

B-05-2026

Comunicación científico-técnica

Determinación espacial de ETo mediante procedimientos dinámicos apoyado en estaciones agroclimáticas

Spatial determination of ETo through dynamic procedures supported by agroclimatic stations

Autores: Carricondo-Antón, J.M.¹; Garcia-Prats, A.¹; Jiménez-Bello, M.A.¹; Manzano-Juárez, J.²; López-Pérez, E.¹; Pulido-Velazquez, M.¹

¹ Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València, Camino de vera s/n, 46022, Valencia, España. juacaran@upv.es

² Centro Valenciano de Estudios sobre el Riego (CVER), Universitat Politècnica de València, Camino de vera s/n, 46022, Valencia, España.

Resumen:

Este trabajo realiza un cálculo diario, espacialmente distribuido de evapotranspiración de referencia (ETo, mm) en la cuenca del río Júcar en el Este de España, con el objetivo de conocer la variación de ETo entre las estaciones meteorológicas (EM) y la ETo de las parcelas agrícolas (PA). Para disponer de valores de ETo específicos de las PA se han generado mapas que describen la variación espacial de los parámetros meteorológicos (PMet) que conforman la ETo, temperatura media (°C), temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), humedad máxima (%), humedad mínima (%), radiación neta (MJm⁻²día⁻¹) y velocidad del viento a 2m (ms⁻¹).

Los cálculos para una zona de estudio se realizan mediante una técnica de interpolación basada en una regresión lineal. Las variables dependientes son los PMet diarios, temperatura, humedad y viento. Se obtuvieron los PMet del año 2022 de 63 EM del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (www.siar.es), de ellas 13 se utilizaron para validar el modelo. Las variables independientes son las características geográficas de cada EM, longitud (grados), latitud (grados), distancia al mar Mediterráneo (m), radiación solar media (MJd⁻¹), radiación solar media a una distancia de 2.5 y 25km de la EM (MJd⁻¹), elevación (m), elevación a una distancia de 2.5, 5 y 10km de la EM (m), pendiente (%) y orientación donde 0 es el norte (grados).

La radiación solar se obtiene mediante el módulo Radiación Solar de Áreas de ArcGIS (www.arcgis.com).

Una vez realizados los mapas de PMet y radiación solar se calcula la diferencia entre el valor interpolado y el dato observado de la EM. Esta diferencia genera una nube de puntos la cual junto con un Modelo Digital de Elevaciones permite realizar una interpolación de superficies (IS) mediante la metodología *Splines with Tension* integrada en Grass (*Qgis*). Estas IS se restan a los mapas de PMet obtenidos por interpolación, disponiendo ya de PMet corregidos con los cuales se determina la ETo mediante la metodología de Penman-Monteith descrito en el FAO56. También se calcula la diferencia entre la ETo interpolada y la ETo de la EM restando esta IS a la ETo obtenida por la metodología de Penman-Monteith generando una ETo corregida.

Para conocer las diferencias de ETo entre la EM y las PA se realizó el estudio estadístico con 263.413 PA. Las PA se le asignaron a la estación más próxima mediante la aproximación de los Polígonos de Thiessen.

Para la zona de estudio (Cuenca del río Júcar) se obtiene una ETo media anual de las EM de 3.37 mm mientras que la ETo media de las PA es de 3.43 mm produciendo un error relativo del 9.14% con una desviación estándar de 0.15. La ETo media de los valores medios máximos y mínimos de las PA fueron 4.14 mm y 3.02 mm respectivamente generando una diferencia de 1.12 mm de media. Por último, la metodología proporciona una correlación R² de 0.95 y un error absoluto medio de 0.3 mm entre la ETo de las EM y la ETo obtenida por esta metodología. Se puede concluir, a partir de estos valores, que la metodología planteada proporciona unos resultados válidos para la determinación de la ETo. **Palabras clave:** Evapotranspiración de referencia, mapeo ETo, interpolación ETo, meteorología.

