

## **CUANTIFICACIÓN DEL USO DE AGUA PRODUCTIVO VERSUS IMPRODUCTIVO EN UN HUERTO DE NOGAL BAJO RIEGO POR INUNDACIÓN Y DIFERENTES TEXTURAS DEL SUELO**

**Orlando Ramirez-Valle<sup>1,2\*</sup>; Hugo A. Gutiérrez-Jurado<sup>2</sup>; Lixin Jin<sup>2</sup>; Lin Ma<sup>2</sup>; Sergio Iván Jiménez -Jiménez<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Delicias, Km. 2 Carretera Delicias-Rosales C.P. 33000, Centro, Cd. Delicias, Chihuahua.

<sup>2</sup>Department of Earth, Environmental and Resource Sciences, University of Texas at El Paso, El Paso, Texas, 79902, USA

[ramirez.orlando@inifap.gob.mx](mailto:ramirez.orlando@inifap.gob.mx) (\*Autor de correspondencia)

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua Suelo Planta Atmósfera. Km 6.5 Canal Sacramento, Gómez Palacio Durango, México. C.P. 35140

---

### **Resumen**

En las tierras áridas, el uso del agua de los cultivos varía considerablemente donde las altas temperaturas y la disponibilidad limitada de agua demeritan las actividades agrícolas, y la planificación del riego es esencial para el uso eficiente del agua y la sostenibilidad a largo plazo de la agricultura. Sin embargo, a pesar de la disminución del suministro de agua y la amenaza inminente de sequías más frecuentes e intensas, el riego poco eficiente (por ejemplo, por surcos e inundaciones) sigue siendo el método más utilizado para el suministro de agua a las parcelas agrícolas. La transición hacia una agricultura más sostenible requiere conocimiento del período de uso productivo del agua por los cultivos versus improductivo durante el ciclo agrícola. En el presente trabajo se aplicó El método partición de la evapotranspiración usando índices de vegetación (*PETVI* por sus siglas en inglés) utilizando imágenes de satélite para dividir la evapotranspiración ( $ET_a$ ) en evaporación ( $E_v$ ) y transpiración ( $T_r$ ). El método fue validado con las estimaciones de  $E_v$  y  $T_r$  con  $ET_a$  medidas de forma independiente con la técnica de Eddy Covariance (usando el método subyacente de eficiencia en el uso del agua ( $uWUE$ )). En el presente trabajo se muestra que, el uso improductivo del agua por parte del cultivo ocurre al comienzo de la temporada, debido a un largo intervalo de tiempo entre el primer riego y el rebrote de los árboles de nogal, debido a que el agua subterránea suministra el riego temprano en la temporada. Acortar el tiempo entre el primer riego y el rebrote disminuiría el uso consuntivo total de agua en estos cultivos.

