

## ARTÍCULO ORIGINAL

# Valoración de las incertidumbres en la estimación de la evapotranspiración de referencia en Cuba

## *Assessment of uncertainties in estimating reference evapotranspiration in Cuba*

Alberto A. Méndez Jocik<sup>1</sup>, Oscar Solano Ojeda<sup>2</sup> y Daniel Ponce de León<sup>3</sup>

**RESUMEN.** En el trabajo se valora el nivel de incertidumbre de la estimación de la evapotranspiración de referencia en Cuba, mediante la cuantificación de los errores propagados en modelos numéricos y por la interpolación espacial mediante métodos estocásticos y probabilísticos.

**Palabras clave:** riego, interpolación, propagación de errores, modelos numéricos.

**ABSTRACT.** The paper assesses the level of uncertainty in the estimation of reference evapotranspiration in Cuba, by quantifying the errors propagated in numerical models and spatial interpolation using stochastic and probabilistic methods.

**Keywords:** irrigation, interpolation, error propagation, numerical model.

### INTRODUCCIÓN

En 1990 la FAO reúne un panel de 14 expertos de alto nivel, miembros de la Comisión Internacional de Riego y Drenaje (ICID), la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), y las principales universidades, para evaluar los procedimientos de estimación de la evapotranspiración (*ET*) bajo diversas condiciones climáticas en el mundo. El estudio consistió en comparar con lisímetros más de 110 fórmulas empíricas para la determinación de la evapotranspiración de referencia (*ET<sub>o</sub>*).

El panel de expertos recomendó la adopción del método de la FAO-PM como el único método estandarizado para el cálculo de la *ET<sub>o</sub>* ya que ha sido reportado por los equipos de investigación como aquel que produce resultados relativamente exactos en climas áridos y en húmedos (Allen *et al.*, 2006).

A partir de estos estudios Cuba decide adoptar la aplicación del método, el cual requiere de observaciones meteorológicas. Como alternativa, el IIRD y el Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET), propusieron la utilización de la Red Nacional

de Estaciones con fines de planificación del riego (Cisneros *et al.*, 2004).

El INSMET, publicó la zonificación de la evapotranspiración de referencia (*ET<sub>o</sub>*) en Cuba para series decadales históricas (Solano *et al.*, 2003).

Méndez *et al.* (2008) a partir de estos estudios determinaron la variabilidad espacial de la *ET<sub>o</sub>*. Como resultado se obtuvieron mapas de intervalos de confianza y establecieron zonas de incertidumbre, donde la red meteorológica de Cuba no es lo suficientemente densa que posibilite hacer interpolaciones espaciales confiables, requerida para la planificación de los regadíos. El coeficiente de variación de la estimación de la *ET<sub>o</sub>* osciló desde un 5% hasta un 35% en un rango de 0.32-1.47 mm d<sup>-1</sup>, informando, que el 81.76% de las áreas tienen un coeficiente de variación de un 30%, equivalente a sesgos de 0.44 mm d<sup>-1</sup>, considerados significativos por el porcentaje de áreas que abarcan.

Por este motivo se realiza el siguiente trabajo que tiene como objetivo evaluar y cuantificar los niveles de incertidumbre en la estimación de la *ET<sub>o</sub>*.

**Recibido** 16/02/11, aprobado 30/01/12, trabajo 25/12, artículo original.

<sup>1</sup> Dr. C., J Dpto. Geomática ENPA, Edificio MINAG, Piso 10. Conil esq. Carlos M. Céspedes, Nuevo Vedado, Plaza de la Revolución, La Habana, Cuba, E-✉: [mendez@enpa.minag.cu](mailto:mendez@enpa.minag.cu)

<sup>2</sup> Dr. C., Inv. Titular, INSMET, Instituto de Meteorología, Apartado 17032, Código Postal: 11700, La Habana, Cuba.

<sup>3</sup> Dr. C., Prof. Titular, UNAH, San Antonio de las Vegas, Calle 18 No. 503 entre 5 y 7, Código Postal : 32700, Provincia La Habana, Cuba.

## MÉTODOS

El marco geográfico de la investigación abarca el territorio de Cuba y la Isla de la Juventud. Para el estudio se seleccionaron las bases de datos decadales de 65 estaciones meteorológicas de la red del INSMET, correspondientes al año 2005, de estimaciones de la evapotranspiración de referencia, determinadas a partir de ecuación de la FAO-PM ajustadas a las condiciones del país.

El año 2005 se seleccionó por el comportamiento de las precipitaciones respecto al valor medio del período de referencia de 1961 - 1990, definido con períodos húmedos y secos con máximos y mínimos que permiten evaluar la información para valores extremos de la serie.

Para desarrollar el objetivo propuesto, el trabajo fue estructurado en 2 etapas:

### Evaluación de los métodos actuales de estimación espacial de la ETo en Cuba

Cuantificación de los errores propagados al modelar por métodos numéricos

Para cuantificar los errores producidos por la estimación espacial de la ETo se utilizó el método de validación cruzada (Chiles y Delfiner, 1999; Olea, 1999), mediante la selección de un conjunto de datos no utilizado en la estimación espacial (datos control).

En el trabajo se proponen dos escenarios de investigación:

*1<sup>er</sup> Escenario para evaluar los errores producidos al generalizar la ETo cuando se realiza una interpolación por los métodos de Distancia inversa ponderada y Kriging ordinario.*

En Cuba han sido utilizados los métodos de interpolación de Distancia inversa ponderada (González y Gagua, 1979; Ramírez, 1989; Solano *et al.*, 2003) y métodos probabilísticos o geoestadísticos como el método del Kriging (Hernández *et al.*, 2001; Zamora y Chaterlán, 2001; Chaterlán *et al.*, 2002; González *et al.*, 2004).