Abstract:

This work performs a daily, spatially distributed calculation of reference evapotranspiration (ET_o, mm) in the Júcar river basin in Eastern Spain, with the objective of knowing the variation of ET_o between the meteorological stations (EM) and the ET_o of agricultural plots (PA). To have specific ET_o values of the PA, maps have been generated that describe the spatial variation of the meteorological parameters (PMet) that make up the ET_o, average temperature (°C), maximum temperature (°C), minimum temperature (°C), maximum humidity (%), minimum humidity (%), net radiation (MJm⁻²day⁻¹) and wind speed at 2m (ms⁻¹).

Calculations for a study area are carried out using an interpolation technique based on linear regression. The dependent variables are daily PMet, temperature, humidity and wind. The PMet for the year 2022 were obtained from 63 EM from the Agroclimatic Information System for Irrigation (www.siar.es), of which 13 were used to validate the model. The independent variables are the geographical characteristics of each EM, longitude (degrees), latitude (degrees), distance to the Mediterranean Sea (m), average solar radiation (MJd⁻¹), average solar radiation at a distance of 2.5, 5 and 25km of the EM (MJd⁻¹), elevation (m), elevation at a distance of 2.5, 5 and 10km from the EM (m), slope (%) and orientation where 0 is north (degrees).

Solar radiation is obtained using the Area Solar Radiation module of ArcGIS (www.arcgis.com).

Once the PMet and solar radiation maps have been made, the difference between the interpolated value and the observed EM data is calculated. This difference generates a cloud of points which, together with a Digital Elevation Model, allows surface interpolation (IS) to be carried out using the Splines with Tension methodology integrated into Grass (Qgis). These IS are subtracted from the PMet maps obtained by interpolation, already having corrected PMet with which the ET_o is determined using the Penman-Monteith methodology described in the FAO56. The difference between the interpolated ET_o and the ET_o of the EM is also calculated by subtracting this IS from the ET_o obtained by the Penman-Monteith methodology, generating a corrected ET_o.

To know the differences in ET_o between EM and PA, the statistical study was carried out with 263413 PA. The PA were assigned to the nearest station by approximating the Thiessen Polygons.

For the study area (Júcar River Basin), an average annual ET_o of EM 3.37 mm while the average ET_o of the PA is 3.43 mm, producing a relative error of 9.14% with a standard deviation of 0.15. The mean ET_o of the mean maximum and minimum values were 4.14 mm and 3.02 mm respectively, generating a difference of 1.12 mm on average. Finally, the methodology provides an R² correlation of 0.95 and a mean absolute error of 0.3 mm día⁻¹ between the ET_o of the EM and the ET_o obtained by this methodology. It can be concluded that, once these values are known, the proposed methodology provides valid results for the determination of ET_o.

Keywords: Reference evapotranspiration, ET_o mapping, ET_o interpolation, meteorology.

1. Introducción

La red de estaciones agrometeorológicas automatizadas (REA) han experimentado un gran auge en los últimos años, tanto en el número de estaciones meteorológicas (EM) como en el uso de los datos registrados por estas para el asesoramiento del riego, debido al crecimiento de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC). Cualquier usuario puede acceder a los datos meteorológicos en tiempo real, estando agrupados y disponibles en periodos semihorarios, horarios, diarios, mensuales y anuales.

Este tipo de estación meteorológica suele estar equipada con suficientes sensores (sondas de temperatura y humedad relativa, anemómetro y piranómetro) para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) mediante la metodología de FAO-56 Penman-Monteith (PM56) como expresión de la demanda evaporativa diaria de la atmósfera. La ET_o junto con la precipitación registrada permite establecer recomendaciones de riego utilizando la metodología FAO-56 [1].

Un problema que pueden tener estas recomendaciones se deriva de la densidad de EM de la REA, puesto que en ocasiones las EM pueden distar incluso decenas de kilómetros de las parcelas, con lo que no recogen la variación espacial que se produce en los diferentes parámetros observados [5]. Lo novedoso de este trabajo es aplicar el trabajo de [5], el cual está realizado agrupando mensualmente valores históricos de parámetros meteorológicos para el cálculo de ET_o, a una ventana temporal diaria, permitiéndonos generar pautas de riego de una manera dinámica con menor incertidumbre.

