

Evaluación del método FAO-56 en Costa Rica

KARINA HERNANDEZ E.¹

Resumen

El Tanque evaporímetro tipo A es el único registro de datos utilizable para evaluar un modelo de evapotranspiración en Costa Rica. Inicialmente se calcula la evapotranspiración utilizando el modelo FAO-56 para un cultivo de referencia hipotético que asume una altura de 0,12 m con una resistencia superficial de 70 s/m y un albedo de 0,23. Seguidamente se obtiene el valor del coeficiente del Tanque evaporímetro tipo A. Luego se estima la evaporación diaria para seis Regiones Climáticas del país: Pacífico Norte, Pacífico Central, Pacífico Sur, Valle Central, Zona Norte y Caribe. El ajuste del modelo FAO-56 y el Tanque evaporímetro tipo A muestra diferencias dependiendo de la región, donde el Pacífico Central y Norte obtienen los mejores ajustes, según índice de concordancia (0,93 y 0,89) y coeficiente de determinación (0,93 y 0,91).

PALABRAS CLAVES: EVAPORACIÓN, EVAPOTRANSPIRACIÓN, FAO-56, PENMAN-MONTEITH

Abstract

The Class A evaporation instrument gives the only useful date to evaluate an evapotranspiration model in Costa Rica. Firstly, evapotranspiration is calculated using FAO-56 method for a reference evapotranspiration for a 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. Secondly, Class A coefficient is obtained. Thirdly, Class A daily evaporation is estimated for the next climatic regions: Northern Pacific, Central Pacific, Southern Pacific region, Central Valley, Northern Zone and Caribbean regions. A FAO-56 model fit using Class A evaporation instrument shows differences depending on the region, where Central and Northern Pacific regions have fit better coefficient of determination (0.93 and 0.91) and concordance index (0.93 and 0.89) than the others.

KEYBOARDS: EVAPORATION, EVAPOTRANSPIRATION, FAO-56, PENMAN-MONTEITH

1. Introducción

La evaporación es uno de los componentes principales del balance hídrico del planeta Tierra y a su vez, primordial en la interacción atmósfera y superficie terrestre, mientras que la evapotranspiración es el conjunto de la pérdida de humedad por evaporación directa y pérdida de agua por transpiración.

Las estadísticas de evaporación y evapotranspiración son imprescindibles para la planificación y operación de empresas, canales de riego, irrigación y sistemas de drenaje.

Ramírez (1976), en el análisis de la estimación de varios modelos para el cálculo de la evaporación y evapotranspiración en Costa Rica, 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, para construir series de evaporación.

En el análisis de la aplicación de tres modelos para el cálculo de la evaporación en Costa Rica, Villalobos (1996) verificó la hipótesis de que

1 Licda. en Meteorología. Departamento de Climatología e Investigaciones Aplicadas. Instituto Meteorológico Nacional, San José, Costa Rica. Email: khernandez@imn.ac.cr

algunos modelos sólo se ajustan a condiciones similares a las utilizadas de cuándo y dónde fueron evaluados.

En el presente estudio se utilizó el método FAO-56 para el cálculo de evaporación, con el fin de aplicar la metodología descrita por Allen, Pereira, Raes, & Smith (1998), que fue desarrollada para ser aplicada en cualquier país. Los resultados se evaluaron estadísticamente, al ser comparadas con series de tiempo de evaporación propias de Costa Rica, que fueron registradas diariamente por el Tanque evaporímetro tipo A.

2. Metodología

2.1. Datos meteorológicos

La estimación de la evaporación con el método FAO-56, requiere de los parámetros listados en el **cuadro 1** en el cual se listan los porcentajes de datos faltantes para cada variable, donde 'NA' indica la ausencia de registro de datos. Los datos a nivel diario de las estaciones meteorológicas que representan las seis regiones climáticas que se investigaron, fueron proporcionados por El Instituto Meteorológico Nacional (IMN). La estación de Santa Clara representa la Zona Norte (años: 1987 a 1994, 1998 a 2000, 2006, 2007, 2009, 2010.), la Mola el Caribe (años: 2001, 2003, 2004, 2005, 2007, 2009, 2010.), Liberia el Pacífico

Norte (años: 1976, 1978, 1981 a 1983, 1986, 1987, 1989.), Fabio Baudrit el Valle Central (años: 1974, 1975, 1977, 1978, 1980, 1982 a 1984, 1986 a 2000.), Damas el Pacífico Central (años: 2001, 2005 a 2007, 2009, 2010.) y Pindeco el Pacífico Sur (años: 1986 a 1991, 1998, 2001, 2003, 2004.).

Las series de tiempo que presentaron datos faltantes fueron rellenas con las rutinas, programas y conclusiones descritas por Alfaro y Soley (2009).

Para las estaciones de Santa Clara, Mola y Liberia, se utilizó para la velocidad del viento la constante de 2 ms^{-1} , recomendada en la publicación Allen et al. (1998), dado que este es el valor promedio de 2 000 estaciones meteorológicas en todo el mundo. Debido a la ausencia de registros de radiación de dichas estaciones y de la de Damas, se utilizó la fórmula de Angstrom que relaciona la radiación solar con la radiación extraterrestre y la duración relativa de la insolación, además de la nubosidad, de acuerdo con las recomendaciones de Allen et al. (1998).

Muñoz, Fernández, Gutiérrez, & Zarate (2002), encontraron que el comportamiento anual de la velocidad del viento para la estación de Pindeco es relativamente uniforme y varía entre $0,8 \text{ ms}^{-1}$ y $1,7 \text{ ms}^{-1}$. Por esto se decide rellenar el 48% de datos faltantes de esta estación en vez de utilizar la constante recomendada.

