacente del suelo. Esta evaporación puede estimarse mediante el balance hídrico en ciertos casos, o a partir de la ecuación del balance calorífico. Alternativamente, esta evaporación puede ser estimada a partir de observaciones de los cambios del agua contenida en el suelo medidos mediante muestreo de la humedad del suelo, o bien pueden medirse con mayor precisión utilizando una instalación de lisímetro de pesada. (OMM1977)

Relacionando la cantidad medida de evapotranspiración real con las estimaciones en cantidad climáticamente limitada de evapotranspiración potencial, y relacionando después este valor normalizado con el agua contenida en el suelo o con el contenido potencial de agua en la zona de raíces, es posible establecer coeficientes con los que se puede calcular la evapotranspiración real a partir de un estado dado de cantidad de agua en el suelo (OMM, 1973, 1981; Rasmussen, 1977).

Otro planteamiento que se utiliza cada vez con más frecuencia para representar en un modelo la evapotranspiración real a partir de datos meteorológicos, consiste en calcular la conductancia de la superficie con respecto al vapor de agua, a partir de la relación entre la evapotranspiración real y la potencial, y después relacionar estos valores de conductancia de

la superficie con los correspondientes parámetros ambientales tales como la densidad de flujo de la radiación global y el contenido potencial de agua en el suelo. Cualquiera que sea el planteamiento utilizado, debe tenerse en cuenta que las relaciones obtenidas sólo serán seguras cuando las condiciones de la vegetación, el suelo y el clima sean similares a aquellas para las que fueron deducidas.(OMM, 1981).

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló con los datos tomados, en el período 1990-2015, en dos estaciones meteorológicas de la provincia de Holguín: Guaro (20° 40' 21" N y 75° 46' 57" W), con una precipitación de 1 099.3 mm al año 25.6°C de temperatura media, a 21 msnmm y Pinares de Mayarí (20° 29' 14" N y 75° 47' 26" W), 1 871.0 mm de lluvia anuales, una temperatura media de 21.6°C, a 647 msnmm.

Se revisaron las bases de datos de las estaciones meteorológicas para encontrar datos faltantes y se realizó un análisis de correlación entre ambas para completar los datos faltantes mediante regresión. Los años comprendidos en el período estudiado (26 años) se dividieron en dos grupos de 13 años cada uno. Con los años pares se calibró el coeficiente K_p .

La evaporación del tanque evaporímetro clase "A" está relacionada con la evapotranspiración de referencia por un coeficiente empírico derivado del mismo tanque:

$$ET_o = K_p * E_{pan}$$

Donde ET_o es la evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}); K_p es el coeficiente del tanque evaporímetro clase "A" (-) y E_{pan} es la evaporación del tanque evaporímetro (mm día^{-1}).

A partir de (1) se calcula el coeficiente del tanque evaporímetro clase "A":

$$K_p = \frac{ET_o}{E_{pan}}$$

Al mismo tiempo se determinó el coeficiente K_p calculado por la ecuación propuesta por Allen *et al.* (2006):

$$K_p = 0.108 - 0.0286u_2 + 0.0422\ln fet + 0.1434\ln HR_m - 0.000631 \ln fet^2 \ln HR_m \quad (3)$$

Donde u_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura ($m s^{-2}$); fet es el borde o distancia al borde de la superficie identificada, fijada en 1 000 m, que es la distancia máxima permitida para la estimación del coeficiente Kp (Allen *et al.*, 2006) y HR_m es la humedad relativa media (%).

La velocidad del viento u_2 se mide a una altura estándar elegida para todas las estaciones meteorológicas (10 m), pero para calcular la evapotranspiración se necesita dicha variable climática medida a 2 m de altura; por lo que para ajustar los datos medidos se utilizó la relación logarítmica:

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln 67.8z - 5.42}$$

Donde u_z es la velocidad del viento medida a z m sobre la superficie ($m s^{-2}$) y z es la altura de medición sobre la superficie (10 m en ambas estaciones).

Los valores del coeficiente Kp obtenidos por la metodología de Allen *et al.* (2006) fueron comparados con los obtenidos a partir de la ecuación del tanque evaporímetro clase "A" para verificar si se adapta a las condiciones ambientales locales.