**Palabras claves:** *PETVI*, evaporación, transpiración, sensores remotos, METRIC.

## Introducción

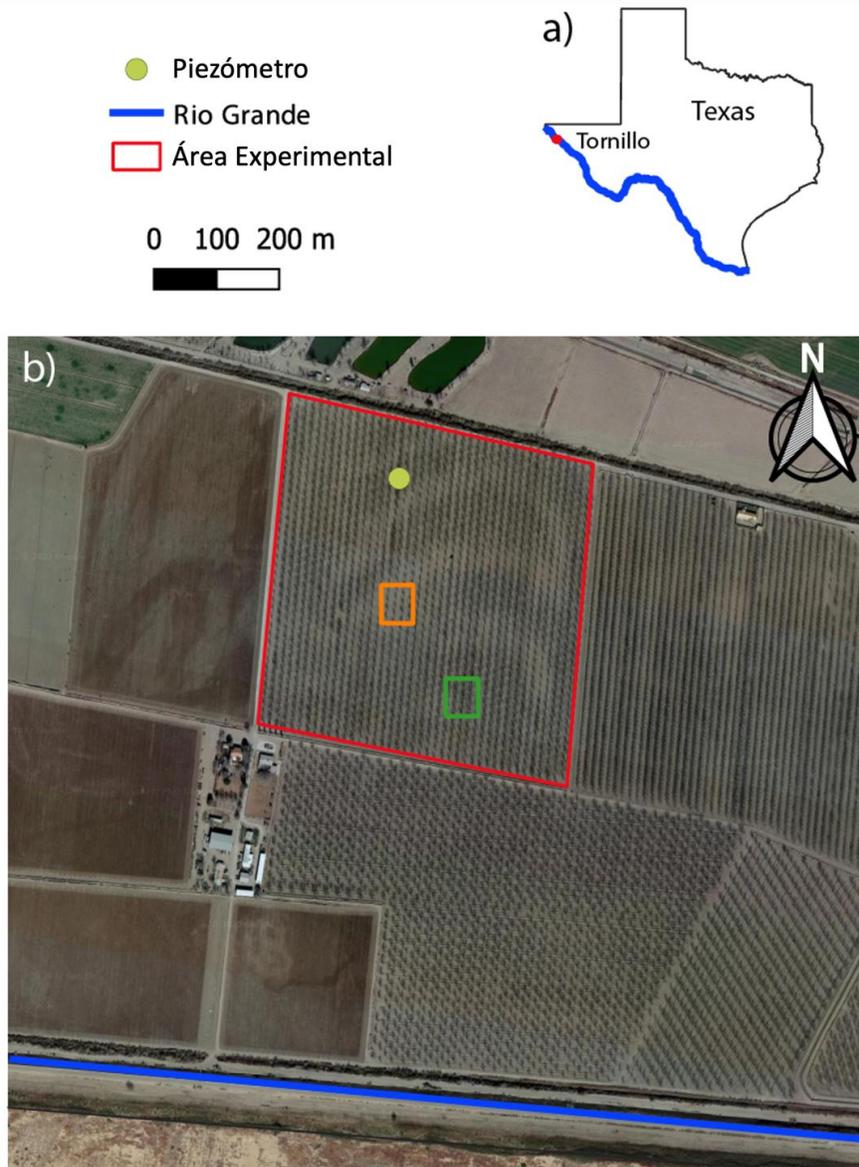
El agua superficial es un recurso limitado en las regiones áridas y semiáridas. Por esa razón, los cultivos de regadío en las tierras áridas utilizan aguas subterráneas para complementar o, en algunos casos, satisfacer las necesidades hídricas de la mayoría de los cultivos. Sin embargo, el agua subterránea puede ser un recurso no renovable en una escala de tiempo humana. En consecuencia, mejorar la gestión y la planificación del riego es esencial para el uso eficiente del agua en la agricultura y su viabilidad continua (Nazari et al., 20018). Sin embargo, a pesar de la disminución del suministro de agua y la amenaza inminente de sequías más frecuentes e intensas, el riego con baja eficiencia en el uso del agua (por ejemplo, riego por inundación) sigue siendo el método más utilizado para el suministro de agua a las parcelas agrícolas (Sketch et al., 2019).

A medida que el cambio climático añade presión a la producción agrícola y las actividades socioeconómicas en todo el mundo, las tendencias al alza en la escasez mundial de agua plantean un riesgo inmediato para los sistemas de producción de alimentos de las tierras áridas (Mekonnen y Hoekstra, 2016; Jin et al., 2018). Teniendo en cuenta que la agricultura consume alrededor del 70 % del agua dulce a nivel mundial (AQUASTAT-FAO, 2021), y que la lentitud en la implementación de innovaciones tecnológicas que promueven la conservación del agua en la agricultura mantiene una gran proporción de zonas áridas irrigadas con eficiencias de riego de ~29 % en promedio a escala global (Jägermeyr et al., 2015). Ante estos escenarios existen amplias oportunidades para mejorar los esfuerzos de gestión del agua a diferentes escalas. Por ejemplo, las eficiencias de riego reportadas en el Valle del Río Grande en el suroeste de EE. UU. varían del 20 al 95 % en huertos de nueces (Ahadi et al., 2013), su metodología se basa en estimaciones de evapotranspiración (ET) que toman en cuenta los dos componentes de la ET como parte del agua requerida por parte los cultivos.