*2<sup>do</sup> Escenario para estimar los errores producidos por la incidencia de la distancia entre las muestras (estaciones meteorológicas) en ambos métodos.*

En el primer escenario investigativo se utilizó el 100% de la población de datos independientes de la red de estaciones meteorológicas. Teniendo en cuenta los valores conocidos en N lugares de observación del conjunto de datos originales, la validación cruzada permite evaluar la calidad relativa de la red de puntos y la estimación de los errores de interpolación. Los errores se calcularon mediante la eliminación de la primera observación del conjunto de datos; con la restante información existente y el algoritmo especificado, se interpoló un valor en el lugar de la primera observación, el error de interpolación se calculó como: Error = valor interpolado - valor observado. Se realizó una secuencia de muestreos con reposición, la primera observación se colocó de nuevo en el conjunto de datos y la segunda observación se eliminó del conjunto de datos. Con los datos restantes (incluyendo la primera observación), y el algoritmo especificado, se interpoló un valor en el lugar del

segundo término, el proceso se repitió hasta la observación N. La interpolación se realizó por el método de Distancia inversa ponderada (Webster y Oliver, 1992) y Kriging ordinario (Isaaks y Srivastava, 1989; Deutsch y Journal, 1998), la validación cruzada entre los valores iniciales y los interpolados permitió estimar el error medio (EM), el error medio cuadrático (EMC) (Voltz *et al.*, 1997) y la raíz del error medio cuadrático (REMC) (Minasny *et al.*, 1999).

La validación cruzada es un método objetivo para evaluar la calidad de los resultados obtenidos de los métodos de interpolación, y es utilizada para comparar la calidad relativa de dos o más métodos candidatos (Chiles y Delfiner 1999). Para la realización de la validación cruzada se empleó el programa SURFER Versión 8.01 (Golden Software, 2002).

El segundo escenario investigativo tiene como objetivo analizar el efecto producido por la distancia en la interpolación al hacer estimaciones espaciales con los métodos de Distancia inversa y Kriging ordinario, para lo cual se realizó un muestreo aleatorio simple mediante la técnica *Jackknife* recomendada para estimaciones de modelos y estimaciones espaciales (Cressie, 1993). Se utilizó el mapa digital base de Cuba escala 1:250 000 (GEOCUBA, 2006) y la red de estaciones del INSMET, con un tamaño de muestra del 10% de la población (González *et al.*, 1998). A cada estación meteorológica se le asignó un número de orden (1-65); mediante una generación de números aleatorios se seleccionaron las estaciones a evaluar (8 muestras). De estas muestras se extrajeron los valores de errores en función de la distancia. El espaciamiento entre estaciones fue determinado mediante una matriz cruzada de las diferencias de las coordenadas entre las estaciones meteorológicas muestreadas.

### Cuantificación de los errores propagados al modelar por métodos numéricos

Para la determinación de las incertidumbres en análisis puntuales en cada celda, se aplicó el método de aproximación analítica de errores en modelos numéricos, (Burrough y McDonnell, 1998) el proceso fue automatizado mediante la creación de macros en Microsoft Office Excel 2003 y lotes de comandos del sistema de información geográfica ILWIS Versión 3.4 (ITC y 52North, 2007).

El error relativo se determinó como el producto del error absoluto entre el valor medio (Yakovliev, 1981).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para mostrar y cuantificar los errores propagados, al modelar por métodos numéricos e interpolar los resultados por técnicas empleadas en Cuba, se presentan los resultados de las valoraciones en de dos escenarios de investigación.

### Evaluación de los métodos actuales de estimación espacial de la ETo en Cuba

*1<sup>er</sup> Escenario para evaluar los errores producidos al interpolar la ETo por los métodos de Distancia inversa ponderada y Kriging ordinario.*

Las Figuras 1 y 4 muestran los mapas de  $ET_o$  promedio decadal correspondiente al año 2005, obtenidos producto de la interpolación realizada por el método de Distancia inversa ponderada y Kriging ordinario.

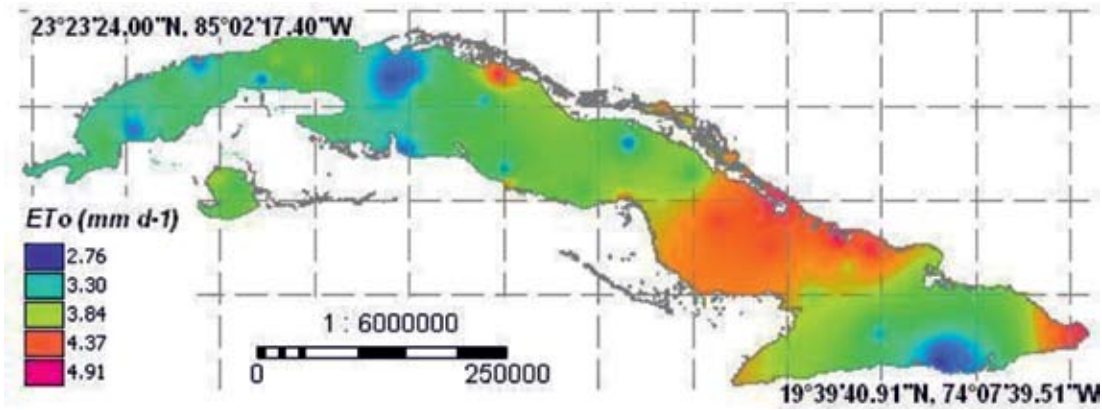


FIGURA 1. Mapa decadal del año 2005 de  $ET_o$  interpolada por el método de distancia inversa ponderada.

Como alternativa para solucionar la modelación del Kriging ordinario dada la insuficiencia de datos de estaciones meteorológicas (65) se generó un semivariograma con un modelo de tendencia externa (Figura 2) a partir de técnicas de interpolación híbridas, las cuales utilizan una combinación de herramientas geoestadísticas y variables externas (Müller *et al.*,2003).

