

# Estimaciones espaciales de evapotranspiración multianual usando R para aplicaciones hidrológicas \*

**Breiner Dan Bastidas Osejo** *Universidad de Antioquia*  
**Laura Ximena Echeverri Gutierrez** *Universidad Nacional de Colombia*

---

**Resumen:** La evapotranspiración es un flujo hidrológico fundamental en los análisis de recursos hídricos, especialmente en lo relacionado con el balance hídrico a escala de cuencas, a su vez es uno de los flujos más difíciles de medir y estimar, por tanto, para diversas aplicaciones hidrológicas es clave estimar este flujo por diversos métodos, con el fin de reducir la incertidumbre asociada y poder realizar dichas estimaciones espacialmente distribuidas. La estimación espacial se realiza frecuentemente en software SIG, sin embargo, no resultan ser tan eficientes cuando se trata de la implementación de diversos métodos y a escalas espaciales de alta resolución, por ello, en este trabajo proponemos un código simple que utiliza el lenguaje R como software SIG para estimar la evapotranspiración potencial (ETP) y real (ETR) a escala multianual mediante cinco métodos típicos de estimación: Turc, Thornthwaite, Cenicafé, Hargreaves y Countagne. La implementación de estos métodos en R muestra un notable mejor desempeño en comparación con los softwares SIG tradicionales, dada la facilidad de incorporar en R funciones matemáticas, funciones condicionales y bucles, requeridos en los diversos métodos de estimación, adicionalmente permite ejecutar un proceso más simplificado y consistente, limitando errores típicos de SIG. Los resultados del código se muestran a manera de ejemplo para una región climática y topográficamente compleja de Colombia. El código permite obtener salidas raster de ETP y ETR multianual para los cinco métodos implementados, además de la ETP mensual – multianual y del índice de Aridez (IA) definido por el IDEAM.

*Keywords:* Índice de Aridez, Análisis espacial, SIG, flujos hidrológicos

---

## Introducción

La evapotranspiración es un elemento clave en el ciclo hidrológico, fundamental en los análisis de recursos hídricos y en las evaluaciones agrícolas (Wanniarachchi and Sarukkalgige, 2022; Amani and Shafizadeh-Moghadam, 2023), aplicaciones tales como el cálculo del balance hídrico (Chow, Maidment and Mays, 1994; Bastidas-Osejo, Vargas and Martinez, 2019), análisis de condiciones de aridez y sequía (Amani and Shafizadeh-Moghadam, 2023), estimaciones de la oferta hídrica y de la demanda hídrica agrícola (Amani and Shafizadeh-Moghadam, 2023; Raza et al., 2021), dependen notablemente de esta variable. A su vez es uno de los flujos más difíciles de medir y estimar (Chow, Maidment and Mays, 1994), en especial para cuencas no instrumentadas, por lo anterior, para diversas de las aplicaciones mencionadas es clave poder estimar este flujo por diversos métodos con el fin de reducir la incertidumbre asociada y poder realizar dichas estimaciones espacialmente distribuidas.

La evapotranspiración (ET) es el flujo de agua (en estado gaseoso - vapor de agua) de inter-

---

\* Autor de contacto: [breiner.bastidas@udea.edu.co](mailto:breiner.bastidas@udea.edu.co)

cambio desde la superficie hacia la atmósfera, a partir de dos procesos combinados: el proceso físico de evaporación desde los cuerpos de agua y del suelo, y el proceso biológico de transpiración desde los seres vivos, fundamentalmente desde la vegetación (Chow, Maidment and Mays, 1994; Shuttleworth, 2012; Amani and Shafizadeh-Moghadam, 2023). El comportamiento espacio-temporal de la ET depende de tres factores fundamentales: suministro de energía (vía radiación solar), disponibilidad de agua para el cambio de fase y el estado aerodinámico de la atmósfera para asimilar y permitir el transporte de vapor de agua (Chow, Maidment and Mays, 1994).

