

Cálculo de la evaporación en Costa Rica mediante el método FAO-56

KARINA HERNÁNDEZ ESPINOZA¹

Resumen

Con el método FAO-56 se calcula la evapotranspiración de referencia para un cultivo de referencia “De una altura de 0,12m con una resistencia superficial de 70 s/m y un albedo de 0,23”. Posteriormente se calcula el coeficiente del Tanque evaporímetro tipo A para conseguir la evaporación. Obteniendo así la evaporación promedio diaria para las siguientes seis Regiones Climáticas del país: 6 $mm\ dia^{-1}$ en Zona Caribe, 5,8 $mm\ dia^{-1}$ en Zona Norte, 7,6 $mm\ dia^{-1}$ en Pacífico Norte, 4,8 $mm\ dia^{-1}$ en Pacífico Central, 8,2 $mm\ dia^{-1}$ en Pacífico Sur y 8 $mm\ dia^{-1}$ en Valle Central. El análisis de las gráficas de los acumulados mensuales muestran un patrón similar en cuanto a la distribución mientras que presentan una diferencia en el rango, donde los acumulados de la serie, reconstruida sobreestima la serie real.

PALABRAS CLAVE: EVAPORACIÓN, EVAPOTRANSPIRACIÓN, PENMAN, MONTEITH, FAO, MÉTODO FAO-56.

Abstract

The FAO-56 method gives us the reference evapotranspiration for the hypothetical grass reference crop with an assumed crop height of 0,12 m, a fixed surface resistance of 70 s/m and an albedo of 0,23. Calculate pan coefficient for Class A pan to obtain daily evaporation for six climatic regions of Costa Rica, to obtain the regional daily means evaporations data: 6 $mm\ dia^{-1}$ in Caribbean Region, 5,8 $mm\ dia^{-1}$ in North Region, 7,6 $mm\ dia^{-1}$ in North Pacific, 4,8 $mm\ dia^{-1}$ in Central Pacific, 8,20 $mm\ dia^{-1}$ in South Pacific and 8 $mm\ dia^{-1}$ in Central Valle. Month cumulative graphics shows a similar distribution but differs on range data, where the method over estimate real data.

KEYWORDS: EVAPORATION, EVAPOTRANSPIRATION, PENMAN, MONTEITH, FAO, FAO-56 METHOD.

1. Introducción

En la actualidad, Costa Rica carece de estudios que calculen los promedios diarios específicos de evaporación para cada región climática. Hasta ahora se ha utilizado un valor estándar de 5 $mm\ dia^{-1}$ para la estimación del inicio y conclusión de las épocas seca y lluviosa, en cualquier región del territorio nacional, esto tomando como base a Alfaro, Cid y Enfield (1998), donde se indica que el valor diario de la evaporación en Centroamérica varía entre 5 y 8 $mm\ dia^{-1}$.

El principal uso de la evapotranspiración se da en las ciencias agronómicas, cuya finalidad es conocer las necesidades hídricas del cultivo para un buen

desarrollo del mismo. Esto se obtiene restando al acumulado total de lluvia la cantidad de agua que se evapora, lo que representa el volumen de agua disponible.

El análisis de estas variables es indispensable en diversos aspectos, tales como la gestión de recurso hídrico, la planificación, la producción vegetal, los estudios ambientales y ecológicos, la fitopatología y la investigación, entre otros.

En el presente estudio, se utilizó el método FAO-56 para obtener la evaporación mediante el cálculo de la evapotranspiración y el coeficiente del tanque evaporímetro. Posteriormente, se estimaron los valores promedio mensuales de la

1 Licda. en Meteorología. Departamento de Climatología e Investigación Aplicada. Instituto Meteorológico Nacional. Correo electrónico: khernandez@imn.ac.cr. Tel. (506) 2222-5616.

evaporación para seis regiones climáticas de Costa Rica, con el fin de generar gráficos comparativos entre los acumulados mensuales de evaporación obtenidos con el modelo FAO-56 y los registros del tanque evaporímetro tipo A. Adicionalmente se logra demostrar que los promedios diarios de evaporación varían para cada una de dichas regiones.

