

EVALUACIÓN COMPARATIVA Y PREDICCIÓN ESPACIAL DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA MEDIANTE MÉTODOS GEOESTADÍSTICOS

Miguel I. Silva Borges¹ y Naghely M. Mendoza Díaz¹

RESUMEN

La determinación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) es imprescindible al momento de realizar planificaciones del riego agrícola. Una de las metodologías más recomendadas para ello es la de FAO Penman-Monteith; sin embargo, su aprovechamiento está limitado a la necesidad de disponer las variables necesarias para su estimación, por lo que es posible recurrir a la predicción espacial de la ET_o a partir de valores conocidos de la misma. En este estudio, se compararon y evaluaron el Kriging Ordinario (KO) y Kriging Universal (KU) en la predicción espacial de la ET_o a escala mensual en los llanos venezolanos, estimada mediante FAO Penman-Monteith, lo que permitió a su vez, visualizar su comportamiento espacial. Se evaluó mediante validación cruzada, empleando el coeficiente de determinación R^2 , el error de predicción cuadrático medio (EPCM) y la raíz del error cuadrático medio (RECM). Se determinó al KO como el mejor predictor, atribuido a la estacionariedad de la media en la mayoría de los meses, exceptuando marzo y octubre, aun cuando existió reducida diferencia de los errores entre los métodos, así como una baja y moderada dependencia espacial de la ET_o para el KO, y alta para el KU. Los alcances oscilaron entre los 100 km para octubre y noviembre hasta 290 km para julio según el KO, mientras que para el KU, fluctuaron entre 35 km para julio y octubre y 290 km para enero. Se constató mayor demanda de la ET_o hacia los llanos orientales que los occidentales, así como su estacionalidad, debido al comportamiento de las variables que influyen en su estimación.

Palabras claves adicionales: ET_o, Kriging, llanos venezolanos, métodos de predicción

ABSTRACT

Comparative assessment and spatial prediction of the reference evapotranspiration through geostatistical methods

The determination of the reference evapotranspiration (ET_o) is essential when carrying out agricultural irrigation planning. One of the most recommended methodologies for this is that of FAO Penman-Monteith; however, its use is limited to the need to have the necessary variables for its estimation, so it is possible to resort to the spatial prediction of the ET_o from known values of it. In this study, Ordinary Kriging (KO) and Universal Kriging (KU) were compared and evaluated in the spatial prediction of the ET_o on a monthly scale in the Venezuelan plains, estimated by FAO Penman-Monteith, which in turn allowed visualizing its spatial behavior. It was evaluated by cross-validation, using the coefficient of determination R^2 , the mean squared prediction error (MSPE) and the root mean square error (RMSE). The KO was determined as the best predictor, attributed to the stationarity of the mean in most months, except March and October, even when the difference in errors is reduced between the methods, as well as a low and moderate spatial dependence of the ET_o for the KO, and high for the KU. The ranges ranged from 100 km for October and November to 290 km for July according to KO, while for the KU, they fluctuated between 35 km for July and October and 290 km for January. There was a greater demand for ET_o towards the eastern plains than the western plains, as well as its seasonality, due to the behavior of the variables that influence its estimation.

Additional keywords: ET_o, Kriging, prediction methods, Venezuelan plains

INTRODUCCIÓN

El comportamiento del sistema atmosférico tiene importantes implicaciones en el ámbito agrícola, ambiental y social, influyendo directamente en la economía de muchos países en vías de desarrollo. El análisis, manejo e

interpretación de la información climática aportada por los servicios de meteorología especializados, en la hidrología y meteorología es imprescindible para la toma de decisiones en todas las áreas, representando un aspecto de gran importancia en la mayoría de las actividades humanas (Eakin y Conley, 2002).

Recibido: Junio 3, 2019

Aceptado: Marzo 2, 2020

¹ Depto. e Instituto de Ingeniería Agrícola, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela (UCV). Maracay, Venezuela. e-mail: miguel.i.silva@ucv.ve (autor de correspondencia); naghely.mendoza@gmail.com

Uno de los elementos del ciclo hidrológico de mayor relevancia lo constituye la evapotranspiración, la cual representa la demanda de agua en los diferentes ecosistemas. Se concibe como un término compuesto entre el agua evaporada de las diferentes superficies, mas la que es transportada dentro y a través de los tejidos de las plantas hacia la atmósfera. La importancia de este elemento radica en su papel determinante en la disipación y redistribución del calor latente dentro del balance energético, así como también, es componente del régimen de disponibilidad de agua en la agricultura (Olivares et al., 2018) e influye en las necesidades de riego y drenaje y la capacidad hidrográfica de las cuencas.

Para conocer la cantidad de agua demandada por parte del complejo suelo-planta, se ha estandarizado su definición al concepto de evapotranspiración de referencia, denotada como ETo. De acuerdo a Allen et al. (2006), la ETo se define como la demanda máxima de un cultivo de referencia sin limitaciones de riego, siendo este cultivo hipotético con una altura 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70 s/m y un albedo de 0,23. Esta ETo depende principalmente del comportamiento de las variables meteorológicas y su estimación se puede hacer tanto de forma directa a través de lisímetros, como indirecta mediante fórmulas desarrolladas empíricamente. Uno de los métodos empíricos más ampliamente utilizados y recomendados para la estimación de la ETo es la ecuación FAO Penman-Montieth, debido a la integración de un elevado número de variables meteorológicas en su cálculo.