Se evidencia así, que una estimación precisa y directa de ET requiere de una gran cantidad de datos hidrometeorológicos y de superficie, que para muchas regiones no se encuentran disponibles, especialmente en cuencas no instrumentadas. Por lo anterior, es una práctica común en hidrología la aplicación de expresiones empíricas basadas en variables meteorológicas con mayor facilidad de medición, tales como precipitación, temperatura, entre otras (Xu and Singh, 2002; Bastidas-Osejo, Vargas and Martinez, 2019). En muchas ocasiones la estimación de ET por métodos indirectos se realiza de manera puntual (en la estación disponible), sin embargo, para diversas aplicaciones hidrológicas es deseable conocer el comportamiento de ET a escala espacial.

La tarea de estimación espacial se realiza frecuentemente en software SIG (Sistemas de Información Geográfica) como QGIS y ARCGIS, sin embargo, dichos softwares no resultan ser tan eficientes cuando se trata de la implementación de diversos métodos y a escalas espaciales de alta resolución, por ello, el objetivo de este trabajo es proponer un código simple que ilustra como el lenguaje R Core Team (2019) puede ser utilizado como un software SIG para análisis espaciales eficientes, en particular para estimar la evapotranspiración potencial (ETP) y real (ETR) a escala multianual mediante métodos indirectos. A continuación, se describen los datos utilizados, en particular para una zona de estudio en Colombia que se ha seleccionado para ilustrar la aplicabilidad del código, seguido de la metodología general y estructura del código, finalmente se presentan los resultados, conclusiones y una breve discusión.

## Materiales y métodos

### *Zona de estudio*

Para ilustrar el uso del código propuesto, se ha seleccionado una región climática y topográficamente compleja en el noreste de Colombia, al sur del departamento del Cesar y el oeste de Norte de Santander, zona comprendida en dos áreas hidrográficas de gran extensión, con la serranía del Perijá como divisoria de ambas: la subzona hidrográfica Quebrada El Carmen y Otros Directos al Magdalena Medio (2321) en la vertiente occidental de la serranía y la subzona hidrográfica Río Algodonal (Alto Catatumbo) (1605) en la vertiente oriental de la serranía (IDEAM, 2019). La extensión de la zona delimitada es de 2594,6 km<sup>2</sup>, la topografía es altamente variable, con elevaciones máximas desde 3200 m.s.n.m, hasta elevaciones mínimas de 32 m.s.n.m, estas características condicionan un clima variable calido a templado, lo cual implica altas variaciones espaciales de evapotranspiración, con implicaciones de variabilidad en la oferta hídrica de estas regiones.

### *Datos*

Para la estimación espacial multianual de la evapotranspiración (ET), es requerida información hidrometeorológica de relativa fácil adquisición: precipitación, temperatura y radiación solar incidente. Dado que el objetivo es obtener distribuciones espaciales de ET, lo ideal es obtener la

información mencionada como archivos espaciales (raster) a escala mensual multianual. La información mencionada puede ser obtenida de bases de datos climáticos globales de alta resolución, como lo son WorldClim 2.1 (Fick and Hijmans, 2017) y Chelsa 2.1 (Karger et al., 2017), que han mostrado un buen desempeño para reproducir diversas condiciones climatológicas a escala de cuencas (Bastidas-Osejo, Vargas and Martinez, 2019; Rodríguez-Almonacid et al., 2023). Adicionalmente, es deseable obtener la información hidrometeorológica mencionada directamente de estaciones y distribuirla espacialmente mediante técnicas de interpolación espacial, donde paquetes como *Field* de *R* son de gran utilidad (Bastidas-Osejo and Betancur, 2019). En Tabla 1 se listan las fuentes de los datos utilizados para el caso de estudio específico. Es condición deseable incorporar lo raster mencionados en un mismo sistema de coordenadas e igual resolución y extensión espacial. Para el caso de estudio la resolución es de 30 m x 30 m, en sistema de coordenadas Magna - Sirgas Origen Nacional (9377)

Tabla 1: Datos utilizados para las estimaciones espaciales de evapotranspiración

Variable	Fuente	Resolución temporal
Topografía del terreno (m.s.n.m)	Modelo de elevación digital de ALOS-PALSAR (12,5 m x 12,5 m) remuestreado	No aplica
Precipitación (mm/año)	Interpolación espacial con Kriging con Deriva Externa, con 23 estaciones del IDEAM y datos de WorldClim	Mensual multianual
Temperatura media (°C)	Interpolación espacial con Kriging con Deriva Externa, con 4 estaciones del IDEAM y datos de WorldClim	Mensual multianual
Radiación solar incidente ( $\text{kJ m}^{-2} \text{da}^{-1}$ )	Datos remuestreados y proyectados de WorldClim	Mensual multianual

