

## Huella hídrica del trigo a escala parcelaria en función del número de riegos

### Water footprint of wheat at the field scale as a function of the number of irrigation events

Sergio Iván Jiménez-Jiménez<sup>1</sup> , Ernesto Sifuentes-Ibarra<sup>2</sup> , Mariana de Jesús Marcial-Pablo<sup>1\*</sup> , Fernando Cabrera-Carbajal<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID RASPA), INIFAP. Km. 6.5 margen derecha Canal de Sacramento, CP. 35079. Gómez Palacio, Durango, México.

<sup>2</sup>Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF), INIFAP. Carretera Internacional México-Nogales km 1609, CP. 81110. Juan José Ríos, Sinaloa, México.

<sup>3</sup>Sitio Experimental Valle del Mayo (SEMAY), INIFAP. Km 9 de la Carretera Navojoa-Huatabampo, CP. 85800. Navojoa, Sonora, México.

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

#### Artículo científico

Recibido: 21 de marzo 2026

Aceptado: 26 de julio 2026

**RESUMEN.** La Huella Hídrica (HH) es una herramienta clave para investigar la sostenibilidad de la producción agrícola en función del uso del agua. En particular, la HH de los cultivos ha sido ampliamente aceptada como un indicador integral del consumo de agua agrícola, sin embargo, la precisión en la cuantificación de la HH es un requisito previo para la implementación de evaluaciones de la HH que favorezcan una gestión regional sostenible del agua. Este estudio tiene como objetivo estimar la huella hídrica de consumo del cultivo de trigo mediante el enfoque de balance hídrico del suelo en campo (BAS) bajo distintas estrategias de manejo del riego, con el propósito de identificar aquella que permita minimizar la HH, promoviendo un uso más eficiente del agua en la zona de estudio. Se evaluó la HH de tres sitios con tres tratamientos de riego: cuatro riegos (4A), tres riegos (3A) y dos riegos (2A); adicionalmente, se evaluó la aplicabilidad del modelo IRRIMODEL, como una alternativa para la estimación de la evapotranspiración del cultivo (ETc) en estudios de HH. Los resultados indican que la HH de consumo estimada del trigo fue de 414 - 695 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup>, siendo el tratamiento de 3A el que obtuvo el valor promedio más bajo de HH<sub>consumo</sub> y el mayor rendimiento; además IRRIMODEL demostró ser una alternativa viable y con gran potencial para el monitoreo de la HH a escala parcelaria y regional, registrando diferencias generalmente inferiores al 15% en la estimación de la HH<sub>consumo</sub> en comparación con CROPWAT.

**Palabras clave:** Balance de agua en el suelo, evapotranspiración del cultivo, CROPWAT, IRRIMODEL.

**ABSTRACT.** The Water Footprint (WF) is a key tool for investigating the sustainability of agricultural production in terms of water use. In particular, the WF of crops has been widely accepted as a comprehensive indicator of agricultural water consumption; however, accurate quantification of the WF is a prerequisite for implementing WF assessments that promote sustainable regional water management. This study aims to estimate the water footprint (WF) of wheat cultivation using the field soil water balance (BAS) approach under different irrigation management strategies, with the goal of identifying the strategy that minimizes the WF and promotes more efficient water use in the study area. Three sites were evaluated with three irrigation treatments: four irrigations (4A), three irrigations (3A), and two irrigations (2A); additionally, the applicability of the IRRIMODEL model was evaluated as an alternative for estimating crop evapotranspiration (ETc) in WF studies, using estimates obtained with CROPWAT as a reference. The results indicate that the estimated consumption WF for wheat ranges from 414 to 695 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup> for the 2022–2023 agricultural year, with the 3A treatment yielding the lowest average WF<sub>consumption</sub> and the highest yield; furthermore, IRRIMODEL proved to be a viable alternative with great potential for monitoring HH at the plot and regional scales, showing differences generally less than 15% in the estimation of WF<sub>consumption</sub> compared to CROPWAT.

**Keywords:** Soil water balance, crop evapotranspiration, CROPWAT, IRRIMODEL.

## INTRODUCCIÓN

El trigo (*Triticum spp.*) es el cereal más cultivado a nivel mundial debido a su alto valor económico y nutricional. En México, es el segundo cereal en importancia con una producción total cercana a los 3 millones de toneladas, su principal productor es el estado de Sonora con una producción de aproximadamente el 50% del total nacional (SIAP 2025). Sin embargo, en esta región, el cultivo de trigo enfrenta múltiples desafíos, como la baja eficiencia del riego, las sequías agrícolas, la variabilidad climática y los fenómenos meteorológicos extremos, los cuales amenazan los calendarios de siembra y la rentabilidad de los cultivos cada año. Frente a estos desafíos, la estrategia de riego juega un papel importante (Allen *et al.* 2011).

Los diferentes métodos y calendarios de riego afectan la fisiología del trigo de diversas maneras, influyendo en el crecimiento y la eficiencia del uso del agua. Una gestión optimizada del riego mejora la capacidad fotosintética de las hojas, promueve una mayor acumulación de materia seca e incrementa el rendimiento después de la antesis (Ercoli *et al.* 2010). En esta región, la temporada de cultivo del trigo abarca el período de noviembre a abril y se caracteriza por cultivarse durante la estación seca, y los agricultores suelen aplicar de tres a cinco eventos de riego a lo largo del ciclo del cultivo (Pask *et al.* 2013). Sin embargo, es necesaria la estimación de indicadores de uso y eficiencia del agua para evaluar alternativas de manejo del riego e identificar las ineficiencias de los sistemas como un primer paso hacia la propuesta de soluciones.

La Huella Hídrica (HH), que se refiere al volumen total de agua dulce empleado para la elaboración de un producto (Hoekstra *et al.* 2011), ha sido ampliamente destacada como una métrica efectiva para construir marcos de evaluación para el nexo entre agua, alimentos y energía, donde la HH agrícola se refiere a la cantidad de agua consumida por los cultivos por unidad de rendimiento. Sin embargo, la precisión en la cuantificación de la HH de los cultivos es un requisito previo para la implementación de evaluaciones de la HH que produzcan una gestión regional sostenible del agua para la agricultura (Mekonnen y Hoekstra 2010).

La cuantificación de la HH de los cultivos integra la HH<sub>azul</sub> (agua de riego), HH<sub>verde</sub> (precipitación) y la HH<sub>gris</sub> (agua dulce necesaria para asimilar contaminantes). La componente de la HH<sub>azul</sub> y HH<sub>verde</sub> constituyen en conjunto la HH de consumo (Chukalla *et al.* 2015). La HH de consumo puede estimarse mediante diferentes enfoques, cuya selección depende de los objetivos del estudio y de la disponibilidad de información. Entre los principales se encuentran el requerimiento de agua del cultivo (RAC), el balance de agua del suelo (BAS), el balance de agua regional (BAR), los sensores remotos (SR) y el balance de agua medido en campo (BAMS) (Feng *et al.* 2021).