En el Valle del Río Grande, al sur de Nuevo México y al oeste de Texas, los productores de nueces utilizan aguas superficiales y subterráneas para satisfacer la demanda de agua de sus cultivos. Sin embargo, en los últimos 20 años, los flujos del agua superficial del río han experimentado caudales reducidos (Mokari et al., 2022); En este escenario, los agricultores necesitan mejorar sus prácticas de riego para mantener sus rendimientos y ganancias a pesar de la creciente incertidumbre sobre la disponibilidad de agua superficial. Para afrontar esta situación es necesario gestionar el agua de forma más eficiente. Por esta razón, identificar las condiciones y los períodos en los que se produce agua productiva e improductiva disminuirá la vulnerabilidad de los cultivos a la disponibilidad limitada de agua. En este trabajo utilizamos el enfoque de “Partición de la evapotranspiración a través de índices de vegetación” (PETVI) (Ramírez-Valle, 2022) para investigar la dinámica espacial y temporal del uso del agua en un huerto de nogales irrigado por inundación con cambios significativos en la textura del suelo.

## Materiales y Métodos

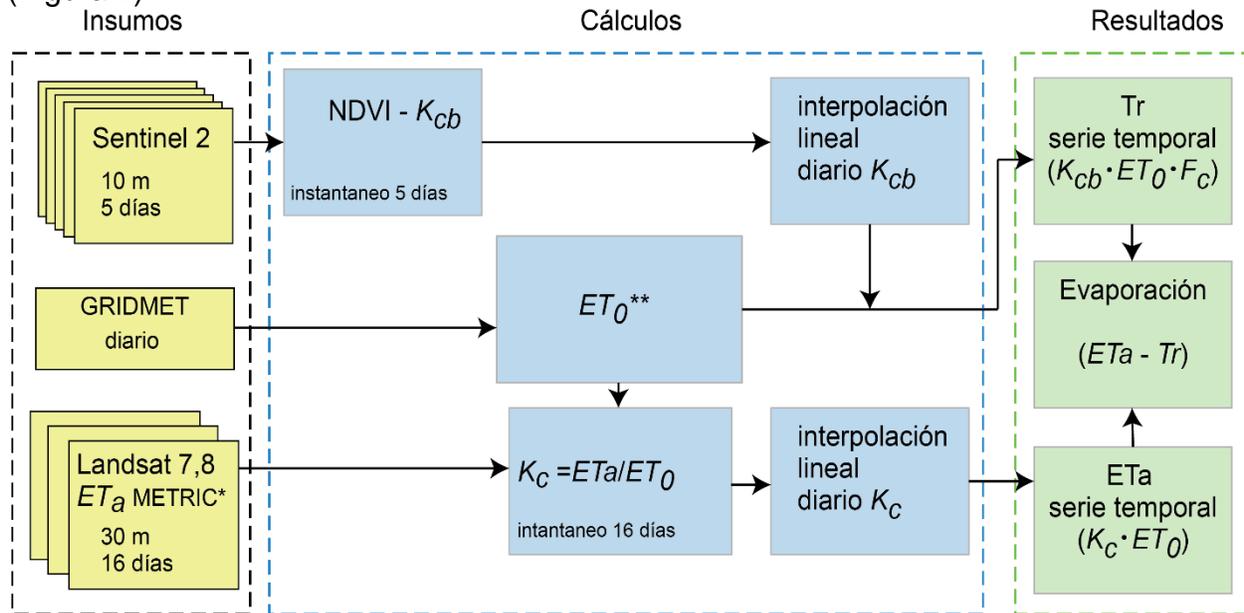
El sitio de estudio está ubicado en Tornillo, Texas, ~36 millas al sureste de la ciudad de El Paso (Figura 1). El sitio es un huerto con árboles maduros, con una superficie de 25,4 ha y una densidad de plantación de ~64 árboles ha<sup>-1</sup>. El sitio experimental se encuentra cerca del río Grande (~900 m) y tiene un nivel freático poco profundo de ~ 2,10 m de profundidad. El clima de la zona es árido, con una precipitación media anual de 203-250 mm (Assadian et al., 1999; Mokari et al., 2021).



**Figura 1.** Ubicación general del área experimental; a) Estado de Texas, resaltando el Río Grande (línea azul) y el área experimental (punto rojo); b) parcela experimental (cuadrado rojo) y ubicación de un piezómetro (punto amarillo) y dos áreas de muestra representativas de texturas finas del suelo (PF; cuadrado naranja) y texturas gruesas del suelo (PC; cuadrado verde). La línea azul muestra la ubicación del Río Grande a ~900 m en dirección al sur desde el centro del huerto.