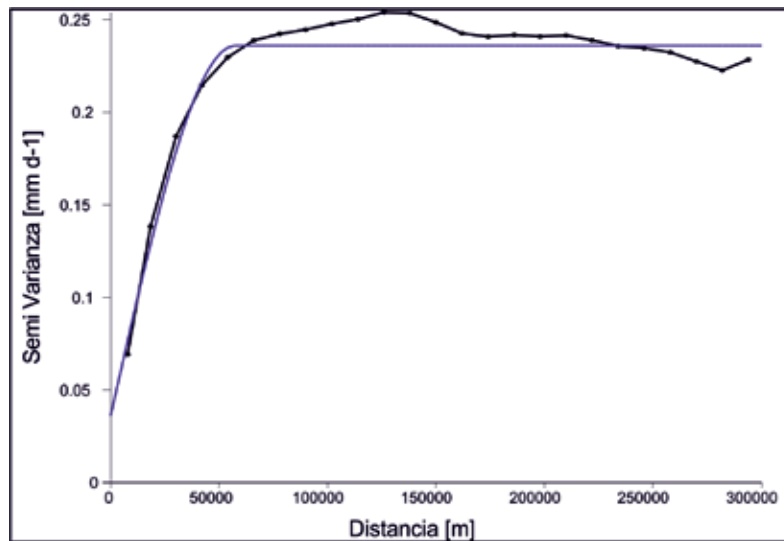


FIGURA 2. Semivariograma para la estimación mediante el método de Kriging ordinario.

La variable externa procesada consistió en un mapa de evapotranspiración de resolución espacial de 1000 m (Figura 3) obtenida mediante técnicas de teledetección (Méndez *et al.*,2009).

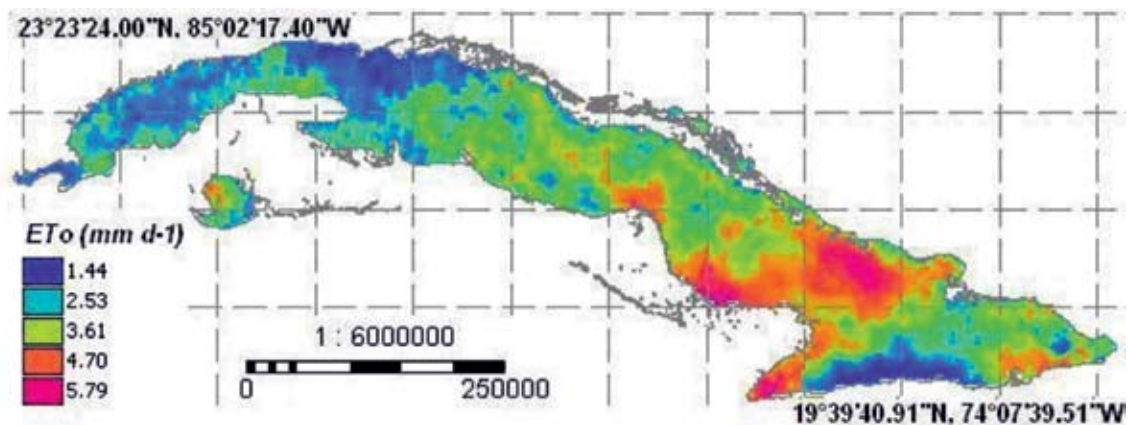


FIGURA 3. Mapa de imagen satelital decadal del año 2005 de  $ET_o$  utilizada como variable externa para generar el semivariograma.

Como resultado de este proceso y utilizando los procedimientos básicos de interpolación de Kriging ordinario con tendencia externa se obtuvo el mapa de *ETo* de la Figura 4.

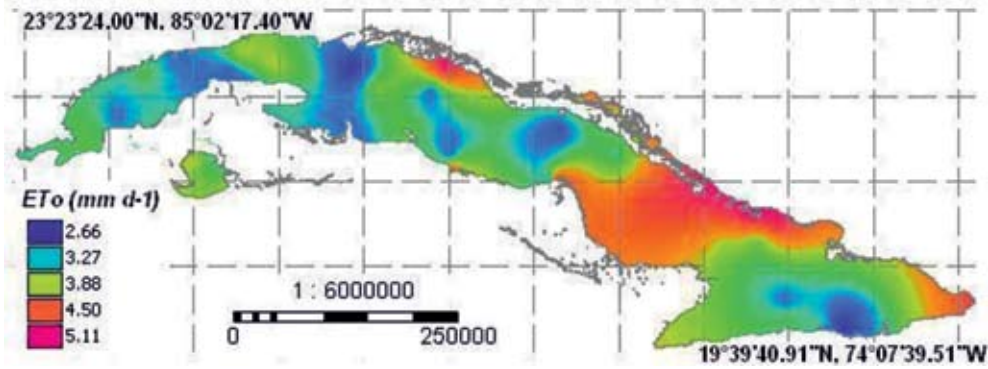


FIGURA 4. Mapa decadal del año 2005 de *ETo* interpolada por el método de Kriging ordinario.

Los resultados visuales de la tendencia de la *ETo* obtenidos en ambos mapas son coherentes y se corresponden con los reportados por algunos autores cubanos que han utilizado el método de Distancia inversa ponderada y métodos probabilísticos o geostatísticos como el método del Kriging. Para verificar la correspondencia entre la distribución espacial de la *ETo* obtenida por los métodos de Distancia inversa ponderada y Kriging ordinario, con tendencia externa, se sustrajeron los mapas de valores absolutos obtenidos por ambos métodos, los resultados se muestran en la Figura 5.