En México, los estudios sobre HH en áreas agrícolas son escasos y están dispersos en distintos contextos productivos, en general estos trabajos se centran principalmente en la estimación de la magnitud de la HH, siendo el enfoque RAC el más empleado para su determinación. Este enfoque asume que el requerimiento de agua del cultivo se cumple plenamente en el campo y que no existe limitación hídrica para el crecimiento del cultivo (Allen *et al.* 1998). Algunos trabajos destacados con este enfoque son los realizados por Flores Lopez y Bautista-Capetillo (2015) quienes calcularon la HH del frijol de riego y temporal en los estados de Durango, Zacatecas y San Luis Potosí para los años agrícolas 2006-2011. En tanto que Garay *et al.* (2022) analizaron la HH de la caña de azúcar

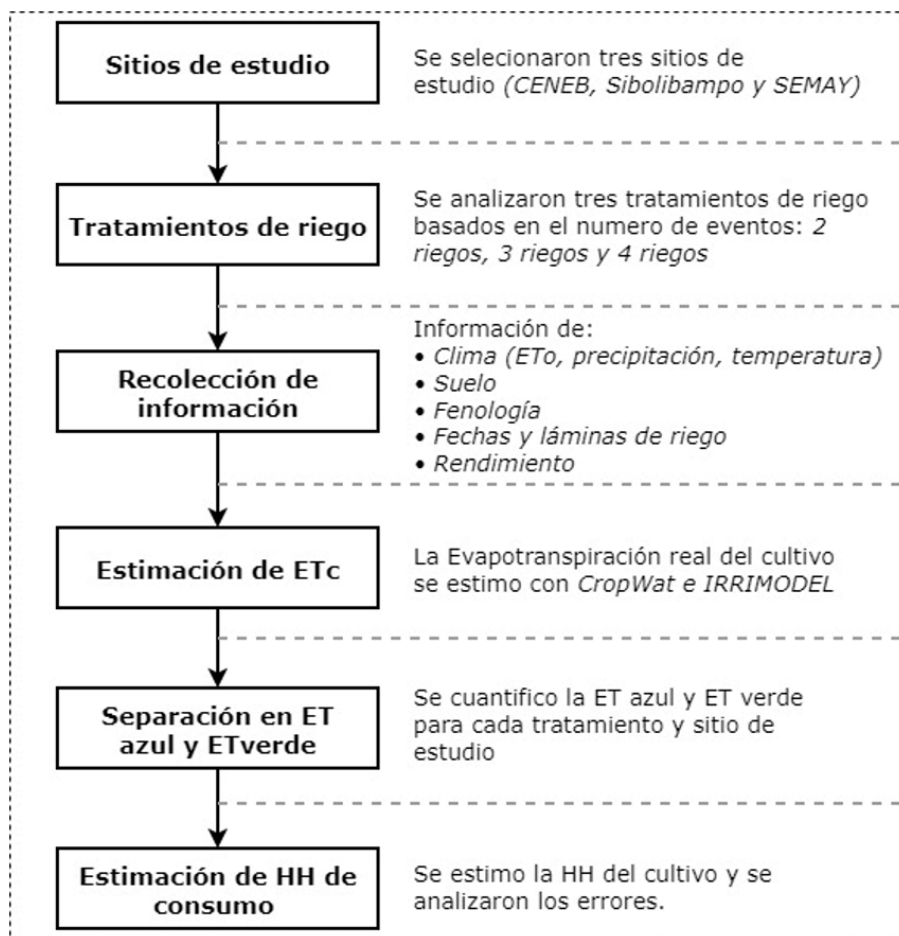
en diferentes municipios de Veracruz; por otro lado Farell *et al.* (2011) al evaluar la HH del trigo en México y Gómez-Tagle *et al.* (2022) determinaron la HH del aguacate de riego y temporal en Uruapan, Michoacán. En estos trabajos se obtienen valores de HH a nivel regional utilizando información derivada de tablas e informes oficiales, los cuales comúnmente presentan un desfase de dos o más años agrícolas. Por otro lado, algunas investigaciones han recurrido a encuestas locales para recopilar datos, como los trabajos de Peñaloza-Sánchez *et al.* (2020) quienes estimaron la HH del cultivo de cebolla en Atlixco, Puebla para los ciclos del año agrícola 2017 y Sánchez-Cohen *et al.* (2016) quienes estimaron la HH azul de cultivos forrajeros en la Comarca Lagunera. Aunque estos trabajos representan un avance significativo en la investigación de la gestión del agua en zonas agrícolas de México, la disponibilidad de información ha limitado la cuantificación de la HH a nivel municipal o regional; estos niveles suelen considerar ciertas suposiciones que pueden ser inconsistentes con la situación real, al no considerar la variabilidad espacio-temporal de la HH derivada de las propiedades del cultivo, las condiciones del suelo, la disponibilidad real del agua, entre otros factores. Por lo tanto, estas investigaciones se han limitado a la fase de cuantificación y no han sido incorporadas para su análisis en las políticas locales (Koradia *et al.* 2025).

Los enfoques como BAS, BAMS o SR pueden brindar mayores precisiones y se puede llegar a la cuantificación de la HH a nivel parcelario como se ha documentado en algunos trabajos (Huang *et al.* 2015, Xinchun *et al.* 2018, Li *et al.* 2022), aunque se requiere información más detallada que muchas veces no está disponible. Entre estos enfoques, el BAS destaca por su capacidad para representar de manera explícita la dinámica hídrica del suelo y su interacción con el cultivo a nivel parcelario, permitiendo una separación confiable de los componentes de la evapotranspiración en agua verde y azul, aspecto clave en estudios de HH (Karandish y Šimůnek 2019). De acuerdo con la FAO (2012), los métodos basados en BAS son especialmente recomendados para evaluaciones locales, ya que reducen la incertidumbre asociada al uso de coeficientes generalizados y facilitan la incorporación de mediciones de campo.

El enfoque BAS permite estimar el uso real de agua de los cultivos mediante el cálculo de la evapotranspiración acumulada del cultivo (Feng *et al.* 2021); proporcionando estimaciones más precisas de la HH. Sin embargo, la obtención de la evapotranspiración del cultivo (ETc) representa uno de los principales retos para la aplicación del enfoque, debido a los requerimientos de información de suelo, clima y del cultivo (Allen *et al.* 1998). Por ello, resulta de interés evaluar metodologías alternativas que permitan la estimación de la ETc con menor demanda de información. De esta manera, el objetivo de este trabajo fue cuantificar la huella hídrica de consumo del cultivo de trigo bajo diferentes estrategias de manejo del riego, con el fin de identificar la alternativa que permita reducir la huella hídrica y optimizar el uso del agua en las condiciones de la región de estudio. Para ello, se empleó un enfoque de balance de agua en el suelo (BAS) utilizando información local de clima, suelo, fenología, manejo del cultivo y rendimiento. Adicionalmente, se evaluó la aplicabilidad de IRRIMODEL (Sifuentes *et al.* 2016), un modelo basado en grados días de desarrollo acumulado, como una alternativa para la estimación de la ETc en estudios de HH a escala parcelaria, tomando como referencia las estimaciones obtenidas con el modelo CROPWAT.