### Metodología general

La metodología aplicada, los paquetes utilizados, las funciones implementadas y las ecuaciones incorporadas por cada método de evapotranspiración se resumen gráficamente en la Figura 1. Es de aclarar que hay métodos que estiman directamente la evapotranspiración real multi-anual (ETR), como el caso de Turc y Countagne, mientras que otros como Cenicafé, Hargreaves y Thornthwaite estiman evapotranspiración potencial (ETP), por tanto es necesario convertirla en ETR, considerando la disponibilidad de precipitación (P) y usando la expresión de Budyko (Ecuación 1), la cual se ha incorporado como función en el código. Se ha incluido también la posibilidad de ingresar ETP mensual calculada externamente, para convertirla en ETR mediante la expresión de Budyko. Para el caso de estudio la ETP alterna se ha tomado del proyecto Chelsa V.2.1.

$$ETR = \left[ \left( ETP \cdot P \cdot \tanh \left( \frac{P}{ETP} \right) \right) \cdot \left( 1 - \cosh \left( \frac{ETP}{P} \right) + \sinh \left( \frac{ETP}{P} \right) \right) \right]^{0,5} \quad (1)$$

Para los métodos que estiman ETP y ETR, es posible calcular el Índice de Aridez (IA), definido por el IDEAM (Ecuación 2), el cual se ha incorporado como función en el código.

$$IA = \frac{ETP - ETR}{ETP} \quad (2)$$

Este índice es clave para evaluar los excesos (IA menor) o déficits (IA mayor) de humedad en la en el sistema suelo-atmósfera de una región en Colombia. Finalmente, los métodos Hargreaves y

Thornthwaite parten de una implementación mensual, por lo cual para estos se ha implementado una función en el código que exporta los raster mensuales multianuales de ETR de los mencionados métodos.

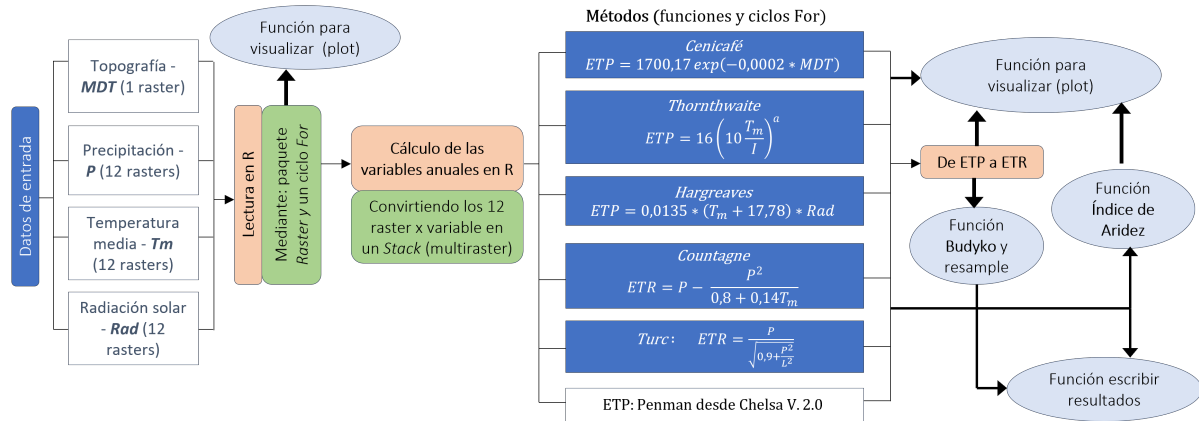


Figura 1: Metodología general que estructura el código (se ilustran las ecuaciones principales de los métodos de ETP y ETR, las ecuaciones completas están en el código)