Para poder reducir el error entre los datos de la REA y los que asociáramos a una determinada parcela, debidos a la variación espacial, se debe de tener en cuenta tanto los accidentes geográficos como la elevación mediante métodos de interpolación. Estos están basados en regresiones lineales múltiples, en las que la variable meteorológica explicada se relaciona con alguna característica geográfica como latitud, longitud, elevación, continentalidad, pendiente, orientación... actuando como variables independientes.

En las regiones cubiertas por una REA dedicadas específicamente al asesoramiento sobre riego con acceso a los datos meteorológicos en tiempo real, es imperativo investigar el desarrollo de un algoritmo dinámico capaz de obtener mapas ET_o confiables. Este proceso se puede realizar diariamente y con una resolución espacial adecuada para producir recomendaciones de riego específicas para el sitio y no solo referidas a la estación meteorológica más cercana.

Este estudio tiene como objetivo el desarrollo de una metodología para el mapeo diario de ET_o considerando las características geográficas del territorio a escala de la cuenca hidrográfica del río Júcar y con ello poder obtener las variaciones espaciales de ET_o.

2. Materiales y métodos

2.1 Zona de estudio

La cuenca del río Júcar está situada en el este de la Península Ibérica (Fig. 1), entre las comunidades autónomas de Castilla la Mancha, Comunidad Valenciana y una pequeña zona sin regadíos en la comunidad autónoma de Aragón. La superficie geográfica de esta cuenca es de 2.226.093 ha, de las cuales 210.000 ha son de regadío. El cultivo predominante son los cítricos (en el este de la cuenca) con casi el 40% de la superficie de regadío, también se dan otros cultivos como los cereales (principalmente en el oeste de la cuenca), viña, frutales, olivos y hortícolas.

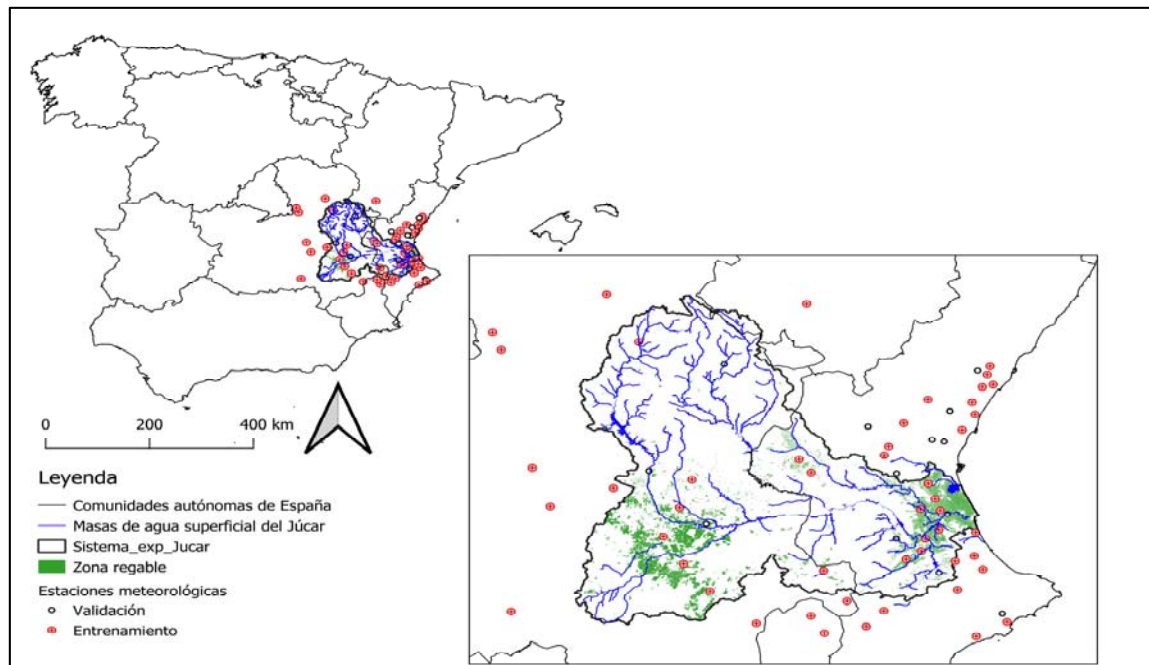


Figura 1. Cuenca del río Júcar, zonas de regadío y estaciones meteorológicas de la red SIAR de la zona o próximas a la zona de estudio.