Este método, ha generado los mejores resultados en Venezuela (López y Dennett, 2005; Pire y Rodríguez, 2007; Trezza, 2008). No obstante, la inclusión de múltiples elementos, también puede ser una desventaja en situaciones donde no se dispongan de todos los datos precisos. Esto ocurre en muchos espacios geográficos en el país, donde es baja la densidad de estaciones de tipo C1 o automáticas que puedan registrar las variables necesarias para la estimación de la ETo. Un ejemplo de ello es la región de los llanos venezolanos, que a pesar de generar un importante porcentaje de la producción agrícola en el país (MARN, 2005; Martelo y Pérez, 2010), especialmente bajo el régimen de secano (Olivares y Zingaretti, 2018), no cuenta con un número representativo de estaciones meteorológicas.

Para superar esta limitación se han desarrollado técnicas de interpolación que permiten estimar valores en localizaciones que no cuentan con registros climáticos. Entre los métodos que mejores resultados han demostrado para interpolar la ETo se encuentran las técnicas geoestadísticas derivadas del Kriging (Quereda et al., 2016; Duarte et al., 2016; El-Shirbeny y Abdellatif, 2017). Éstas se basan en el principio de la variable regionalizada, que no solamente estima valores desconocidos, sino que permite también visualizar y entender el comportamiento en el espacio del fenómeno modelado. Estas metodologías también han sido utilizadas en Venezuela para la predicción espacial de variables meteorológicas en los trabajos de Rodríguez et al. (2013) y Cortez et al. (2016) para el caso de la precipitación y Silva (2019) para la temperatura del aire.

No obstante, es imprescindible definir al mejor interpolador de un fenómeno específico en una región particular, puesto que no existe un método universal que garantice la mejor predicción para cualquier espacio debido a los parámetros y requisitos que exigen los modelos de interpolación y las características propias de los diferentes emplazamientos. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue realizar una evaluación comparativa de dos métodos geoestadísticos, tanto univariado (Kriging ordinario) como multivariado (Kriging universal) en la interpolación espacial de la ETo en los llanos venezolanos, que permitió a su vez, generar información referente al comportamiento espacial de la misma en el mencionado espacio geográfico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El área de estudio está representada por los llanos venezolanos, ubicados entre las coordenadas 6 y 10° de latitud norte, y entre 62 y 72° de longitud oeste. Están conformados por los llanos occidentales (estados Apure, Barinas y Portuguesa), centrales (estados Cojedes y Guárico) y orientales (estados Monagas y Anzoátegui). Presentan una topografía regular que varía entre los 20 hasta los 500 msnm y se caracterizan por exhibir climas que oscilan desde el semiárido hacia el noreste de los llanos orientales, subhúmedo seco entre los llanos orientales y centrales, subhúmedo húmedo en gran

Silva y Mendoza Evaluación y predicción espacial de la evapotranspiración de referencia

parte de los llanos occidentales hasta moderadamente húmedo hacia el piedemonte

andino en la parte más occidental de los llanos (Martelo, 2003).

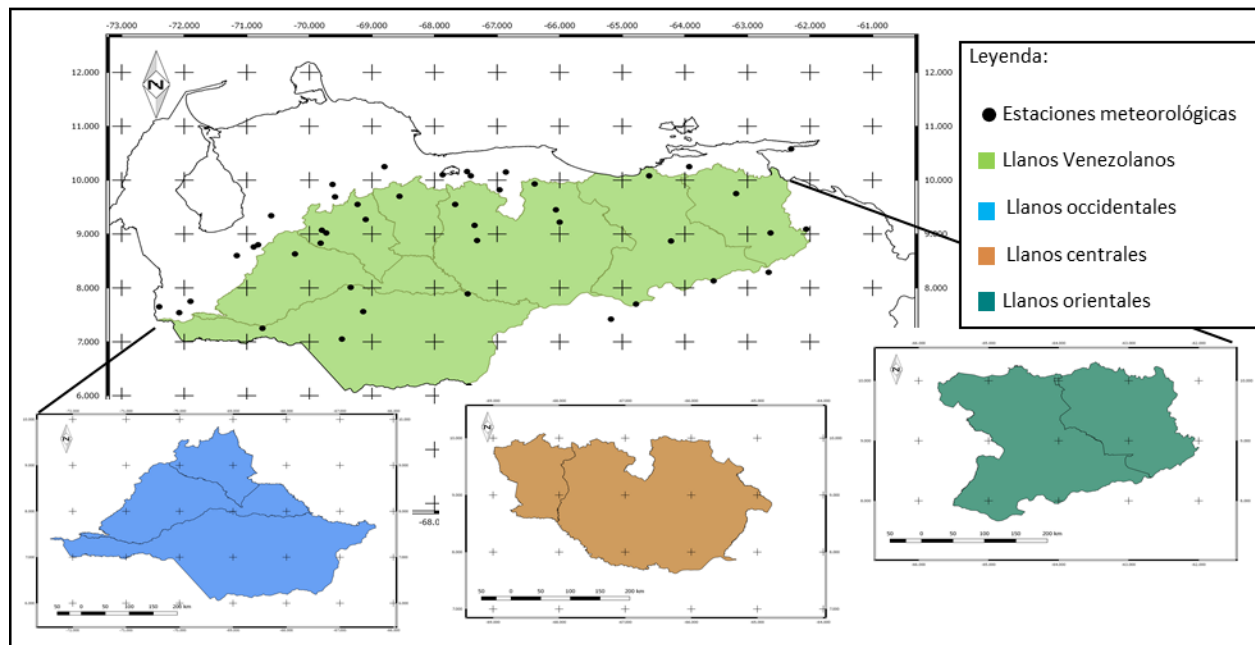


Figura 1. Zona de estudio y estaciones climáticas empleadas en la investigación

Datos climáticos. Se emplearon los datos mensuales de temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad de viento correspondientes al período 1970-2000 de 45 estaciones pertenecientes al Banco Nacional de datos del Ministerio del Ambiente (28), Servicio de Meteorología de la Aviación (12), Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (3) y a la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela (2) (Figura 1). Estos datos se tomaron del proyecto de Elaboración del Mapa de Zonas Áridas, Semiáridas y Subhúmedas de América Latina y el Caribe (UNESCO, 2010), los cuales cuentan con los criterios de calidad: homogeneidad, valores atípicos y datos faltantes.