El agua llega al huerto mediante riego por inundación durante el ciclo agrícola. En el año 2018, se registraron 11 eventos de riego de ~127 mm cada uno. El riego se realizó sistemáticamente en intervalos de tiempo de aproximadamente ~3 a 4 semanas. El primer riego se aplica para lixiviar las sales del perfil del suelo debido al acumulado en el ciclo anterior. Una peculiaridad del sitio de estudio es la existencia de dos regiones de textura de suelo distintas que son espacialmente visibles en el campo y en imágenes aéreas. Una de las texturas del suelo está compuesta por suelos con altos contenidos de arcillas (en adelante denominados Pecan Fine (*PF*), donde los árboles de nogal muestran un crecimiento precario; la otra textura del suelo está compuesta por partículas de suelo más gruesas (en adelante denominados Pecan Coarse (*PC*) donde los árboles han crecido sanos (Ortiz & Jin, 2021).

Se utilizaron datos *LiDAR* del USGS en el área para calcular el modelo de altura del dosel (CHM) y evaluar el efecto de las texturas del suelo. El huerto donde los árboles muestran un crecimiento diferencial. Se utilizaron datos de imágenes satelitales Sentinel-2 para re-escalar el índice de vegetación a valores del coeficiente basal del cultivo ( $K_{cb}$ ) e imágenes de Landsat 7 y 8 para obtener valores de evapotranspiración actual ( $ET_a$ ) y datos meteorológicos de reanálisis para el cálculo de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) (Figura 2).



\*Allen et al., 2007; \*\* Penman-Monteith, Allen et al., 1998.

**Figura 2.** Diagrama de flujo para estimar las variables necesarias en el método PETVI. Este diagrama de flujo muestra las variables de entrada de izquierda a derecha (cuadrados amarillos). Se requieren imágenes del satélite Sentinel-2, datos meteorológicos e imágenes de  $ET_a$  de Landsat utilizando algoritmos METRIC. En el centro del diagrama de flujo se encuentran los cálculos y procedimientos básicos. Finalmente, en los recuadros verdes se representan los resultados a escala diaria de  $T_r$ ,  $ET_a$ , y por último, pero no menos significativo, la evaporación como el valor residual de la resta de la  $T_r$  de  $ET_a$ .