## MATERIALES Y MÉTODOS

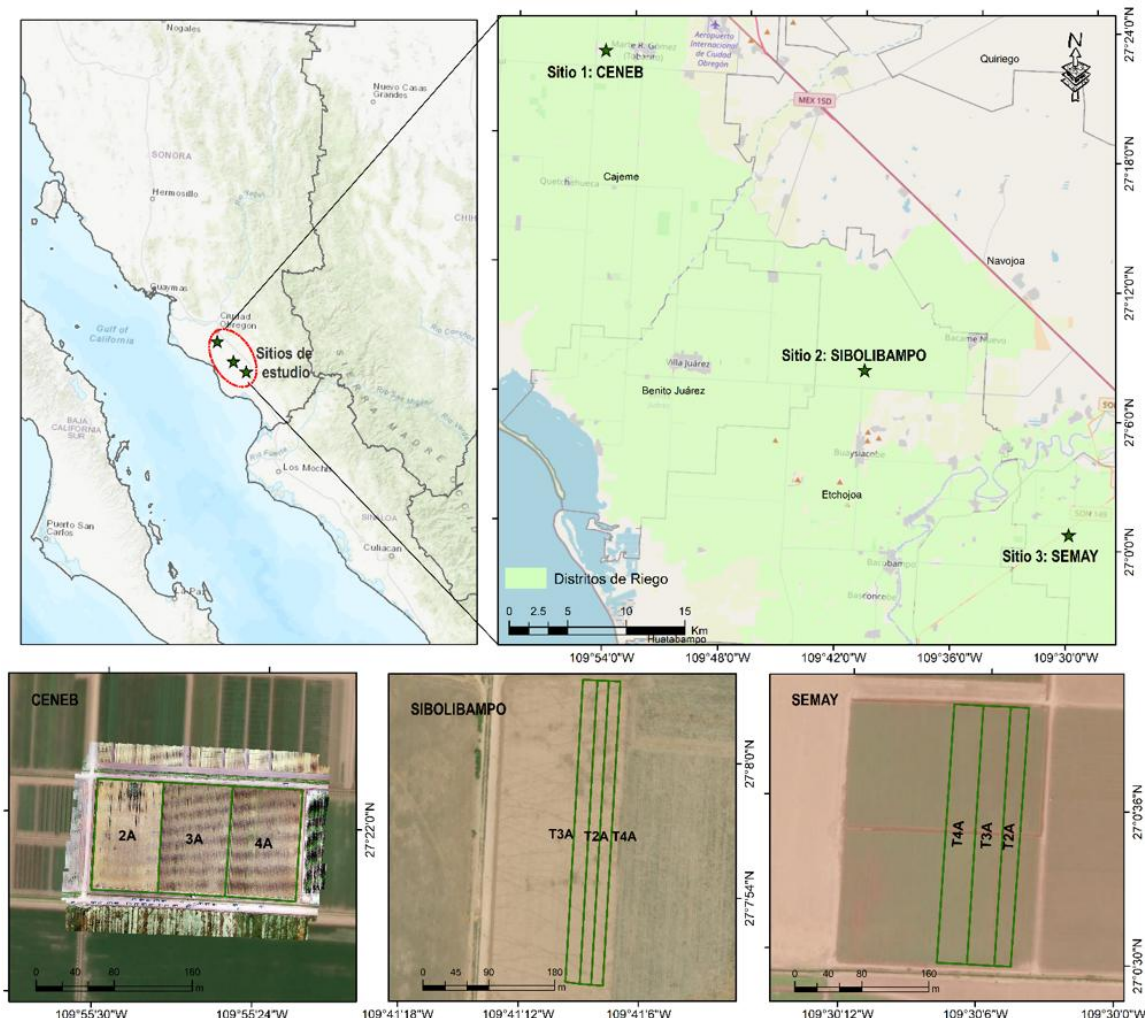
La Figura 1 resume la metodología general empleada en este estudio. A partir de la información climática, edáfica, fenológica y de manejo generada en los diferentes tratamientos de riego evaluados, se estimó la evapotranspiración real del cultivo mediante los modelos CROPWAT e IRRIMODEL. Posteriormente, las estimaciones de evapotranspiración y los rendimientos observados se utilizaron para calcular los componentes azul y verde de la huella hídrica (HH) del trigo y evaluar el efecto de las estrategias de manejo del riego sobre este indicador.



**Figura 1.** Metodología general empleada en el proceso de estimación de la Huella Hídrica (HH).

### Descripción del área

El área de estudio está localizada en el sur del estado de Sonora, México (Figura 2), en un clima semiárido. Esta región tiene una temperatura media máxima de 32.7 °C y una mínima de 16.1 °C; la precipitación media anual es de 461.9 mm. Se establecieron tres sitios de estudio (Tabla 1) distribuidos en la zona triguera del sur de Sonora con el propósito de representar condiciones presentes en los Distritos de Riego 038 Río Mayo y 041 Río Yaqui. La selección de los sitios consideró la disponibilidad de parcelas donde fue posible establecer los tratamientos de riego, realizar el monitoreo continuo de variables de suelo, cultivo y clima.



**Figura 2.** Localización de los sitios de estudio

**Tabla 1.** Características generales de las parcelas de observación.

| Sitio       | Coordenada central     | Municipio | Área (ha) | Fecha de siembra        | Fecha de cosecha   | Días a la cosecha |
|-------------|------------------------|-----------|-----------|-------------------------|--------------------|-------------------|
| CENEB       | 27.36660°, -109.92402° | Cajeme    | 2.73      | 18 de diciembre de 2022 | 26 de mayo de 2023 | 159               |
| SIBOLIBAMPO | 27.13318°, -109.68583° | Etchojoa  | 2.57      | 22 de noviembre de 2022 | 10 de mayo de 2023 | 169               |
| SEMAY       | 27.01020°, -109.50173° | Navojoa   | 2.52      | 1 de diciembre de 2022  | 15 de mayo de 2023 | 165               |

El sitio 1 se encuentra dentro del Campo Experimental Norman E. Borlaug (CENEB) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). El sitio 2 (SIBOLIBAMPO) está ubicado en la localidad de Sibolibampo, Navojoa, Sonora. El sitio 3 se sitúa en el Sitio Experimental Valle del Mayo (SEMAY) del INIFAP, en Navojoa, Sonora.

### Manejo de los tratamientos

En los tres sitios se estableció trigo grano variedad Don Lupe con una densidad de siembra de 80 kg ha<sup>-1</sup>, durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2022-2023 (Tabla 1). La preparación del terreno se

realizó de manera convencional en las tres localidades de estudio, incluyendo barbecho, rastreo, trazado de surcos y canalización. Antes de la siembra se caracterizó el suelo (Tabla 2), el cual mostró una textura predominantemente arcillosa y una humedad aprovechable entre 15 y 17% en los sitios evaluados.

**Tabla 2.** Característica del análisis de los suelos para los sitios de estudio.

| Variable                                       | CENEB     | SEMAY     | Sibolibampo |
|------------------------------------------------|-----------|-----------|-------------|
| Densidad aparente ( $\text{gr cm}^{-3}$ )      | 1.17      | 0.904     | 1.1         |
| Arena (%)                                      | 23        | 17        | 31          |
| Limo (%)                                       | 17        | 21        | 21          |
| Arcilla (%)                                    | 60        | 62        | 48          |
| Textura                                        | Arcillosa | Arcillosa | Arcillosa   |
| Materia orgánica (%)                           | 0.90      | 0.80      | 0.85        |
| Conductividad eléctrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ) | 0.92      | 0.80      | 0.82        |
| Capacidad de campo (CC) (%)                    | 49        | 51        | 42          |
| Punto de marchitez permanente (PMP) (%)        | 33        | 34        | 27          |
| Humedad aprovechable (HA) (%)                  | 16        | 17        | 15          |

Los riegos se aplicaron por gravedad, la forma más común de riego para este cultivo en la región. Se evaluaron tres estrategias de manejo del riego basadas en una reducción gradual del calendario tradicional empleado, el cual consiste en cuatro riegos de auxilio (4A). A partir de este esquema se establecieron dos tratamientos adicionales: tres riegos de auxilio (3A) y dos riegos de auxilio (2A). Cada sitio fue dividido en tres secciones, y se asignaron de manera aleatoria los tratamientos de riego (2A, 3A y 4A) a cada sección (Figura 2).