2. Metodología

2.1. Datos meteorológicos

Se utilizaron datos diarios los cuales fueron proporcionados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN). La selección de las estaciones a utilizar se basó en los siguientes criterios: estaciones con registros de temperatura extrema, humedad relativa extrema, radiación, insolación, viento a 2 metros de altura y evaporación; estaciones en las cuales los años de registro para dichas variables sean los mismos; que sean representativas de las siguientes seis regiones climáticas definidas para Costa Rica: Pacífico

Norte, Pacífico Central, Pacífico Sur, Valle Central, Zona Norte y Caribe. Se utilizaron las series de tiempo más extensas encontradas.

En el **cuadro 1** se muestran las estaciones seleccionadas para representar a cada región climática del país, los parámetros disponibles, los años analizados, las coordenadas y la elevación.

El **cuadro 2** muestra las estaciones estudiadas, así como el porcentaje de datos faltantes de cada variable, donde NA (no hay dato) indica la ausencia total de datos para ese parámetro meteorológico.

Para el relleno de datos faltantes se utilizaron las rutinas, programas y conclusiones definidas por Alfaro y Soley (2009). Este método utiliza predictores auto regresivos conocidos como AR(p), es un modelo lineal que utiliza los valores de “p” tiempos de muestreo anterior y posterior al dato para estimar el valor en un tiempo dado (Ulrych y Bishop,1975) y (Ulrych y Clayton,1976).

Para aquellas estaciones que no tenían registros de velocidad de viento a ninguna altura como

Cuadro 1. Nómina de estaciones meteorológicas seleccionadas

Número estación	Nombre estación	Región climática	Elevación (msnm)	Latitud (°)	Longitud (°)	Años	Parámetros
69579	Santa Clara, ITCR	Zona Norte	183	10,36	84,51	1987 a 1994, 1998 a 2000, 2006, 2007, 2009, 2010.	Temperatura, humedad relativa, horas sol, evaporación.
71002	La Mola	Caribe	94	10,34	83,67	2001, 2003, 2004, 2005, 2007, 2009, 2010.	Temperatura, humedad relativa, horas sol, evaporación.
74020	Llano Grande, Liberia	Pacífico Norte	80	10,60	85,54	1976, 1978, 1981 a 1983, 1986, 1987, 1989.	Temperatura, humedad relativa, horas sol, evaporación.
84023	Estación Experimental Fabio Baudrit	Valle Central	840	10,02	84,27	1974, 1975, 1977, 1978, 1980, 1982 a 1984, 1986 a 2000.	Temperatura, humedad relativa, horas sol, radiación, viento, evaporación.
90009	Damas	Pacífico Central	21	9,50	84,21	2001, 2005 a 2007, 2009, 2010.	Temperatura, humedad relativa, horas sol, viento, evaporación.
98027	Pindeco	Pacífico Sur	401	9,15	83,34	1986 a 1991, 1998, 2001, 2003, 2004.	Temperatura, humedad relativa, horas sol, viento, radiación, evaporación.

Cuadro 2. Porcentajes faltantes de los parámetros disponibles

Parámetro / Estación	Santa Clara, ITCR	La Mola	Llano Grande, Liberia	Estación Experimental Fabio Baudrit	Damas	Pindeco
Humedad relativa máxima	8	1	3	0	13	7
Humedad relativa mínima	11	2	5	6	18	10
Horas sol	12	13	7	2	6	6
Radiación global	NA	NA	NA	0	NA	9
Velocidad viento	NA	NA	NA	27	7	48
Temperatura máxima	13	1	1	1	2	0
Temperatura mínima	22	11	4	3	17	2
Evaporación	13	6	12	5	21	10

Santa Clara, La Mola y Llano Grande, se utilizó la constante de 2 ms^{-1} , recomendada por Allen, Pereira, Raes & Smith (1998), dado que éste es el valor promedio de 2000 estaciones meteorológicas distribuidas en todo el mundo.