Como muestra la Figura 1, la cuenca del Júcar está cubierta por la REA del SIAR (Sistema de Información Agroclimática para el Riego), cubriendo las principales zonas regables de la cuenca con un total de 63 EM automatizadas, ubicadas dentro o cerca del perímetro de la cuenca. De estas 63 EM se tomaron 14 para la validación del modelo y 49 EM se utilizaron para realizar el proceso de interpolación. Además, se calculan el coeficiente de determinación (R^2) y el índice de concordancia de Willmott (d), ambos de 0 a 1 implicando que 0 no presenta correlación ni concordancia y 1 si las presentan.

$$d = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (P_j - O_j)^2}{\sum_{j=1}^n (|P_j - O_j| + |O_j - \bar{O}|)^2} \quad (1)$$

Donde P_j es el valor predicho; O_j es el valor observado; \bar{O} es la media de los valores observados; y n es el número de valores.

2.2. Modelado desarrollado

Para el cálculo de la ETo, y con el fin de poder comparar los valores obtenidos en los mapas con los datos de la REA se aplicó la metodología FAO-56, adoptando la ecuación de Penman-Monteith ya que es la metodología que utiliza la REA del SIAR.

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T_m + 273} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot U_2)} \quad (2)$$

Donde ETo es la evapotranspiración de referencia ($\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$); Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$); G es el flujo del calor de suelo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$); U_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); $(e_s - e_a)$ es el déficit de presión de vapor (kPa); y T_m es la temperatura media del aire a 2 m de altura ($^\circ\text{C}$).

Así, previamente se interpoló un mapa continuo de píxeles por variable meteorológica involucrada en PM56-ETo, en base a los registros diarios registrados por la RAE. La resolución espacial de estos píxeles fue de 100 m.

La metodología se apoya en una interpolación mediante una regresión dinámica diaria. Basada en el procedimiento descrito en el trabajo de [5], cada día se obtiene una nueva ecuación de regresión en lugar de utilizar ecuaciones de regresión estáticas obtenidas a partir de datos históricos. Según las condiciones atmosféricas de cada día, diferentes accidentes geográficos son capaces de explicar la variabilidad espacial.

Utilizando este método se obtuvo 1 mapa por día para el año 2022 con los parámetros meteorológicos de temperatura media ($T_{\text{med}}, ^\circ\text{C}$), temperatura máxima ($T_{\text{max}}, ^\circ\text{C}$), temperatura mínima ($T_{\text{min}}, ^\circ\text{C}$), humedad máxima ($HR_{\text{max}}, \%$), humedad mínima ($HR_{\text{min}}, \%$) y velocidad del viento ($U_2, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Se empleó un algoritmo de cuenca visual hemisférica orientado hacia arriba para obtener la radiación solar ($R_s, \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$) diariamente. Finalmente, aplicando álgebra de capas para cada píxel de la cuadrícula, se calculó el mapa PM56-ETo.

2.2.1. Procedimiento de interpolación de temperatura máxima y mínima, humedad relativa máxima y mínima y velocidad del viento.

El valor de la variable en el espacio entre EM se calculó mediante la ecuación:

$$Z(x) = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_n \cdot x_n \quad (3)$$

Donde $Z(x)$ es el valor previsto de temperatura media, máxima y mínima ($^\circ\text{C}$), humedad máxima y mínima ($\%$) y la velocidad del viento ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); a_0 a a_n son los coeficientes de regresión, y x_1 a x_n son los valores de las variables independientes (características geográficas) en el punto espacial x .

En la Tabla 1 se incluyen los accidentes geográficos que actúan como variables independientes. La relación lineal entre ellos y la temperatura/humedad/velocidad del viento predichas se investigó utilizando un valor $p < 0.01$ que se incluyó en la regresión, evitando problemas de colinealidad derivados del uso del conjunto completo.

Tabla 1. Características geográficas que actúan como variables independientes en la interpolación de regresión múltiple.