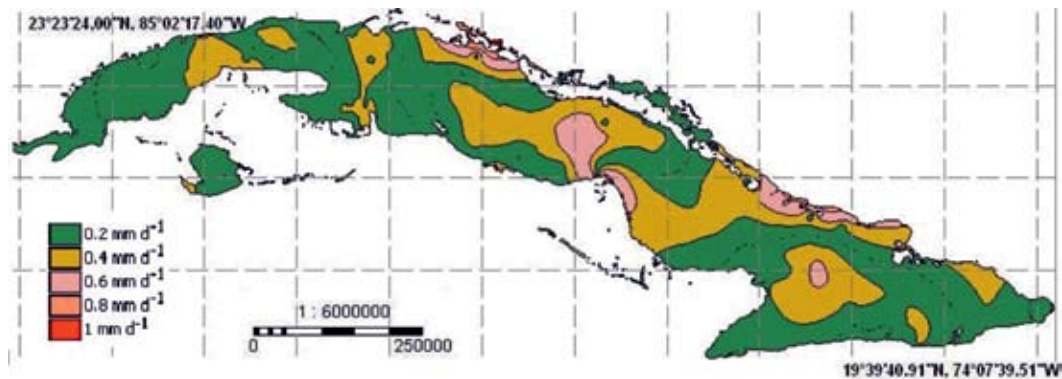


FIGURA 5. Mapa diferencial decadal del año 2005 de *ETo* interpolada por el método de Kriging ordinario con tendencia externa y Distancia inversa ponderada.

El análisis estadístico del mapa diferencial decadal de *ETo* interpolado por medio del Kriging ordinario con tendencia externa y Distancia inversa ponderada se muestra en el histograma de la Figura 6, se observa que el 93.4% de las diferencias entre los métodos oscila entre 0.2 y 0.4 mm d<sup>-1</sup>, y representan un 5 y 11% respecto al valor medio.

Para conocer cuanto difieren estos métodos de los datos control se realizó una validación cruzada.

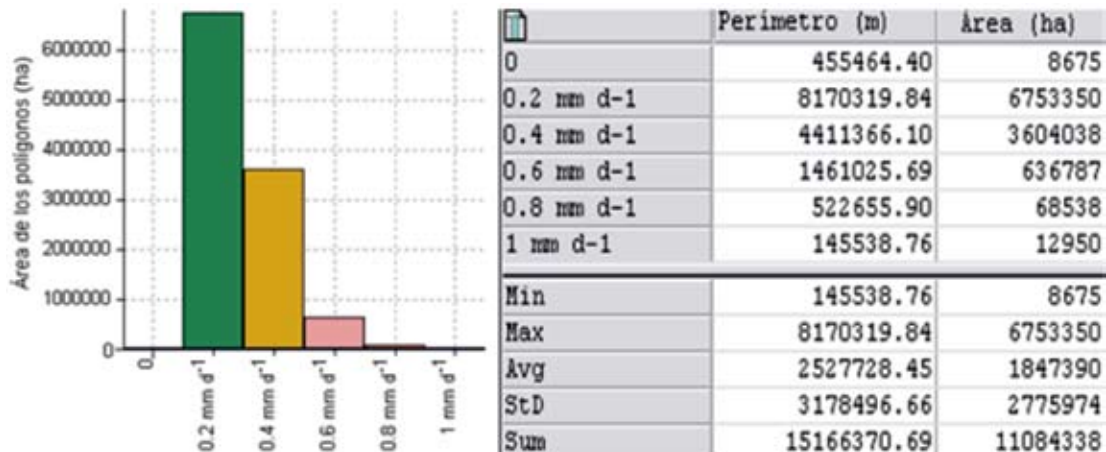


FIGURA 6. Estadística del mapa diferencial decadal del año 2005 de *ETo* interpolada por el método de Kriging ordinario con tendencia externa y Distancia inversa ponderada.

En las Figuras 7 y 8 se observa que la distribución de los valores de *ET<sub>o</sub>* para los métodos de interpolación evaluados presentan una correspondencia mayor con los datos control en el caso del Kriging ordinario con tendencia externa, corroborado por los resultados de la Tabla 1, donde se muestran desviaciones estándar superiores en el caso de Distancia Inversa ponderada, los sesgos producto de la aplicación de la interpolación espacial variaron en rangos de  $\pm 0.364 \text{ mm d}^{-1}$  y de  $\pm 0.303 \text{ mm d}^{-1}$  de los valores de láminas de evapotranspiración estimada. Los errores medios absolutos se cuantifican en  $\pm 10$  y  $8\%$  inferiores en un  $\pm 2\%$  en las estimaciones realizadas por el método del Kriging ordinario, los errores equivalen a  $\pm 3.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  y  $\pm 3.0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ . El método de Kriging ordinario como era de esperar estimó los valores de forma más exacta que el método de Distancia inversa ponderada tal como lo reportan algunos autores como Webster y Oliver (1992).

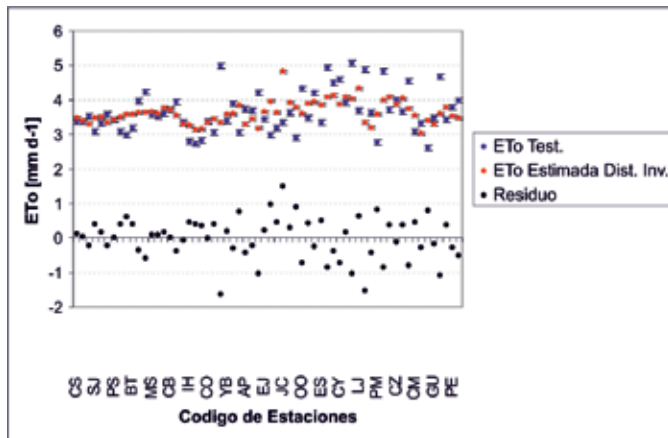


FIGURA 7. Validación cruzada de la *ET<sub>o</sub>* con el método de interpolación espacial de Distancia inversa ponderada.