En el caso de las estaciones La Mola, Santa Clara, Llano Grande y Damas, debido a la falta de registros de radiación, se utilizó la metodología descrita en Allen et al. (1998), la cual se basa en la fórmula de Armstrong que relaciona la radiación solar con la radiación extraterrestre y la duración relativa de la insolación, además de la nubosidad.

En el caso de Pindeco, que tiene un porcentaje de datos faltantes del 48%, la razón por la que se decidió utilizar este registro en vez de la constante recomendada, es porque se consideró que para el caso de Costa Rica son más realistas los valores rellenados con el método auto regresivo, que la dicha constante. Además, de acuerdo con Muñoz, Fernández, Gutiérrez y Zarate (2002), el comportamiento anual de la velocidad del viento para la estación de Pindeco es uniforme y varía entre $0,8 \text{ ms}^{-1}$ y $1,7 \text{ ms}^{-1}$.

2.2. Modelo utilizado

La organización Food Agriculture Organization (FAO) en colaboración con la International

Commission for Irrigation and Drainage (ICID) y la World Meteorological Organization (WMO) decidieron crear la ecuación FAO-56 como un nuevo modelo estándar para el cálculo de la evapotranspiración de referencia. Esta se establece utilizando el método Penman-Monteith, definiendo algunos parámetros constantes, ya que se basa en un cultivo de referencia, a saber: “un cultivo hipotético con una altura de 0,12 m, una resistencia superficial de 70 ms^{-1} y un albedo de 0,23”. Esta nueva propuesta reduce las imprecisiones del método utilizado anteriormente por la FAO y produce valores globales más consistentes de uso de agua en diversos cultivos (Allen et al., 1998).

En la ecuación 1 se muestra el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0), mediante el método FAO-56 en unidades de mm dia^{-1} . Los parámetros se calcularon mediante la metodología descrita en Allen et al. (1998).

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{\text{media}} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

Donde:

R_n : radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)

G : flujo del calor del suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)

T_{media} : temperatura media del aire a 2m de altura ($^{\circ}\text{C}$)

u_2 : velocidad del viento a dos metros de altura (m s^{-1})

e_s : presión de vapor de saturación (kPa)

e_a : presión real de vapor (kPa)

Δ : pendiente de la curva de presión de vapor, ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

γ : constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Para el cálculo del coeficiente del tanque evaporímetro tipo A (K_p) en cada una de las seis regiones climática del país, se utilizó la ecuación de regresión 2 dada por Allen et al. (1998), ya que en Costa Rica este instrumento es el que posee registros más extensos para los datos de evaporación.

$$K_p = 0.108 - 0.086 u_2 + 0.0422 \ln(\text{BORDE}) + 0.1434 \ln(\text{HR}_{\text{media}}) - 0.000631 [\ln(\text{BORDE})]^2 \ln(\text{HR}_{\text{media}}) \quad (2)$$

Donde:

u_2 : velocidad del viento, ($1 \text{ m s}^{-1} \leq u_2 \leq 10 \text{ m s}^{-1}$)

HR_{media} : porcentaje de humedad relativa media diaria, $30\% \leq \text{HR}_{\text{media}} \leq 84\%$

BORDE : distancia del tanque al cultivo, ($1 \text{ m} \leq \text{BORDE} \leq 1000 \text{ m}$)

Posterior a la realización del cálculo de ET_0 y K_p , se utilizó la ecuación 3 para obtener el valor de la evaporación de referencia diaria, en cada región analizada.

$$ET_0 = E_{\text{pan}} * K_p \quad (3)$$

Donde:

u_2 : evaporación del tanque evaporímetro, (mm dia^{-1})

K_p : evaporación del tanque evaporímetro

3. Resultados y discusión

3.1. Comparación FAO-56 y Tanque evaporímetro tipo A

Los valores de evaporación se calcularon con el fin de promediar los acumulados mensuales totales, a partir de los valores diarios, para cada estación y se dividieron en la cantidad de años. La cantidad de años utilizados varía según la estación (cuadro 3).