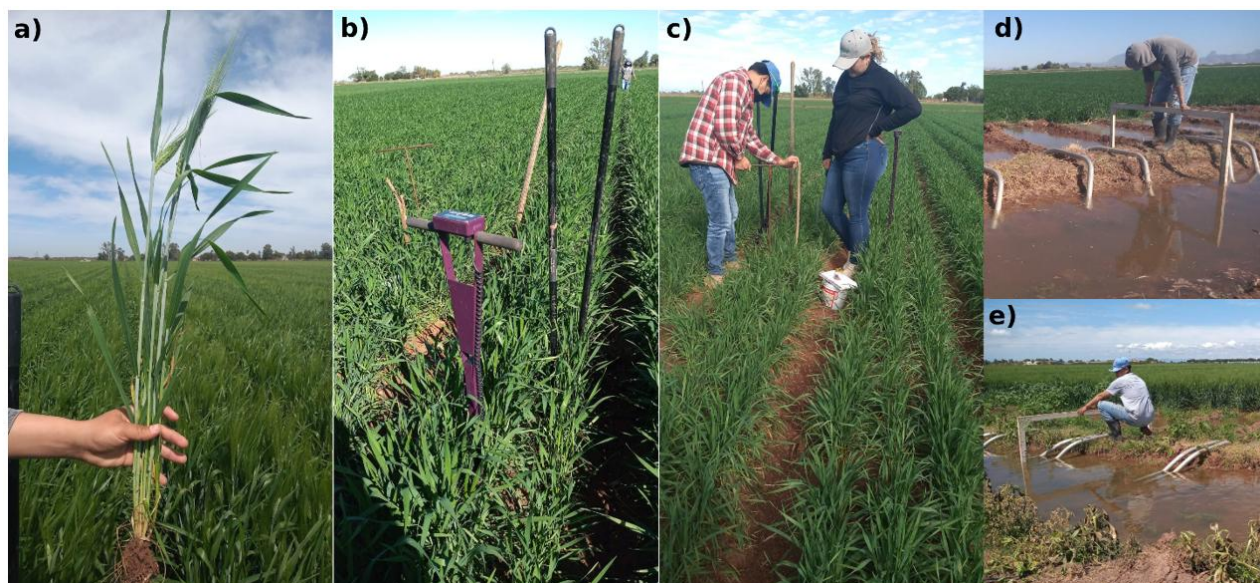
Los eventos de riego se distribuyeron en etapas fenológicas importantes, desde la perspectiva hídrica (Steduto *et al.* 2012). En los sitios SEMAY y Sibolibampo la siembra se realizó en húmedo; para ello, previamente se aplicó un riego de presembrado con el objetivo de llevar el suelo a capacidad de campo (CC) y uniformizar la humedad del suelo en un perfil de 100 cm. La lámina bruta fue de 22 cm en Sibolibampo y de 25 cm en SEMAY. En CENEB la siembra se efectuó en seco y posteriormente se aplicó un riego para germinación con una lámina bruta de 21 cm. Las láminas netas (Ln) y brutas (Lb) aplicadas, así como las eficiencias de aplicación (EA) por cada tratamiento se observan en la Tabla 3.

En cada tratamiento se llevó el registro del desarrollo fenológico del cultivo utilizando la escala de Zadoks (código decimal) (Pask *et al.* 2013), junto con los grados días de desarrollo acumulados (GDDA) correspondientes a cada etapa fenológica. Además, se midió la humedad volumétrica del suelo en dos estratos (0-30 y 30-60 cm) usando un sensor FieldScout TDR-350 (Spectrum Technologies, Inc.) complementando con muestreos gravimétricos previo a cada riego. El monitoreo de la humedad del suelo permitió evaluar el nivel de abatimiento de humedad aprovechable y definir la lámina neta de riego. Adicionalmente, para estimar la lámina bruta de riego y el volumen de aplicación del agua, en cada riego, se midió el caudal (Q) mediante el método de la escuadra graduada con nivel, sobre los sifones de riego para obtener carga (Figura 3).

**Tabla 3.** Lámina total de riego por tratamiento en cada sitio de estudio.

| Sitio       | Variable                            | Tratamiento                                     |                                                                                  |                                                                                           |
|-------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
|             |                                     | 2A                                              | 3A                                                                               | 4A                                                                                        |
|             |                                     | 1: Vaina engrosada (embuche)<br>2: Grano acuoso | 1: Producción de nudos TP (encañado)<br>2: Antesis-floración<br>3: Grano lechoso | 1: Producción de nudos-TP (encañado)<br>2: Espigado<br>3: Grano acuoso<br>4: Grano masoso |
| CENEB       | Fecha de aplicación del riego (DDS) | 51 y 83                                         | 46, 76 y 106                                                                     | 42, 65, 90 y 110                                                                          |
|             | Ln total (cm)                       | 35.1                                            | 43.8                                                                             | 48.3                                                                                      |
|             | Lb total (cm)                       | 46.7                                            | 56.3                                                                             | 66.7                                                                                      |
|             | EA (%)                              | 78.9                                            | 80.9                                                                             | 76.1                                                                                      |
| Sibolibampo | Fecha de aplicación del riego (DDS) | 48 y 88                                         | 48, 83 y 111                                                                     | 48, 71, 85 y 115                                                                          |
|             | Ln total (cm)                       | 35.1                                            | 43.3                                                                             | 45.7                                                                                      |
|             | Lb total (cm)                       | 71                                              | 66.8                                                                             | 80                                                                                        |
|             | EA (%)                              | 49.9                                            | 64.2                                                                             | 56.1                                                                                      |
| SEMAY       | Fecha de aplicación del riego (DDS) | 50 y 83                                         | 44, 79 y 108                                                                     | 38, 65, 89 y 112                                                                          |
|             | Ln total (cm)                       | 27                                              | 33.1                                                                             | 34.6                                                                                      |
|             | Lb total (cm)                       | 66.1                                            | 69.7                                                                             | 72.3                                                                                      |
|             | EA (%)                              | 40.7                                            | 54.2                                                                             | 46.1                                                                                      |

2A = Dos riegos de auxilio, 3A = Tres riegos de auxilio, 4A = Cuatro riegos de auxilio, GDDA = Grados días de desarrollo acumulado, TP = Tallo principal, DDS = Días después de la siembra.



**Figura 3.** a) Etapa fenológica de inicio de espigamiento para el tratamiento de cuatro riegos (4A) en SEMAY (28 de febrero de 2023), b) Medición de la humedad del suelo con el sensor TDR 350, c) Muestras gravimétricas de humedad del suelo, d) y e) Medición del caudal en los tratamientos de riego.