Cálculo de evapotranspiración de referencia (ET_o). La evapotranspiración de referencia fue obtenida mediante el Sistema de cálculo de índices del régimen hídrico (CIRH) empleado en el proyecto antes mencionado. El sistema CIRH estimó la media de la ET_o utilizando para ello los valores promedios mensuales de las variables de entrada. A partir del valor promedio de la ET_o se realizaron los demás procedimientos desarrollados en la investigación. La ET_o fue estimada de acuerdo con la ecuación FAO Penman-Monteith

(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: evapotranspiración del cultivo de referencia (mm·d⁻¹), R_n: radiación neta en la superficie del cultivo (MJ·m⁻²·d⁻¹), G: densidad de flujo de calor en el suelo (MJ·m⁻²·d⁻¹), T: temperatura media diaria a 2 m (°C), U₂: velocidad promedio del viento (media de 24 h) a 2 m (m·s⁻¹), (e_s - e_a): déficit de presión de vapor a 2 m (kPa), Δ: pendiente de la curva T vs presión de vapor de saturación (kPa·°C⁻¹), γ: constante psicrométrica (kPa·°C⁻¹).

Análisis exploratorio de datos. Para reconocer el comportamiento estadístico de los datos de la ET_o se aplicó un análisis exploratorio de datos (AED) que consistió en la determinación de la media, varianza, desviación estándar, coeficiente de variación, valores máximos y mínimos, asimetría y curtosis según procedimientos estadísticos detallados en Parra y Cortez (2005) y Olivares et al. (2013), así como en el contraste de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilks. Además, se determinó el grado de dependencia entre la ET_o y la longitud, latitud y altitud.

Análisis geoestadístico e interpolación. Se utilizaron las técnicas geoestadísticas conocidas como Kriging Ordinario (KO) y Kriging Universal (KU). Estas metodologías se basan en el principio de la variable regionalizada, o fenómenos cuya estructura espacial presenta correlación. El primer paso para la aplicación de éstas técnicas fue la determinación de la dependencia espacial mediante la construcción de un semivariograma experimental, a través de la siguiente ecuación:

$$\bar{\gamma}(h) = \frac{\sum (Z(x+h) - Z(h))^2}{2n}$$

dónde $Z(x)$ es el valor de una variable en un sitio x , $Z(x+h)$ es otro valor separado del anterior por una distancia h , y n es el número de pares que se encuentran separados a dicha distancia. Ésta se promedia a una distancia entre pares de sitios dentro de cada intervalo y se fundamenta en la mínima varianza asociada a una correlación entre las observaciones a cortas distancias.

Una vez realizado el semivariograma experimental a una distancia promedio, se generalizó la estructura de auto correlación a cualquier posible distancia mediante el ajuste de un modelo, lo que llevó el semivariograma experimental a uno teórico. En este trabajo se evaluaron en la eficiencia del ajuste a los semivariogramas experimentales los modelos exponencial, esférico, gaussiano y lineal. Para esta investigación se emplearon variogramas omnidireccionales (en todas las direcciones posibles) con base en los datos de 45 estaciones meteorológicas.

El ajuste del modelo generó tres parámetros: la varianza aleatoria (C_0), la varianza muestral ($C_0 + C_1$) y el alcance (A). Estos se emplearon en el entendimiento de la estructura espacial del fenómeno modelado. La varianza aleatoria se concibió como una discontinuidad en el origen generada por errores y/o variabilidades que no fueron muestreadas. La varianza muestral es el establecimiento de la varianza hasta cierto punto a partir del cual, deja de crecer y se hace constante. El alcance hace referencia a la distancia donde se pierde la autocorrelación de los puntos observados. La predicción o interpolación del fenómeno se logró mediante el estimador Kriging. Éste estimador está definido por:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

donde x_0 : es la ubicación del valor a predecir, λ_i : peso conocido para la ubicación a predecir, $Z(x_i)$: es el valor observado, n : número de valores observados. En el predictor Kriging, los pesos se estimaron como el inverso de la varianza conseguida en el semivariograma experimental, o dicho de otra forma, la mínima varianza del error de predicción. Para el KO se asumió que el fenómeno modelado es estacionario y de media desconocida, mientras que para el KU el fenómeno no es estacionario y exhibe tendencia. La tendencia fue determinada mediante modelos de superficie producto de combinaciones lineales de covariables espaciales escalares. Estos métodos fueron corridos en el software estadístico R Studio versión 1.1.463.

Evaluación del método. Para evaluar la precisión en la predicción espacial de los métodos utilizados se empleó la validación cruzada. Esta validación consistió en eliminar secuencialmente cada punto de los datos de entrada, y utilizando los puntos restantes, se predijo el valor en la ubicación del punto excluido. Una vez hecho esto, se emplearon las diferencias o residuales entre el valor real y el predicho para calcular estadísticos que reflejaran el ajuste y el error del modelado. Los estadísticos utilizados fueron los siguientes:

Coefficiente de correlación (Pearson). Este coeficiente, que mide la relación lineal entre variables cuantitativas permitió visualizar el grado de ajuste entre los valores observados y predichos.