En el cuadro 3 se muestran los valores extremos de los promedios mensuales, de la evaporación

calculada y el mes correspondiente a dicho valor extremo. Todas las estaciones presentan su valor máximo en el mes de marzo, a excepción de Llano Grande que muestra su valor máximo en el mes de abril. Además, únicamente Llano Grande (octubre) y Fabio Baudrit (septiembre) no presentaron su valor mensual mínimo en el mes de noviembre. Las variaciones entre dichos valores extremos presentadas por las estaciones en orden descendente son: Pacífico Sur 169 mm, Valle Central 140 mm, Pacífico Norte 110 mm, Zona Norte 85 mm, Pacífico Central 75 mm y Región Caribe 50 mm.

Como se muestra en la figura 1(a), la estación de Llano Grande en Liberia tiene un comportamiento mensual similar entre la evaporación estimada (verde) y observada (azul). Se puede apreciar además, que la ecuación sobreestima principalmente los valores obtenidos durante los meses lluviosos. En las figuras 1(b) y 3(b), se observa que las estaciones de La Mola y Pindeco presentan las mayores diferencias entre el modelo y la realidad.

En las seis gráficas contenidas en las figuras 1, 2 y 3, se puede observar la sobrestimación del método FAO-56, en relación con el Tanque evaporímetro tipo A. El comportamiento de la curva estimada y calculada tienen similitudes, sin embargo se encuentran diferencias importantes en el rango de éstas, debido a dicha sobrestimación.

En el análisis gráfico que muestra Lizano (2007), se observa que en el Pacífico Central y Sur ocurren dos leves disminuciones durante los meses de

Cuadro 3. Valores extremos mensuales de las diferencias de evaporación

Estación	Mes del valor máximo	Máximo (mm)	Mes del valor mínimo	Mínimo (mm)
Santa Clara	Marzo	225	Noviembre	140
Mola	Marzo	210	Noviembre	160
Llano Grande	Abril	300	Octubre	190
Fabio Baudrit	Marzo	355	Septiembre	215
Damas	Marzo	188	Noviembre	113
Pindeco	Marzo	279	Noviembre	110

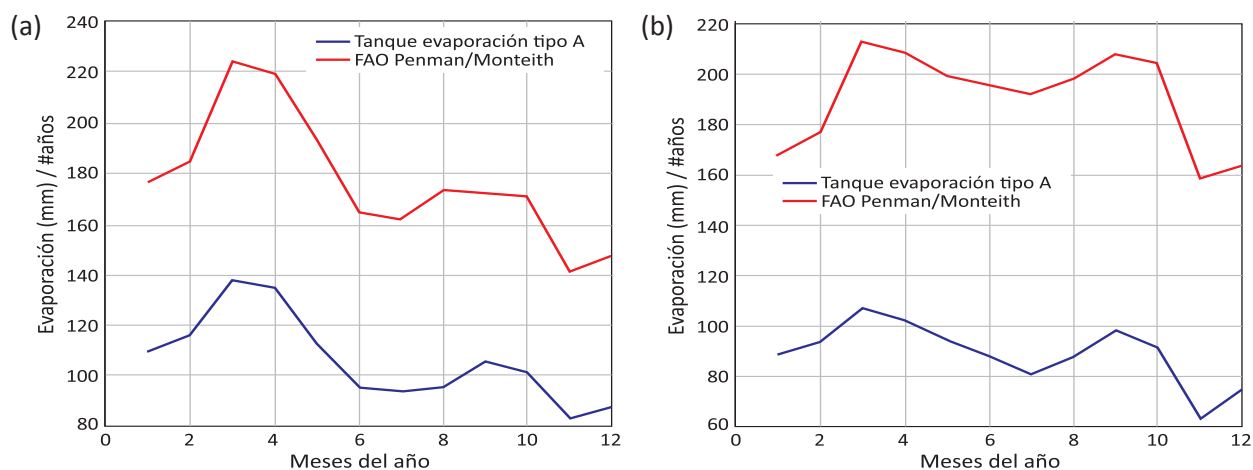


Figura 1. Promedio de evaporación mensual del Tanque evaporímetro tipo A y método FAO Penman-Monteith. (a) Estación 69579 – Santa Clara, ITCR, (b) Estación 71002 – La Mola.