## Evapotranspiración real del cultivo

La evapotranspiración real del cultivo (ET<sub>c</sub>) se estimó mediante dos enfoques independientes. El primero correspondió al modelo CROPWAT (Smith 1992), ampliamente utilizado para la programación del riego y la estimación de los requerimientos hídricos de los cultivos, y que ha sido empleado en estudios de HH (Elbeltagi *et al.* 2020, Si *et al.* 2025). El segundo correspondió al modelo IRRIMODEL (Sifuentes *et al.* 2016), desarrollado para estimar la ET<sub>c</sub> y programación del riego a partir de la acumulación de grados días de desarrollo (GDD) y de las etapas fenológicas del cultivo. El modelo IRRIMODEL ha sido empleado en otros trabajos y cultivos (Mendoza-Pérez *et al.* 2018, Mendoza-Pérez *et al.* 2019).

En ambos enfoques, la evapotranspiración real del cultivo (ET<sub>c</sub>) se estimó siguiendo la metodología de la FAO-56 (Allen *et al.* 1998), mediante la relación entre la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) y el coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>). La ET<sub>o</sub> se calculó mediante la ecuación FAO Penman-Monteith utilizando información climática proveniente de las estaciones de la red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora (CESAVE-SIAFESON, 2023). Para el sitio CENEB se usaron los datos de la estación BLOCK 910 (CIANO), para Sibolibampo la estación BLOCK 1936 SIBOLIBAMPO y para SEMAY la estación CAMPO EL 20. Los valores de ET<sub>o</sub>, precipitación y temperaturas durante el periodo de análisis para los sitios de estudio se muestran en la Figura 4.

$$ET_c = (K_c) * ET_o$$

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left( \frac{C_n}{T + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d u_2)}$$

Donde  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>); R<sub>n</sub> es la radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m<sup>-2</sup>día<sup>-1</sup>); G es la densidad del flujo de calor del suelo (MJ m<sup>-2</sup>día<sup>-1</sup>);  $\gamma$  es la constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>); T es la temperatura media del aire a 2 m de altura (°C); U<sub>2</sub> es la velocidad del viento a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>); e<sub>s</sub> es la presión de vapor de saturación (kPa); e<sub>a</sub> es la presión real de vapor (kPa); C<sub>n</sub> y C<sub>d</sub> son los parámetros del numerador y denominador que varían según el tipo de superficie de referencia y tiempo de cálculo, sus valores específicos se describen por Pereira *et al.* (2015).

Para las simulaciones en CROPWAT se ingresaron los datos observados de cada tratamiento de riego, incluyendo las fechas de siembra y cosecha, la duración de las etapas fenológicas, las características físicas del suelo, la precipitación, la ET<sub>o</sub> diaria, así como las fechas y láminas de riego observadas y aplicadas en campo para cada tratamiento. Los coeficientes de cultivo (K<sub>c</sub>) y la profundidad radicular (0.3 - 1.2 m) fueron tomados de las recomendaciones para trigo propuestas por Allen *et al.* (1998). De esta manera, se realizó una simulación independiente para cada tratamiento de riego (2A, 3A y 4A) en cada uno de los sitios de estudio.

En el caso IRRIMODEL, se utilizaron datos observados de fenología y grados días de desarrollo acumulado (GDDA) para parametrizar las funciones que describen la evolución temporal del K<sub>c</sub> en el cultivo de trigo. IRRIMODEL estima el K<sub>c</sub> diario utilizando la metodología propuesta por (Ojeda-Bustamante *et al.* 2006), en el cual el K<sub>c</sub> del día n se expresa como una función de los GDDA.

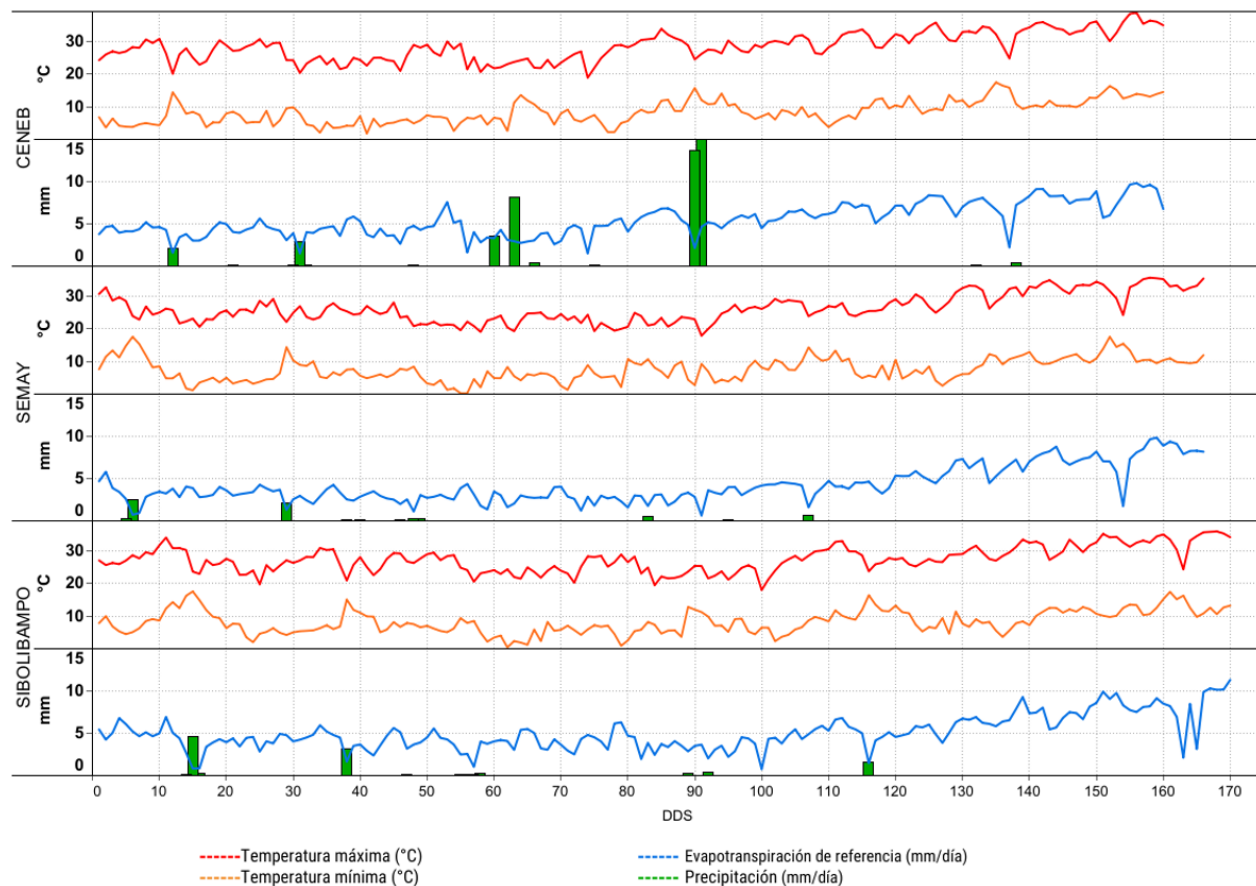
$$K_{c_n} = K_{max} \operatorname{erfc} \left( \left( \frac{x_n - x_{K_{max}}}{\alpha_1} \right)^2 \right)$$

Si  $K_{Cn} < K_{Co}$  entonces  $K_{Cn} = K_{Co}$

$$x_n = \frac{GDDA_n}{\alpha_0}$$

$K_{Cn}$  es el coeficiente de cultivo en el día  $n$ ;  $K_{max}$  es el máximo valor de  $K_c$  durante el desarrollo del cultivo;  $erfc()$  denota la función error complemento,  $x_n$  expresa los GDDA hasta el día  $n$  a partir de la siembra, normalizado con respecto al parámetro  $\alpha_0$ ;  $\alpha_0$  es el valor de GDDA necesario para completar las fases fenológicas del cultivo (de siembra a cosecha);  $x_{K_{max}}$  es el valor adimensional normalizado  $x$  cuando se presenta el valor máximo  $K_{max}$ ;  $K_{Co}$  es el valor inicial de  $K_c$  cuando el área foliar del cultivo es mínima, predominando la evaporación del suelo sobre la transpiración del cultivo; y  $\alpha_1$  es un parámetro de regresión calibrado por Ojeda-Bustamante *et al.* (2006) cuyo valor es de 0.45.