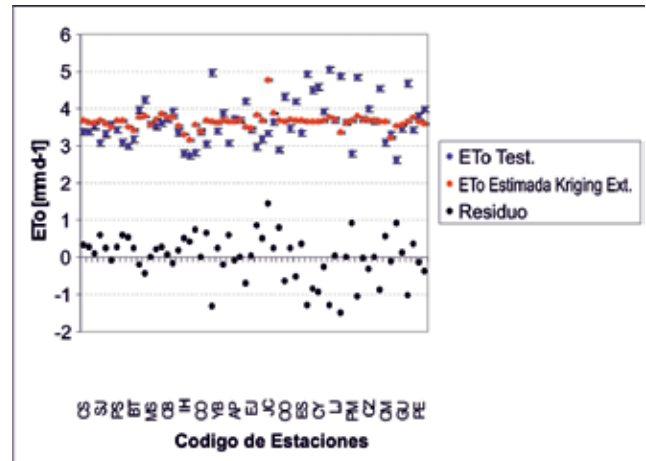


FIGURA 8. Validación cruzada de la *ET<sub>o</sub>* con el método de interpolación espacial Kriging ordinario con tendencia externa.

**TABLA 1. Evaluación de los errores obtenidos producto de la estimación espacial de la *ET<sub>o</sub>* Kriging con tendencia externa**

Parámetros	Distancia Inversa		Kriging con T.E	
	<i>ET<sub>o</sub></i> estimada	Residuos	<i>ET<sub>o</sub></i> estimada	Residuos
Mínimo	3.023	-1.631	3.150	-1.506
Mediana	3.590	0.076	3.661	0.046
Máximo	4.817	1.486	4.764	1.432
Media	3.627	-0.022	3.646	-0.004
Desviación estándar	0.321	0.603	0.197	0.610
Varianza	0.103	0.364	0.039	0.372
Coefficiente de variación	0.089	-1.000	0.054	-1.000
Coefficiente de asimetría	0.864	-0.383	2.352	-0.524
Error medio absoluto [ $\text{mm d}^{-1}$ ]	$\pm 0.364$		$\pm 0.303$	
Error medio relativo [%]	$\pm 10$		$\pm 8$	
Error medio cuadrático [ $\text{mm}^2 \text{d}^{-2}$ ]	$\pm 0.364$		$\pm 0.372$	
Raíz del error medio cuadrático [ $\text{mm d}^{-1}$ ]	$\pm 0.603$		$\pm 0.610$	

Es relevante considerar en futuros trabajos en Cuba los resultados de la cuantificación de los errores obtenidos mediante estas técnicas de interpolación utilizadas en la estimación espacial de la *ET<sub>o</sub>*.

El método determinístico de Distancia inversa ponderada no dispone de la potencialidad de estimar los errores producto de la interpolación y no permite medir la calidad con que estiman los resultados a diferencia de otros métodos estocásticos como el método del Kriging, que informa de las imprecisiones (desviación estándar) y permite elaborar mapas de intervalos de confianza (Sheather, 1986), útiles para los usuarios interesados en medir el

nivel de “veracidad” del producto y conocer las posibles zonas de “incertidumbres” e informar a su vez del nivel de calidad de los resultados para las recomendaciones de su utilización.

El método del Kriging presupone considerar aspectos como la naturaleza de los datos a interpolar, cantidad de información necesaria y la estructura espacial de las variables, lo cual no siempre se ha tenido en cuenta en la generación de los mapas en Cuba y ha conducido a la elaboración de semivariogramas con datos insuficientes, lo cual metodológicamente no es correcto y a su vez introduce errores con un aumento de las incertidumbres en la estimación de la *ET<sub>o</sub>*.



Gascuel (1994) al estudiar la variabilidad en las estimaciones espaciales mediante métodos geoestadísticos, consideró necesario para la modelación adecuada del semivariograma unos 150 datos, mientras Webster y Oliver (1992) afirman que esta cantidad es el límite inferior de datos y recomiendan un tamaño de muestra de unos 225.

Martínez-Cob y Faci (1994) en un estudio para cartografiar la variabilidad espacial agronómica mediante técnicas geoestadísticas univariada y multivariada, estimar las mismas en los vértices de una red regular de puntos con el objetivo de elaborar mapas de isolíneas en la Unidad de Suelos y Riegos del Servicio de Investigación Agraria de Zaragoza España, realizaron un análisis de la variabilidad espacial de: 1) variables agrometeorológicas: la evapotranspiración y la precipitación y 2) la salinidad del suelo. Los resultados obtenidos concluyeron que se necesita un mínimo de diez años de los datos meteorológicos decadales, registrados en 158 estaciones de la red para estimar la *ET<sub>0</sub>* y diez años de los datos de precipitación decadal registrados en 182 estaciones de la mencionada red, así como diez muestras por hectárea de mediciones de conductividad eléctrica del extracto saturado medio del perfil del suelo, obtenido como la media ponderada del valor de la variable en cada horizonte con respecto a su espesor, para obtener semivariogramas coherentes y efectivos

con una mínima incertidumbre en un intervalo de confianza de la media de un 95% de probabilidad.

Méndez *et al.* (2008) en un estudio espacio-temporal de la evapotranspiración de referencia en Cuba estimaron el número de datos necesarios para un intervalo de confianza de la media de un 95% de probabilidad, informan que con la actual densidad y distribución espacial de las estaciones meteorológicas de Cuba, se incurren en desviaciones de la *ET<sub>0</sub>* de  $\pm 1.56 - \pm 2.611$  mm de lámina en estaciones clasificadas en diferentes alturas sobre el nivel medio del mar entre 0-15 m y 86-1500 m respectivamente, concluyeron que para obtener un margen de error adecuado (95% de probabilidad) implica que deben existir teóricamente en el país unas 684 estaciones meteorológicas distribuidas en un radio de unos 200-400 km en dependencia de su altitud.