Error de predicción cuadrático medio (EPCM) y raíz del error cuadrático medio (RECM). El primero corresponde al valor resultante entre las diferencias cuadráticas de los valores reales y predichos; mientras más bajo fue el EPCM mejor fue el ajuste del modelo. El segundo se entiende como la raíz cuadrada de las diferencias o residuales entre los valores reales y predichos; la mejor eficiencia del modelado fue aquella donde el RECM estuvo más cercano a cero.

Estos estadísticos se calcularon mediante las siguientes expresiones matemáticas:

$$EPCM = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_o)^2}{n}$$

$$RECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_o)^2}{n}}$$

donde P_i son los valores reales, O_o : los valores predichos y n el número total de valores

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis exploratorio de datos se encuentran en el Cuadro 1, los cuales arrojaron valores de media, varianza (Var) y

desviación estándar (SD) mayores para los meses de enero a mayo y diciembre, así como un mayor coeficiente de variación (CV) de febrero a mayo en comparación al resto, asociado posiblemente a la mayor disponibilidad de energía radiante en esos meses, que aumenta a su vez la demanda evaporativa. Esto resulta coincidente con la temporada seca en los llanos (Cortez et al., 2016; Olivares, 2018) lo que indica un comportamiento moderadamente estacional de la ETo.

Cuadro 1. Resultados del análisis exploratorio de datos de ETo ($\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$)

Mes	Media	Var	SD	CV	CA	Curtosis	Shapiro-Wilks		r (Pearson)		
							P-valor	W	Long	Lat	Alt
Enero	139,9	418	20,5	14,6	-0,2	-0,9	0,13	0,96	0,12	-0,10	-0,43
Febrero	139,9	513	22,6	16,2	-0,2	-0,8	0,24	0,97	0,22	-0,11	-0,44
Marzo	160,1	746	27,3	17,1	-0,2	-0,5	0,44	0,98	0,38	0,01	-0,53
Abril	142,3	662	25,7	18,1	-0,2	-0,1	0,67	0,98	0,64	0,09	-0,59
Mayo	135	480	21,9	16,2	-0,3	0,7	0,12	0,96	0,63	0,15	-0,52
Junio	121,9	297	17,2	14,1	-1	2	0,02	0,94	0,44	0,28	-0,49
Julio	128,8	327	18,1	14	-1,1	2,2	0,01	0,93	0,41	0,23	-0,45
Agosto	132,9	310	17,6	13,2	-1,2	2,7	0,01	0,92	0,39	0,15	-0,47
Septiembre	131,2	295	17,2	13,1	-1,1	2,8	0,01	0,93	0,44	0,06	-0,54
Octubre	131	294	17,2	13,1	-1	2,7	0,01	0,93	0,45	-0,03	-0,61
Noviembre	122,8	277	16,6	13,6	-0,4	0,7	0,55	0,98	0,32	-0,09	-0,56
Diciembre	127,8	341	18,5	14,4	-0,3	-0,5	0,39	0,97	0,15	-0,12	-0,50

Var: varianza; SD: desviación estándar; CV: coeficiente de variación; CA: coeficiente de asimetría; W: estadístico

El coeficiente de asimetría (CA) mostró una tendencia negativa que se hace más marcada en los meses húmedos (mayo a octubre), lo cual también fue observado en el coeficiente de curtosis, pero de forma positiva. Esto revela que los meses más secos se acercan más a la normalidad; de hecho, en estos meses (noviembre-abril) la ETo tuvo una distribución normal de acuerdo con los resultados arrojados por el estadístico W de la prueba de Shapiro-Wilks, donde ningún P -valor fue menor al nivel de significancia.

En relación al grado de dependencia con otras variables, la ETo manifestó una moderada correlación negativa con la altitud (Alt), es decir, una disminución de la ETo al aumentar esta variable, comportamiento observado también en otras

investigaciones (Jaramillo, 2006). Por su parte, se evidencia también una moderada dependencia con la longitud (Long), donde R^2 crece al transcurrir los meses para luego disminuir, siendo abril y mayo los que mostraron un R^2 más alto. La latitud (Lat) mostró muy baja dependencia con la ETo.

La moderada correlación inversa de la ETo con la altitud se atribuye, tal como lo expone Martelo (2003), a la disminución de la temperatura y la evaporación en la zona bajo estudio producto del ascenso generado por la topografía. Así como también lo muestra la correlación con la longitud, en este caso, posiblemente atribuido a la estacionalidad de la convergencia intertropical (abril-septiembre) (Grotsky y Carton, 2003). Tanto la temperatura como la velocidad del viento son variables

meteorológicas de importancia para la evapotranspiración cuyo proceder incide como componente térmico y aerodinámico en el cálculo de ETo (Allen et al., 2006), por lo tanto, cualquier cambio temporal o espacial de estos elementos, influye directamente en su estimación.

En relación a los semivariogramas experimentales y teóricos univariados de acuerdo

al Kriging ordinario (Figura 2a) y multivariados para el Kriging universal (Figura 2b) se apreció un comportamiento transitivo y anidado caracterizado por un aumento de la semivarianza en función de la distancia hasta estabilizarse para ambos métodos y para todos los meses, ilustrado a modo de ejemplo para el mes de abril en ambas figuras, lo que refleja la presencia de dependencial espacial.