Longitud, en grados.
Latitud, en grados.
Distancia al mar más cercano con clara influencia en el parámetro meteorológico (mar Mediterráneo para esta zona de estudio), en m.
Radiación solar de entrada media anual, in MJ d ⁻¹ .
Radiación solar de entrante media anual, in MJ d ⁻¹ , dentro de la zona xi, donde x es el radio de 2.5, 5 y 25 km.
Elevación, en m.
Elevación media, en m, dentro de la zona xi, donde x es el radio de 2.5, 5 y 10 km.
Pendiente del terreno, en %.
Orientación del terreno, de 0 a 360 grados, con respecto al norte (0 grados).

Luego de obtener las variables geográficas involucradas y los coeficientes de las ecuaciones de regresión múltiple, se obtuvo un mapa continuo combinando las capas ráster con la información de cada variable geográfica y aplicando la fórmula algebraica. Lógicamente, en la ubicación de cada EM, el valor de temperatura/humedad/velocidad del viento registrado y modelado no coincide. Los residuos suelen interpolarse en toda el área de estudio y sumarse al valor previsto utilizando técnicas locales. En este caso, para ello se empleó el método de *Splines with Tension* [4] mediante el módulo v.surf.rst para el entorno GRASS en QGIS.

A partir de los datos diarios registrados a lo largo de la REA, se obtuvo una nueva ecuación de regresión específica para cada día.

2.2.2. Procedimiento de interpolación de la radiación.

La R_s juega un papel clave en el proceso ETo debido a que se encarga de aportar la energía necesaria para transformar el agua del estado líquido al estado de vapor. Las plataformas SIG han desarrollado algoritmos de estimación de la R_s espacialmente adaptados al relieve como por ejemplo r.sun para GRASS/QGIS [3] o Area Solar Radiation en Spatial Analyst de ArcGIS. Estos mapas de R_s se pueden obtener para periodos de tiempo agrupados o diarios. Para el año 2022, se obtuvieron 365 mapas de radiación potencial (RP), uno para cada día del año, utilizando el algoritmo de cuenca visual hemisférica mirando hacia arriba y asumiendo valores de transmisividad y tasa de radiación difusa para las mejores condiciones de cielo despejado, 0.6 y 0.2 respectivamente.

Para cada día que queremos obtener un mapa de R_s , se calcula la relación entre la radiación real R_s (registrada para cada estación meteorológica) y la R_P específica del día del año en la ubicación de la EM. Estos valores puntuales de la relación R_s/R_P se interpolan espacialmente utilizando el método de splines con tensión obteniendo un mapa con el coeficiente R_s/R_P en cada pixel. Luego, se derivó un mapa diario de R_s multiplicando esta cuadrícula de relación R_s/R_P y la cuadrícula de R_P . En este trabajo, se empleó Solar Analyst para el entorno ArcGIS para obtener los mapas R_P y $v.surf.rst$ para el entorno GRASS para interpolar valores diarios de relación R_s/R_P utilizando el método de splines con tensión.

2.2.3. Determinación de la variación de E_{To} en el área de afectación de las estaciones meteorológicas.

Para conocer la variación espacial de E_{To} se dividió la cuenca del río Júcar en recintos (polígonos de Thiessen) donde asumimos el valor de E_{To} de cada estación meteorológica para su zona de afectación. Para el día 15 de cada mes del año 2022 y para cada polígono de Thiessen, se comparó la E_{To} registrada en la EM con el valor de E_{To} interpolado correspondiente a cada una de las 263413 PA y luego se compararon con el registrado en la EM.

3. Resultados y discusión

3.1 Parámetros meteorológicos y E_{To} predichos frente a observados

Los resultados muestran para el índice de concordancia de Willmott (d) valores entre 0.98 y 1 para la E_{To} y los parámetros de R_s , T_{max} , T_{min} y HR_{min} . Esto indica que el modelo presenta una gran concordancia entre los parámetros predichos y los observados. Por otro lado, la HR_{max} y U_2 muestran valores de concordancia de 0.88 y 0.85 respectivamente, aunque estos valores sean inferiores a los anteriores, siguen siendo próximos a 1 con lo cual se puede indicar que presentan una concordancia aceptable.