Para evaluar la influencia que produce la distribución espacial de las estaciones meteorológicas en los valores de *ET<sub>0</sub>* se presentan los resultados en el siguiente escenario de estudio.

2<sup>do</sup> Escenario para estimar los errores producidos por la incidencia de la distancia entre las muestras (estaciones meteorológicas) en ambos métodos.

En las Tablas 2 y 3 se contabilizan los errores producto de la distancia de interpolación para los métodos de interpolación de Distancia inversa ponderada y Kriging ordinario.

**TABLA 2. Matriz cruzada de errores por el método de Distancia inversa ponderada**

EST.	PS	TP	JG	YB	SS	FL	VG
TP	0.596						
JG	0.339	0.257					
YB	0.187	0.409	0.152				
SS	0.438	0.158	0.099	0.251			
FL	0.418	0.178	0.079	0.231	0.02		
VG	0.803	0.207	0.464	0.616	0.365	0.385	
PM	0.802	0.206	0.464	0.616	0.365	0.384	0.001

**TABLA 3. Matriz cruzada de errores por el método de Kriging ordinario**

EST.	PS	TP	JG	YB	SS	FL	VG
TP	0.314						
JG	0.086	0.228					
YB	0.067	0.381	0.153				
SS	0.155	0.159	0.069	0.222			
FL	0.548	0.234	0.462	0.615	0.393		
VG	0.877	0.562	0.79	0.943	0.721	0.329	
PM	0.513	0.199	0.427	0.58	0.358	0.035	0.363

Al relacionar la matriz de distancia con la de errores producidos por los métodos de interpolación, se observa una tendencia a una relación positiva y directamente proporcional entre los errores y la distancia que separan las estaciones meteorológicas, lo que permite afirmar que con el aumento de la distancia en ambos métodos de interpolación, la tendencia es de aumentar el error en tasas de 0.14 y 0.13 mm d<sup>-1</sup> por cada 100 km. En la Tabla 4 se comparan los resultados obtenidos.

**TABLA 4. Errores de interpolación espacial estimados en función de la distancia de muestras**

Métodos	<i>ET<sub>0</sub></i> media [mm d <sup>-1</sup> ]	Error medio absoluto [mm d <sup>-1</sup> ]	Tasa de error absoluto [mm d <sup>-1</sup> 100 km]
Distancia inverse ponderada	3.579	± 0.422	± 0.14
Kriging ordinario	3.512	± 0.385	± 0.13

Los resultados se corresponden con lo referido por algunos autores (Webster y Oliver 2001) que aseguran que método de Distancia inversa ponderada asume que cada punto medido tiene una influencia local que disminuye con la distancia; en el método se le asigna una mayor ponderación a los puntos cercanos a la posición a predecir, que los que se encuentran alejados, de ahí el nombre de esta variante de interpolación.

El método del Kriging ordinario es más exacto, como lo reporta la literatura ya que interpola con mínima varianza, a pesar de que los puntos más alejados se encuentran afectados por tasas de errores mayores (Goovaerts, 2001).

Las tasas de error por distancia de ambos métodos de interpolación, no demuestran una alta diferencia entre ellos, pero sí un incremento de los mismos en ambos casos a medida que aumenta la distancia entre estaciones.

Las Figuras 9 y 10 representan una tendencia visual de un aumento directo y positivo de los errores de interpolación asociados a la distancia de las muestras (estaciones meteorológicas), aunque estadísticamente no se pudo establecer correlaciones y

regresiones con coeficientes de determinación altos que permitiera probar estas relaciones.

### Incertidumbres por la propagación de errores en los modelos numéricos

Los resultados de los errores obtenidos mediante soluciones de aproximación analítica para cuantificarlos al modelar por métodos numéricos en el desarrollo matemático de la ecuación de la FAO-PM se muestra en la Tabla 5.

TABLA 5. Errores en modelos numéricos

Errores	U/M	FAO-PM
Error absoluto mínimo	mm d <sup>-1</sup>	± 0.054
Error absoluto máximo	mm d <sup>-1</sup>	± 1.707
Error absoluto promedio	mm d <sup>-1</sup>	± 0.345
Error relativo mínimo	%	± 2
Error relativo máximo	%	± 48
Error relativo promedio	%	± 10

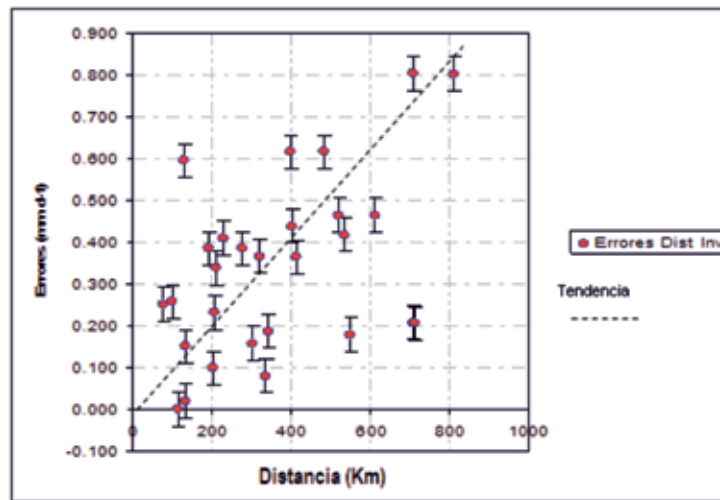


FIGURA 9. Relación error y distancia entre estaciones. Método de distancia inversa ponderada.