Los parámetros  $K_{Co}$  y  $K_{max}$  fueron tomados de las recomendaciones de FAO-56 para el cultivo de trigo (Allen *et al.* 1998) y fueron los mismos que se emplearon en CROPWAT. Por su parte, los parámetros  $\alpha_0$  y  $x_{K_{max}}$  se determinaron a partir de los GDDA y de las observaciones fenológicas realizadas en cada sitio de estudio. Los valores de los parámetros empleados en IRRIMODEL para estimar el  $K_c$  diario en cada uno de los sitios de estudio se presentan en la Tabla 4.



**Figura 4.** Comportamiento de la ETo diaria (mm/día), precipitación (mm/día) y temperaturas (°C) en los sitios de estudio: CENEB, SEMAY y Sibolibampo para cada día después de la siembra (DDS).

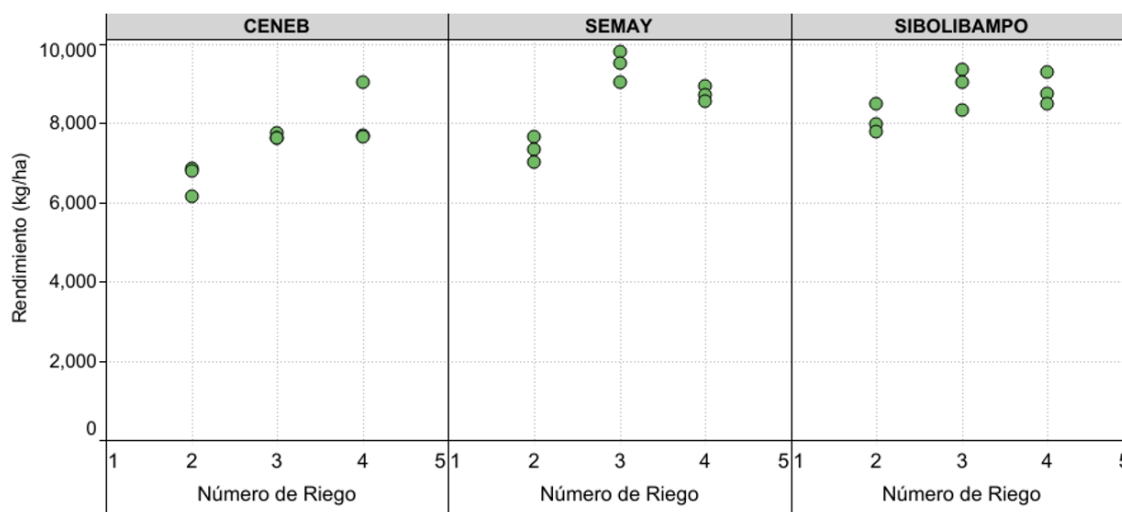
**Tabla 4.** Parámetros de IRRIMODEL utilizados para la estimación del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) en los sitios de estudio.

| Sitio       | $K_{co}$ | $K_{máx}$ | $X_{kmáx}$ | $\alpha_0$ |
|-------------|----------|-----------|------------|------------|
| CENEB       | 0.2      | 1.1       | 0.52       | 1,372      |
| Sibolibampo | 0.2      | 1.1       | 0.53       | 1,782      |
| SEMAY       | 0.2      | 1.1       | 0.49       | 1,595      |

## Rendimiento del cultivo

El rendimiento de grano se determinó al 12% de humedad estimado mediante muestreo (INIFAP 2017). En los sitios SEMAY y Sibolibampo se realizaron tres muestreos por tratamiento sobre el surco central de cada parcela experimental. Cada muestra estuvo compuesta por cuatro submuestras obtenidas en segmentos de un metro lineal. En SEMAY, las muestras se ubicaron a 50 m del inicio del surco, 150 m después de la primera y 50 m después de la segunda. En Sibolibampo, las muestras se ubicaron a 50, 200 y 100 m, respectivamente.

En el sitio CENEB por ser de ancho mayor, se obtuvieron tres muestras compuestas utilizando los surcos 20, 40 y 60 (contando de este a oeste). Cada muestra se integró con dos submuestras tomadas dentro del mismo surco; la primera se ubicó a 30 m del inicio del surco y la segunda, a 60 m de la primera. Los valores de rendimiento obtenidos para cada muestra en los diferentes sitios de estudio se presentan en la Figura 5.



**Figura 5.** Rendimiento de grano por muestra en los diferentes sitios de estudio.

## Estimación de la Huella hídrica de consumo

La  $HH_{consumo}$  del trigo se estimó para cada tratamiento y sitio de estudio siguiendo la metodología de Hoekstra *et al.* (2011) descrita en la siguiente ecuación.

$$HH_{consumo\ cultivo} = HH_{verde} + HH_{azul}$$

El componente verde ( $HH_{verde}$ ,  $m^3\ t^{-1}$ ) y azul ( $HH_{azul}$ ,  $m^3\ t^{-1}$ ) de la huella hídrica de un cultivo se calcula dividiendo el uso de agua verde ( $CWU_{verde}$ ,  $m^3\ ha^{-1}$ ) y azul ( $CWU_{azul}$ ,  $m^3\ ha^{-1}$ ) del cultivo entre el rendimiento del cultivo ( $R$ ,  $t\ ha^{-1}$ ), según sea el caso. El agua verde representa el agua de

lluvia total evaporada en el terreno durante el ciclo del cultivo y el agua azul corresponde al aporte proveniente del agua de riego.

$$HH_{\text{verde}} = \frac{CWU_{\text{verde}}}{R} \quad HH_{\text{azul}} = \frac{CWU_{\text{azul}}}{R}$$

Los componentes verde y azul del agua (CWU, m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) se calculan mediante la acumulación de la evapotranspiración diaria (ET, mm día<sup>-1</sup>) durante el período de crecimiento completo del cultivo:

$$CWU_{\text{verde}} = 10 \times \sum_{d=1}^{lgp} ET_{\text{Verde}} \quad CWU_{\text{azul}} = 10 \times \sum_{d=1}^{lgp} ET_{\text{azul}}$$

Dónde la ET<sub>verde</sub> corresponde a la evapotranspiración del agua verde y ET<sub>azul</sub> la evapotranspiración de agua azul. El coeficiente 10 actúa como factor de conversión de la lámina del agua medida en mm a volúmenes de agua de superficie en m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. La sumatoria se realiza desde el día de la siembra (día 1) hasta el día de la cosecha (*lgp* es la duración del período de crecimiento en días).