Por otro lado, el R^2 para la E_{To} y los parámetros (Fig.2) de R_s , T_{max} , T_{min} y Hr_{min} es de 0.95, 0.92, 0.98, 0.95 y 0.93 respectivamente mostrando una alta correlación entre los valores predichos y los observados. Los parámetros HR_{max} y U_2 muestran valores de R^2 con correlaciones de 0.61 y 0.56 respectivamente, sin embargo, los parámetros con mayor capacidad de variación en el cálculo de E_{To} son en orden de mayor a menor, radiación solar, temperatura, humedad relativa y viento, por ello se reduce su efecto negativo sobre el cálculo de la E_{To} predicha [2].

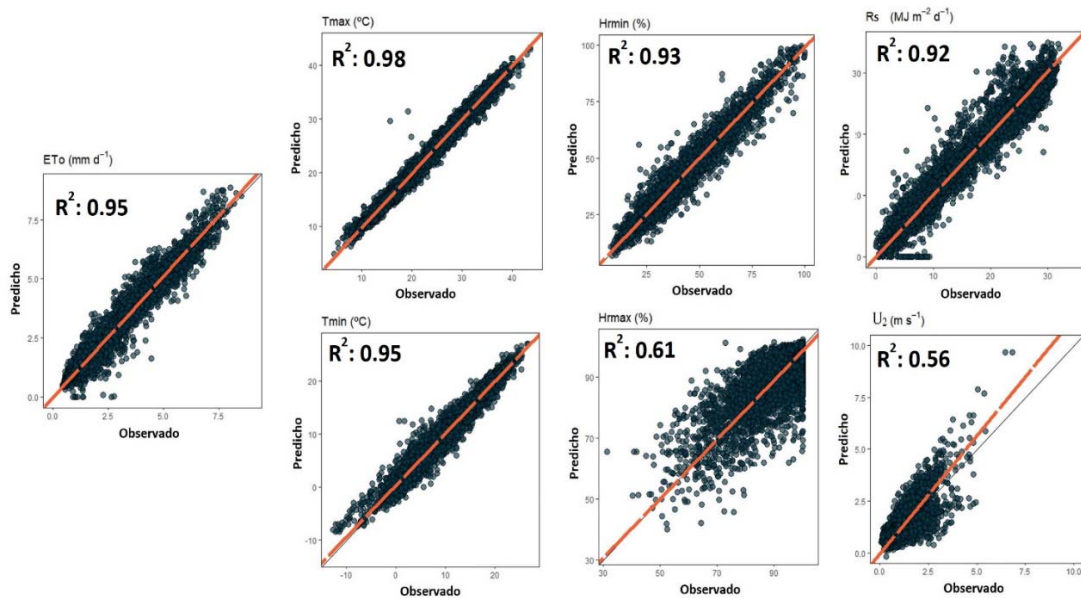


Figura 2: Correlaciones entre valores predichos y observados de ETo, Tmax, Tmin, Hrmax, Hrmin, Rs y U₂.

En la Figura 3 se puede observar el nivel de detalle en la determinación de ETo mediante interpolación basada en regresión lineal dinámica para el día 15 de julio de 2022. Esta metodología no ofrece problemas para poder ser escalada a nivel de cuenca hidrográfica o comunidad autónoma.

