

Evaluación de cambios de indicadores hidrológicos y de vegetación en la región agrícola de secano de Córdoba, Argentina, entre 1970 y 2020

de la Casa, A.; Ovando, G.; Díaz, G.; Clemente, J.; Díaz, P. y Soler, F.

RESUMEN

La dinámica hidrológica de la región agrícola de Córdoba se evaluó entre 1970 y 2020 utilizando el balance de agua de Thornthwaite para interpretar aspectos tanto productivos como de sustentabilidad. La variabilidad temporal y espacial de indicadores hidrológicos fue examinada entre 2000 y 2020, para determinar su influencia sobre la vegetación usando el NDVI de MODIS como proxy. El balance se evaluó comparando dos alternativas para computar la extracción de agua del suelo cuando $PP-ETP < 0$, la original que considera una relación exponencial con respecto a la Evapotranspiración Potencial (ETP) y otra que considera una extracción lineal, no encontrando diferencias entre ambas. También se analizó la influencia de distintos procedimientos para estimar ETP: Thornthwaite (ETP_{Th}), Hamon (ETP_H) y Penman-Monteith (ETP_{PM}). Mientras que los valores de ETP_{Th} y ETP_H resultan absolutamente análogos, los de ETP_{PM} son sistemáticamente mayores a los anteriores y más variables, si bien la pendiente de la relación lineal entre ellos tiende a 1. El consumo de agua (ETR_{Th}) fue el indicador más correlacionado con la dinámica estacional del NDVI departamental, en especial cuando se considera el retraso de 1 mes con respecto al estímulo hídrico. La tendencia de los indicadores hidrológicos evaluados en distintos puntos de la provincia, en general, no resultó significativa excepto en Pilar Observatorio, donde se detectaron tendencias significativas ($p < 0,05$) de aumento de T y ETP y disminución de PP y ETR.

Palabras clave: cambio climático, deficiencia/exceso de agua, NDVI; tendencia

de la Casa, A.; Ovando, G.; Díaz, G.; Clemente, J.; Díaz, P. and Soler, F., 2023. Evaluation of changes in hydrological and vegetation indicators between 1970 and 2020 in the rainfed agricultural region of Córdoba, Argentina. RADA XIV: 1-17

SUMMARY

Thornthwaite water balance was used to evaluate hydrological dynamics of the agricultural region of Córdoba between 1970 and 2020, and to interpret both productive and sustainability aspects. Both, temporal and spatial variability of hydrological indicators was examined between 2000 and 2020, and their

influence on the vegetation was determined using the MODIS NDVI as a proxy. The water balance was evaluated by comparing two alternatives to compute the water extraction from the soil when $PP-ETP < 0$, the original one that considers an exponential relationship with respect to Potential Evapotranspiration (ETP), and another that considers a linear relationship, finding no differences between both. In addition, different procedures to estimate ETP were assessed: Thornthwaite (ETP_{Th}), Hamon (ETP_H) and Penman-Monteith (ETP_{PM}). While the values of ETP_{Th} and ETP_H were similar, those of ETP_{PM} were systematically larger and more variable. Nonetheless, the slope of the linear relationship between different ETP procedures tended to 1. Water consumption (ETR_{Th}) was best correlated with the seasonal dynamics of NDVI at department level, especially when considering the 1-month delay with respect to the water stimulus. In general, the trends of the hydrological indicators evaluated in different points of the province were not significant, except in Pilar Observatorio where significant trends ($p < 0.05$) of T and ETP increases and PP and ETR decreases were detected.

Key words: climate change, deficiency/excess of water, NDVI; trend

de la Casa, A.; Ovando, G.; Díaz, G.; Clemente, J.; Díaz, P. y Soler, F. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. Ing. Agr. Félix Aldo Marrone 746, Ciudad Universitaria. (5000) Córdoba, Argentina. Correspondencia a: delacasa@agro.unc.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La región de secano de la provincia de Córdoba incrementó su aptitud agrícola en la segunda mitad del siglo XX, asociada a la disminución sostenida de la deficiencia hídrica (de la Casa y Ovando, 2014). Sin descartar la ocurrencia de algunos años inusualmente húmedos, la escasez de agua en la región constituye uno de los factores de riesgo para la agricultura que está siempre latente en mayor o menor medida (de la Casa y Nasello, 2015). Por esta razón, es imperativo evaluar los cambios de distintos indicadores relacionados a la dinámica del régimen hídrico, no sólo a fin de explicar variaciones temporales y espaciales de la productividad de los cultivos, sino también para monitorear la sustentabilidad del territorio (Viglizzo *et al.*, 1995; Viglizzo *et al.*, 2003).

La evaluación integral de las características hidrológicas de una región impone utilizar la técnica del balance de agua, que es una herramienta en particular idónea para analizar la dinámica temporal y espacial de la vegetación (Rodríguez-Iturbe, 2000). Sustentado en el principio de conservación de masa, este procedimiento integra los flujos de entrada y salida de agua a un reservorio de capacidad limitada

que, además del valor de consumo efectivo (ETR), permite computar condiciones hídricas tanto de deficiencia, cuando ETR es inferior a la tasa potencial (ETP), como de exceso cuando el ingreso de agua al sistema supera la capacidad máxima de retención del suelo (Fernández Long *et al.*, 2012). Las técnicas de balance de agua se han desarrollado con el propósito de estimar e integrar los distintos componentes del ciclo hidrológico en un territorio (McCabe y Markstrom, 2007). Incluso esta metodología puede ser empleada para distintos enfoques, por ejemplo de la Casa y Nasello (2015) analizaron la fluctuación periódica de la deficiencia de agua en la provincia de Córdoba, asociada en particular a la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), mientras que Cogliati *et al.* (2018) la emplearon para caracterizar la condición hidrológica de Neuquén.

McCabe y Markstrom (2007) desarrollaron un procedimiento para calcular el balance de agua del suelo que supone una simplificación del método de Thornthwaite (Thornthwaite y Mather, 1955), al considerar que la extracción de humedad disminuye de manera lineal con la reducción del agua almacenada. Thornthwaite y Mather (1955) habían establecido una relación no lineal entre el contenido de agua del suelo y

la pérdida potencial acumulada que organizaron en forma tabular (Westenbroek *et al.*, 2010). En su versión original, el cálculo del balance hídrico de Thornthwaite considera la información de las tablas de retención de agua, de modo que durante los primeros días en que la Evapotranspiración Potencial supera la Precipitación, el suelo entrega el agua más fácilmente. En los días subsiguientes, a medida que la deficiencia potencial acumulada aumenta, la humedad del suelo se pierde con menor facilidad (Thornthwaite, 1948; Thornthwaite y Mather, 1955).

La condición pluviométrica de la región central de la Argentina presentó una fluctuación notable en el transcurso del siglo XX, con anomalías de lluvia negativas hasta la década de 1960 y positivas a partir de entonces (de la Casa *et al.*, 2018). Minetti y Vargas (1998) explicaron la fase positiva del régimen de lluvias en la Argentina como resultado de un salto climático alrededor de la década de 1960 que, asociado al fenómeno de calentamiento global, tendría un carácter permanente. Sabbatini y Sabbatini (2021) también determinaron un salto de la precipitación en Entre Ríos, Argentina, con un valor medio anual de 946 mm antes de la década de 1970 y de 1150 mm posteriormente. Más preocupante, en cambio, es la concepción oscilatoria del fenómeno pluviométrico (de la Casa y Nasello, 2010; de la Casa *et al.*, 2018), ya que a la actual fase positiva debería continuar una negativa. En este caso, la sustitución de la ganadería por la agricultura, como de algunas otras alternativas de manejo que se adoptaron bajo un contexto climático más húmedo, puede resultar perjudicial, tanto económica como ambientalmente, de acuerdo a los antecedentes agroecológicos que existen en la región (Viglizzo y Frank, 2006).

Frente a la variabilidad que la precipitación experimentó en la región y considerando el fenómeno de calentamiento global, otro aspecto que merece atención en términos hidrológicos se refiere a la dinámica de la demanda atmosférica de agua. De acuerdo a la ecuación desarrollada por Penman (1948) para calcular la evapotranspiración potencial (ETP) o de referencia (ETo), el proceso de evaporación es impulsado tanto por los intercambios radiativos como por la acción de la difusión turbulenta, determinado por el efecto combinado de la velocidad del viento y la humedad atmosférica. De esta forma, además de considerar las tendencias de la temperatura del aire, que influye tanto sobre los componentes radiativos como aerodinámicos, se deben evaluar también las tendencias de la velocidad del viento, la humedad atmosférica y el balance radiativo a los efectos de explicar de manera exhaustiva la

variación de la evaporación de tanque, ETP o ETo (McKenney y Rosenberg, 1993; Donohue *et al.*, 2010; Irmak *et al.*, 2012; McVicar *et al.*, 2012).

Viglizzo *et al.* (2003) no encontraron una respuesta concluyente sobre la condición de sustentabilidad de los sistemas agrícolas en la región Pampeana y de sus trayectorias productivas a lo largo del tiempo. A tal efecto, propusieron desarrollar un sistema de monitoreo del ambiente rural basado en indicadores que sirva de herramienta para orientar las políticas medioambientales, impulsar las prioridades de investigación y dirigir las estrategias de comunicación. Tanto el consumo de agua, como la eficiencia de su uso y la relación lluvia-energía están entre los 18 indicadores ambientales que el software AgroEcolIndex utiliza para evaluar el impacto ambiental, valorar los servicios ecosistémicos y promover el ordenamiento sustentable de un territorio (Viglizzo *et al.*, 2006). El seguimiento de estos índices de naturaleza hídrica y de sus cambios a través del tiempo puede aportar información sobre variaciones en la condición de sustentabilidad del territorio.