Cuadro 1. Porcentajes faltantes de los parámetros

Parámetro / Estación	Santa Clara	Mola	Liberia	Fabio Baudrit	Damas	Pindeco
Temperatura máxima	13	1	1	1	2	0
Temperatura mínima	22	11	4	3	17	2
Radiación global	NA	NA	NA	0	NA	9
Velocidad viento	NA	NA	NA	27	7	48
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
Evaporación	13	6	12	5	21	10

2.2. Modelo utilizado

Allen et al. (1998) describen el proceso a seguir para la estimación de la evaporación, para un cultivo de referencia según el método FAO-56. "Un cultivo hipotético de referencia con una altura asumida de 0,12m, una resistencia superficial de 70 ms^{-1} y un albedo de 0,23" Inicialmente se utiliza la ecuación 1 para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_0), en unidades de $mm\ dia^{-1}$. Seguidamente se aplica la ecuación 2 para obtener el coeficiente del tanque evaporímetro tipo A (K_p), para cada región climática del país. Finalmente se aplican estos dos valores teóricos en la ecuación 3, para generar la evaporación del tanque evaporímetro tipo A (E_{pan}) en unidades de $mm\ dia^{-1}$, obteniéndose así el dato calculado de la evaporación.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{media} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (1)$$

$$K_p = 0,108 - 0,086 u_2 + 0,0422 \ln(BORDE) + 0,1434 \ln(HR_{media}) - 0,000631 [\ln(BORDE)]^2 \ln(HR_{media}) \quad (2)$$

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

Donde,

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

R_a : radiación extraterrestre ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$)

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

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

u_2 : velocidad del viento a dos metros de altura (ms^{-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 ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$)

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

HR_{media} : porcentaje de humedad relativa media diaria (%)

$BORDE$: distancia del tanque al cultivo (m)

El tanque evaporímetro responde de una manera similar a los mismos factores climáticos que afectan la transpiración en los cultivos y por tanto, es una buena opción reconstruir las series de evaporación a partir de la evapotranspiración calculada con FAO-56. Sabiendo que en Costa Rica el Tanque evaporímetro tipo A es el instrumento posee los registros de evaporación más extensos, en diferentes zonas climáticas, se decidió utilizar dichos registros para la validación de la ecuación FAO-56 en el país.

2.3. Evaluación del modelo

Según indica Villalobos (1996), una correcta evaluación del modelo utilizado requiere el cálculo de los indicadores estadísticos recomendados por Fox (1981).

El sesgo nos permite conocer el error de apartamiento medio, estimando la diferencia entre el valor esperado y el real. Lo ideal es que resulte no sesgado, lo cual implica que no existe apartamiento entre ambos.

$$MBE = N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (4)$$

Donde, N : número de casos P_i : Valor estimado O_i : Valor observado

El segundo estadístico se refiere a la varianza de la distribución de las diferencias. Es la variabilidad de ($P-O$) respecto de MBE .

$$DS^2 = (N - 1)^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i - MBE)^2 \quad (5)$$

El promedio de las diferencias es la raíz cuadrada del error medio estimado (MSE).

$$RMSE = [N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2]^{0,5} \quad (6)$$

El error absoluto medio se calculó utilizando la siguiente ecuación

$$MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (7)$$

Adicionalmente Willmott (1982) indica, que el coeficiente de determinación no es un índice adecuado para evaluar el grado de ajuste de un modelo dado y debido a esto recomienda otros cálculos estadísticos para evaluar un modelo.

La desviación estándar de la variable observada se obtuvo utilizando la siguiente ecuación

$$DS_{Er} = [N^{-1} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2]^{0,5} \quad (8)$$

Mientras que la desviación estándar de la variable estimada se generó con la ecuación

$$DS_{Ec} = [N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2]^{0,5} \quad (9)$$

Para obtener los valores de la intersección (a) y la pendiente (b) de la ecuación de regresión de mínimos cuadrados se utilizó

$$\hat{P}_i = a + b * O_i \quad (10)$$

Como parámetro descriptivo que indique la calidad del ajuste de dicho modelo se utiliza el índice de concordancia (d).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|\hat{P}_i| + |\bar{O}_i|)^2} \right] \quad (11)$$

Donde,

$$\hat{P}_i = P_i - \bar{O} \quad , \quad \bar{O}_i = O_i - \bar{O} \quad , \quad 0 \ll d \gg 1$$

El error sistemático es aquel error que se produce igualmente en todas las mediciones y se obtuvo con la ecuación 12

$$MSE_s = (N)^{-1} \sum_{i=1}^N (\hat{P}_i - O_i)^2 \quad (12)$$

Mientras que el error no sistemático que surge de forma aleatoria se generó utilizando

$$MSE_u = (N)^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - \hat{P}_i)^2 \quad (13)$$

Donde, $MSE = MSE_s + MSE_u$

Para evaluar la bondad del ajuste se calculó el coeficiente de determinación con la siguiente ecuación

$$r^2 = \frac{\sigma_{xy}^2}{\sigma_x^2 \sigma_y^2} \quad (14)$$

Donde, σ_{xy}^2 : Covarianza de (x,y) , σ_x^2 : Desviación típica de 'x', σ_y^2 : Desviación típica de 'y'

Según Fox (1981), las bases lógicas para la selección de un modelo deben enfatizar la respuesta del modelo a un amplio rango de datos. Dadas estas consideraciones se procedió a generar la evaluación del modelo a nivel diario y posteriormente a nivel mensual.

Por su parte Villalobos (1996), reconoce que la interpretación de las medidas cuantitativas para la evaluación del modelo utilizando las recomendaciones de Fox (1981) y Willmott (1982), es básicamente descriptiva y basada en un criterio científico y no sobre las bases de una medida de significancia estadística. Por tal motivo, este método de análisis es una herramienta valiosa que permite visualizar muy acertadamente la relativa habilidad de un modelo para ajustarse a los datos observados.

3. Resultados

3.1. Evaluación del modelo a nivel diario

Inicialmente se graficaron los valores diarios de los años seleccionados de cada estación meteorológica, para conocer la distribución espacial de la evaporación en dicha resolución, tanto de la serie de tiempo del Tanque evaporímetro tipo A, como la calculada con el método FAO-56. Seguidamente se generó un gráfico de dichas diferencia diarias, entre los valores calculados y los reales, para obtener la variación de ambas series en unidades de $mm \text{ dia}^{-1}$.