En este caso, para separar la ET<sub>c</sub> en los componentes ET<sub>verde</sub> y ET<sub>azul</sub> se usó el método empleado en CROPWAT (Smith 1992). La ET<sub>verde</sub> se calculó como el mínimo entre la ET<sub>c</sub> y la precipitación efectiva (Pe). La ET<sub>azul</sub> es igual a la evapotranspiración real del cultivo menos la Pe, y es cero cuando la Pe supera la ET<sub>c</sub>. Para estimar la Pe diaria se usó una aproximación simplificada del Método de Conservación de Suelos del USDA (Smith 1992), ampliamente utilizado en estudios de balance hídrico agrícola y huella hídrica (Chattaraj *et al.* 2014, Koukoulis *et al.* 2023).

$$ET_{\text{Verde}} = \min(ET_c, Pe)$$

$$ET_{\text{Azul}} = \max(ET_c - Pe, 0)$$

$$P_e = \frac{P(4.17 - 0.2P)}{4.17}, \quad \text{para } P < 8.3 \text{ mm/día}^{-1}$$

$$P_e = (4.17 - 0.1P), \quad \text{para } P \geq 8.3 \text{ mm/día}^{-1}$$

### Análisis estadístico

Para evaluar el desempeño de IRRIMODEL en la estimación de la ET<sub>c</sub> y, en consecuencia, de la HH, se compararon sus resultados con los obtenidos mediante CROPWAT. La evaluación se realizó mediante los parámetros de error: la raíz del cuadrado medio del error (RMSE) (Tanaka y Huba 1989), el error medio (ME) y el error porcentual (% Error).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}}$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)}{n}$$

$$\%Error = \frac{Y_i - X_i}{X_i} \times 100$$

Donde Xi y Yi representan los valores comparados para cada variable analizada, Xi corresponde a los valores obtenidos con CROPWAT y Yi los valores estimados con IRRIMODEL; n es el número total de datos.

Adicionalmente, para evaluar el rendimiento y la HH por tratamiento, se llevó a cabo un análisis estadístico descriptivo mediante el cálculo de la media, desviación estándar y coeficiente de variación (CV). Posteriormente, se evaluaron los efectos del número de riegos mediante un análisis de varianza y una prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

## RESULTADOS

### Evapotranspiración real del cultivo con CROPWAT e IRRIMODEL

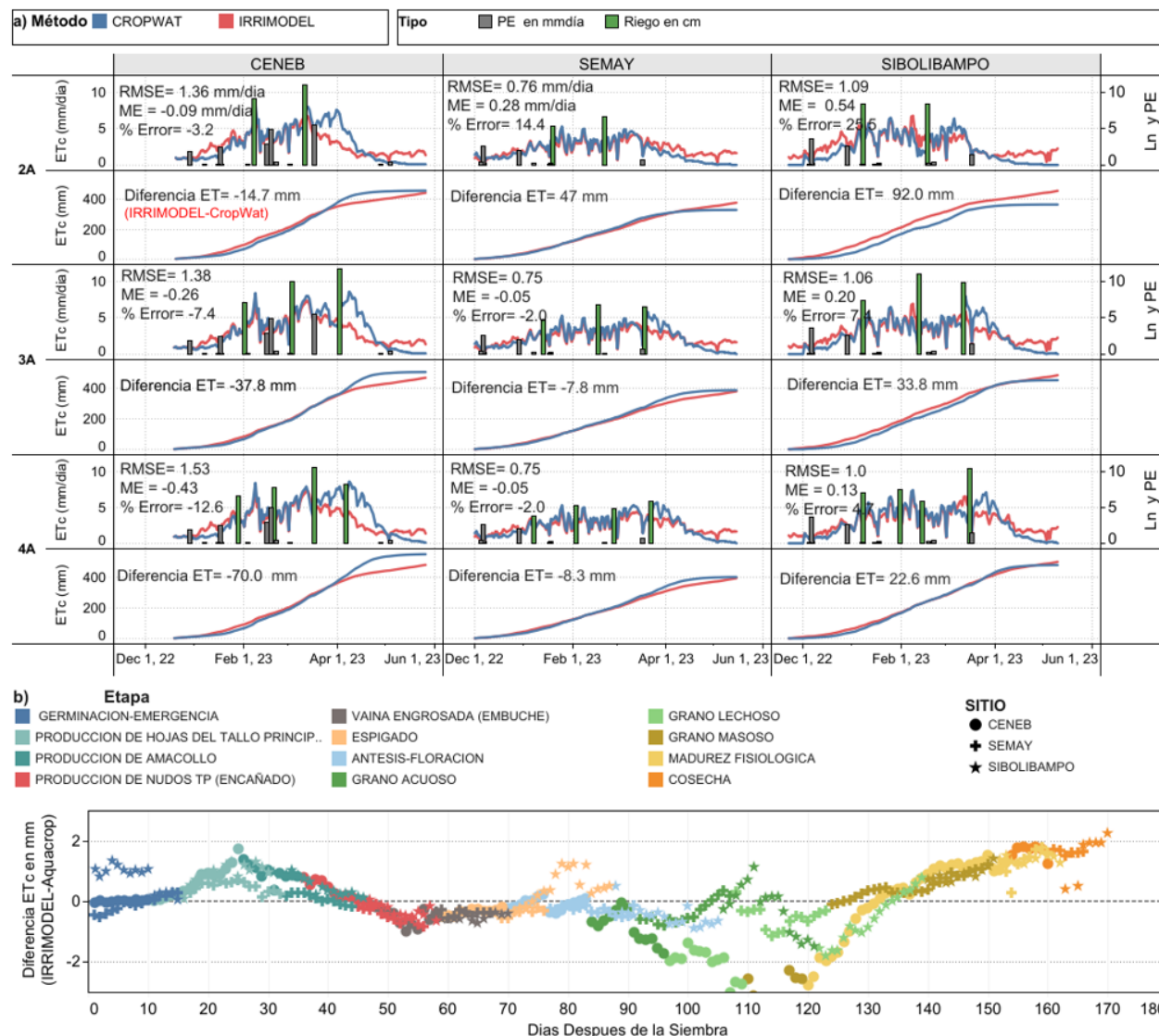
Durante el ciclo de cultivo, la ETo acumulada fue mayor en CENEB (872.2 mm), seguida de Sibolibampo (858.1 mm), mientras que SEMAY presentó el valor más bajo (698.5 mm), reflejando diferencias en la demanda atmosférica entre los sitios de estudio. Los valores acumulados de ETc estimados con CROPWAT mostraron una tendencia creciente conforme aumentó el número de riegos. Para el tratamiento 2A, la ETc acumulada fue de aproximadamente 458 mm en CENEB, 330 mm en SEMAY y 364 mm en Sibolibampo. En 3A, los valores aumentaron a 510, 390 y 456 mm, respectivamente. En el tratamiento 4A se registraron las mayores ETc acumuladas, alcanzando valores cercanos a 530 mm en CENEB, 400 mm en SEMAY y 490 mm en Sibolibampo (Figura 6).

La comparación entre CROPWAT e IRRIMODEL mostró valores de RMSE que fluctuaron entre 0.75 y 1.53 mm día<sup>-1</sup> (Figura 6a), mientras que el error medio (ME) varió entre -0.43 y 0.54 mm día<sup>-1</sup>. En cinco de los nueve casos analizados, el ME fue negativo, indicando una tendencia de IRRIMODEL a subestimar los valores de ETc de CROPWAT; de los 90 a los 130 días después de la siembra se observan las mayores diferencias promedio, que llegan a ser cercanos a 2 mm día<sup>-1</sup>, que son las etapas de grano masoso y grano acuoso. Sin embargo, se observa en las etapas iniciales y finales una sobrestimación de los valores de ETc por parte de IRRIMODEL (Figura 6b).