Los índices de vegetación espectral (IVe) constituyen algoritmos simples y efectivos para detectar a partir de información satelital el tipo de cubierta vegetal, su vigor y dinámica de crecimiento (Mkhabela *et al.*, 2011; Nolasco *et al.*, 2021). Además de monitorear la condición de los cultivos y estimar la productividad agrícola (Sakamoto *et al.*, 2014; Saeed *et al.*, 2017; Seo *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020; Sakamoto, 2020; Nolasco *et al.*, 2021), los IVe como el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) también se han mostrado idóneos para identificar los cambios fenológicos de la vegetación a lo largo del su ciclo (Brown *et al.*, 2010; Jayawardhanaa y Chathurangeb, 2016).

El análisis de la tendencia de series de tiempo de precipitación, ETo y de otros componentes del ciclo hidrológico se ha incrementado notablemente en los últimos años, vinculado a la preocupación general sobre el cambio climático y la variabilidad climática (Umar *et al.*, 2018; Benestad *et al.*, 2022; Feng *et al.*, 2022). Por otra parte, evaluaciones de largo plazo del impacto que los cambios proyectados del clima, de la población y del uso de la tierra tendrían sobre los recursos hídricos son fundamentales para el desarrollo sustentable de un territorio (Sun *et al.*, 2008). En este sentido, una cuantificación ajustada de la disponibilidad de agua es crucial para afrontar el desafío de equilibrar la demanda y la oferta de agua en un territorio y, en tal sentido, es imperioso utilizar estimaciones más precisas de la demanda atmosférica.

El objetivo de este trabajo fue analizar, en la región agrícola de secano en la provincia de Córdoba, la dinámica de largo (entre 1970 y 2020) y mediano plazo (entre 2000 y 2020) que experimentaron los indicadores del régimen hídrico que ejercen influencia, tanto sobre la condición y el rendimiento de los cultivos como en la sustentabilidad agrícola y ambiental. Como objetivos secundarios de este trabajo se planteó: i) Evaluar el procedimiento de cálculo del Balance Hidrológico seriado utilizando un modelo simplificado de balance hídrico mensual (BHM) y mecánica de resolución estándar, junto con la evaluación de distintos métodos de estimación de ETP. ii) Revisar la aptitud del procedimiento de BH para representar la disponibilidad de agua en la región, analizando la influencia del consumo de agua (ETR) sobre información derivada de la curva estacional del NDVI, que se utiliza como un proxy de la vegetación. iii) Determinar la naturaleza y magnitud de los cambios temporales de los indicadores hidrológicos en la región, como así también analizar la relación de dependencia entre los cambios climáticos e hidrológicos acaecidos con respecto a su impacto sobre la dinámica de la vegetación.

MATERIAL Y MÉTODOS

1. Región en estudio

La Figura 1 presenta la localización geográfica de los Departamentos: Río Segundo, Río Cuarto, Marcos Juárez y Presidente Roque Sáenz Peña en la Provincia de Córdoba, así como de las estaciones meteorológicas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN): Pilar Observatorio, Río Cuarto Aero, Marcos Juárez Aero y Laboulaye Aero, cuya información se considera de referencia para cada uno de los territorios departamentales, respectivamente. Además, en la figura se muestran las isotermas de los valores medios anuales y las isoyetas de medias anuales, que se obtuvieron a partir de la información climática del SMN correspondiente a los registros del periodo 1981-2010, para el conjunto completo de las 71 estaciones de superficie que constituyen la red de observación, incluyendo las estaciones meteorológicas de la provincia de Córdoba y de provincias limítrofes. De acuerdo a los registros climáticos disponibles en el SMN, la información normal del periodo 1981-2010 se procesó en lugar de la referencia actual de la Organización Meteorológica Mundial entre 1990 y 2020.

El clima en el área de estudio se clasifica como subhúmedo seco (Rodríguez y de la Casa, 1990),

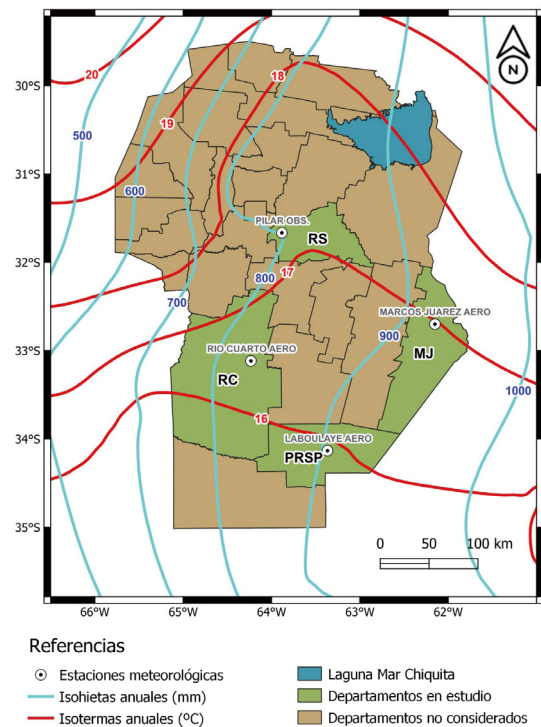


Figura 1. Ubicación geográfica de los Departamentos Río Segundo (RS), Marcos Juárez (MJ), Río Cuarto (RC) y Presidente Roque Sáenz Peña (PRSP) en la Provincia de Córdoba, así como de las estaciones meteorológicas Pilar Observatorio, Marcos Juárez Aero, Río Cuarto Aero y Laboulaye Aero, cuyos datos se utilizan en el estudio. En la región central de la República Argentina se presentan también las isotermas y las isoyetas de los valores medios anuales correspondientes al periodo 1981-2010, elaborados a partir de la red de observación de superficie del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

siendo la precipitación media anual entre 700 y 800 mm en el límite occidental y entre 900 y 1000 mm en el oriental. El régimen de lluvias es monzónico con un poco más del 80% de la lluvia del total anual registrada durante el semestre cálido, de octubre a marzo (de la Casa *et al.*, 2018). Por su parte, el régimen térmico presenta valores de temperatura media anual de aproximadamente 16°C en el límite austral de este sector, con un gradiente suave de aumento hacia el norte, como muestra la Figura 1.

Conjugando patrones de suelo y del régimen pluviométrico, Viglizzo *et al.* (2003) dividieron la llanura Pampeana en 5 regiones agroecológicas homogéneas. El territorio de Río Segundo se encuentra en la ecorregión de la Pampa Central (que se puede subdividir en subhúmeda al este y Semiárida hacia el oeste) de la provincia de Córdoba. Los suelos de esta región se clasifican como Haplustoles Énticos y Típicos, y presentan un relieve plano ligeramente ondulado desarrollado

sobre material de loess, de textura franco limosa con una pequeña pendiente hacia el este.

La producción agrícola de la región se realiza principalmente en secano y los cultivos de verano predominantes son la soja y el maíz (Sayago *et al.*, 2017). De acuerdo a la información del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, el área agrícola ocupada por el cultivo de soja en el departamento Río Segundo (RS) se ha visto ligeramente reducido en los últimos años, mientras que la superficie de siembra de maíz ha crecido hasta alcanzar actualmente un porcentaje de uso del suelo mayor a 20% (MAGyP, 2022). De esta forma, la superficie departamental de RS dedicada a ambos cultivos ascendió de 70 a 80% en el periodo entre 2000 y 2020. Un comportamiento similar muestra la información de Marcos Juárez, cuya superficie ocupada con maíz y soja presenta valores de alrededor de 70% a lo largo de este periodo.

En los departamentos de Río Cuarto (RC) y Presidente Roque Saénz Peña (PRSP), en cambio, la superficie dedicada a la actividad agrícola (soja y maíz) aumentó notablemente durante el periodo 2000-2020. Mientras en RC la superficie agrícola con soja y maíz hasta 2011 era inferior a 50% aumentó luego a 80%, en PRSP pasó de 10% al comienzo de la serie a valores que actualmente oscilan entre 50 y 60%.

2. Cálculo del balance hidrológico

El procedimiento de balance hidrológico se evaluó, como caso testigo, a partir de los registros mensuales de Precipitación (PP) y Evapotranspiración Potencial (ETP), obtenidos en la estación Pilar Observatorio (SMN), para el periodo entre 1970-2020. Se utilizaron para computar ETP las tres expresiones que se indican en punto 2.3.

El archivo de entrada para el cálculo del balance hidrológico contiene datos mensuales de temperatura (T) y precipitación (PP) (McCabe y Markstrom, 2007). A partir de la información térmica el programa calcula exclusivamente ETP_H , lo que impide considerar cualquier otro procedimiento alternativo, y establece asimismo si la precipitación es líquida o sólida (nieve), como así también la tasa de fusión para incorporar de manera progresiva agua al suelo. De acuerdo al régimen climático de la región en estudio (Figura 1), los episodios de nevada son muy poco frecuentes y aportan eventualmente escasa cantidad de agua, de modo que su consideración no resulta de particular de interés. El procesamiento de la información de lluvia, por otra parte, a través de la interfaz

gráfica permite establecer en primera instancia un monto de escurrimiento superficial, si bien el procedimiento considera de manera arbitraria una proporción de escurrimiento constante, más asociada con el lugar o al tipo de suelo que con la intensidad de la lluvia.

A los efectos de superar estas limitaciones y ajustar el procedimiento a las condiciones regionales, se procedió a programar una rutina de cálculo (macro de Excel) de BH cuya secuencia se presenta en el diagrama de la Figura 2. En este caso, la ETP configura directamente un dato de entrada, además de la PP, y así es factible calcular el BH asumiendo distintos modelos para estimar la demanda atmosférica de agua. Por su parte, teniendo en consideración que el escurrimiento superficial (E_s) es un hecho probable, el procedimiento establece un porcentaje fijo (5%) de escurrimiento directo (RO) respecto a la precipitación total, siendo el remanente la precipitación efectiva (P).