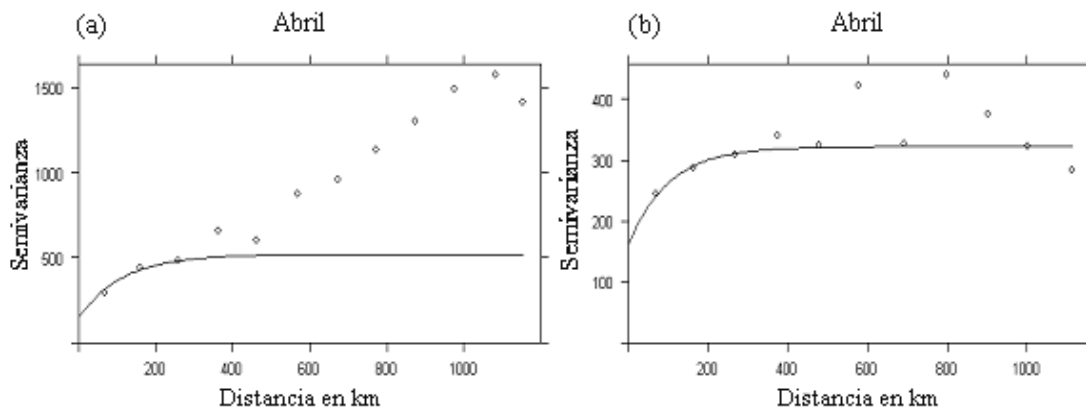


Figura 2. Variogramas teóricos de acuerdo con el KO (a) y KU (b) para el mes de abril

Tanto el modelo como los resultados de los parámetros ajustados producto de la modelación logrados por validación cruzada para ambos métodos se aprecian en la Cuadro 2. El modelo exponencial fue el que tuvo mejores resultados; el modelo esférico también presentó un buen ajuste; pero a alcances mucho más elevados que las distancias a las que se calcularon los semivariogramas experimentales, por lo que se descartó como un modelo ideal que evaluar la variabilidad espacial de la ETo en la zona analizada.

La correlación de los datos o alcances fluctuó entre los métodos y los meses, llegando a variar de los 100 km para octubre y noviembre hasta 290 km para julio para el KO, mientras que para el KU, se presentaron alcances de 35 km para julio y octubre y un máximo de 290 km para enero. Se constató la presencia de varianza aleatoria en todos los meses para ambos métodos, que disminuía drásticamente bajo KU en comparación al KO para algunos casos, resaltando que ésta era mayor para aquellos que mostraron también mayor varianza en el análisis exploratorio de datos. Lo que contrasta con el hecho de que todos los umbrales que se consiguieron fueron inferiores a esa varianza.

Las evidencias anteriores demuestran la existencia de dependencia espacial de la ETo para todos los meses, y que posiblemente los datos sean estacionarios, donde la variabilidad de las propiedades de la ETo en el espacio esté más relacionada a la distancia entre los datos que de su emplazamiento. Esto también se puede afirmar por el éxito del modelado exponencial, ya que éste está asociado a fenómenos de fuerte estacionaridad (Samper y Carrera, 1990). Lo anterior, a su vez afianza el principio de la interpolación mediante Kriging ordinario, cuyo principal fundamento es la necesidad de disponer de información que cumpla los principios de estacionariedad, a pesar de la falta de normalidad de los datos, como se comprobó en el AED. Esto último, al ser el Kriging una metodología robusta, permite superar esta desventaja (Samper y Carrera, 1990).

Sin embargo, la variabilidad fue contrastante entre los métodos, tal como se pudo apreciar en la varianza aleatoria relativa de acuerdo a lo establecido por Cambardella et al. (1994). Para el KU hubo una alta dependencia espacial (C_o relativa $\leq 25\%$) para julio, septiembre, noviembre y diciembre, mientras que fue moderada ($25\% < C_o$ relativa $\leq 75\%$) para marzo, junio y octubre;

Silva y Mendoza Evaluación y predicción espacial de la evapotranspiración de referencia

para el resto de los meses fue baja (C_o relativa > 75 %) para el. No obstante, para el KO, no hubo ningún mes que tuviera una alta dependencia espacial, sólo presentándose una moderada dependencia entre febrero y junio, y baja en el resto de los meses.

Cuadro 1. Parámetros derivados del ajuste del modelo exponencial para ambos métodos

Método	Mes	C_o	C_o+C_1	A	C_o relativa
KO	Enero	231	232	180	100
	Febrero	180	425	180	42
	Marzo	200	527	108	38
	Abril	150	370	115	41
	Mayo	100	170	110	59
	Junio	50	190	170	26
	Julio	185	215	290	86
	Agosto	220	260	250	85
	Septiembre	185	375	164	49
	Octubre	161	161	100	100
	Noviembre	160	195	100	82
	Diciembre	100	270	160	37
KU	Enero	185	215	290	86
	Febrero	220	260	250	85
	Marzo	185	375	164	49
	Abril	161	161	100	100
	Mayo	160	195	100	82
	Junio	100	270	160	37
	Julio	25	222	35	11
	Agosto	40	225	125	18
	Septiembre	40	170	80	24
	Octubre	40	137	35	29
	Noviembre	40	160	65	25
	Diciembre	40	255	85	16

Estas varianzas aleatorias relativas permiten afirmar que para el KO, la variabilidad de la ETo es mayor a cortas distancias para todos los meses, mientras que para el KU, algunos meses muestran un baja variabilidad bajo el mismo principio.

Esto demuestra que la inclusión de covariables pudiera aumentar la dependencia espacial entre los datos, es decir, una disminución de la variabilidad y/o varianza a cortas distancias, a pesar de que la correlación no sea muy elevada. No obstante, la evaluación de los métodos por validación cruzada, cuyos resultados se encuentran en el Cuadro 3, muestran que el mejor ajuste de los valores observados y predichos lo tuvo el KO en la mayoría de los meses, excluyendo solamente marzo y octubre con el menor EPCM y RECM

bajo KU, si bien la diferencia entre los errores con el KO en estos meses es muy baja. Estos resultados son probablemente una respuesta a una moderada correlación entre la ETo y las covariables que se utilizaron, que impidieron disminuir la varianza lo suficiente para generar una interpolación más eficiente, posiblemente por la poca disponibilidad de datos observados.