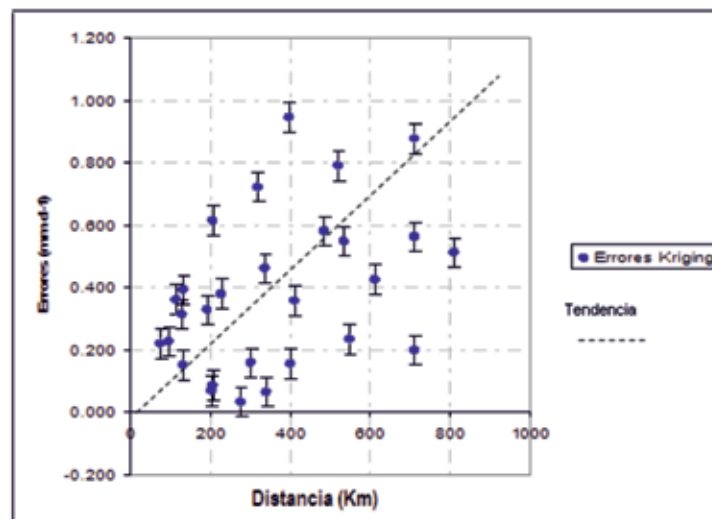


FIGURA 10. Relación error y distancia entre estaciones. Método de Kriging ordinario.

El valor del error absoluto se encuentra entre  $\pm 0.054$  y  $1.707 \text{ mm d}^{-1}$ , con un error relativo promedio en el modelo de la FAO-PM de un 10%, este valor está influenciado por la complejidad matemática del desarrollo de ecuación FAO-PM, ya que la mayoría de los términos que la componen no se obtienen a partir de mediciones directas en las estaciones meteorológicas.

En la Tabla 6 se realiza una valoración del presupuesto total de errores (producto de la interpolación espacial y de la propagación de errores en los modelos numéricos), los errores relativos oscilan entre  $\pm 8-10\%$  en dependencia de los métodos utilizadas en Cuba.

En el presupuesto final de errores se reportan valores de  $\pm 0.709$  y  $\pm 0.648 \text{ mm d}^{-1}$  en los métodos de Distancia inversa ponderada y Kriging ordinario respectivamente.

Considerando que la evapotranspiración se expresa en lámina de agua, la propagación de errores en valores de norma de riego es del orden de diez metros cúbicos por hectárea ( $1\text{mm}-10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ), que representa en volumen de agua para el riego un sesgo expresado en déficit o sobreestimación de unos  $\pm 17.574.278-19.228.647 \text{ m}^3$  por cada riego, mayor en el caso de Distancia inversa ponderada, considerando siete días de riego promedio y un área de regadío con valor de uso en el país de 387 440 ha (Rafols y Alfonso, 2009).

**TABLA 6. Presupuesto de errores de las incertidumbres en la estimación de la ETo\***

Errores	Errores de interpolación interpolación		Errores numéricos FAO-PM	Presupuesto total de errores	
	Dist. inv.	Kriging		Dist. inv.	Kriging
Error medio absoluto [mm d <sup>-1</sup> ]	$\pm 0.364$	$\pm 0.303$	$\pm 0.345$	$\pm 0.709$	$\pm 0.648$
Error medio relativo [%]	$\pm 10$	$\pm 8$	$\pm 10$	$\pm 20$	$\pm 18$

\*Dist. inv.: método de interpolación espacial de distancia inversa ponderada, Kriging: método de interpolación espacial Kriging ordinario.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y el criterio dado por algunos autores como Obregón y Fragala (2006), que afirman que para modelar la ET como sistema complejo en condiciones de incertidumbre, donde las funciones de transferencia no tienen un carácter lineal y los parámetros de entrada de los modelos tienen una alta anisotropía espacial y heterogeneidad, la estimación espacial mediante procedimientos estadísticos clásicos pueden ser inexactos.

## CONCLUSIONES

La estimación espacial de la evapotranspiración de referencia por medio de modelos empíricos desarrollados en Cuba, cuantifican errores relativos de  $\pm 18-20\%$  en dependencia de los métodos utilizados, lo que representa en volumen de agua para el regadío, sesgos expresados en déficit o sobreestimación de unos  $\pm 17\ 574\ 278-19\ 228\ 647 \text{ m}^3$  por cada riego.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; L. PEREIRA; D. RAES & M. SMITH: *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, 298pp., Estudio FAO Riego y Drenaje No. 56 (Segunda edición). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 2006.
- BURROUGH, P. & R. MCDONNELL: *Principles of Geographical Information Systems*, 333pp., Oxford University Press, Oxford, 1998.
- CISNEROS, E.; P. GONZÁLEZ y O. SOLANO: *El Servicio de Asesoramiento al Riego una necesidad del futuro*, 14pp., Informe Técnico IIRD. Doc. 91, La Habana, 2004.
- CRESSIE, N.: *Statistics for spatial data*, 90pp., John Wiley Sons, New York, 1993.
- CHATERLÁN, Y.; E. ZAMORA y G. LÓPEZ: "Distribución espacial de la evapotranspiración en Cuba", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 11(1): 67-70, 2002.
- CHILES, J. & P. DELFINER: *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*, 695pp., John Wiley and Sons, New York, 1999.
- D'AGOSTINO, R. & M. STEPHENS: *Goodness-of-Fit Techniques*, 25pp., Marcel Dekker, USA, 1986.
- DEUTSCH, C. & A. JOURNAL: *GSLIB. Geostatistical software library and user's guide*, 369pp., 2nd. Oxford University Press, New York, 1998.
- GASCUEL, O.: "Variability of variograms and spatial estimates due to soil sampling: a case study", *Geoderma*, 62: 165-182, 1994.
- GEOCUBA: *Mapa digital de Cuba escala 1: 250 000*, GEOCUBA, La Habana, 2006.
- GONZÁLEZ, E. y G. GAGUA: Nuevo estudio sobre la evaporación en Cuba, *Voluntad Hidráulica*, 51: 23-34, 1979.
- GONZÁLEZ, F.; R. MOREJÓN; C. RODRÍGUEZ; A. CABRERA y J. REYNALDO: "El tamaño de la muestra en la estimación de la varianza poblacional" *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 7(3): 65-67, 1998.
- GONZÁLEZ, F.; T. LÓPEZ, T.; P. GONZÁLEZ y E. CISNEROS: "Uso del GeoConcept en la planificación de la finca de transferencia de tecnología del Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje". *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 13(2): 47-49. 2004.
- GOLDEN SOFTWARE INC.: *SURFER. Contouring and 3D surface mapping for scientists and engineers, User's Guide*, 61pp., Colorado, USA, 2002.
- GOOVAERTS, P.: "Geostatistical modeling of uncertainty in soil science", *Gederma*, 103: 3-26, 2001.