De esta forma, a partir de los casos positivos de (P - ETP) el almacenaje de agua del suelo (ST)

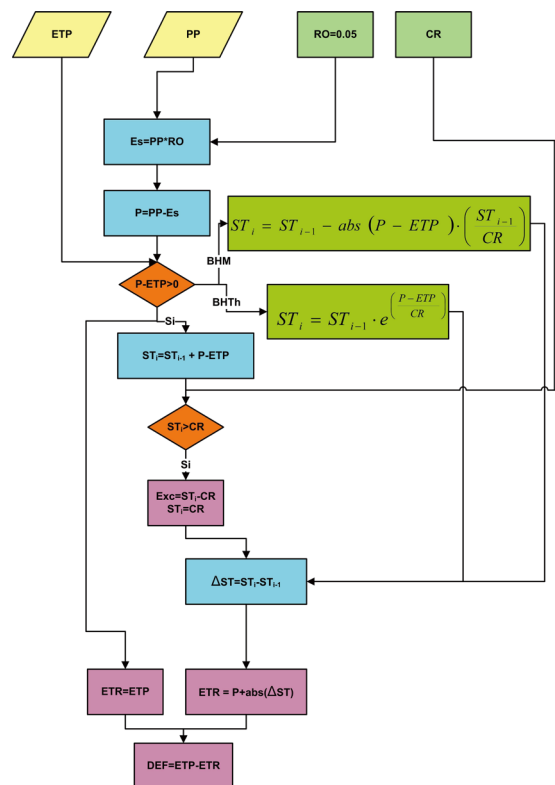


Figura 2. Diagrama del modelo de balance hidrológico mensual con las variantes propuestas para el cálculo del Balance hidrológico mensual (BHM) y del Balance hidrológico Thornthwaite (BHTH).

se incrementa conforme al valor remanente, hasta que se alcanza la máxima capacidad de retención de agua (CR), variable con el lugar y tipo de suelo. El monto que sobrepasa CR configura el exceso hídrico (Exc). Por su parte, cuando se presentan los casos negativos (Deficiencia potencial), la evapotranspiración real (ETR) o consumo de agua se establece de acuerdo al valor de P y el monto que se extrae de ST (ΔST), de acuerdo a criterio de cada BH, siendo para el Balance hidrológico mensual (BHM) una relación lineal con la ETP, en tanto que el modelo de Balance hidrológico Thornthwaite (BHTh) plantea una relación exponencial con respecto a la ETP.

3. Cálculo de la ETP

3.1 Método de Hamon (ETP_H)

El cálculo del balance hidrológico mensual a partir de una interfase digital (McCabe and Markstrom, 2007), utiliza exclusivamente el procedimiento de Hamon para estimar la ETP (ETP_H). El método responde a la siguiente ecuación (Hamon, 1961):

$$ETP_H = 13,97 \times d \times D^2 \times W_t \quad [1]$$

Donde d es el número de días de cada mes, D es la duración del día media mensual expresada en unidades de 12 horas, y W_t es un término que expresa la densidad del vapor de agua a saturación ($g\ m^{-3}$), que se obtiene por:

$$W_t = \frac{4,95 \times e^{0,062 \times T_m}}{100} \quad [2]$$

Donde T_m es la temperatura media mensual ($^{\circ}C$), que se obtuvo del promedio de la temperatura media diaria calculada a partir de los registros de temperatura máxima y temperatura mínima diarias.

3.2 Método de Thornthwaite (ETP_{Th})

El cálculo mensual de ETP_{Th} se realizó a partir de la siguiente expresión (Thornthwaite, 1948):

$$ETP_{Th} = 16 \times \left[\frac{H}{12} \times \frac{n}{30} \right] \times \left[\frac{10 \times T_m}{I} \right]^a \quad [3]$$

donde H es la duración del día (hs), n es el número de días de cada mes, T_m es la temperatura media mensual, en tanto

$a = 6,75E-7 \times I^3 - 7,71E-5 \times I^2 + 1,79E-2 \times I + 0,4924$; donde:

$$I = \sum_{\text{enero}}^{\text{diciembre}} \left(\frac{T_m}{5} \right)^{1,514} \quad [4]$$

3.3 Método de Penman-Monteith (ETP_{PM})

Los valores de ETP_{PM} se obtuvieron de acuerdo a la expresión de Allen *et al.* (1998):

$$ETP_{PM} = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 237} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad [5]$$

donde ETP_{PM} es la tasa diaria de evapotranspiración de referencia ($mm\ d^{-1}$), R_n es la radiación neta ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), G es el flujo de calor del suelo ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), Δ es la pendiente de la curva de saturación con respecto a la temperatura ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$), γ es la constante psicrométrica ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$), T es la temperatura media del aire ($^{\circ}C$), u_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura ($m\ s^{-1}$), e_s es la presión de vapor de saturación (kPa), y e_a es la presión de vapor actual (kPa). El valor de 900 es una constante que representa una superficie hipotética de un pasto corto con una altura de 0,12 m, una resistencia superficial de $70\ s\ m^{-1}$ y un albedo de 0,23. Por su parte, 0,408 convierte la R_n expresada en $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ en evaporación equivalente expresada en $mm\ d^{-1}$.

Este procedimiento se aplicó a escala diaria para la serie completa de datos, siguiendo las pautas que proponen de la Casa *et al.* (2022) y, de acuerdo a la escala de resolución del BH, los valores se acumularon mensualmente. La información meteorológica completa para obtener ETP_{PM} se extiende desde 1970 hasta 2018.

4. Datos satelitales: NDVI del periodo 2000-2020

En este estudio se utilizaron datos mensuales del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) del sensor MODIS, a bordo del satélite TERRA. En particular se empleó el producto MOD13C2 versión 6, que proporciona un valor de NDVI por píxel en una cuadrícula de modelado climático (CMG) de resolución 0,05 grados de latitud/longitud. Mayores detalles sobre los productos MODIS NDVI se pueden encontrar en Huete *et al.* (2002). La información que corresponde a un lapso de 21 años se obtuvo a través del sistema de datos en línea AppEEARS, desarrollado y mantenido por NASA GES DISC (Acker y Leptoukh, 2007), extrayendo los datos de cada departamento en formato de archivos Shapefile. Asimismo, se calcularon los valores medios mensuales de NDVI de los departamentos en estudio, para analizar su correlación y regresión

con distintos indicadores del balance, como así también se obtuvo la serie de valores anuales para analizar su relación con la respectiva deficiencia de agua.

5. Evaluación de la tendencia

Se aplicó el análisis de regresión lineal para evaluar la tendencia de las series de tiempo. El principal parámetro estadístico extraído del análisis de regresión es la pendiente, que indica el cambio temporal medio de la variable en estudio. Los valores positivos de la pendiente muestran tendencias crecientes, mientras que los valores negativos indican tendencias decrecientes (Tabari *et al.*, 2011).

La significación estadística de la pendiente se evaluó con el estadístico *t* de Student. El análisis de tendencias que se aplicó corresponde a una regresión lineal ordinaria entre los valores agregados anuales y el año (τ), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\hat{y} = (y_0 \pm \delta y) + (\beta \pm \delta \beta) \tau + \varepsilon \quad [6]$$

donde \hat{y} corresponde al mejor ajuste de la tendencia lineal, y_0 es la ordenada al origen, β la pendiente y ε el término de error. También se definieron las tendencias estadísticamente significativas aquellas en que la estimación de β fue diferente a cero al nivel de 5% (lo que implica una estimación baja del error estándar $\delta \beta$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Relación entre los valores de ETP

La Figura 3 presenta la relación entre los valores mensuales de Evapotranspiración Potencial determinados con el método de Thornthwaite (ETP_{Th}), en abscisa, con respecto a los calculados a partir de Hamon (ETP_H) y Penman-Monteith (ETP_{PM}) en ordenada para los registros de la estación meteorológica Pilar Observatorio. La función de ajuste expone el comportamiento lineal para la relación en ambos casos. Mientras la relación entre ETP_{Th} y ETP_H muestra una fuerte aproximación a la función identidad (la pendiente es 0,87) y la dispersión de los datos es escasa ($R^2 = 0,985$), la función de ajuste de ETP_{Th} con respecto a ETP_{PM} se proyecta de manera sistemática por encima de la función 1:1 con un marcado paralelismo (la pendiente es 1,03), y se destaca una mayor dispersión entre los registros como lo refleja el coeficiente de determinación menor ($R^2 = 0,778$).

La similitud entre los valores de ETP que

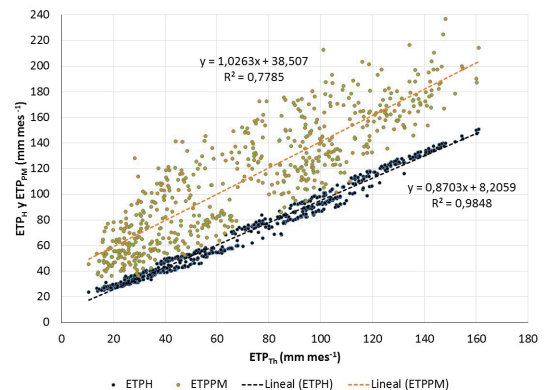


Figura 3. Gráfico de dispersión entre los valores mensuales de ETP obtenidos a partir del método de Thornthwaite (ETP_{Th}) con respecto a los calculados con los métodos de Hamon (ETP_H) y Penman Monteith (ETP_{PM}) en Pilar Observatorio, Córdoba.

calculan los modelos de Th y H obedece a que el elemento meteorológico utilizado para representar la capacidad de evaporación de la atmósfera en ambos casos es la temperatura del aire, si bien el fundamento de cada procedimiento es distinto. Mientras que la temperatura en el método de Hamon expresa la variación del contenido atmosférico de humedad, en la fórmula de Thornthwaite se refiere directamente a la disponibilidad de energía. Esta similitud, a priori, sugiere que los resultados del balance hidrológico obtenidos con la demanda atmosférica estimada a partir del método de H no deberían ser muy diferentes a los que se producen con Th.