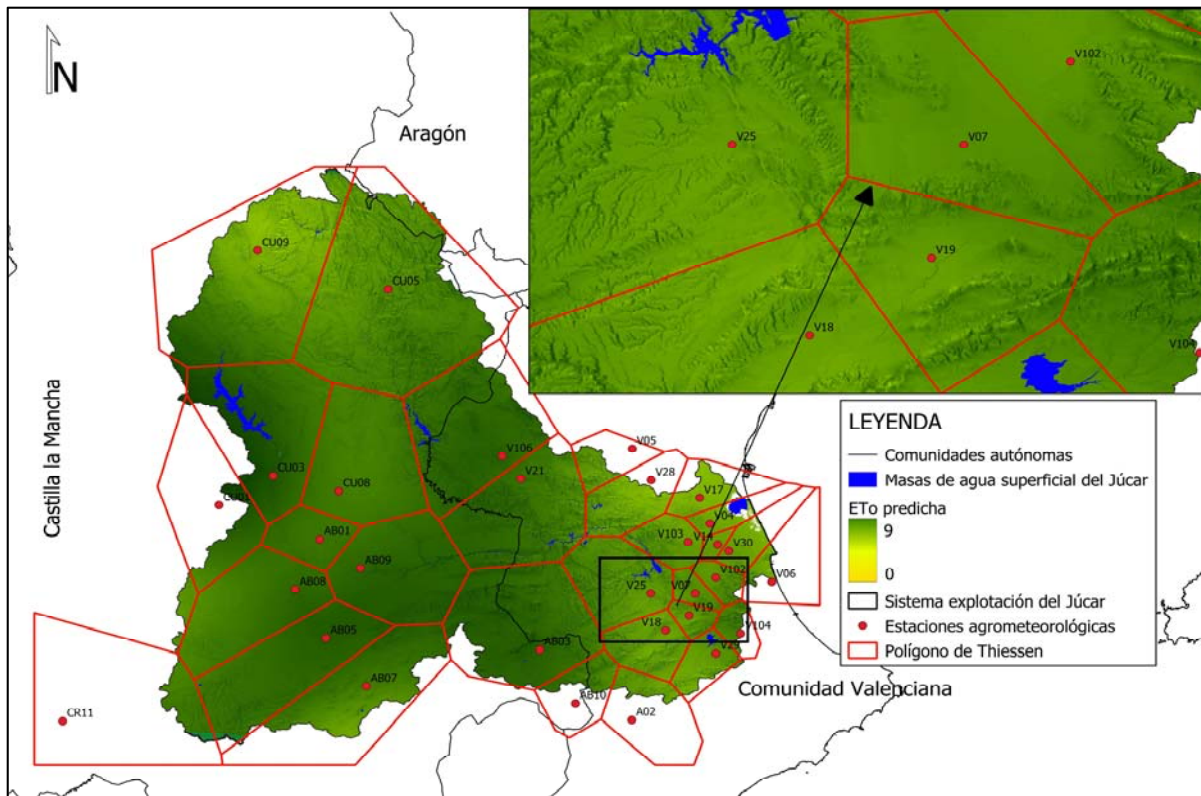


Figura 3. Mapa de ETo obtenido por interpolación para el día 15 de julio de 2022 con la posición de las estaciones meteorológicas y las áreas asignadas a cada estación (Polígonos de Thiessen).

En la Figura 4 se puede observar la ETo para todo el año 2022 que ofrece la estación V25, situada en Bolbaite, provincia de Valencia (UTMX: 699829; UTM Y: 4326990; Altura: 272m), frente a la predicha. Cabe destacar la similitud de la ETo predicha respecto a la observada, aun teniendo en cuenta que el modelo debe de mejorar para poder alcanzar un mayor coeficiente de determinación (R^2) e índice de concordancia de Willmott (d) en los parámetros de H_{rmax} y U_2 en futuros trabajos.

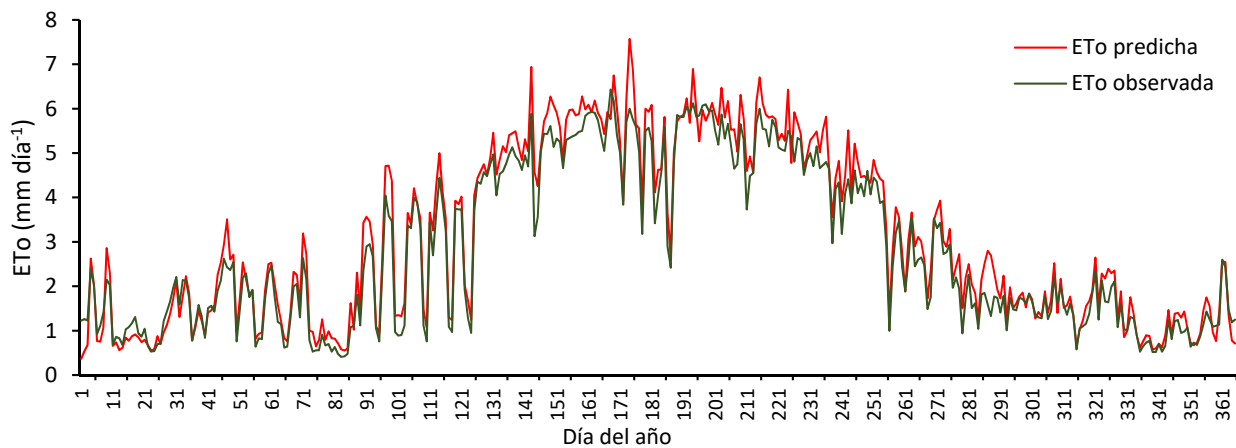


Figura 4. ETo observada (línea verde) de la EM V25 frente a predicha (línea roja) para el año 2022.