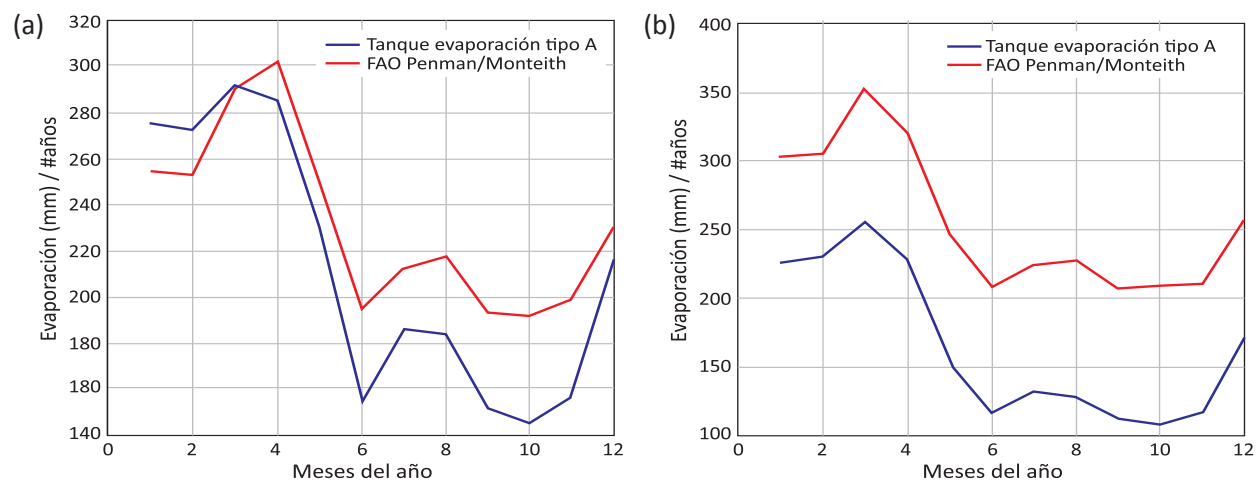


Figura 2. Promedio de evaporación mensual del Tanque evaporímetro tipo A y método FAO Penman-Monteith. (a) Estación 74020 – Llano Grande, Liberia, (b) Estación 84023 – Estación Experimental Fabio Baudrit.