La mayor dispersión que presenta la relación con el procedimiento de PM obedece a la naturaleza multifactorial propia de este método combinado, de modo tal que, comparado a las expresiones de Th o H, multiplica la diversidad de resultados posibles. Por otra parte, la cuantificación de la demanda atmosférica es notablemente más elevada en este caso (la ordenada es 38,5 mm), algo que en principio representaría una fuente de diferenciación en los resultados del balance. Además, esta diferencia pone en evidencia que en Pilar Observatorio la influencia de los procesos advectivos, que aportan energía y remueven vapor de agua, resulta en un incremento en la demanda potencial de agua. Acumulados de ETP_{PM} sistemáticamente más elevados que ETP_{Th} fueron reportados por Vicente-Serrano *et al.* (2014) en España, Lakatos *et al.* (2020) en la región de los Cárpatos y Lang *et al.* (2017) en China, tanto para valores anuales como estacionales, similar a lo señalado por Serio *et al.* (2006) y Murphy (2008) en la Argentina.

2. Comparación de los procedimientos de balance hídrico

A los efectos de evaluar el desempeño de los procedimientos de BH, en particular para comparar la dinámica de extracción de agua del suelo de BH_{Th} y BHM, se presentan los respectivos valores de Consumo (ETR), Deficiencia (Def) y Exceso de agua (Exc) que constituyen los resultados del

análisis hidrológico correspondientes al periodo de largo plazo entre 1970 y 2020. Siendo el ingreso de agua al sistema el mismo en todos los casos y siguiendo el enfoque previo, la Figura 4 presenta para Pilar Observatorio cada uno de los elementos que constituye la información hidrológica de salida del balance, estableciendo la relación entre los resultados que utiliza ETP_{Th}, en abscisa, con respecto a los valores que se obtienen con ETP_H y

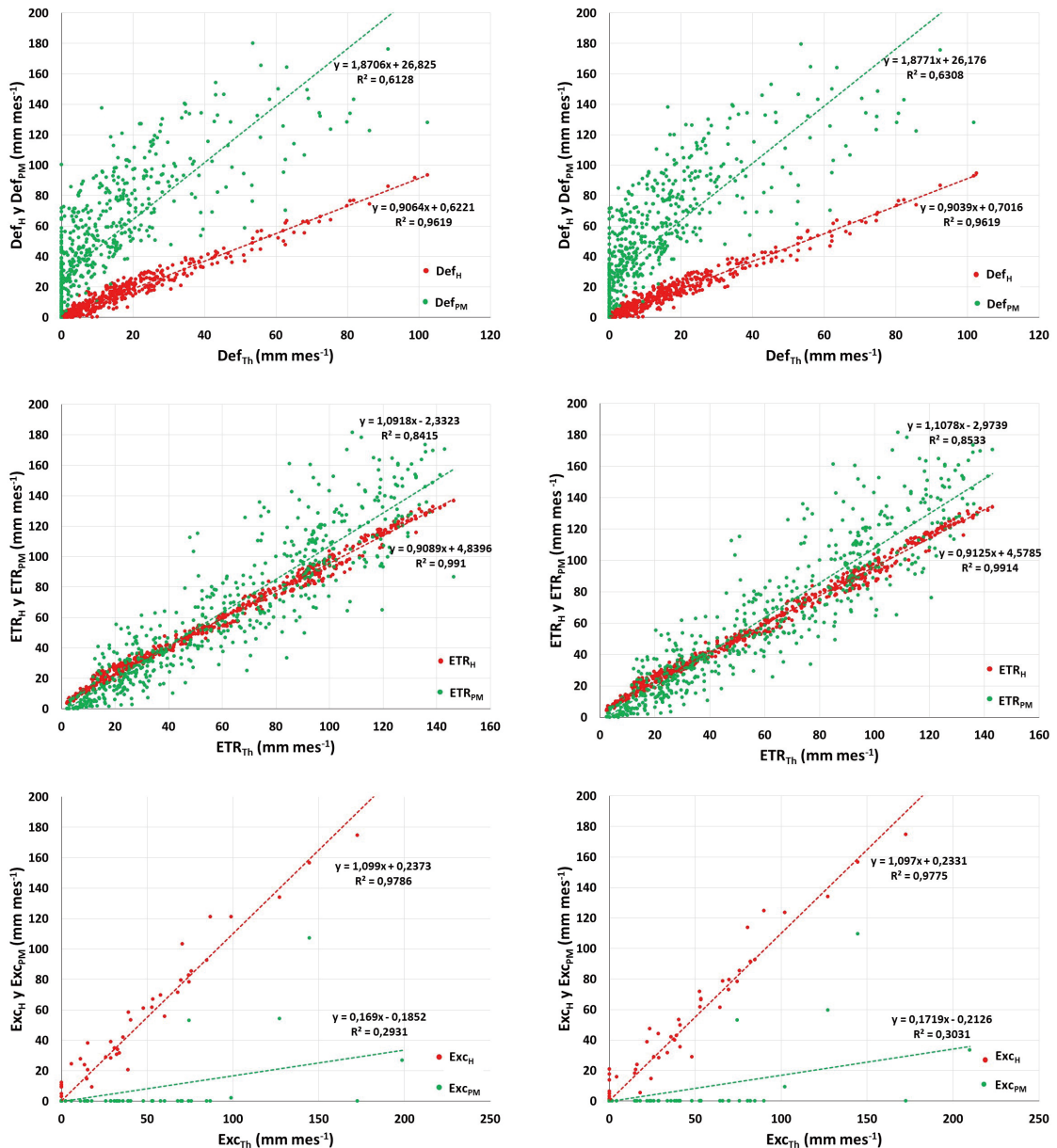


Figura 4. Relación entre los valores de Evapotranspiración real (ETR), Deficiencia (Def) y Exceso de agua (Exc) obtenidos de ETP_{Th} (en abscisa), ETP_H y ETP_{PM} que resultan alternativamente a partir de los procedimientos de Balance Hidrológico de Thornthwaite (BH_{Th}) y Mensual (BHM) en Pilar, Córdoba, entre 1970 y 2020.

ETP_{PM} en ordenada, y de acuerdo con la valoración particular de cada BH.

Las relaciones que muestra la Figura 4 confirman en cada caso la equivalencia de los procedimientos de balance hidrológico sometidos al análisis, ya que ambos producen tanto funciones de ajuste como parámetros de dispersión absolutamente similares entre los respectivos valores de ETR, Def y Exc que se obtienen considerando los diferentes métodos de estimación de ETP.

Por su parte, estos resultados corroboran también la indiferencia de utilizar tanto ETP_{Th} como ETP_H a los efectos de considerar la demanda atmosférica de agua, ya que tanto los coeficientes angulares como los coeficientes de determinación son próximos a 1 para los tres indicadores hidrológicos. Por otra parte, cualquiera sea el balance de agua que se utilice la función de ajuste entre los valores de ETR obtenidos a partir de ETP_{Th} y de ETP_{PM} tampoco resultan muy diferentes a la función identidad, siendo la pendiente próxima a 1 y el valor de la ordenada no distinta de cero, si bien resulta evidente la mayor dispersión de la relación en total correspondencia con la información de la Figura 4.

Los valores más elevados de ETP_{PM} explican que la deficiencia de agua resulte ostensiblemente más alta cuando el balance de agua utiliza el procedimiento de PM para estimar la demanda atmosférica, en comparación tanto a ETP_{Th} como a ETP_H, como así también que los excesos hídricos se presenten, en cambio, menos frecuentes y sus montos resulten notablemente más reducidos.

3. Relación del balance hídrico (BH) con el NDVI

Con el propósito de analizar la dependencia entre la dinámica de la vegetación y la condición hidrológica del departamento Río Segundo, con datos circunscritos sólo a la estación Pilar Observatorio, la Tabla 1 presenta los coeficientes de correlación entre los registros meteorológicos mensuales observados y la información que deriva del BHTh con respecto al valor de NDVI medio departamental. Asimismo, para considerar el efecto de retraso que el crecimiento de la vegetación experimenta con respecto a las condiciones atmosféricas e hidrológicas (Ji and Peters, 2003; Zribi *et al.*, 2010; Zhang, *et al.*, 2013), se analiza también la información del indicador radiométrico referido al mes inmediato subsiguiente ($i+1$, siendo i el subíndice que denota al mes). Si bien el efecto de retardo en la respuesta de la vegetación se observó inicialmente entre la ocurrencia de lluvia y el crecimiento vegetal (Nicholson and Farrar, 1994), esta demora también fue puesta de manifiesto cuando la variación del NDVI se estableció en función al contenido de agua del suelo del mes previo a los datos radiométricos (Farrar *et al.*, 1994; Zribi *et al.* 2010). De la misma forma, la demora que ocurre entre el aporte hídrico y su repercusión sobre el crecimiento vegetal se refleja al considerar el consumo efectivo de agua (ETR) que deriva del BH (de la Casa *et al.*, 2017).

En lo que se refiere al comportamiento de la vegetación según lo interpreta el NDVI, la Tabla 1 corrobora que tanto la temperatura del aire como la precipitación son factores ligados

Tabla 1. Coeficientes de correlación entre variables meteorológicas e indicadores mensuales que se obtienen del Balance Hidrológico de Thornthwaite (BHTh) de Pilar Observatorio y el NDVI propio del mes (i) y del mes posterior ($i+1$) del departamento Río Segundo, Córdoba, entre enero de 2000 y diciembre de 2021.