## Resultados

El código desarrollado se dispone en el siguiente repositorio de [Github](#). Para la zona de estudio, el código permitió generar en formato Geotiff cuatro mapas de ETP multianual, seis de ETR multianual, 12 de ETR mensual multianual y tres de Índice de Aridez (IA) multianual, todos a resolución espacial de 30 m x 30 m para una extensión de 2300 filas x 2414 columnas, en un tiempo aproximado de 03 minutos (En PC: AMD Ryzen 5 4600H (3.00 GHz) - 24GB de RAM), tiempo que en un SIG tradicional podría tomar al menos varias horas. El código grafica en el panel *Plots* los mapas resultantes de cada cálculo, para facilitar el chequeo por parte del usuario. En la Figura 2 se muestra un resumen gráfico de los resultados obtenidos, donde se evidencia la importante variabilidad espacial de la ETP, ETR e IA, así como similitudes y diferencias entre los métodos implementados.

## Discusión y conclusiones

La implementación de métodos espaciales empíricos para la estimación de la ETP y ETR a escala multianual y mensual multianual en [R Core Team \(2019\)](#) muestra un notable buen desempeño, siendo fuertemente competitivo frente a los software SIG tradicionales, dada la facilidad de incorporar en *R* funciones matemáticas, funciones condicionales y bucles, requeridas en los diversos métodos de estimación, adicionalmente permiten ejecutar un proceso más simplificado y consistente, limitando errores típicos de SIG como incompatibilidad en resolución y extensión espacial y sistemas de coordenadas de referencia (src) distintos, que en muchas ocasiones implica reprocesos.