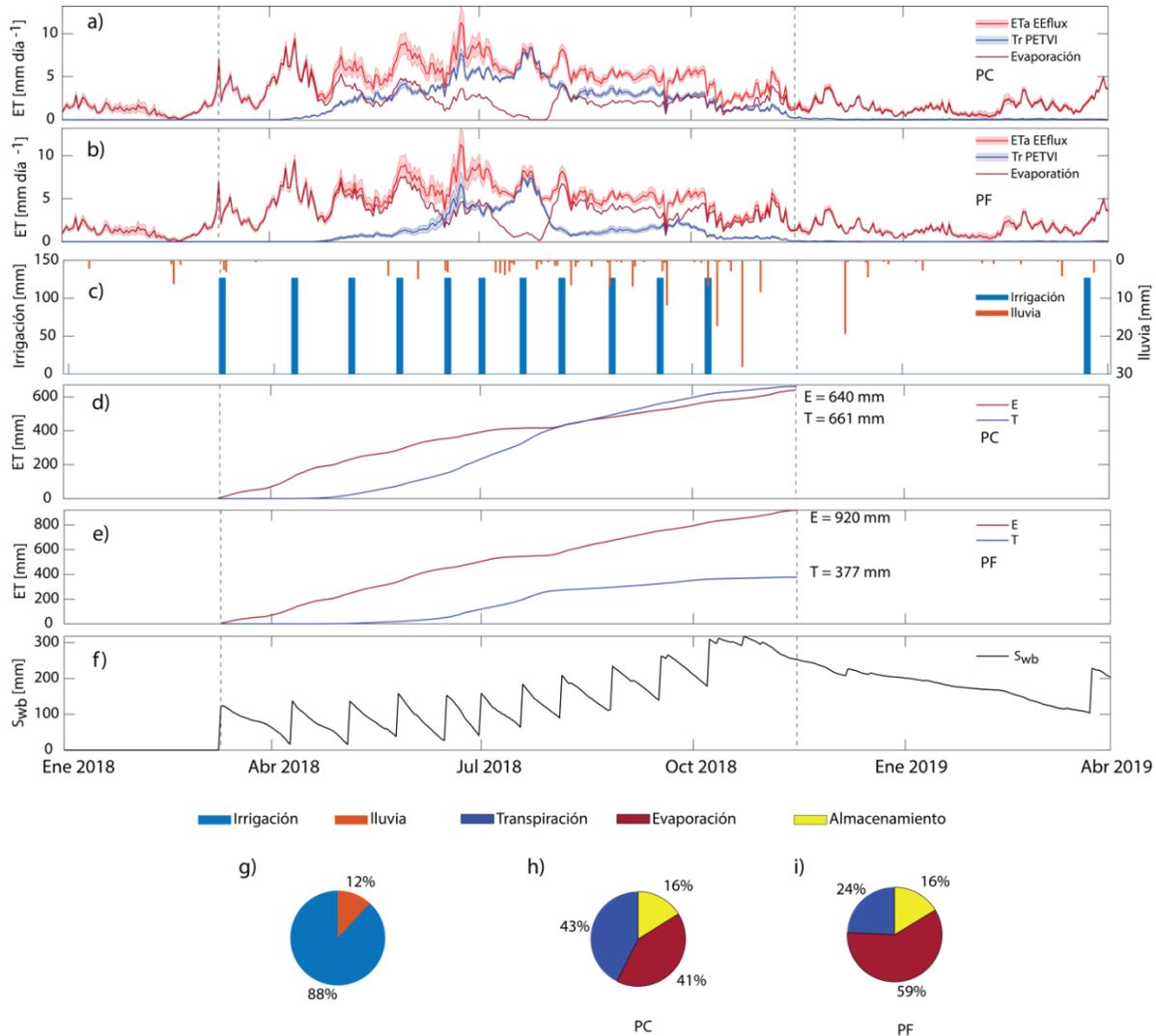
La dinámica de la evapotranspiración en tierras de cultivo de regiones semiáridas es útil dado que permite comprender cómo se transfiere el agua hacia la atmósfera desde los sistemas agrícolas. En este trabajo, analiza la dinámica de la  $ET_a$  real y su división en evaporación ( $E_v$ ; agua improductiva) y transpiración ( $T_r$  [agua productiva]) con una serie de tiempo que comienza el 1 de enero de 2018 y finaliza el 31 de marzo de 2019 para observar el comportamiento de la  $ET_a$  real y su división en evaporación ( $E_v$ ; agua improductiva) y transpiración ( $T_r$ ). La serie temporal inicia con el riego pre-brotación (Figura 3).

## Resultados y Discusión

El agua consumida por evapotranspiración ( $ET_a$ ) en el huerto durante la temporada de crecimiento fue de 1,297 mm. La mayor parte del flujo de la  $ET_a$  en la temporada temprana del ciclo agrícola fue agua improductiva (Evaporación [ $E_v$ ]), es decir el agua que es evaporada directamente del suelo, en el momento en que los árboles de nuez muestran poca o nula actividad y el riego previo a la brotación se entrega principalmente para lixiviar las sales acumuladas en el perfil del suelo derivado de las actividades agrícolas del ciclo anterior.

Los flujos de transpiración ( $T_r$ ) iniciaron en abril con la brotación de las Nogales, alcanzando su valor máximo en junio, cuando el cultivo alcanzó su mayor desarrollo foliar con una tasa de  $T_r$  de  $7.8 \text{ mm día}^{-1}$ , y el  $E_v$  disminuyó su magnitud con valores cercanos a cero, en septiembre los valores de  $E_v$  aparecen debido a que disminuye la actividad de la vegetación, y los árboles inician su periodo de dormancia. Por otro lado, la  $E_v$  continúa más allá del final del ciclo de crecimiento por efecto de la humedad disponible en el suelo y a la demanda atmosférica de evapotranspiración continúa.

Las Figuras 3 a, b; muestran las series de tiempo de la trayectoria y las variaciones de  $ET_a$ ,  $E_v$  y  $T_r$  básicamente para las dos áreas de muestra representativas de suelo grueso (PC) y suelo fino (PF), respectivamente. La variabilidad en  $T_r$  en el sitio denominado PC muestra una menor variabilidad versus el incremento en la variabilidad de la  $T_r$  en el área denominada PF, lo anterior refleja la influencia de ambas texturas del suelo en el uso de agua por los árboles. Generalmente y durante toda la temporada de crecimiento, la variabilidad de  $T_r$  en PC se mantiene baja, reflejando la señal homogénea de los índices de vegetación de los árboles sanos, mientras que las  $T_r$  de PF muestran una mayor variabilidad. Además, los árboles del área PF son significativamente más pequeños que los del área PC, produciendo valores de  $T_r$  más bajos que los árboles en el PC durante toda la temporada de crecimiento. La  $E_v$  promedio acumulado en PC se registró en ~640 mm. 3c). Los flujos de transpiración acumulados más pequeños ocurrieron en el área de PF, donde  $E_v$  totalizó 920 mm y  $T_r$  representó solo 377 mm, que en comparación con  $T_r$  de PC representa ~58 % de su total.