La evapotranspiración de referencia se estimó a partir de la ecuación FAO Penman-Monteith, propuesta por Allen *et al.* (2006):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta R_n - G + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)}$$

Donde ET_o es la evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}); Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$); G es el flujo de calor del suelo, γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); T es la temperatura media del aire a 2 m de altura ($^\circ\text{C}^{-1}$) y u_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-2}).

Con los años impares del período se validó la ET_o estimada con los coeficientes K_p determinados a partir de la ecuación del tanque evaporímetro clase "A" (ET_o estimada_1) y de la ecuación propuesta por Allen *et al.* (2006) (ET_o estimada_2). Se realizó un análisis de regresión simple y se determinaron los índices de concordancia y de confianza o desempeño.

Índice de concordancia (Index of agreement, d) (Wilmott, 1985):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ETi_e - ETi_m)^2}{\sum_{i=1}^n (ETi_e - ETmean_m)^2 + \sum_{i=1}^n (ETi_m - ETmean_m)^2}$$

Donde n es el número de pares de datos, ETi_e es la i -ésima observación de la evapotranspiración estimada por el modelo a comparar, ETi_m es la i -ésima observación de la evapotranspiración estimada por el método de FAO Penman-Monteith y $ETmean_m$ es la media de la evapotranspiración estimada por el método de FAO Penman-Monteith. Es una medida estandarizada del grado de error de la predicción del modelo, en un rango desde 0 hasta 1. Cuando $d=1$, existe una concordancia perfecta entre los valores determinados experimentalmente y los estimados por el modelo; en sentido contrario, cuando $d=0$, nos indica falta de concordancia entre las variables.

Coficiente de confianza o desempeño (c) (Camargo y Sentelhas, 1997):

$$c = d * r$$

Donde d es el índice de concordancia y r es el coeficiente de correlación. Los valores de c fueron clasificados de acuerdo a las categorías propuestas por Camargo y Sentelhas (1997).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra el promedio del coeficiente K_p determinado decenalmente a partir de la ecuación del tanque evaporímetro clase “A” aplicada a los años pares de la serie temporal estudiada. Los resultados obtenidos fueron superiores a los observados por Bonet *et al.* (2012), quienes en el cultivo de la piña en la provincia de Ciego de Ávila encontraron valores del coeficiente K_p de 0.58 y 0.65 para los períodos seco y lluvioso, respectivamente.

Tabla 1.- Coeficientes K_p determinados a partir de la ecuación del tanque evaporímetro clase “A”.

| Decenas | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | sep | oct | nov | dic |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Guaro | | | | | | | | | | | | |
| Primera | 0.66 | 0.66 | 0.64 | 0.65 | 0.67 | 0.70 | 0.68 | 0.67 | 0.68 | 0.71 | 0.71 | 0.70 |
| Segunda | 0.65 | 0.66 | 0.68 | 0.68 | 0.66 | 0.71 | 0.68 | 0.67 | 0.69 | 0.70 | 0.67 | 0.67 |
| Tercera | 0.63 | 0.65 | 0.67 | 0.73 | 0.70 | 0.69 | 0.66 | 0.65 | 0.67 | 0.72 | 0.65 | 0.63 |
| Pinares de Mayarí | | | | | | | | | | | | |
| Primera | 0.69 | 0.71 | 0.72 | 0.79 | 0.83 | 0.85 | 0.79 | 0.82 | 0.79 | 0.75 | 0.70 | 0.68 |
| Segunda | 0.65 | 0.75 | 0.72 | 0.75 | 0.77 | 0.82 | 0.82 | 0.82 | 0.84 | 0.79 | 0.72 | 0.71 |
| Tercera | 0.67 | 0.74 | 0.73 | 0.84 | 0.83 | 0.82 | 0.77 | 0.76 | 0.84 | 0.75 | 0.71 | 0.69 |

Los valores del coeficiente K_p son, generalmente, más cercanos a 1 en Pinares de Mayarí que en Guaro; lo cual indica que existen menos diferencias entre los tenores de la evapotranspiración de referencia y la evaporación del tanque evaporímetro en la primera estación meteorológica mencionada.