16. HERNÁNDEZ, G.; R. CABRERA; M. LEÓN y E. ZAMORA: "Distribución espacial de las necesidades de agua para el cultivo del tomate", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 10(3): 77-80, 2001.
17. ISAAKS, E. & R. SRIVASTAVA: *Applied Geostatistics*, 561pp., Oxford University Press, Inc. New York, 1989.
18. ITC, 52North, ILWIS. *Integrated Land and Eater Information System [en línea] Disponible en: <http://www.itc.nl> [Consulta: mayo 18 2007]*.
19. MARTÍNEZ-COB, A. y J. FACI: "Análisis geoestadístico multivariado, una solución para la interpolación espacial de la evapotranspiración y la precipitación", *Riegos y Drenajes XXI*, 78: 15-21, 1994.
20. MÉNDEZ, J.; E. GARCÍA O. SOLANO: *Utilización de modelos geostatísticos y técnicas de redes neuronales artificiales en la evaluación espacio temporal de la evapotranspiración en Cuba. Memorias del XIII Simposio Internacional de la Sociedad Latino Americana de Percepción Remota Satelital SELPER 2008 Habana. Cuba. Artículo C-58. ISBN 978-959-247-063-7. Editorial Obras, [en línea] 2008, Disponible en: <http://www.selpercuba.unaicc.cu> / [Consulta: septiembre 18 2008]*.
21. MÉNDEZ, J., E. GARCÍA y O. SOLANO: Estimación de la evapotranspiración mediante procesamiento de imágenes satelitales y redes neuronales artificiales. En: **Convención Internacional Ingeniería Agrícola 2009**, I Simposio de Geomática Aplicada a la Ingeniería Agrícola, Artículo G-4, ISBN 978-959-282-088-1, Bayamo, Cuba, 2009.
22. MINASNY, B.; A. MCBRATNEY; L. KEITH & J. BRISTOW: "Comparison of different approaches to the development of pedotransfer Journal functions for water-retention curves", *Geoderma*, 93: 225-253, 1999.
23. MÜLLER, J.; J. LAGRANGE & R. WEIBEL: *GIS and Generalizations*, 96pp., Methodological and Practical Issues, London, Taylor and Francis, London, 2003.
24. OBREGÓN, N. & F. FRAGALA: Some applications of artificial intelligent systems in hydroinformatics. In: **Eighteen International Joint Conferences on Artificial Intelligence**, EDSS03 Workshop, pp. 9-15, Acapulco, Mexico, 2006.
25. OLEA, R.: *Geostatistics for Engineers and Earth Scientists*, 303pp., Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.
26. RAFOLS, L. y A. ALFONSO: *Balance Nacional de áreas bajo riego 2009*, 75pp., Ministerio de la Agricultura de Cuba, Departamento de Riego y Drenaje, La Habana, Cuba, 2009.
27. RAMÍREZ, E.: "La distribución de la evapotranspiración de referencia en Cuba", *Ciencia y Técnica en la Agricultura, Serie Riego y Drenaje*, Vol. 1/21, 1989.
28. SHEATHER, H.: "Confidence intervals based on interpolated order statistics", *Statistics and Probability Letters*, 4: 75-79. 1986.
29. SIVAKUMAR, M. & R. MOTHA: *Managing weather and climate risks in agriculture*, 503pp., Springer Science and Business Media, USA, 2007.
30. SOLANO, O., C. MENÉNDEZ; R. VÁZQUEZ y J. MENÉNDEZ: *Zonificación de la evapotranspiración de referencia en Cuba*, Atlas Agrometeorológico de disponibilidades hídricas para una agricultura de secano, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba, 2003.
31. VOLTZ, M., P. LAGACHERIE X. LOUCHART: "Predicting soil properties over a region using sample information from a maid reference area". *European Journal of Soil Science*, 48: 19-30, 1997.
32. WEBSTER, R. & M. OLIVER: "Sample adequately to estimate variograms of soil properties", *Journal of Soil Science*, 43: 177-192, 1992.
33. WEBSTER, R. & M. OLIVER: *Geostatistics for Environmental Scientists, Statistics in Practice*, 271pp., Ed. VicBarnet, John Wiley and Sons, New York, 2001.
34. YAKOVLIEV, G. N.: *Álgebra y Principios del Análisis*, 95pp., Ed. MIR, Moscú, 1981.
35. ZAMORA, E. y Y. CHATERLÁN: "Estudios sobre la evapotranspiración de referencia en Cuba", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 10(3): 87-90, 2001.

*Todos nuestros servicios  
a su disposición*

**BIBLIOTECA ANTONIO MACHADO RUIZ**

**UNIVERSIDAD DE GRANMA (UGR)**