Con ayuda de las figuras de la uno a la 12, podemos analizar las variaciones diarias (a) y las diferencias entre la serie observada y la calculada (b). Santa Clara, Pindeco y La Mola (figuras 1, 2 y 3) evidencian rangos de variación con amplitudes muy diferentes, al comparar el modelo con el tanque. Las estaciones de Llano Grande, Fabio Baudrit y Damas (figuras 4, 5 y 6), presentan las gráficas más consistentes al comparar las series de evaporación calculada y observada. Con respecto a las diferencias, Santa Clara presenta variaciones entre -4 y 6 mm dia^{-1} , La Mola muestra un intervalo entre -2 y 8 mm dia^{-1} , Llano Grande presenta una oscilación anual muy marcada en la

distribución de las diferencias que ronda los -6 a los 6 mm dia^{-1} , Fabio Baudrit ostenta una variación de entre -4 y 10 mm dia^{-1} hasta el año 1985, que luego disminuye a valores de entre -2 y 6 mm dia^{-1} , Damas expone un rango entre -6 y 4 mm dia^{-1} y Pindeco tiene un intervalo que está entre los -3 y 8 mm dia^{-1} .

En el cuadro 2 se muestran las estadísticas de validación a nivel diario obtenidas para el método FAO-56, donde se puede observar que los errores son altos y en su mayoría de origen sistemático, esto podría optimizarse con un mejor ajuste del modelo para Costa Rica, pero además es la

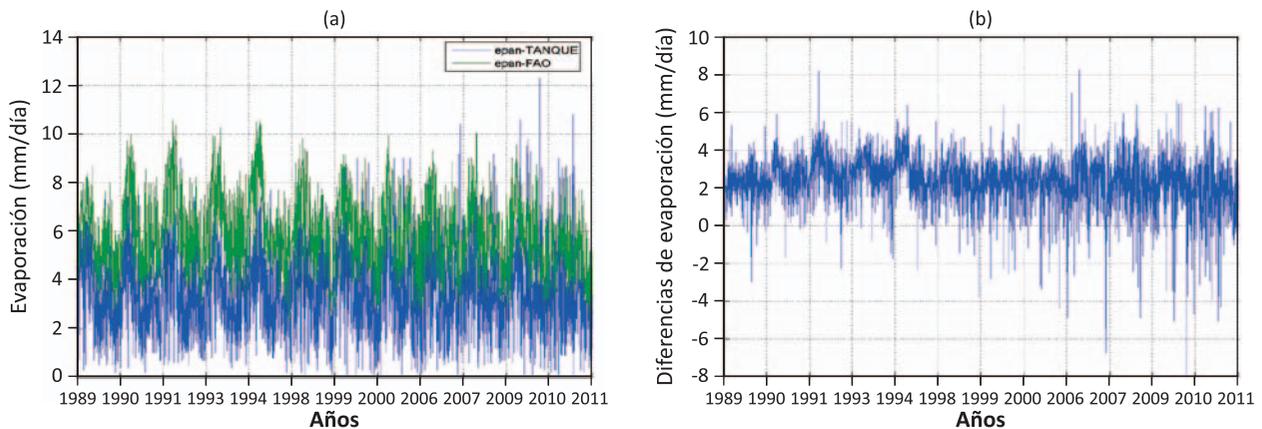


Figura 1. Estación 69579 - Santa Clara, ITCR. (a) Evaporación diaria (mm dia^{-1}), (b) diferencias diarias del Tanque evaporímetro tipo A (azul) y método FAO Penman-Monteith (verde).

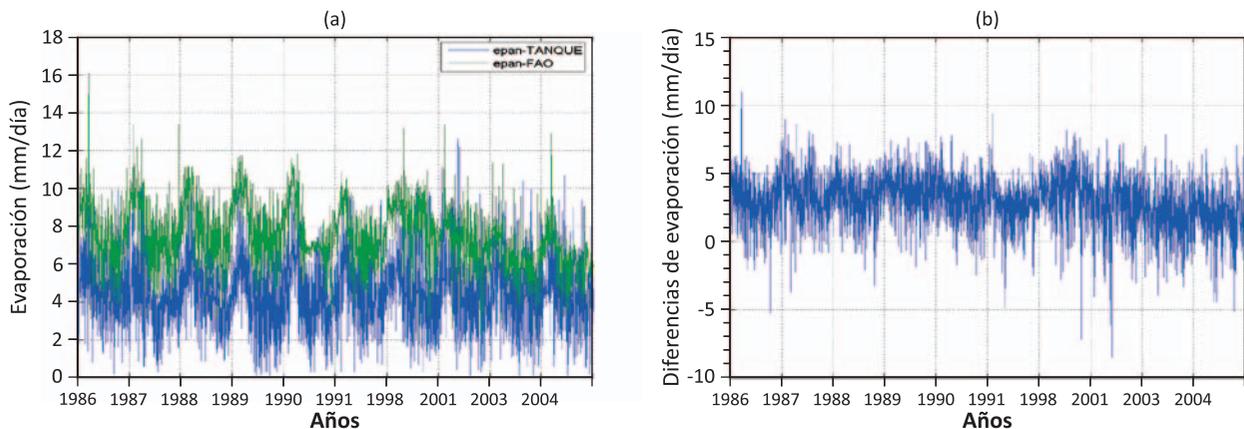


Figura 2. Estación 98027 - Pindeco. (a) Evaporación diaria (mm dia^{-1}), (b) diferencias diarias del Tanque evaporímetro tipo A (azul) y método FAO Penman-Monteith (verde).