Cuadro 2. Evaluación de los métodos de interpolación

Método	Mes	R^2	MCEP	RCEM
KO	Enero	0,57	289,14	17
	Febrero	0,60	330,92	18,19
	Marzo	0,66	427,1	20,67
	Abril	0,70	342,95	18,51
	Mayo	0,62	301,27	17,35
	Junio	0,52	219,041	14,8
	Julio	0,50	249,14	15,78
	Agosto	0,51	229,24	15,14
	Septiembre	0,52	215,89	14,70
	Octubre	0,57	198,38	14,08
	Noviembre	0,60	180,74	13,44
	Diciembre	0,55	237,16	15,40
KU	Enero	0,56	290,08	17,03
	Febrero	0,57	346,54	18,61
	Marzo	0,66	425,81	20,63
	Abril	0,71	329,47	18,15
	Mayo	0,56	337,57	18,37
	Junio	0,30	297,52	17,24
	Julio	0,34	294,41	17,15
	Agosto	0,24	320,36	17,90
	Septiembre	0,42	247,74	15,73
	Octubre	0,57	197,73	14,06
	Noviembre	0,55	196,94	14,03
	Diciembre	0,53	254,51	15,95

Los resultados de la interpolación espacial para los métodos con mejores ajustes y menores errores se encuentran en la Figura 3 (enero-junio) y en la Figura 4 (julio- diciembre). Los montos mínimos y máximos generados en la predicción de la ETo oscilaron entre los 93 mm para junio y julio hasta 200 mm en marzo. Se observó una disminución de la ETo en sentido este-oeste hacia los llanos occidentales atribuido posiblemente al efecto de inversión con la altitud como se vio en el AED, en este caso producido por la cercanía al pie de monte andino y de oeste-este hacia los llanos orientales, lo que se aprecia más claramente en enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre.

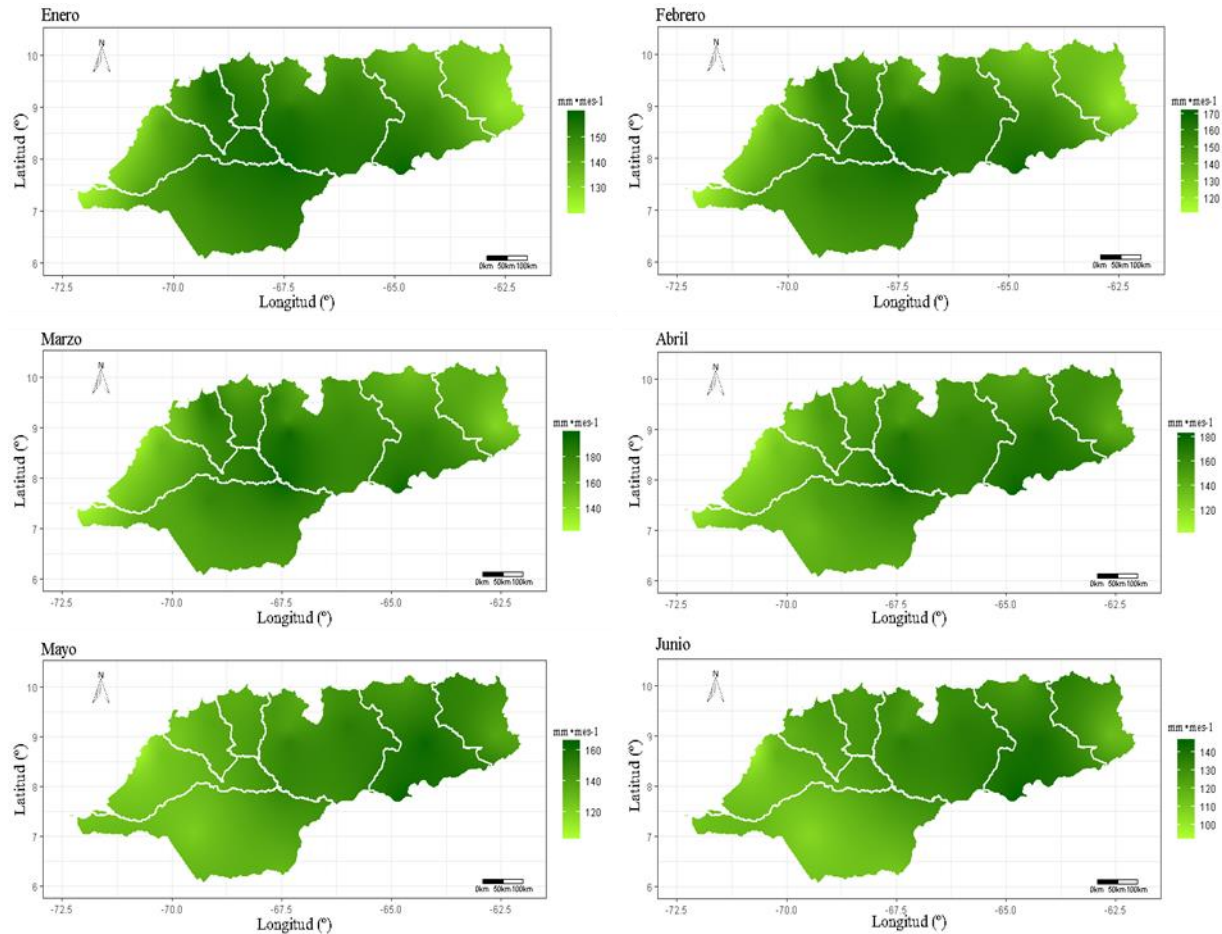


Figura 3. Distribución espacial de la ETo en los llanos venezolanos para el semestre enero-junio

Por otra parte, se constató un desplazamiento de los aumentos de la demanda hacia los llanos orientales a partir de mayo hasta octubre para luego ubicarse hacia el centro de los llanos en diciembre. A pesar de este aparente desplazamiento del aumento de la ETo, las demandas máximas se mantienen por debajo de 160 mm en el lapso junio-diciembre. Por el contrario hacia los llanos occidentales disminuye la ETo durante esta misma temporada.