	T	ETP_{Th}	ETP_{PM}	PP	ALM	ETR_{Th}	ETR_{PM}	EXC	DEF	ETR_{Th}/ETP_{Th}
T	1									
ETP_{Th}	0,978	1								
ETP_{PM}	0,839	0,881	1							
PP	0,640	0,631	0,472	1						
ALM	-0,106	-0,108	-0,205	0,295	1					
ETR_{Th}	0,864	0,879	0,747	0,821	0,183	1				
ETR_{PM}	0,718	0,728	0,602	0,902	0,303	0,929	1			
EXC	0,117	0,100	0,008	0,475	0,349	0,174	0,235	1		
DEF	0,300	0,317	0,359	-0,330	-0,587	-0,173	-0,340	-0,140	1	
ETR_{Th}/ETP_{Th}	0,294	0,278	0,121	0,634	0,615	0,632	0,709	0,167	-0,683	1
$NDVI_i$	0,524	0,451	0,171	0,485	0,243	0,528	0,469	0,237	-0,119	0,403
$NDVI_{(i+1)}$	0,683	0,722	0,504	0,572	0,147	0,741	0,622	0,154	0,017	0,387

Referencias: T : temperatura media; PP : precipitación; ETP_{Th} : evapotranspiración potencial (Thornthwaite); ETP_{PM} : evapotranspiración potencial (Penman-Monteith); ALM : almacenaje de agua del suelo; ETR_{Th} : evapotranspiración real (Thornthwaite); ETR_{PM} : evapotranspiración real (Penman-Monteith); EXC : exceso de agua; DEF : deficiencia de agua; ETR_{Th}/ETP_{Th} : evapotranspiración relativa.

directamente con el crecimiento vegetal o estado de la vegetación. Por su parte, en virtud que el método de Thornthwaite utiliza la temperatura para determinar ETP, la demanda atmosférica también se vincula de manera estrecha con NDVI, en especial porque ambas variables comparten la misma dinámica estacional. Por otra parte, mientras que la deficiencia y el exceso de agua no se presentan ligados de manera particular con el NDVI a escala mensual, los valores de ETP_{PM} y ETR_{PM} , si bien muestran una tendencia similar a los resultados que producen ETP_{Th} y ETR_{Th} , el valor de la correlación en ambos casos es menor.

Estos resultados ratifican además que la relación clima/vegetación, o clima/agricultura de manera más específica en este caso, es más estrecha y evidente en la región cuando se considera el retraso de la respuesta de la vegetación al estímulo tanto climático como hídrico. El consumo de agua derivado de BHTH (ETR_{Th}) es la variable más correlacionada con NDVI, razón por la cual el análisis de la dinámica temporal de la vegetación

se realiza a partir de ETR_{Th} con respecto al valor de NDVI del mes inmediato subsiguiente ($NDVI_{(i+1)}$). Los resultados del análisis de correlación y regresión entre estas variables se presentan en la Figura 5 que incluye, además de Río Segundo (RS), información equivalente de los territorios de Marcos Juárez (MJ), Presidente Roque Saénz Peña (PRSP) y Río Cuarto (RC) a los efectos de extender el análisis a distintos sectores de la región de secano de Córdoba.

El coeficiente de determinación del conjunto completo de datos para el departamento RS es 0,548 que, si bien resulta significativo ($p < 0,05$), expone una dispersión considerable. La performance moderada del ajuste lineal se explica en principio por el carácter departamental de los datos radiométricos evaluados a partir de la información meteorológica local de la estación Pilar Observatorio. No obstante, la figura muestra que la relación resulta más manifiesta y ajustada cuando los valores de NDVI corresponden a la etapa en que los cultivos transitan su ciclo de vida,

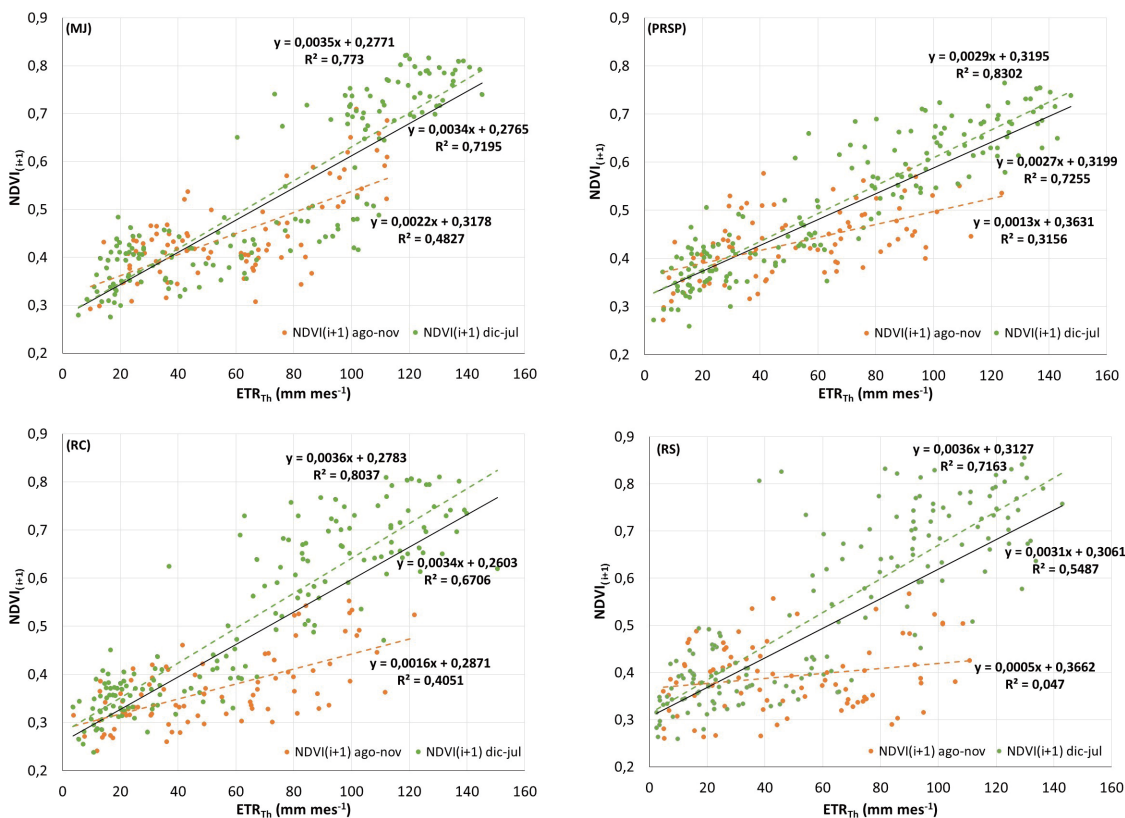


Figura 5. Relación entre la evapotranspiración real del BHTH (ETR_{Th}) calculada a partir de ETP_{Th} en Pilar, Marcos Juárez, Río Cuarto y Laboulaye y el NDVI del mes posterior ($i+1$) de los departamentos Río Segundo (RS), Marcos Juárez (MJ), Río Cuarto (RC) y Presidente Roque Sáenz Peña (PRSP), respectivamente, diferenciando la etapa en que la vegetación se encuentra inactiva previa a la siembra (entre agosto y noviembre) de la etapa durante el ciclo de cultivo (entre diciembre y julio).

periodo que en este caso comprende los meses desde diciembre hasta julio. El R^2 para la relación en esta etapa no sólo es más elevado y alcanza un valor de 0,716, sino que también se evidencia una tasa que es mayor a la pendiente general. Por otra parte, entre agosto y noviembre, que corresponde a la etapa previa o inmediatamente posterior a la siembra de los cultivos estivales, cuando en la escena predomina vegetación no activa o bajo condiciones de suelo desnudo, la relación es menos evidente con una marcada tendencia de la relación a la independencia en el departamento de RS.

La explicación que se formula para RS encuentra un sustento generalizado cuando se considera la información semejante de otros departamentos en la región agrícola de secano de Córdoba. Como muestra la Figura 5, tanto el coeficiente de determinación como la pendiente de la recta de ajuste en MJ, PRSP y RC son más elevados en el periodo entre diciembre y julio que los respectivos valores sin diferenciar. Por su parte, los mismos decrecen ostensiblemente cuando se considera la etapa próxima a la siembra de los cultivos estivales entre agosto y noviembre, justo un poco antes o durante el comienzo del periodo de lluvias de régimen monzónico de la región.

De esta forma, el comportamiento relativamente uniforme del NDVI en respuesta al consumo de agua expone la condición agrícola generalizada de la región y un modo similar de uso del suelo. Dividida la información según este criterio, durante la etapa que transcurre alrededor del momento de la siembra de los cultivos estivales, el coeficiente de determinación de la relación entre el consumo de agua y el crecimiento vegetal decrece respecto al modelo general, y la respuesta de la vegetación frente a la disponibilidad de agua expone mayor independencia. Por el contrario, cuando los cultivos transitan los procesos de crecimiento y desarrollo, la relación acusa un aumento significativo del parámetro de ajuste y el coeficiente angular de la recta de ajuste se incrementa por encima de la tasa sin diferenciar, de modo tal que la respuesta al estímulo hídrico es más evidente.