La Figura 1 muestra las regresiones de las ET_o estimadas 1 y 2 con respecto a la evapotranspiración de referencia obtenida a partir de la ecuación de FAO Penman-Monteith. En ambas estaciones meteorológicas los valores estimados a partir del coeficiente K_p calibrado (ET_o estimada_1) mostró con los coeficientes K_p obtenidos.

En el modelo de regresión lineal simple puede observarse que el parámetro que representa la pendiente de la recta (b) se encuentra en todos los casos por debajo de 1, lo que indica una tendencia a subestimar, por parte de las ETo estimadas 1 y 2, los valores de evapotranspiración de referencia obtenidos por la ecuación patrón. No obstante, resulta válido señalar la mayor cercanía a la unidad, en el modelo de regresión de la ETo estimada_1 para la estación meteorológica de Guaro, del parámetro b . Lo que revela una mayor semejanza de los valores de la ETo estimada_1 con la evapotranspiración de referencia por el modelo FAO Penman-Monteith.

El comportamiento de la ETo estimada_2 durante el análisis de regresión difiere de lo observado por Andrade *et al.* (2016). Al estimar la evapotranspiración de referencia con la ecuación del tanque evaporímetro clase "A" mediante la utilización del coeficiente K_p a partir de la ecuación propuesta por Allen *et al.* (2006), con los datos medidos durante un periodo de 10 años en la estación meteorológica principal del municipio de Lavras (estado de Minas Gerais, Brasil), y compararla con la ETo por el método FAO Penman-Monteith encontraron un coeficiente de regresión de 0.9069.

De la misma forma, en la región medio-norte del estado de Mato Grosso (Brasil), Souza *et al.* (2015) al comparar la ETo obtenida a partir de la ecuación del tanque evaporímetro clase "A", mediante la utilización de coeficiente K_p (Allen *et al.*, 2006), con la ETo de la ecuación FAO Penman-Monteith encontraron un coeficiente de regresión de 0.6226.