**Figura 3** a), b) muestra las series de tiempo de la dinámica de evapotranspiración media ( $ET_a$ ), transpiración (Tr) y evaporación del suelo (Ev) para el área de suelo de grano grueso (PC) y el área del suelo de grano fino (PF) respectivamente; las líneas sombreadas en rojo y azul muestran la variabilidad de  $ET_a$  y Tr respectivamente con  $\pm$  una desviación estándar; c) muestra los aportes de agua al huerto provenientes de eventos de riego (barras azules) y eventos de lluvia (barras rojas); d, e,) muestran el Ev acumulativo (rojo) y el Tr acumulativo (azul) para PC y PF respectivamente; f) serie temporal del balance hídrico superficial (SWC); g) indica la proporción de aportes de agua como porcentaje de riego (azul) y lluvia (rojo); y h, i) muestra la proporción de los componentes de salida de agua (Tr en azul, Almacenamiento en amarillo y Ev en rojo) expresada en porcentaje para los sitios PC y PF respectivamente.

En la producción agrícola, el uso consuntivo del agua se determina a partir de la evapotranspiración ( $ET_a$ ), y que comúnmente se considera el equivalente a la huella hídrica del cultivo. Esta huella hídrica en cultivos de importancia económica generalmente se complementa con riego. En el huerto de estudio, los flujos de  $ET_a$  comenzaron a principios de marzo, después del primer evento de riego y antes de la brotación, como parte de la preparación del suelo para lixiviar las sales más allá de la zona de las raíces (Jin et al., 2018; Palmate et al., 2022). La mayor parte del agua que ingresa al huerto

durante el período de senescencia regresa a la atmósfera en forma de evaporación ( $E_v$ ) y se convierte en agua improductiva debido a que la vegetación está inactiva.

Los valores diarios de  $ET_a$  fluctuaron desde cercanos a cero al inicio de la temporada hasta valores máximos de 10 mm día<sup>-1</sup> durante la temporada de máximo desarrollo vegetal; esto ocurrió de julio a agosto. Desde el 10 de marzo [primer riego] hasta el 15 de noviembre, se calculó una  $ET_a$  total de 1,297 mm durante el período de observación. Estos valores son comparables a los hallazgos recientes de Mokari et al., (2022) en un huerto de nueces de Nuevo México, donde se obtuvo  $ET_a$  mediante imágenes térmicas y documentaron valores de  $ET_a$  en un rango de 1200 a 1300 mm de agua. Otro trabajo realizado en la región productora de nueces de Nuevo México (Miyamoto, 1983) reportó una  $ET_a$  total de 1,310 mm durante la temporada de crecimiento, también similar a la  $ET_a$  registrada en el sitio de estudio.

Las diferencias entre los valores informados y nuestros hallazgos se pueden atribuir a las particularidades del sitio de estudio debido a las texturas del suelo y el desarrollo de la vegetación y ligeras diferencias en las condiciones climáticas de la variabilidad climática natural del área. La característica más destacada de nuestro análisis es el hallazgo de que la mayor parte del agua improductiva consumida en el huerto se produce a principios de año, al comienzo de la temporada de crecimiento, y representa el 28 % de la cantidad anual de agua entregada y el 30 % de la  $ET$  total.

## Conclusiones

En este trabajo encontramos que la textura del suelo influyó en la variabilidad del agua productiva e improductiva en el huerto. Observamos que una gran parte del uso improductivo del agua ocurre temprano en la temporada debido a la preparación del suelo para el siguiente ciclo agrícola.

La aplicación de la metodología *PETVI* para separar los flujos de  $ET$  usando una resolución espacial moderada (30 m de Landsat y 10 m de S-2) y temporal (16 días de Landsat y 3-5 días de S-2) nos permitió observar la variabilidad espaciotemporal del uso productivo e improductivo del agua en el huerto.