4. Tendencia de los elementos climáticos e indicadores hidrológicos

La dinámica temporal de las condiciones atmosféricas en la región se evaluó a escala anual a partir de la tendencia lineal de la temperatura media y la cantidad de precipitación, mientras que la situación hidrológica se ponderó por medio del BHT_h, tanto en términos de la demanda

atmosférica (ETP) como del consumo de agua (ETR). La Figura 6 presenta las series de tiempo entre 1971 y 2020 de las variables analizadas en Pilar, con la función de ajuste lineal para representar la tendencia temporal, en tanto la Tabla 2 muestra los indicadores estadísticos de la tasa de cambio, el valor de t y de su probabilidad asociada incorporando además de Pilar, la información de

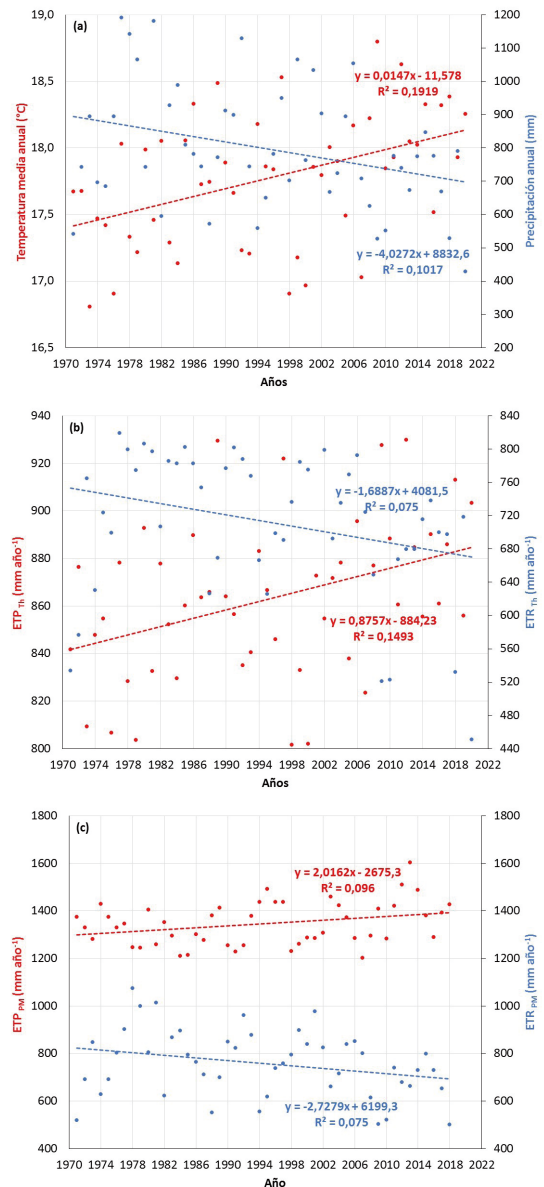


Figura 6. Series de tiempo de valores anuales y tendencia lineal de (a) temperatura media y precipitación; (b) evapotranspiración potencial (ETP_{Th}) y real (ETR_{Th}) obtenida con el Balance hidrológico secuencial de Thornthwaite (BHT_h); (c) evapotranspiración potencial (ETP_{PM}) y real (ETR_{PM}) obtenidos a partir de Penman-Monteith, de Pilar Observatorio, Córdoba.

Río Cuarto, Marcos Juárez y Laboulaye. Además de la serie completa, la Tabla 2 incluye el análisis del periodo más reciente entre 2000 y 2020, como así también incorpora el análisis de los valores anuales de NDVI de los departamentos de RS, RC, MJ y PRSP, respectivamente.

Mientras la temperatura anual de Pilar en la Figura 6(a) muestra un incremento sostenido en este periodo de 50 años que es compatible con el fenómeno de calentamiento global (IPCC, 2021), la tendencia de la lluvia, en cambio, acusa una disminución progresiva y resulta opuesta al comportamiento del fenómeno durante la segunda mitad del siglo XX en la región central de la Argentina (de la Casa *et al.*, 2018). El aumento progresivo de ETP_{Th} en la Figura 6b acompaña al incremento de la temperatura, en particular porque su cálculo utiliza principalmente información térmica. Por su parte, el consumo de agua (ETR) muestra la tendencia a disminuir que se explica directamente por la reducción que manifiesta la lluvia. A partir del aumento de ETP y la disminución de ETR, la deficiencia de agua exhibe una tendencia positiva (Tabla 2), contraria a la que se había manifestado entre 1940 y 2010 (de la Casa *et al.*, 2014), mientras que los excesos hídricos se redujeron, tanto en magnitud como frecuencia.

Por su parte, la tendencia de ETP_{PM} resulta también positiva como muestra la Figura 6c, si bien este valor proviene de un modelo multivariado. El fenómeno de calentamiento global, de esta forma, no sólo estaría influyendo sobre la condición térmica de la región, sino que también tendría repercusión sobre otras variables atmosféricas para dar lugar a una demanda atmosférica de agua más intensa (de la Casa *et al.*, 2022). Por su parte, el cambio de largo plazo de ETR_{PM} registra asimismo una tendencia negativa, de similar naturaleza a ETR_{Th} , aunque aceptable para un nivel de probabilidad ligeramente mayor ($p < 0,06$). De esta forma, más allá del modelo utilizado para representar la demanda atmosférica de agua, Pilar exhibe actualmente una situación hidrológica con rasgos crecientes de aridez, que incrementa el nivel de riesgo tanto agrícola, por la merma productiva directa, como ambiental asociada con una eventual pérdida de sustentabilidad, en una región donde el uso del suelo es predominantemente agrícola (de la Casa y Ovando, 2014). La menor disponibilidad de agua es menos propicia para el crecimiento de la vegetación y debería eventualmente verse reflejada por el comportamiento del NDVI. De acuerdo con la Tabla 2, el NDVI en el departamento RS presenta una tendencia de reducción significativa en el periodo más reciente que es compatible, tanto con la caída del consumo de agua como al incremento

de la deficiencia.

Comparando los valores estadísticos que reflejan las tendencias de mediano y largo plazo de Pilar, surge que en los últimos años se ha producido el aumento, tanto de la tasa de incremento de la temperatura, como de la tasa de disminución de la lluvia (Tabla 2). En términos hidrológicos esto se traduce en el aumento de la tasa de demanda atmosférica (ETP) y la disminución de la tasa de consumo de agua (ETR), que no respondería sólo al determinante térmico, ya que lo mismo acontece con los valores obtenidos a partir de Penman-Monteith. Si se considera al modelo de PM, más confiable para representar la demanda potencial del agua, el aumento de la tasa de ETP_{PM} en 2000-2020 triplica al valor de largo plazo, mientras que la disminución de ETR muestra en la actualidad una tasa que resulta 5 veces mayor a la que muestra el periodo de 50 años.

A fin de extender el análisis territorialmente, la Tabla 2 incluye la evaluación estadística de la tendencia observada de las variables atmosféricas e indicadores hidrológicos en otros sitios de la región agrícola de secano de Córdoba. La condición hidrológica más árida de Pilar contrasta en buena medida con el resto de los sitios analizados. A excepción del incremento térmico significativo que acusan los registros de Río Cuarto y Laboulaye, y no significativo de Marcos Juárez, el comportamiento de la lluvia en cambio no es uniforme. Mientras en Río Cuarto la tendencia se presenta decreciente, tanto en Marcos Juárez como en Laboulaye la pendiente resulta positiva, pero sin alcanzar significación estadística en ninguno de los tres casos. El aumento de la temperatura en Río Cuarto y Laboulaye también es acompañado por el incremento de ETP_{Th} , supeditado a la información que utiliza el método de estimación. Por su parte, la condición climática en Marcos Juárez no muestra prácticamente signos de cambio de largo o mediano plazo, a excepción de la tendencia positiva de ETP_{PM} entre 2000 y 2020.

La situación hidrológica de Pilar contrasta en buena medida con el resto de los sectores del territorio en estudio. Mientras la deficiencia de agua en Pilar tiende a ser más elevada tanto en el largo como en el mediano plazo, alcanzando en ambos casos el nivel de significación estadística ($p < 0,05$), el exceso de agua tiende a disminuir, si bien con un nivel de error ligeramente mayor en 2000-2020. En términos climáticos esto significa que el carácter más húmedo de Río Segundo hasta fines del siglo XX se ha revertido, de modo que la condición atmosférica resulta actualmente más seca, tanto por aumento de la demanda de agua como por disminución del aporte pluviométrico. Si

Tabla 2. Pendiente de la regresión lineal (b), valor de t de la pendiente y su nivel de probabilidad (p) para las series de largo (1971-2020) y mediano plazo reciente (2000-2020) en Pilar (Río Segundo), Río Cuarto (Río Cuarto), Marcos Juárez (Marcos Juárez) y Laboulaye (Pte. Roque Sáenz Peña). En rojo los valores significativos al 5% ($p < 0,05$); en naranja los valores significativos al 10% ($p < 0,10$).

Pilar Observatorio (Río Segundo)									
	Tmed	PP	ETP _{Th}	ETR _{Th}	Def _{Th}	Exc _{Th}	ETP _{PM}	ETR _{PM}	NDVI
1971-2020									
b	0,015	-4,027	0,876	-1,689	2,564	-1,626	2,016	-2,728	
t	3,376	-2,331	2,903	-1,973	2,559	-2,070	2,210	-1,931	
p	0,001	0,024	0,006	0,054	0,014	0,044	0,032	0,060	
2000-2020									
b	0,032	-11,924	2,137	-9,317	11,454	-2,727	6,815	-12,029	-0,003
t	2,125	-2,293	2,011	-2,965	3,080	-1,985	1,713	-2,569	-2,592
p	0,047	0,033	0,059	0,008	0,006	0,062	0,105	0,020	0,018
Río Cuarto Aero (Río Cuarto)									
1971-2020									
b	0,011	-1,444	0,570	-0,297	0,868	-0,480	3,160	-1,189	
t	2,734	-0,975	2,146	-0,499	1,213	-0,643	2,566	-0,935	
p	0,009	0,334	0,037	0,620	0,231	0,523	0,014	0,355	
2000-2020									
b	0,031	-5,400	1,640	-2,069	3,708	-2,785	8,304	-7,964	-0,002
t	2,157	-1,013	1,623	-0,928	1,342	-1,308	1,915	-1,584	-1,612
p	0,044	0,324	0,121	0,365	0,196	0,206	0,073	0,132	0,124
Marcos Juárez Aero (Marcos Juárez)									
1971-2020									
b	0,003	-0,958	0,129	0,372	-0,243	-0,809	0,300	-0,126	
t	0,651	-0,504	0,442	0,766	-0,431	-0,656	0,263	-0,083	
p	0,518	0,616	0,661	0,448	0,669	0,515	0,794	0,934	
2000-2020									
b	0,006	1,011	0,333	0,626	-0,293	2,268	9,137	4,877	-0,001
t	0,446	0,177	0,406	0,354	-0,168	0,810	2,228	0,912	-1,664
p	0,661	0,861	0,689	0,727	0,868	0,428	0,040	0,375	0,112
Laboulaye Aero (Presidente Roque Sáenz Peña)									
1971-2020									
b	0,016	1,396	0,726	0,478	0,248	1,119	-4,058	1,398	
t	3,487	0,700	2,596	0,844	0,378	0,874	-3,244	0,911	
p	0,001	0,487	0,012	0,403	0,707	0,387	0,002	0,367	
2000-2020									
b	0,060	7,103	3,004	3,910	-0,905	2,722	6,923	8,461	-0,002
t	4,153	0,836	3,414	1,433	-0,310	0,574	1,705	1,080	-1,577
p	0,001	0,414	0,003	0,168	0,760	0,573	0,106	0,295	0,131

Referencia: Los valores de ETP_{PM} corresponden al periodo entre 1971 y 2018.

bien la evidencia permite sostener el incremento de la demanda atmosférica de agua en la región, considerando las tendencias positivas tanto de ETP_{Th} como de ETP_{PM}, la precipitación, más allá de las fluctuaciones propias del fenómeno, no parece haber modificado su aporte a lo largo del tiempo, de modo que los valores de deficiencia y exceso de agua no acusan ningún cambio efectivo en Río Cuarto, Marcos Juárez y Laboulaye.