La predicción espacial de la ETo confirmó su estacionalidad y a su vez, se ajustó a los valores esperados en toda el área de estudio, lo que proporciona información de la variable de interés en cualquier parte del espacio geográfico analizado. Esto permite disponer información de la ETo en localizaciones no medidas en cualquier parte de los llanos. Estos valores se pueden

utilizar para cualquier tipo de planificación, especialmente agrícola pues proporciona las demandas hídricas esperadas al ajustarse a los coeficientes de los cultivos (Allen et al., 2006), y por lo tanto, el máximo aprovechamiento del agua disponible.

Por otro lado, el comportamiento espacial de la ETo visto en los resultados, confirma la influencia determinante que tienen las variables meteorológicas en los valores de la ETo, tal como se ha observado en otras investigaciones con características climáticas similares a los llanos venezolanos (López y Dennett, 2005; Pire y Rodríguez, 2007), así mismo, se pudo constatar como la ecuación de FAO Penman-Monteith puede proporcionar valores de ETo representativos a los esperados en el área geográfica estudiada (Trezza, 2008).

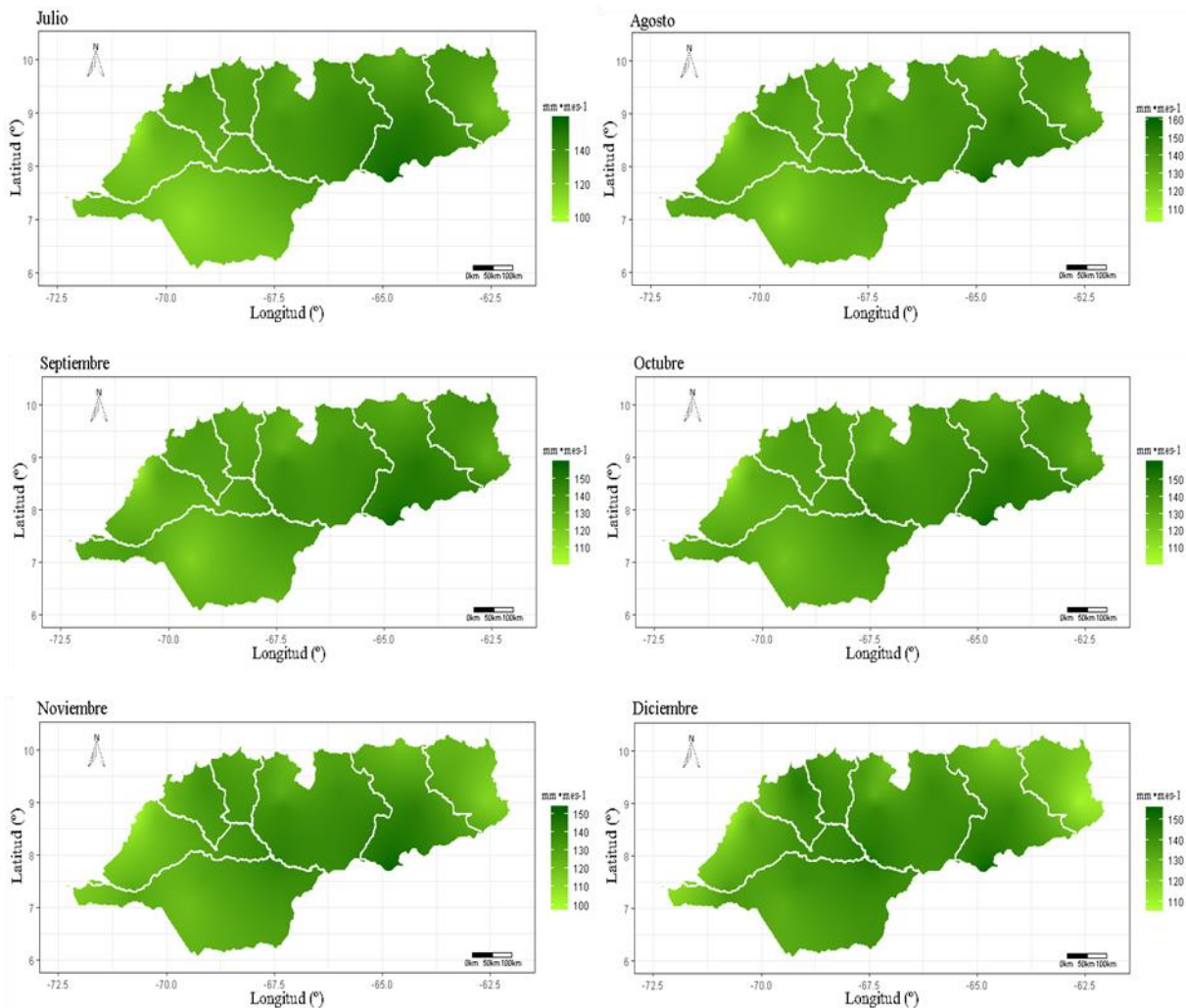


Figura 4. Distribución espacial de la ETo en los llanos venezolanos para el semestre julio-diciembre.