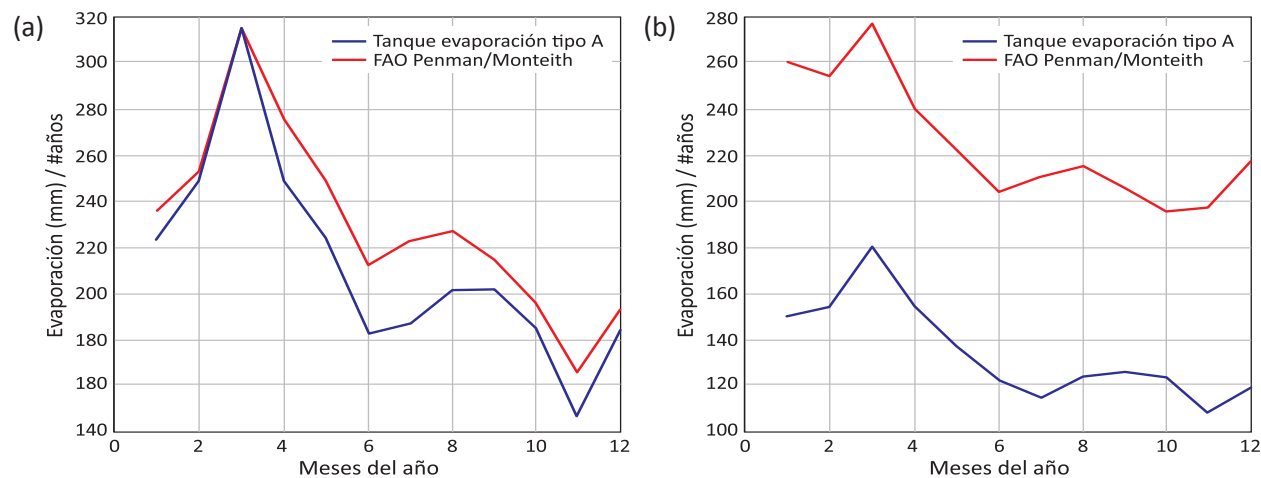


Figura 3. Promedio de evaporación mensual del Tanque evaporímetro tipo A y método FAO Penman-Monteith. (a) Estación 90009 – Damas, (b) Estación 98027 – Pindeco.

junio y agosto, lo cual coincide con el momento en que los vientos Alisios se aceleran nuevamente en el Caribe. Menciona además este autor, que para la costa Caribe los vientos nortes y los sistemas de alta presión en el Atlántico hacen que en esta región soplen los vientos Alisios intensamente, desde noviembre hasta abril, aumentando significativamente en julio lo que coincide nuevamente con el veranillo.

Mediante la observación de las figuras 1, 2 y 3, podemos evidenciar dentro del período de valores mínimos de evaporación, un leve aumento de dicha variable durante los meses de julio y agosto para las estaciones del Pacífico y Valle Central. En el caso del Caribe y la Zona Norte, el incremento se da en septiembre y octubre que son los meses más secos en esa región, donde el incremento varía entre 5 y 20 mm, lo cual refleja la presencia del veranillo en todo el territorio nacional.

3.2. Promedios regionales de evaporación

En el cuadro 4 se presenta el cálculo del promedio de evaporación diaria, mediante los métodos FAO-56 y Tanque evaporímetro tipo A, para el registro total de cada una de las series de tiempo. Comparando ambos métodos, se confirma la sobrestimación de la fórmula sobre las observaciones. La cantidad de años varía según sea la estación entre seis y 23, tal como se mostró en el cuadro 1.

Según las experiencias en el procesamiento de datos del tanque evaporímetro tipo A, las observaciones mencionadas por Hidalgo, Cayan y Dettinger (2005), en relación a la dependencia de la evaporación con respecto a otras variables climáticas y las deficiencias ya conocidas en el registro de los datos, se sabe que dichos registros podrían subestimar el valor real de evaporación.

Ramírez (1976) mediante el manejo de datos mensuales de evaporación, reconoce las

limitaciones al trabajar con evaporación, siendo el Tanque evaporímetro tipo A la única medida de evaporación en Costa Rica, además de todos los factores externos que afectan esta medición en caso de querer usarla como medida patrón, para la evaluación de las fórmulas de cálculo y construcción de series de evaporación.

Al observar la primera columna del cuadro 4, se puede notar que se cumple lo comentado por Alfaro, Cid y Enfield (1998), referente al valor promedio de la evaporación que varía entre 5 y 8 $mm\ día^{-1}$ para Centroamérica, pero también se evidencia que existen diferencias importantes en los promedios diarios, para cada una de las seis regiones climáticas del país aquí estudiadas.

Cuadro 4. Valores promedio de la evaporación diaria

Estación	Promedio ($mm\ día^{-1}$)	
	FAO-56	Tanque tipo A
69579 - Santa Clara	5,8	3,5
71002 - Mola	6,0	3,0
74020 - Llano Grande	7,6	7,0
84023 - Fabio Baudrit	8,0	5,0
90009 - Damas	4,8	4,5
98027 - Pindeco	8,2	4,0

4. Conclusiones

Al calcular los valores promedio de la evaporación regional, se evidencia que dichos valores varían entre la estimación del método FAO-56 y las observaciones del Tanque evaporímetro tipo A, ya que el método FAO-56 sobreestima las series de evaporación reales. Por esta razón, la curva de evaporación reconstruida se posiciona en valores más altos que los de la curva de valores reales, generando una brecha entre los valores promedio de la evaporación calculada y observada.