Otra fuente importante de evidencia proviene del

NDVI, que en todos los departamentos muestra una tendencia decreciente, aunque la tasa negativa es significativa sólo en Río Segundo, acompañando la condición actual de mayor aridez que convalida este análisis. La dependencia que existe entre las condiciones hidrológicas y la vegetación en la región, considerando esta vez una escala anual y adoptando la deficiencia de agua como un indicador integral de la disponibilidad de agua, se presenta en la Figura 7, que muestra la relación entre el indicador hidrológico y el NDVI medio

anual en distintos departamentos de la región.

La Figura 7 expone la estrecha dependencia entre el NDVI, que se utiliza como proxy de la vegetación, y la Deficiencia de agua que se obtiene de la diferencia entre la demanda atmosférica y el consumo efectivo de agua computados a partir del BHTh. Debido a que la mayor parte de cada territorio departamental se destina a la producción agrícola, es razonable vincular las fluctuaciones del NDVI directamente a los cambios en la producción agrícola. Además del carácter inverso de la relación lineal y de tasas de disminución relativamente similares en todos los sectores, la disponibilidad de agua explica aproximadamente 70% de la variabilidad del NDVI observada en RS, 31% en RC, 22 % en MJ y 56% en PRSP. Considerando que tanto el aumento de la deficiencia de agua como la disminución del NDVI en RS presentan una tendencia significativa en las primeras dos décadas del siglo XXI, los valores de NDVI más bajos en este sector se explican por un incremento sostenido de Def. En RC, MJ y PRSP, al no tener una tendencia significativa, el cambio interanual del NDVI se asocia a la propia variabilidad climática de la Deficiencia de agua.

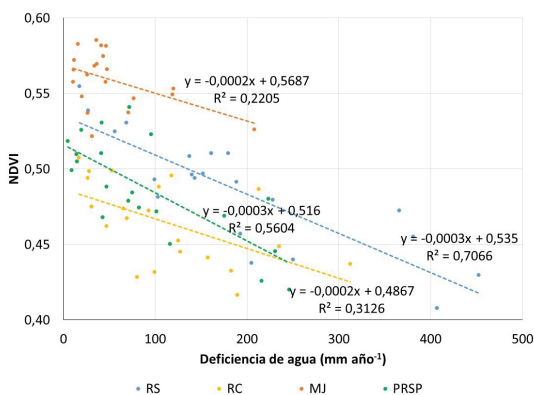


Figura 7. Relación entre los valores anuales de la deficiencia de agua obtenida con datos de Pilar, Río Cuarto, Marcos Juárez y Laboulaye a partir del BHTh y el NDVI medio de los departamentos Río Segundo, Río Cuarto, Marcos Juárez y Pte. Roque Sáenz Peña, respectivamente, en la región agrícola de secano de Córdoba entre 2000 y 2020.

CONCLUSIONES

A los efectos de calcular la ETP mensual, el método de Thornthwaite produce resultados similares a los que estima el modelo de Hamon, de modo tal que su empleo es indistinto a fin de representar la demanda atmosférica de agua para la resolución del Balance Hidrológico (BH). En cambio, los valores mensuales obtenidos

a partir del método multivariado de Penman-Monteith resultan sistemáticamente más elevados y variables con respecto de aquellos que usan sólo información térmica. En este sentido, si el método para estimar ETP recomendado por FAO es el de Penman-Monteith, los procedimientos de Thornthwaite y Hamon sólo deberían ser utilizados si se dispone sólo de información térmica.

Si bien el cálculo de la extracción de agua que propone el método simplificado de BHM a partir de una expresión lineal difiere del método original de balance de Thornthwaite (BHTh) que emplea a tal efecto una expresión exponencial, ambos procedimientos producen resultados que son análogos, tanto en términos de la evapotranspiración real (ETR), la Deficiencia (Def) y el Exceso (Exc) de agua. Los acumulados mensuales de ETR, Def y Exc que se obtienen a partir de ambos procedimientos son absolutamente semejantes.

El balance de agua de Thornthwaite constituye una técnica apropiada para representar la variabilidad hidrológica de la región agrícola de secano de Córdoba, en la medida que representa de manera adecuada la dinámica de la vegetación de acuerdo a la señal que de ella reproduce el NDVI. El consumo de agua que se obtiene de BHTh (ETR_{Th}) constituye el factor más ligado a la variación del crecimiento vegetal que emplea los registros de NDVI como proxy. El análisis confirma que esta dependencia a escala departamental se manifiesta en la región con un mes de retraso respecto al estímulo hídrico. La influencia hidrológica sobre la agricultura exhibe un comportamiento particular en esta región donde prevalece la producción de cultivos estivales, de modo tal que la respuesta positiva de la vegetación al consumo de agua difiere de acuerdo a la etapa del año: entre agosto y noviembre la asociación es menor, probablemente como consecuencia de la mayor proporción de suelo desprovisto de vegetación activa antes del inicio del periodo de lluvias monzónicas y durante la etapa de siembra. Por su parte, tanto el coeficiente de ajuste como la pendiente de la relación aumentan durante la etapa entre diciembre y julio, cuando los cultivos transitan su ciclo de crecimiento y desarrollo en la región, sincrónico a la temporada de lluvias.

La variación de largo plazo de los indicadores climáticos e hidrológicos en la región agrícola de secano de Córdoba no es uniforme. Mientras los valores anuales de temperatura y ETP, usando tanto el método de Th como de PM, presentan una tendencia creciente (a excepción de Laboulaye, cuya tendencia de largo plazo de ETP_{PM} es decreciente), sólo la precipitación en Pilar (RS)

muestra una tasa decreciente significativa. De esta forma, la Deficiencia de agua es actualmente más elevada y los Excesos menores y menos frecuentes exclusivamente en este sector. La evaluación de la tendencia de mediano plazo en Pilar (Departamento de Río Segundo), que corresponde a un periodo entre 2000 y 2020 más próximo en el tiempo, exhibe la intensificación de estas condiciones hidrológicas de largo plazo y expone en la actualidad condiciones que son propias de un clima más árido. La condición hidrológica de Río Cuarto (RC), Marcos Juárez (MJ) y Laboulaye (PRSP) presenta, en cambio, un carácter estacionario, principalmente en los valores de Deficiencia y Exceso de agua.

La Deficiencia de agua anual que se obtiene del BHT_h presenta una relación inversa con el NDVI departamental que explica alrededor de 70 % de su variabilidad interanual en Pilar (RS), 31% en Río Cuarto (RC), 22 % en Marcos Juárez (MJ) y 56% en Laboulaye (PRSP). De esta forma, la condición más acentuada de aridez en Pilar de los últimos años se traduce en valores de NDVI que son progresivamente más reducidos y explica en buena medida la tendencia negativa de este indicador de la actividad agrícola en el departamento Río Segundo, Córdoba.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo tuvo apoyo financiero de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina (SeCyT-UNC) [Proyecto N° 32720200400235CB].

BIBLIOGRAFÍA

Acker, J.G. and G. Leptoukh, 2007. Online analysis enhances use of NASA Earth Science Data. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 88:14-17. <https://doi.org/10.1029/2007EO020003>

Allen, R.G.; L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith, 1998. *Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy.

Benestad, R.E.; C. Lussana, J. Lutz, A. Dobler, O. Landgren, J.E. Haugen, A. Mezghani, B. Casati and K.M. Parding, 2022. Global hydro-climatological indicators and changes in the global hydrological cycle and rainfall patterns. *PLOS Clim* 1(5):e0000029. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000029>

Brown, M.E.; K.M. De Beurs and A. Vrieling, 2010. The response of African land surface phenology to

large scale climate oscillations. *Remote Sensing of Environment* 114:2286-2296, doi: 10.1016/j.rse.2010.05.005

Cogliati, M.G.; G. Ostertag, M. Caso, F.G. Finessi y D. Groch, 2018. Análisis del balance hídrico medio mensual en la provincia del Neuquén (Argentina). *Boletín Geográfico* 40(2): 26-44.

de la Casa, A. and O. Nasello, 2010. Breakpoints in annual rainfall trends in Córdoba, Argentina. *Atmospheric Research* 95:419-427.

de la Casa, A.C. and G.G. Ovando, 2014. Climate change and its impact on agricultural potential in the central region of Argentina between 1941 and 2010. *Agric. For. Meteorol.* 195-196:1-11.

de la Casa, A. y O. Nasello, 2015. Análisis periódico de las condiciones hidrológicas en la provincia de Córdoba, Argentina. *Anales AFA* 26(4):170-176.

de la Casa, A.; G. Ovando, G. Díaz y P. Díaz, 2017. Evaluación de la sequía con indicadores estandarizados de diferente origen en Córdoba, Argentina. 46° JAIIO Jornadas Argentinas de Informática – CAI 9 Congreso de Agrolnformática. pp. 33-46.

de la Casa, A.; G. Ovando and G. Díaz, 2018. Secular variation of rainfall regime in the central region of Argentina. *Atmospheric Research* 213:196-210.

de la Casa, A.C.; G.G. Ovando y G.J. Díaz, 2022. Variación de la evapotranspiración de referencia en Córdoba, Argentina, entre 1968 y 2018 bajo la influencia de la velocidad del viento y la amplitud térmica. *Agriscientia* 31(1):29-47. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v39.n1.34573>

Donohue, R.J.; T.R. McVicar and M.L. Roderick, 2010. Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate. *J. Hydrol.* 386(1-4):186-197.