Nuestros datos indican que respaldan la hipótesis de que los cambios impulsados por la textura del suelo en la partición de  $ET_a$  limitan el uso del agua por parte de los árboles, limitando o mejorando su crecimiento y desarrollo del dosel. Según nuestros hallazgos, la mayor parte del agua improductiva ocurre en los parches irregulares de *PF*, mientras que, el uso de agua más productivo ocurre en las áreas de *PC*. El uso acumulado de agua improductiva es mayor en el *PF* que en el *PC* en cada período de riego, debido principalmente a la baja fracción de vegetación dentro del área del *PF*. Con base en estos hallazgos, el mejor momento para reducir el uso improductivo de agua en el huerto es al comienzo del ciclo agrícola, acercando las primeras entregas de agua al momento de la brotación. Modificando la calendarización de los primeros riegos, los agricultores podrían ayudar a reducir las concentraciones de sal en el perfil del suelo y reducir el agua improductiva al inicio de la temporada.

## Referencias Bibliográficas

- Ahadi, R., Samani, Z., & Skaggs, R. (2013). Evaluating on-farm irrigation efficiency across the watershed: A case study of New Mexico's Lower Rio Grande Basin. *Agricultural Water Management*, 124, 52–57. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2013.03.010>
- Assadian, N. W., Fenn, L. B., Flores-Ortiz, M. A., & Ali, A. S. (1999). Spatial variability of solutes in a pecan orchard surface-irrigated with untreated effluents in the upper Rio Grande River basin. *Agricultural Water Management*, 42(2), 143–156. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(99\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(99)00037-2)
- FAO. (2021). AQUASTAT-FAO. 2021. <https://www.fao.org/aquastat/en/overview/methodology/water-use>
- Jin, N., Ren, W., Tao, B., He, L., Ren, Q., Li, S., & Yu, Q. (2018). Effects of water stress on water use efficiency of irrigated and rainfed wheat in the Loess Plateau, China. *Science of The Total Environment*, 642, 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.06.028>
- Jägermeyr, J., Gerten, D., Heinke, J., Schaphoff, S., Kummu, M., & Lucht, W. (2015). Water savings potentials of irrigation systems: global simulation of processes and linkages. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(7), 3073–3091. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3073-2015>
- Mokari, E., Samani, Z., Heerema, R., Dehghan-Niri, E., DuBois, D., Ward, F., & Pierce, C. (2022). Development of a new UAV-thermal imaging based model for estimating pecan evapotranspiration. *Computers and Electronics in Agriculture*, 194, 106752. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2022.106752>
- Mokari, E., Samani, Z., Heerema, R., & Ward, F. (2021). Evaluation of long-term climate change impact on the growing season and water use of mature pecan in Lower Rio Grande Valley. *Agricultural Water Management*, 252, 106893. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.106893>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1250033>
- Miyamoto, S. (1983). Consumptive Water Use of Irrigated Pecans. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 108(5), 676–681.
- Nazari, B., Liaghat, A., Akbari, M. R., & Keshavarz, M. (2018). Irrigation water management in Iran: Implications for water use efficiency improvement. *Agricultural Water Management*, 208, 7–18. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.003>
- Ortiz, A. C., & Jin, L. (2021). Chemical and hydrological controls on salt accumulation in irrigated soils of southwestern U.S. *Geoderma*, 391. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114976>
- Palmate, S. S., Kumar, S., Poulouse, T., Ganjegunte, G. K., Chaganti, V. N., & Sheng, Z. (2022). Comparing the effect of different irrigation water scenarios on arid region pecan orchard using a system dynamics approach. *Agricultural Water Management*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107547>
- Ramirez-Valle, Orlando, "Impact Of Agricultural Practices On The Consumptive Water Use Of Irrigated Annual And Perennial Crops Of Northern Mexico And The U. S. Southwest." (2022). *Open Access Theses & Dissertations*. 3717. [https://scholarworks.utep.edu/open\\_etd/3717](https://scholarworks.utep.edu/open_etd/3717)

Sketch, M., Dayer, A. A., & Metcalf, A. L. (2020). Western ranchers' perspectives on enablers and constraints to flood irrigation. *Rangeland Ecology & Management*, 73(2), 285-296.