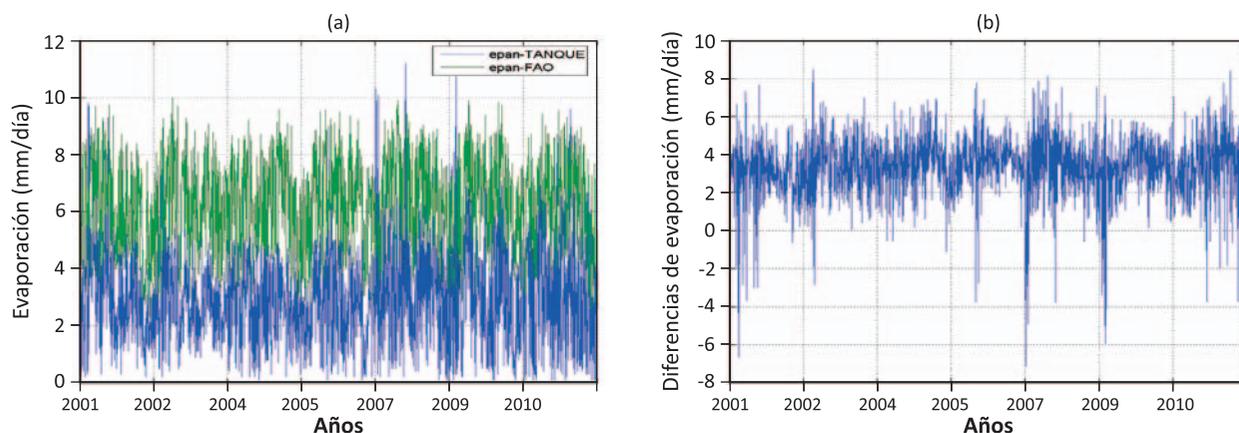


Figura 3. Estación 71002 - La Mola. (a) Evaporación diaria ($mm\ dia^{-1}$), (b) diferencias diarias del Tanque evaporímetro tipo A (azul) y método FAO Penman-Monteith (verde).

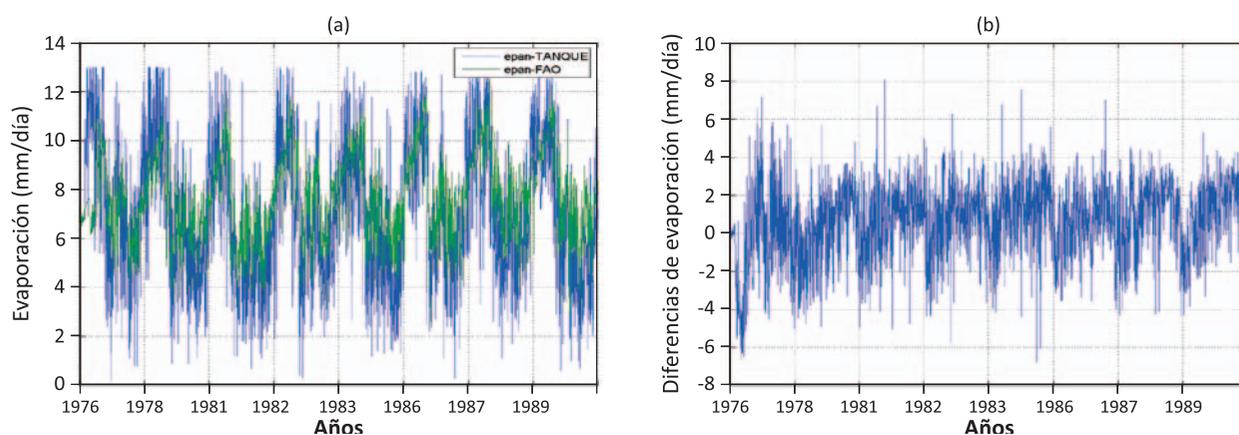


Figura 4. Estación 74020 - Llano Grande, Liberia. (a) Evaporación diaria ($mm\ dia^{-1}$), (b) diferencias diarias del Tanque evaporímetro tipo A (azul) y método FAO Penman-Monteith (verde).

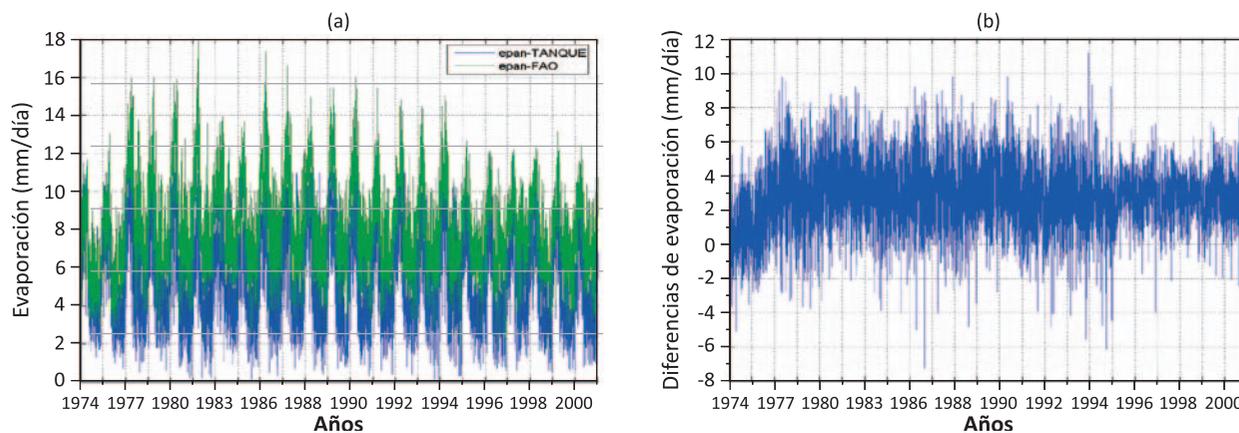


Figura 5. Estación 84023 - Estación Experimental Fabio Baudrit. (a) Evaporación diaria ($mm\ dia^{-1}$), (b) diferencias diarias del Tanque evaporímetro tipo A (azul) y método FAO Penman-Monteith (verde).