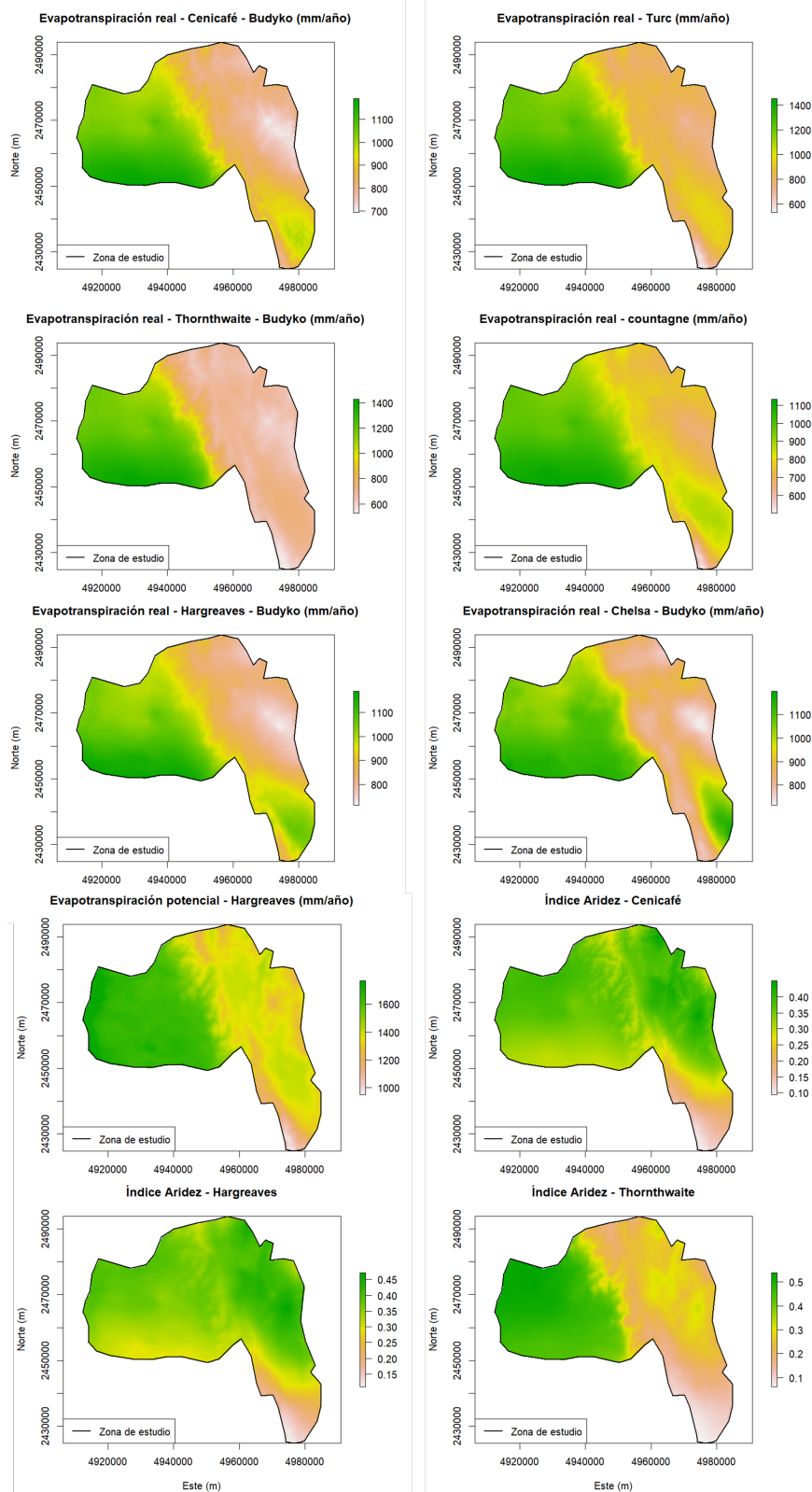


Figura 2: Distribución espacial de ETR, ETP e IA por diversos métodos en la zona de estudio

## Referencias

- Amani, Shima and Hossein Shafizadeh-Moghadam. 2023. "A review of machine learning models and influential factors for estimating evapotranspiration using remote sensing and ground-based data."
- Bastidas-Osejo, Breiner and Teresita Betancur. 2019. Uso de R y el paquete Fields para la interpolación espacial recurrente de variables ambientales.
- Bastidas-Osejo, Breiner, Teresita Betancur Vargas and John Alejandro Martinez. 2019. "Spatial distribution of precipitation and evapotranspiration estimates from Worldclim and Chelsa datasets: Improving long-term water balance at the watershed-scale in the Urabá region of Colombia." *International Journal of Sustainable Development and Planning* 14:105–117.  
**URL:** <http://www.witpress.com/doi/journals/SDP-V14-N2-105-117>
- Chow, Ven Te, David R Maidment and Larry W. Mays. 1994. *Hidrología aplicada*. Segunda ed.
- Fick, Stephen E and Robert J Hijmans. 2017. "WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas." *International Journal of Climatology* 37:4302–4315. doi: 10.1002/joc.5086.  
**URL:** <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- IDEAM. 2019. "Estudio Nacional del Agua 2018."
- Karger, Dirk Nikolaus, Olaf Conrad, Jürgen Böhrer, Tobias Kawohl, Holger Kreft, Rodrigo Wilber Soria-Auza, Niklaus E. Zimmermann, H. Peter Linder and Michael Kessler. 2017. "Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas." *Scientific Data* 4:1–20.  
**URL:** <http://dx.doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
- R Core Team. 2019. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.  
**URL:** <https://www.R-project.org/>
- Raza, Ali, Yongguang Hu, Muhammad Shoaib, Manar K. Abd Elnabi, Muhammad Zubair, Muhammad Nauman and Neyha Rubab Syed. 2021. "A systematic review on estimation of reference evapotranspiration under prisma guidelines."
- Rodríguez-Almonacid, Deidy Viviana, Joaquín Guillermo Ramírez Gil, Joaquín Guillermo Ramírez-Gil, Olga Lucia Higuera, Francisco Hernández and Eliecer Díaz-Almanza. 2023. "Comprehensive Step-by-Step Guide to Using Data Science Tools in the Gestion of Epidemiological and Climatological Data in Rice A Comprehensive Step-by-Step Guide to Using Data Scie... Comprehensive Step-by-Step Guide to Using Data Science Tools in the Gestion of Epidemiological and A Comprehensive Step-by-Step Guide to Using Data Science Tools in the Gestion of Epidemiological and Climatological Data in Rice Production Systems."  
**URL:** <https://doi.org/10.3390/agronomy13112844>
- Shuttleworth, James W. 2012. *Terrestrial hydrometeorology*.
- Wanniarachchi, Susantha and Ranjan Sarukkalige. 2022. "A Review on Evapotranspiration Estimation in Agricultural Water Management: Past, Present, and Future."
- Xu, C.-Y and V P Singh. 2002. "Cross Comparison of Empirical Equations for Calculating Potential Evapotranspiration with Data from Switzerland."