En la metodología actualmente utilizada para obtener la estimación del inicio y conclusión de

la época lluviosa en Costa Rica, se utiliza un valor diario de evaporación de 5 mm dia^{-1} para todo el territorio nacional, lo cual nos lleva a un valor umbral pentadal de 25 mm dia^{-1} para todo Costa Rica. La aplicación de los valores promedio diarios de evaporación obtenidos en esta investigación, para cada región climática, debe mejorar sustancialmente los resultados de las fechas del inicio y conclusión de la época lluviosa en nuestro país. Dichos promedios diarios de evaporación son: 6 mm dia^{-1} en la Zona Caribe, $5,8 \text{ mm dia}^{-1}$ en la Zona Norte, $7,6 \text{ mm dia}^{-1}$ en el Pacífico Norte, $4,8 \text{ mm dia}^{-1}$ en el Pacífico Central, $8,2 \text{ mm dia}^{-1}$ en el Pacífico Sur y 8 mm dia^{-1} en el Valle Central.

La aplicación de este modelo en Costa Rica requiere aún más calibración, ya que como pudo notarse algunas regiones como el Pacífico Sur y el Caribe, muestran una gran diferencia en cuanto al rango, entre el método FAO-56 y el Tanque evaporímetro tipo A.

El método FAO-56 utilizado para reconstruir los registros de evaporación, es robusto estadísticamente y por lo tanto su aplicación se torna difícil en aquellos casos en los que se carece de las series de tiempo que este modelo requiere para su cálculo.

Dicha metodología recomienda utilizar un valor constante de 2 ms^{-1} para aquellas estaciones que carecen de dicho registro, y este es un valor muy bajo para ciertas épocas del año y ciertas regiones como es el caso del Pacífico Norte. Esta constante es una posible fuente de error en los cálculos de la evaporación.

5. Referencias

- Alfaro, E.; Cid, L. & Enfield, D. (1998). Relaciones entre el inicio y el término de la estación lluviosa en Centroamérica y los Océanos Pacífico y Atlántico Tropical. *Investigaciones Marinas*. 26, 59-69.
- Alfaro, E. & Soley, J. (2009). Descripción de dos métodos de rellenado de datos ausentes en series de tiempo meteorológicas. *Revista de Matemáticas: Teoría y Aplicaciones*. 16(1): 59-74.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water Requirements*. FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Hernández, K. (2013). *Estudio de la evaporación en Costa Rica y su aplicación para determinar el inicio y conclusión de la época seca y lluviosa*. Tesis de grado en Meteorología. Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Hidalgo, H.; Cayan, D. & Dettinger, M. (2005). Sources of Variability of Evapotranspiration in California. *Journal of Hydrometeorology*. 6, 3-19.
- Lizano, O. (2007). Climatología del viento y oleaje a las costas de Costa Rica. *Ciencia y Tecnología*, 25(1-2): 43-56.
- Muñoz, C.; Fernández, W.; Gutiérrez, J. & Zarate, E. (2002). Variación estacional del viento en Costa Rica y su relación con los regímenes de lluvia. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 9(1): 1-13.
- Ramírez, P. (1976). *Cálculo de la evaporación y la evapotranspiración en Costa Rica*. Tesis de grado en Meteorología. Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Ulrych, T.J. & Bishop, T.N. (1975). Maximum entropy spectral analysis and autoregressive decomposition. *Reviews of Geophysics and Space Physics*. 13(1): 183-200.
- Ulrych T.J. & Clayton, R.W. (1976). Time series modeling and maximum entropy. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 12: 188-200.