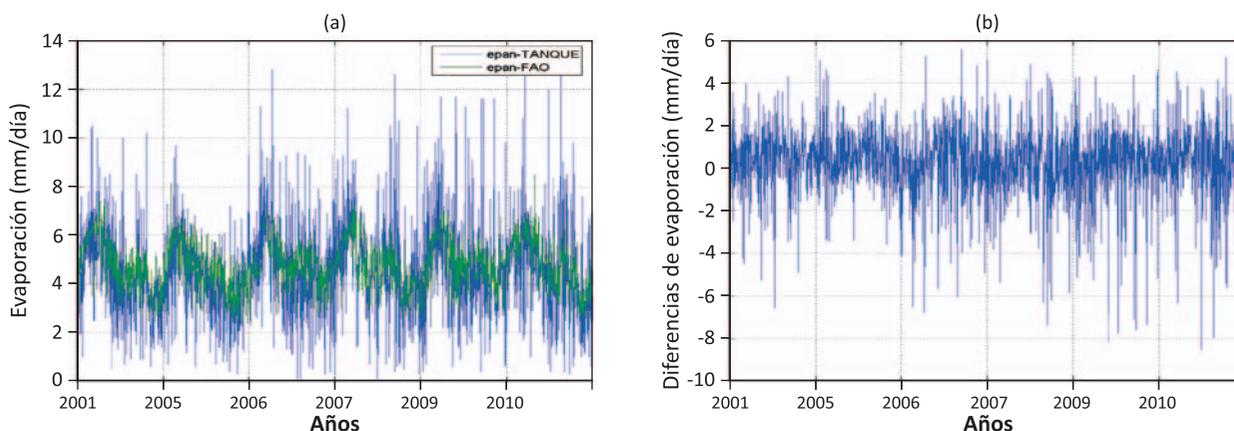


Figura 6. Estación 90009 – Damas. (a) Evaporación diaria ($mm\ dia^{-1}$), (b) diferencias diarias del Tanque evaporímetro tipo A (azul) y método FAO Penman-Monteith (verde).

Cuadro 2. Evaluación del modelo a nivel diario

ESTACIÓN	E_r	E_c	DS_{E_r}	DS_{E_c}	N	a	b	MAE	RMSE	RMSE _s	RMSE _u	d	r^2
69579 - Santa Clara	3,48	5,83	1,564	1,56	4381	0,63	3,61	2,45	2,70	2,41	1,21	0,55	0,40
71002 - Mola	2,93	6,26	1,612	1,63	2556	0,55	4,64	3,42	3,67	3,40	1,37	0,45	0,29
74020 - Llano Grande	6,98	7,63	2,798	1,83	2921	0,46	4,42	1,72	2,10	1,64	1,30	0,77	0,49
84023 - Fabio Baudrit	5,19	8,07	2,377	2,47	8766	0,71	4,37	3,02	3,46	2,95	1,79	0,64	0,47
90009 - Damas	4,48	4,76	1,820	1,06	2190	0,28	3,49	1,18	1,62	1,33	0,93	0,63	0,23
98027 - Pindeco	4,44	7,40	1,787	1,75	3652	0,42	5,54	3,12	3,51	3,13	1,58	0,47	0,18

razón por la cual los índices de concordancia son relativamente bajos. En dicho cuadro se puede apreciar la sobreestimación de FAO-56 sobre el Tanque evaporímetro tipo A, en el total de los casos, debido a que el valor promedio del dato calculado con el modelo (E_r) supera el valor promedio del dato observado (E_c). El índice de concordancia más alto es el de la estaciones de Llano Grande y Fabio Baudrit, al igual que el coeficiente de determinación, lo cual indica que esta es la estación que mejor ajusta el modelo. La estación de Damas es la que presenta los valores más bajos, tanto del error de estimación como del error absoluto medio.

Tal como menciona Villalobos (1996), la presentación de los datos en forma gráfica es muy valiosa y útil para identificar los patrones en las diferencias entre los datos medidos y los estimados, así como los casos extremos. Por tanto

se generaron las curvas de ajuste entre los valores diarios de la evaporación real, registrada mediante el Tanque de evaporación tipo A y calculada mediante el modelo FAO-56. A estos datos de resolución diaria se les calculó la ecuación de regresión de mínimos cuadrados, para generar la curva de mejor ajuste y así obtener los valores de la intersección 'a' y la pendiente 'b'.

Al observar las figuras de la 7, 8 y 9, en las cuales se graficaron las curvas de ajuste de la evaporación calculada y estimada, lo primero que se percibe es la diferencia de escalas entre el eje 'x' y el eje 'y' en las estaciones de Pindeco, y Fabio Baudrit., esto nos indica que el modelo está sobre estimando los valores reales de la evaporación. Sin embargo se confirma con los parámetros de regresión calculados para cada estación, que el modelo no sobreestima en todo momento.

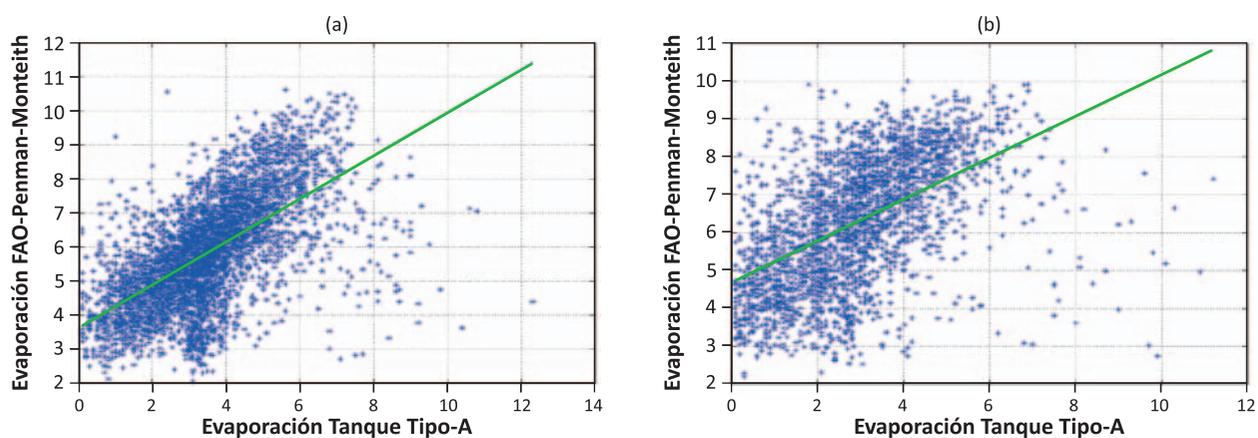


Figura 7. Ajuste de la evaporación diaria del Tanque evaporímetro tipo A y método FAO-56. (a) Estación 69579 – Santa Clara, ITCR, (b) Estación 71002 - La Mola.