3.2 Variación de ETo en estaciones meteorológicas

El valor de ETo observada en las 63 EM utilizadas en este estudio dan una ETo media para el año 2022 de 3.37 mm día^{-1} , mientras que la media de la ETo predicha es de 3.43 mm día^{-1} . Dentro de la zona de afectación las EM (polígonos Thiessen) se obtuvieron valores máximos medios de ETo de 4.14 mm día^{-1} y unos valores mínimos medios de 3.02 mm día^{-1} obteniendo una diferencia anual de 1.12 mm día^{-1} y una desviación estándar de 0.15. La ETo observada frente a la predicha genera un error absoluto medio anual d 0.24 mm día^{-1} y con ello un error relativo medio anual de 9.14%.

4. Conclusiones

El estudio se realizó en una región mediterránea donde la agricultura intensiva de regadío y un relieve pronunciado en determinadas zonas, proporciono un contexto excelente para aplicar el procedimiento.

El modelo obtenido presenta un buen comportamiento respecto a los parámetros meteorológicos de T_{max} , T_{min} , H_{rmin} y Rad , siendo peor el resultado en la estimación de H_{rmax} y U_2 . Por otro lado, se propuso un método muy simple pero efectivo para interpolar R_s , demostrando un muy buen ajuste.

La metodología de interpolación por regresión lineal dinámica muestra una gran capacidad de adaptarse a las variaciones meteorológicas de cada día, siendo sin duda su mejor cualidad y el causante de los buenos resultados. Además, esta metodología muestra una gran capacidad de reproducir la forma de la distribución de ETo observada y muestra las diferencias de ETo que se producen entre las diferentes parcelas agrícolas dentro de la zona de afectación de una EM.

A pesar de que la calidad de los mapas ETo producidos es muy alta, es necesario realizar nuevas investigaciones en este campo para mejorar la precisión de la interpolación de la H_{rmax} y U_2 . Esto sería especialmente importante en áreas ventosas donde la influencia potencial de U_2 en ETo podría ser muy alta.

5. Agradecimientos

Este estudio ha recibido financiación del proyecto eGROUNDWATER (GA n. 1921), parte del programa PRIMA apoyado por el programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea, y del proyecto WATER4CAST (PROMETEO/2021/074), que está financiado por la Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital de la Comunitat Valenciana.

Los datos meteorológicos fueron proporcionados por SIAR: “Sistema de Información Agroclimática para el Regadío. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación”. Un agradecimiento especial a Carlos Garrido Garrido e Ivan Cilleros Fuentetaja por brindarnos un acceso API-SIAR.

Referencias

1. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome.
2. Carricondo-Anton, J.M., Jiménez-Bello, M., Martínez Alzamora, F., Sala, A., 2019. Análisis de las Predicciones Climáticas a partir de distintos Servicios Climáticos para la Programación del Riego. XXXVII Congr. Nac. Riegos.
3. Hofierka, J., Suri, M., others, 2002. The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications, in: Proceedings of the Open Source GIS-GRASS Users Conference. pp. 51–70.
4. Mitášová, H., Mitáš, L., 1993. Interpolation by regularized spline with tension: I. Theory and implementation. Math. Geol. 25, 641–655. <https://doi.org/10.1007/BF00893171>/METRICS.
5. Vicente-Serrano, S.M., Azorin-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., López-Moreno, J.I., Espejo, F., 2014. Sensitivity of reference evapotranspiration to changes in meteorological parameters in Spain (1961–2011). Water Resour. Res 50, 8458–8480. <https://doi.org/10.1002/2014WR015427>.