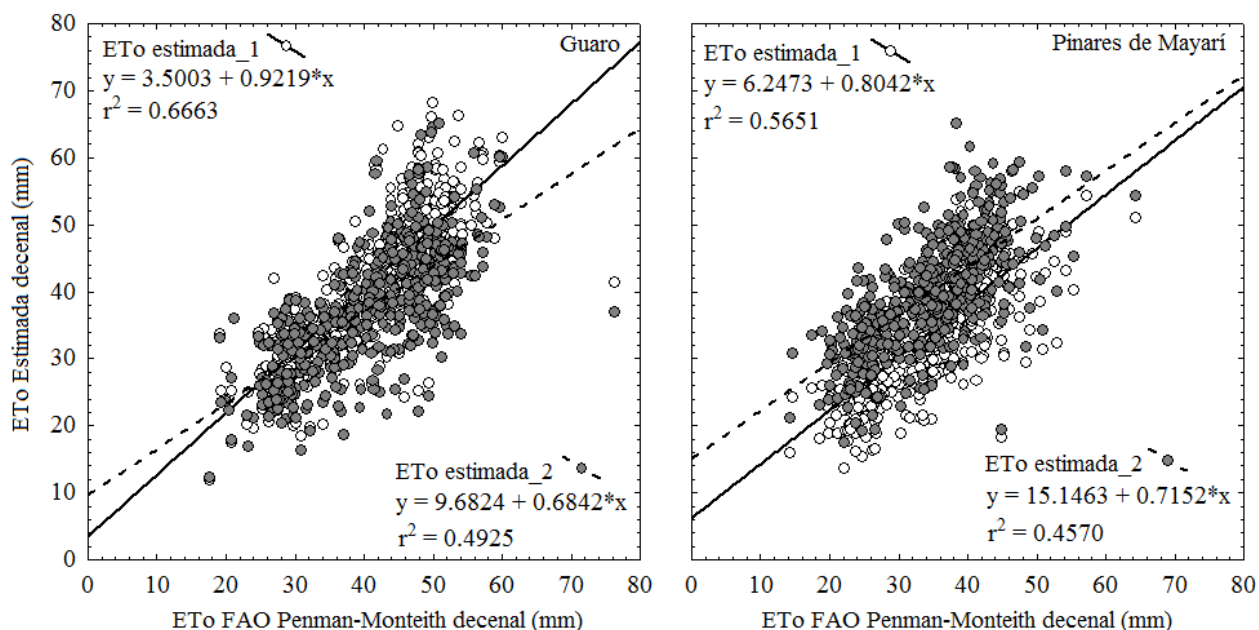


Figura 1.- Ecuaciones de regresión a partir de la evapotranspiración de referencia estimada por el método de FAO Penman-Monteith (regresora) y la *ETo* estimada a partir de los coeficientes *Kp* (dependientes).

La Tabla 2 muestra el comportamiento de los índices utilizados para validar la evapotranspiración de referencia (*ETo* estimada_1 y *ETo* estimada_2) obtenida a partir del coeficiente *Kp*. Con respecto al índice de concordancia se aprecia que los valores más cercanos a 1 se encontraron en la *ETo* estimada_1 para las estaciones meteorológicas de Guaro y Pinares de Mayarí. En el caso de la *ETo* estimada_2 se determinó un menor índice de concordancia. Para las dos *ETo* estimadas, los mejores resultados se observaron en la estación meteorológica de Guaro.

Tabla 2.- Índices de concordancia y desempeño para las *ETo* estimadas en Guaro y Pinares de Mayarí.

| Estaciones meteorológicas | <i>ETo</i> estimada_1 | | <i>ETo</i> estimada_2 | |
|---------------------------|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
| | Índice de concordancia | Índice de confianza | Índice de concordancia | Índice de confianza |
| Guaro | 0.8949 | 0.7305 | 0.7984 | 0.5603 |
| Pinares de Mayarí | 0.8618 | 0.6478 | 0.7272 | 0.4916 |

En cuanto al índice de confianza, el mismo se clasificó para la *ETo* estimada_1 como *bueno* y *medio* en las estaciones meteorológicas de Guaro y Pinares de Mayarí, respectivamente. En el caso de la *ETo* estimada_2, el índice de confianza se ubicó en las categorías de *tolerable* y *pobre* para las estaciones meteorológicas mencionadas, en el mismo orden, anteriormente.

Souza *et al.* (2015) al evaluar diferentes metodologías de determinación del coeficiente *Kp* utilizados en la corrección de los valores del tanque evaporímetro clase “A” para la estimación de la evapotranspiración de referencia en la región de Sinop, estado de Mato Grosso (Brasil), encontraron mayores índices de concordancia (*d*) y de desempeño (*c*) para el coeficiente *Kp* directo que para el determinado a partir de la ecuación de Allen *et al.* (2006).

También, el comportamiento del coeficiente *Kp* determinado a partir de la ecuación propuesta por Allen *et al.* (2006) coincide con lo observado por Bonet *et al.* (2012), quienes encontraron diferencias significativas entre la *ETo* estimada con los coeficientes *Kp* mencionados anteriormente con respecto a la *ETo* estimada a partir de los coeficientes obtenidos por la ecuación del tanque evaporímetro clase “A”:

CONCLUSIONES

Los modelos de regresión con mejores coeficientes se obtuvieron en las dos estaciones meteorológicas con la ET_o estimada_1 con los coeficientes K_p calibrados a partir de la ecuación del tanque evaporímetro clase "A".

La ET_o estimada_1 mostró, en ambas estaciones meteorológicas, los índices de concordancia más cercanos a 1. De la misma manera, los índices de confianza de esta ET_o se clasificaron como *bueno* y *medio*.

La estimación de la evapotranspiración de referencia a partir de la ecuación del tanque evaporímetro clase "A", mediante el uso de los coeficientes K_p calibrados por esta misma ecuación, constituye un método óptimo, rápido y sencillo. Por lo que puede constituir una herramienta adecuada para el manejo del riego.