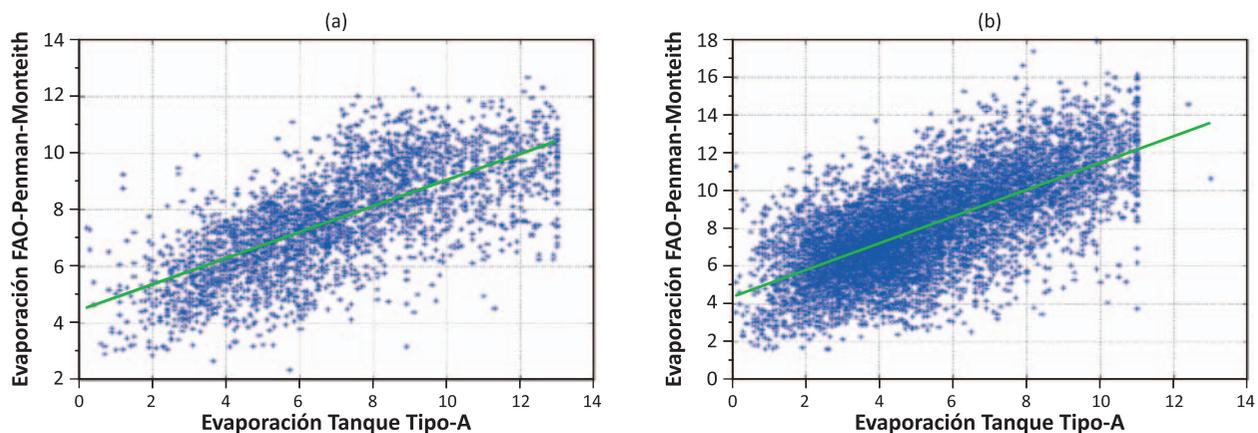


Figura 8. Ajuste de evaporación diaria del Tanque evaporímetro tipo A y método FAO-56. (a) Estación 84023 – Est. Exp. Fabio Baudrit. ($r^2 = 0,98$), (b) Estación 74020 – Llano Grande.

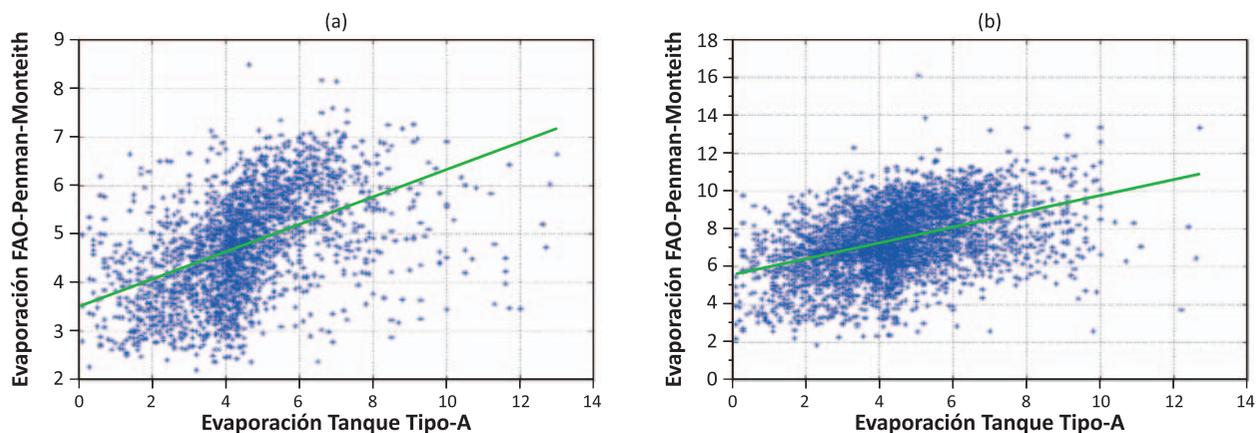


Figura 9. Ajuste de evaporación diaria del Tanque evaporímetro tipo A y método FAO-56. (a) Estación 90009 – Damas, (b) Estación 98027 – Pindeco.

La distribución de los puntos en la estación ubicada en la Zona Norte, tiende a subestimar cuando la demanda atmosférica de agua es mayor a los 6 mm dia^{-1} , tal es el caso de la serie observada. Por su parte el Caribe muestra una distribución bastante dispersa, para demandas atmosféricas menores a 7 mm dia^{-1} , pero presenta el mismo comportamiento que la estación de Santa Clara. En el caso del Pacífico Norte, la estación de Llano Grande muestra una distribución ajustada. La estación con el mayor número de años analizados fue la Fabio Baudrit que representa al Valle Central, donde se observa una distribución de puntos bien definida y centrada. La estación del Pacífico Central es la que tiene el menor número de años analizados y es la que posee una distribución más dispersa. Pindeco es la estación meteorológica que representa al Pacífico Sur y también refleja ese comportamiento disperso en los valores extremos y centrados en los valores medios.