Farrar, T.J.; S.E. Nicholson and A.R. Lare, 1994. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. II. NDVI response to soil moisture. *Remote Sens. Environ.* 50(2):121-133. doi:10.1016/0034-4257(94)90039-6.

Feng, S.; Z. Hao, X. Zhang, L. Wu, Y. Zhang and F. Hao, 2022. Climate change impacts on concurrences of hydrological droughts and high temperature extremes in a semi-arid river basin of China. *Journal of Arid Environments* 202:104768. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104768>

Fernández Long, M.E.; L. Spescha, I. Barnatán y G. Murphy, 2012. Modelo de balance hidrológico operativo para el agro (BHOA). *Rev. Agronomía y Ambiente* 32(1-2):31-47.

- Hamon, W.R., 1961. Estimating potential evapotranspiration: *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 87:107-120.
- Huete, A.; K. Didan, T. Miura, E.P. Rodríguez, X. Gao and L.G. Ferreira, 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83(1-2):195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- IPCC, 2021. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.
- Irmak, S.; I. Kabenge, K.E. Skaggs and D. Mutibwa, 2012. Trend and magnitude of changes in climate variables and reference evapotranspiration over 116-yr period in the Platte River Basin, Central Nebraska-USA. *J. Hydrol.* 420-421:228-244. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.12.006
- Jayawardhana, W.G.N.N and V.M.I. Chathurangeb, 2016. Extraction of agricultural phenological parameters of Sri Lanka using MODIS, NDVI time series data. *Procedia Food Science* 6:235-241.
- Ji, L. and A.J. Peters, 2003. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sens. Environ.* 87:85-98.
- Lakatos, M.; T. Weidinger, L. Hoffmann, Z. Bihari and Á. Horváth, 2020. Computation of daily Penman–Monteith reference evapotranspiration in the Carpathian Region and comparison with Thornthwaite estimates. *Adv. Sci. Res.* 16:251-259, <https://doi.org/10.5194/asr-16-251-2020>.
- Lang, D.; J. Zheng, J. Shi, F. Liao, X. Ma, W. Wang, X. Chen and M. Zhang, 2017. A comparative study of potential evapotranspiration estimation by eight methods with FAO Penman–Monteith method in southwestern China. *Water* 9:734. doi:10.3390/w9100734
- Liu, J.; T. Huffman, B. Qian, J. Shang, Q. Li, T. Dong, A. Davidson and Q. Jing, 2020. Crop yield estimation in the Canadian Prairies using Terra/MODIS-derived crop metrics. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 13:2685-2697.
- MAGyP, 2022. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la República Argentina. Estadísticas agrícolas: Series históricas <https://www.argentina.gob.ar/agricultura>.
- McCabe, G.J. and S.L. Markstrom, 2007. A monthly water-balance model driven by a graphical user interface: U.S. Geological Survey Open-File report 2007-1088, 6 p.
- McKenney, M.S. and N.J. Rosenberg, 1993. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agric. For. Meteorol.* 64:81-110.
- McVicar, T.R.; M.L. Roderick, R.J. Donohue, L.T. Li, T.G. Van Niel, A. Thomas, J. Grieser, D. Jhajharia, Y. Himri, N.M. Mahowald, A.V. Mescherskaya, A.C. Kruger, S. Rehman and Y. Dinpashoh, 2012. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. *Journal of Hydrology* 416-417:182-205.
- Minetti, J.L. and W.M. Vargas, 1998. Trends and jumps in the annual precipitation in South America, south of the 15°S. *Atmósfera* 11(4):205-221.
- Mkhabela, M.S.; P. Bullock, S. Raj, S. Wang and Y. Yang, 2011. Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data. *Agric. For. Meteorol.* 151(3):385-393.
- Murphy, G. (ed.), 2008. Atlas agroclimático de la Argentina. Editorial Facultad Agronomía, Universidad de Buenos Aires. 148 pp.
- Nicholson, S.E. and T.J. Farrar, 1994. The influence of soil type on the relationship between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. I. NDVI response to rainfall. *Remote Sens. Environ.* 50:107-120.
- Nolasco, M.; G. Ovando, S. Sayago, I. Magario and M. Bocco, 2021. Estimating soybean yield using time series of anomalies in vegetation indices from MODIS. *International Journal of Remote Sensing* 42(2):405-421.
- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc., Lond.* A193:120-145.
- Rodríguez, A.R. y A.C. de la Casa, 1990. Regiones hídricas de la República Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agropecuarias (UNC)* 7:31-40. doi: 10.31047/1668.298x.v7.n1.940.
- Rodríguez-Iturbe, I., 2000. Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resources Research* 36(1):3-9.
- Sabattini, J.A. and R.A. Sabattini, 2021. Rainfall trends in humid temperate climate in South America: Possible effects in ecosystems of Espinal ecoregion. (Chapter) *IntechOpen* 1–28. *The Nature, Causes, Effects and Mitigation of Climate Change on the Environment*. Edited by Stuart A. Harris. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.99080>
- Saeed, U.; J. Dempewolf, I. Becker-Reshef, A. Khanb, A. Ahmad and S. Aftab Wajid, 2017. Forecasting

- wheat yield from weather data and MODIS NDVI using random forests for Punjab province, Pakistan. *International Journal of Remote Sensing* 38(17):4831-4854. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1323282>
- Sakamoto, T.; A.A. Gitelson and T.J. Arkebauer, 2014. Near real-time prediction of US corn yields based on time-series MODIS data. *Remote Sensing Environ.* 147:219-231.
- Sakamoto, T., 2020. Incorporating environmental variables into a MODIS-based crop yield estimation method for United States corn and soybeans through the use of a random forest regression algorithm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 160:208-228. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.12.012>
- Sayago, S.; G. Ovando and M. Bocco, 2017. Landsat images and crop model for evaluating water stress of rainfed soybean. *Remote Sensing of Environment* 198:30-39. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.008>
- Seo, B.; J. Lee, K. Lee, S. Hong and S. Kang, 2019. Improving remotely-sensed crop monitoring by NDVI-based crop phenology estimators for corn and soybeans in Iowa and Illinois, USA. *Field Crops Research* 238:113-128. doi.org/10.1016/j.fcr.2019.03.015.
- Serio, L.; H. Vich, R. Hurtado, A. Carreira y G. Murphy, 2006. Evapotranspiración potencial media anual en Argentina en el período 1971-2000. XI Reunión Argentina de Agrometeorología. La Plata, Argentina.
- Sun, G.; S.G. McNulty, J.A. Moore Myers and E.C. Cohen, 2008. Impacts of multiple stresses on water demand and supply across the southeastern United States. *Journal of the American Water Resources Association* 44(6):1441-1457.
- Tabari, H.; S. Marofi, P. Hosseinzadeh Talaei and K. Mohammadi, 2011. Trend analysis of reference evapotranspiration in the western half of Iran. *Agric. Forest Meteorol.* 151:128-136.
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38:55-94.
- Thornthwaite, C.W. and J.R. Mather, 1955. The water balance. *Publications in Climatology* VIII (1), 104p. Drexel Inst. of Tech., New Jersey. USA.
- Umar, D.A.; M.F. Ramli, A.Z. Aris, N.R. Jamil and J.H. Abdulkareem, 2018. Runoff irregularities, trends, and variations in tropical semi-arid river catchment. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 19:335-348.
- Viglizzo, E.F.; Z.E. Roberto, M.C. Filippin and A.J. Pordomingo, 1995. Climate variability and agroecological change in the Central Pampas of Argentina. *Agric. Ecosyst. Environ.* 55:7-16. [doi.org/10.1016/0167-8809\(95\)00608-U](https://doi.org/10.1016/0167-8809(95)00608-U)
- Viglizzo, E.F.; A.J. Pordomingo, M.G. Castro and F.A. Lertora, 2003. Environmental assessment of agriculture at a regional scale in the Pampas of Argentina. *Environmental Monitoring and Assessment* 87:169-195.
- Viglizzo, E.F.; F.C. Frank, J. Bernardos, D.E. Buschiazzo and S. Cabo, 2006. A rapid method for assessing the environmental performance of commercial farms in the pampas of Argentina. *Environmental Monitoring and Assessment* 117:109-134.
- Viglizzo, E.F. and F.C. Frank, 2006. Ecological interactions, feedbacks, thresholds and collapses in the Argentine Pampas in response to climate and farming during the last century. *Quaternary International* 158:122-126.
- Vicente-Serrano, S.M.; C. Azorín-Molina, A. Sánchez-Lorenzo, J. Revuelto, J.I. López-Moreno, J.C. González-Hidalgo, E. Moran-Tejeda and F. Espejo, 2014. Reference evapotranspiration variability and trends in Spain, 1961-2011. *Global and Planetary Change* 121:26-40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.06.005>
- Westenbroek, S.M.; V.A. Kelson, W.R. Dripps, R.J. Hunt and K.R. Bradbury, 2010. SWB-A modified Thornthwaite Mather Soil-Water-Balance code for estimating groundwater recharge: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A31, 60 p.
- Zhang, F.; L. Zhang, X. Wang and J. Hung, 2013. Detecting agro-droughts in southwest of China using MODIS satellite data. *Journal of Integrative Agriculture* 12(1):159-168.
- Zribi, M.; T. Paris Anguela, B. Duchemin, Z. Lili, W. Wagner, S. Hasenauer and A. Chehbouni, 2010. Relationship between soil moisture and vegetation in the Kairouan plain region of Tunisia using low spatial resolution satellite data. *Water Resources Research* 46, W06508, [doi:10.1029/2009WR008196](https://doi.org/10.1029/2009WR008196).