BIBLIOGRAFÍA

Allen, R. G.; Doorenbos, J. y Monteith, L. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje, boletín 56. Roma, 298 pp.

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. Roma: FAO. 300p.

Andrade, A. D.; Miranda, W. L.; Carvalho, L. G. de; Figueiredo, P. H. F.; Silva, T. B. S. da. 2016. Desempenho de métodos de cálculo do coeficiente de tanque para estimativa da evapotranspiração de referencia. *Irriga*, 21 (1): 119-130.

Bhabagrahi, S., Imtisenla, W., Bidyut, D., & Bhagwati, B. (2012). Standardization of Reference Evapotranspiration Models for a Subhumid Valley Rangeland in the Eastern Himalayas. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138, 880-895.

Bonet Pérez, C.; Brown Manrique, O. y Duarte Díaz, Carmen. 2012. Coeficiente de evaporímetro para la programación del riego. *Ingeniería Agrícola*, 2 (1): 26-30.

Chai, T. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? *Geoscientific Model Development Discussions*, 7, 1247-1250.

Camargo, A. P. y Sentelhas, P. C. 1997. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 5: 89-97.

Doorenbos, J., & Pruitt, W. (1977). *Guidelines for predicting crop water requirements*. Roma: FAO.

Grismer, M., Orang, M., Snyder, R., & Matyac, R. (2002). Pan evaporation to reference evapotranspiration conversion methods. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128, 180-184.

Hamilton, Y. (2013). Análisis de la evapotranspiración potencial en función de elementos climáticos en la zona circunlacustre de la cuenca del Titicaca Peruano. *ECI Perú*, 9, 46-52.

Hernández, K. (2014). Evaluación del método FAO-56 en Costa Rica. *Meteorología y Oceanografía*, 13, 56-67.

Martins de Souza, J.; Rosa Pereira; L.; Matta Rafael, A. da; Dias da Silva, L.; Fialho dos Reis, E. y Bonomo, R. 2014. Comparison of methods for estimating reference evapotranspiration in two locations of Espírito Santo. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 8 (2): 114-126. OMM1966

Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration. OMM Nota técnica NO . 83, OMM NO. 201. OMM 1973

Atmospheric vapour flux computations for hydrological purposes. WMO/IHD Report NO . 20, OMM No. 357. OMM 1976

The CIMO international evaporimeter comparisons Final report. OMM No. 449. OMM

Puppo, y García Petillo, 2009.

Estimación de los coeficientes de tanque "A" para calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia en la zona sur del Uruguay. *Agrociencia*, 13 (2): 47-51.

Pereira, A., Villa, N., Pereira, A., & Barbieri, V. (1995). A model for the class A pan coefficient. *Agricultural and Forest Meteorology*, 76, 75-82.

Sánchez Martínez, Marcela Inés. 2001. Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 28: 3-10.

Sentelhas, P. y Folegatti, M. 2003. Class "A" pan coefficients (K_p) to estimate daily reference evapotranspiration (ET_0). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7 (1): 111-115.

Souza, A. P.; Almeida, F. T.; Arantes, K. R.; Martim, C. C. y Silva, J. O. 2015. Coeficientes de Tanque Classe A para estimativa da evapotranspiração de referência diária na região de transição Cerrado-Amazônica. *Scientia Plena*, 11 (5): 1-13.

Samuels, P. (2014). *Pearson Correlation*. Disponible en: <http://www.statstutor.ac.uk/resources/uploaded/pearsoncorrelation3.pdf>

Snyder, R., Orang, M., Matyac, S., & Grismer, M. (2005). Simplified Estimation of Reference Evapotranspiration from Pan Evaporation Data in California. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131, 249-253.

Stannard, D. (1993). Comparison of Penman-Monteith, Shuttleworth-Wallace, and Modified Priestley-Taylor Evapotranspiration Models for wildland vegetation in semiarid rangeland. *Water Resources Research*, 29, 1379-1392.

Willmott, C. J. 1985. On the validation of models. *Physical Geography*, 2: 84-194.

Willmott, C., Robeson, S., & Matsuura, K. (2011). A refined index of model performance. *International Journal of climatology*, 32, 2088-2094