3.2. Evaluación del modelo a nivel mensual

A partir de los datos de evaporación diaria, se realizó una selección mensual y se procedió a calcular el acumulado de cada mes, utilizando todos los años seleccionados con anterioridad

para cada estación. Posteriormente se generaron las gráficas respectivas de mejor ajuste para ambas series de tiempo de evaporación, estimada y observada, esta vez en resolución mensual. Se calculó la ecuación de regresión de mínimos cuadrados para generar la curva que ajuste ambas series y así obtener los valores de la intersección 'a', la pendiente 'b' y todas las estadísticas anteriormente mencionadas que fueron recomendadas inicialmente por Fox (1981), en conjunto con las mencionadas por Willmot (1982).

Como se observa en las figuras 10, 11 y 12, la estación de Llano Grande de Liberia tiene un comportamiento mensual similar entre la evaporación estimada (verde) y la observada (azul), donde se puede apreciar que la ecuación sobreestima mayormente los valores obtenidos durante los meses lluviosos. Tal comportamiento se repite en las demás estaciones, lo que ilustra un comportamiento muy similar para ambas series. Se muestra que La Mola y Pindeco, son las estaciones con mayores diferencias entre el modelo y la realidad.

La figura 11 (a) que corresponde a la estación representativa del Valle Central, muestra la mejor curva de ajuste obtenida. En las otras figuras del ajuste mensual, se observa que la Zona Norte, Pacífico Central y Norte obtuvieron un ajuste

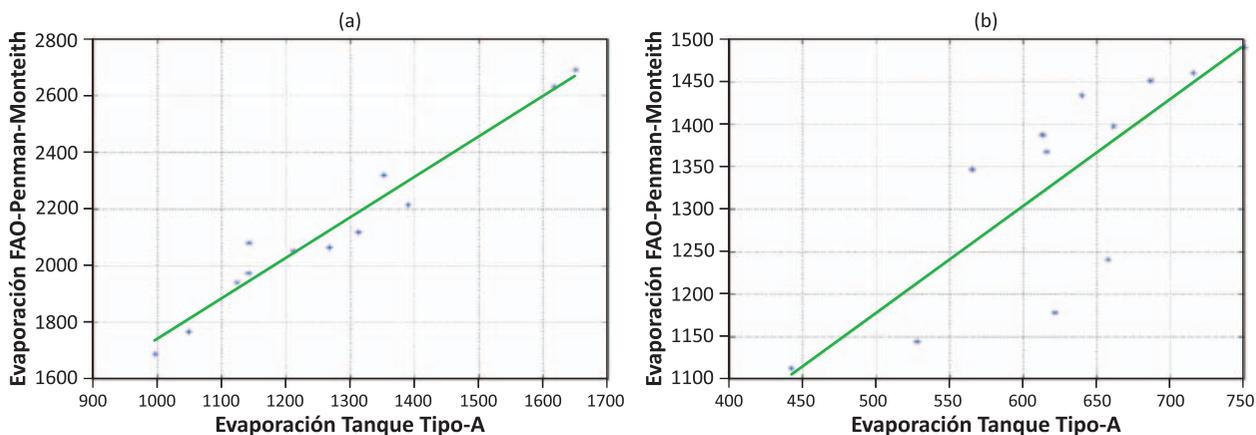


Figura 10. Ajuste de la evaporación mensual del Tanque evaporímetro tipo A y método FAO-56. (a) Estación 69579 – Santa Clara, ITCR, (b) Estación 71002 - La Mola.

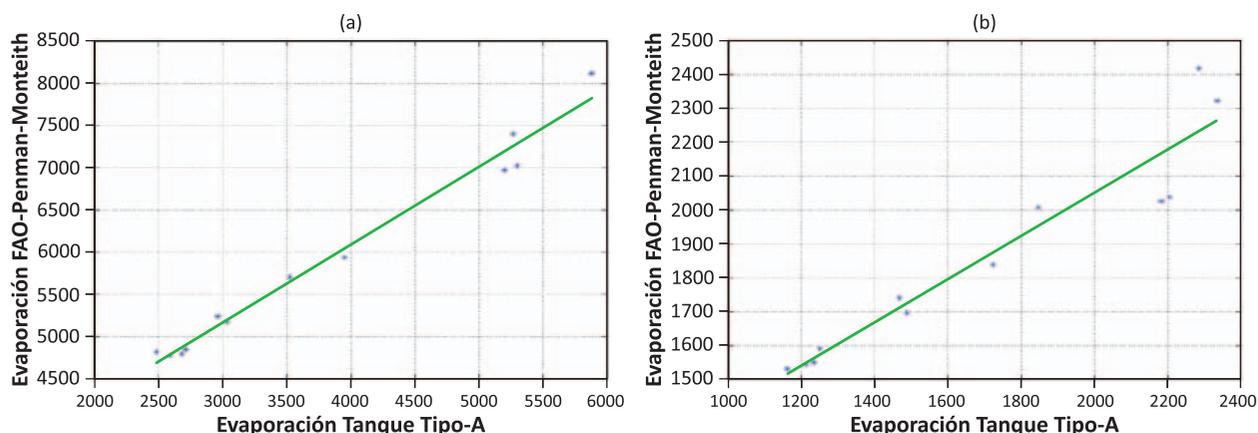


Figura 11. Ajuste de evaporación mensual del Tanque evaporímetro tipo A y método FAO-56. (a) Estación 84023 – Est.Exp.Fabio Baudrit. ($r^2 = 0,98$), (b) Estación 74020 – Llano Grande.