CONCLUSIONES

El método más eficiente para la interpolación de la ETo en los llanos venezolanos es el KO mediante modelación exponencial ya que el KU, no manifestó mejoría en la predicción al incluir la longitud, latitud y altitud durante la modelación, debido a la débil correlación que presentaron éstas con la ETo.

La ETo presentó un carácter moderadamente estacional caracterizado por un aumento de la demanda en los meses secos y una disminución en los meses húmedos, producto de la mayor disponibilidad de energía en la temporada seca en los llanos. Esto se observa en la predicción espacial de la ETo, en el que se apreció una disminución hacia el oeste de los llanos occidentales y este en los orientales producto de la actividad de las variables que actúan en su estimación.

Estos resultados aportan conocimiento sobre el valor de la ETo en coordenadas específicas lo que constituye un aspecto importante en la evaluación del régimen de disponibilidad de agua en la zona y una herramienta para las planificaciones agrícolas.

LITERATURA CITADA

1. Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. FAO, Roma. Paper 56: 1-79.
2. Cambardella, C., T. Moorman, J. Novak, T. Parkin, D. Karlen, R. Turco et al. 1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1501-1511.
3. Cortez, A., M.F. Rodríguez, J.C. Rey, F. Ovalles, W. González, R. Parra et al. 2016. Variabilidad espacio temporal de la

- precipitación en el estado Guárico, Venezuela. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)* 33(3): 292-310.
4. Duarte da Silva, N. A. Silva de Oliveira, T. Souza, L. Ferreira, S. Sousa, F. Amaral y J. Chaves. 2016. Mapping reference crop evapotranspiration in Bahia, Brazil, using Hargreaves-Samani method. *Geama Journal*. 2(4): 396-406.
 5. Eakin, H. y J. Conley. 2002. Climate variability and the vulnerability of ranching in southeastern Arizona: a pilot study. *Clim. Res. (Lüneburg, Germany)* 21: 271-281.
 6. El-Shirbeny, A. y B. Abdellatif, 2017. Reference evapotranspiration borders maps of Egypt based on kriging spatial statistic method. *International Journal of Geomate* 13(37): 1-8.
 7. Grodsky, S. y J. Carton. 2003. The Inter-tropical Convergence Zone in the South Atlantic and the equatorial cold tongue. *Journal of Climate* 16(4): 723-733.
 8. Jaramillo, R. 2006. Evapotranspiración de referencia en la región Andina de Colombia. *Cenicafé* 57(4): 288-298.
 9. Lopez, J. y M. Dennett. 2005. Comparación de dos métodos para estimar la evapotranspiración de referencia (Eto) en una zona semiárida de Venezuela. *Bioagro* 17(1): 41-46.
 10. Martelo, M. 2003. La precipitación en Venezuela y su relación con el sistema climático. Caracas. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales. 72 p. <https://www.scribd.com/document/246262516/> (consulta de Dic. 15, 2019).
 11. Martelo, M. y M. Perez . 2010. Estudio del impacto del cambio climático sobre la agricultura y la seguridad alimentaria en Venezuela. INIA. Caracas. <http://www.fao.org/3a-ax365s.pdf> (consulta de Dic. 15, 2019).
 12. MARNR (Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables). 2005. Primera comunicación nacional en cambio climático de Venezuela. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Caracas. 164 p. <https://unfccc.int/resource/docs/natc/vennc01> (consulta de Dic. 15, 2019).
 13. Olivares, B., R. Hernández, R. Coelho, J.C. Molina y Y. Pereira. 2018. Analysis of climate types: Main strategies for sustainable decisions in agricultural areas of Carabobo, Venezuela. *Scientia Agropecuaria* 9(3): 359- 369.
 14. Olivares, B. y M.L. Zingaretti. 2018. Análisis de la sequía meteorológica en cuatro localidades agrícolas de Venezuela mediante la combinación de métodos multivariados. *UNED Research Journal* 10(1): 181-192.
 15. Olivares, B., R. Parra, A. Cortez y M.F. Rodríguez. 2013. Application of statistics procedures for the quality control of the monthly rainfall series in the Venezuelan Oriental Plains. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)* 30(3): 367-391.
 16. Parra, R. y A. Cortez. 2005. Control de calidad de series de precipitación de las series de precipitación del INIA Venezuela en el periodo 1970-2000. *Rev. Arg. Agrometeorología* 5-6: 63-73.
 17. Pire, R. y R. Rodríguez. 2007. Evapotranspiración referencial (Eto) medida vs estimada en Tarabana (10° 01' N), estado Lara, Venezuela. *Revista Unellez Ciencia y Tecnología* 25: 58-66.
 18. Quereda, J., E. Montón, B. Mollá y M. Quereda. 2016. Evaluación de los recursos hídricos en el sistema hidrográfico Mijares-La plana. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 70: 169-182.
 19. Rodríguez, M.F., A. Cortez, B. Olivares, J.C. Rey, R. Parra y D. Lobo. 2013. Análisis espacio temporal de la precipitación del estado Anzoátegui y sus alrededores. *Agronomía Tropical* 63 (1-2): 57-65.
 20. Samper, F. y J. Carrera. 1990. Geo-estadística. Aplicaciones a la Hidrogeología Subterránea. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. 484 p.
 21. Silva, M. 2019. Evaluación geoestadística y krigeado de la temperatura del aire en los llanos venezolanos. *Revista de Climatología* (19): 41-49.
 22. Trezza, R. 2008. Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en Venezuela. ¿Cuál método utilizar? *Bioagro* 20: 89-95.
 23. UNESCO (2010). Atlas de Zonas Áridas de América Latina y el Caribe. Dentro del marco del proyecto Elaboración del Mapa de Zonas Áridas, Semiáridas y Subhúmedas de América. CAZALAC. Documentos del PHI-LAC. No 25.