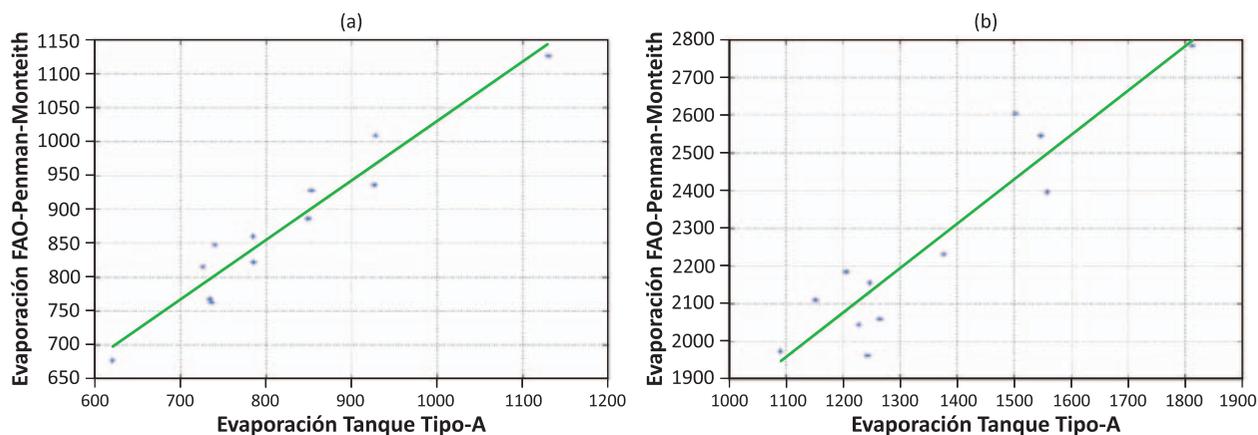


Figura 12. Ajuste de evaporación mensual del Tanque evaporímetro tipo A y método FAO-56. (a) Estación 90009 – Damas, (b) Estación 98027 – Pindeco.

Cuadro 3. Evaluación del modelo a nivel mensual

ESTACIÓN	E_r	E_c	DS_{E_r}	DS_{E_c}	N	a	b	MAE	RMSE	$RMSE_s$	$RMSE_u$	d	r^2
69579 - Santa Clara	1 271,42	2 128,58	206,45	302,39	12	1,43	308,46	857,15	863,56	861,39	61,23	0,35	0,95
71002 - Mola	638,61	1 361,73	50,50	83,64	12	0,83	830,85	723,12	726,48	723,17	69,25	0,10	0,25
74020 - Llano Grande	1 699,40	1 859,01	457,07	304,69	12	0,63	774,10	215,36	239,92	224,75	83,96	0,89	0,91
84023 - Fabio Baudrit	3 714,03	5 800,96	1 286,17	1 227,93	12	0,94	2 282,08	2 086,93	2 092,94	2 087,93	144,68	0,65	0,98
90009 - Damas	817,98	870,00	132,42	119,80	12	0,87	153,37	52,66	61,41	54,33	28,62	0,93	0,93
98027 - Pindeco	1 361,43	2 253,88	200,52	262,93	12	1,24	555,89	892,44	897,07	893,70	77,69	0,34	0,90

tan bueno como el de la figura aquí mostrada. Mientras que en las estaciones del Caribe y Pacífico Sur se obtuvieron las distribuciones más dispersas, donde los puntos no se alinean con la curva de ajuste.

Tal como se aprecia en el cuadro 3, la estación Experimental Fabio Baudrit muestra el mayor error sistemático y el mayor coeficiente de determinación de todas las series. Se evidencia, que las mejores estadísticas las obtuvieron las

estaciones de Llano Grande y Damas, con los valores más aceptables del índice de concordancia y el coeficiente de determinación. Todas las otras estaciones coinciden en que el error es mayormente sistemático.

Tanto el error absoluto medio, como la raíz cuadrada del error medio estimado, son parámetros que sirven para cuantificar el grado de error cometido en la estimación del parámetro. Según Wilmott (1982) cuanto más cercano a cero sea el error entonces mejor se aplica el modelo. La estación de Damas presenta el valor más bajo, del error medio absoluto y de la raíz cuadrada del error medio estimado, sin embargo, aunque es el más bajo de todas las estaciones sigue siendo alto y lejano de cero.

4. Conclusiones

El presente estudio compara los valores de la evaporación diaria en seis regiones climáticas de Costa Rica utilizando el método FAO-56 para el cálculo de las series de evaporación, las cuales fueron validadas con los datos obtenidos en el Tanque de evaporación tipo A. Se deben tomar en cuenta las razones que comenta Hernández (2013), respecto a los problemas presentados durante la toma de datos de evaporación, que son propios del instrumental utilizado para la medición. Por tanto, no se debe asumir que los valores observados sean en su totalidad una exacta representación de la realidad, lo cual influye en las variaciones obtenidas en los ajustes diarios y mensuales.

El método 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 el Pacífico Norte. Se debe recordar que para las estaciones de Santa Clara, La Mola, Llano Grande y Damas no se utilizan registros de radiación, debido a la ausencia de estos para los años seleccionados. Estas son algunas de las posibles fuentes de error en los cálculos de la evaporación.

Del análisis del ajuste mensual se concluye, que es la estación de Llano Grande es la que mejor se ajusta al modelo, debido a que sus estadísticas son las mejores del conjunto de series de tiempo analizadas. Las estadísticas mostradas no son las esperadas y esto se debe principalmente a la brecha existente entre la serie de tiempo obtenida con el modelo FAO-56 y las obtenidas mediante el Tanque de evaporación Tipo A, lo que se refleja en todas las gráficas anteriormente mencionadas, como la sobre estimación de los datos calculados con respecto a los observados.

El modelo se ajustó de manera aceptable en las regiones del Pacífico Norte y Central, mientras que requiere un mejor ajuste para las regiones del Valle Central, Zona Norte, Pacífico Sur y Caribe.

5. Referencias

- Alfaro, E. y 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, RG.; Pereira, LS.; Raes, D. & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration, Guidelines for Computing Crop Water Requirements, Food and Agriculture*. Organization of the United Nations, 56.
- 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.

- Fox, DG. (1981). Judging Air Quality Model Performance. A summary of the AMS Workshop on Dispersion Model Performance. *Bulletin American Meteorogycal Sociaty*. 62: 599-609.
- Muñoz, C.; Fernández, W.; Gutiérrez, J. y 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.
- Villalobos, R. (1996). Evaluación de algunos métodos de estimación de la evaporación desde superficies libres de agua en distintas regiones de Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos Oceanográficos*. 3(5): 141-151.
- Willmott, J. (1982). Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bulletin American Meteorological Society*, 63(11): 1309-1313.