Las mayores diferencias acumuladas entre ambos métodos se observaron en el tratamiento 2A de Sibolibampo (92.0 mm) y en el tratamiento 4A de CENEB (70.0 mm), mientras que las menores diferencias se registraron en SEMAY, con valores entre -7.8 y 47.0 mm. Ambos modelos reprodujeron patrones temporales similares de ETc, caracterizados por un incremento progresivo desde el establecimiento del cultivo hasta alcanzar valores máximos durante las etapas de mayor desarrollo vegetativo y reproductivo, seguido de una disminución hacia la madurez fisiológica. Asimismo, se observó una relación positiva entre el número de riegos aplicados y la ETc acumulada, independientemente del sitio de estudio.

### Evapotranspiración azul y verde del cultivo

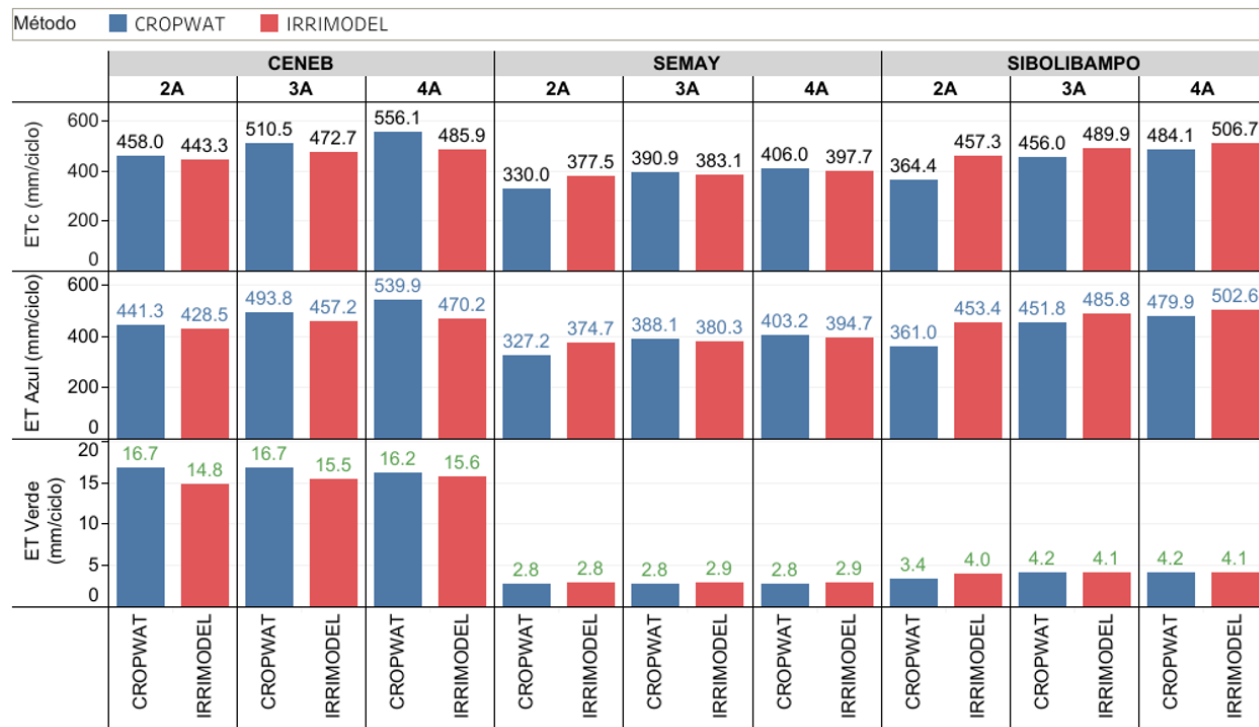
La separación de la ETc en sus componentes ET<sub>azul</sub> y ET<sub>verde</sub> se presenta en la Figura 7. En los tres sitios la ET<sub>verde</sub> representó una fracción muy pequeña de la ETc total, con valores comprendidos entre 2.8 y 16.7 mm ciclo<sup>-1</sup>, equivalente a menos del 5% de la ETc acumulada. Las mayores contribuciones de ET<sub>verde</sub> se registraron en el sitio CENEB, con valores entre 16.2 – 16.7 mm ciclo<sup>-1</sup>, mientras que en SEMAY se observaron los valores más bajos (2.8 - 2.9 mm ciclo<sup>-1</sup>). Sibolibampo presentó valores intermedios, entre 3.4 y 4.2 mm ciclo<sup>-1</sup>.



**Figura 6.** a) Valores de Evapotranspiración real del cultivo (ETc) diaria y acumulado por fecha para los tratamientos y sitios de estudio con CROPWAT e IRRIMODEL; b) diferencias promedio entre CROPWAT e IRRIMODEL por fecha, diferencias positivas indican sobrestimación de IRRIMODEL.

En contraste la  $ET_{\text{azul}}$  osciló entre 327.2 y 545.4 mm ciclo<sup>-1</sup>, constituyendo más del 97% de la ETc total en todos los tratamientos. Estos valores reflejan que el consumo hídrico del trigo estuvo dominado por el agua de riego, por tanto, la  $ET_{\text{azul}}$  mostró una tendencia creciente conforme aumentó el número de riegos de auxilio, de esta manera, los valores promedio de  $ET_{\text{azul}}$  fueron de 378.3, 446.4 y 476.2 mm ciclo<sup>-1</sup> para los tratamientos 2A, 3A y 4A, respectivamente.

La comparación entre modelos en la estimación de la  $ET_{\text{azul}}$  y  $ET_{\text{verde}}$  se muestra en la Figura 7, donde se observan diferencias dependientes del sitio y tratamiento. Las mayores discrepancias ocurrieron en CENEB, donde IRRIMODEL subestimó la  $ET_{\text{azul}}$  entre 14.3 y 70.5 mm ciclo<sup>-1</sup> respecto a CROPWAT. Por el contrario, en Sibolibampo y SEMAY se registraron tanto sobrestimaciones como subestimaciones. Para la  $ET_{\text{verde}}$ , las diferencias entre modelos fueron menores a 0.8 mm ciclo<sup>-1</sup> en todos los casos.



**Figura 7.** Comportamiento de la Evapotranspiración real del cultivo (ET<sub>c</sub>), ET<sub>azul</sub> y ET<sub>verde</sub> acumulado por tratamiento y sitio analizado para las simulaciones con CROPWAT e IRRIMODEL.

### Componente de la huella hídrica del trigo

En la Tabla 5 se muestran los datos de rendimiento promedios obtenidos en los sitios por cada tratamiento, los cuales fluctuaron entre 6,591 - 9,435 kg ha<sup>-1</sup>. En los sitios de Sibolibampo y SEMAY, los rendimientos más altos se obtuvieron en el tratamiento de 3 riegos, mientras que en CENEB fue con 4 riegos. En Sibolibampo no se encontraron diferencia estadística significativa en el rendimiento entre los tratamientos evaluados, además este sitio presentó el rendimiento promedio más alto de los tres sitios con 8,604 kg ha<sup>-1</sup>.

**Tabla 5.** Rendimientos observados por sitio y tratamiento analizado.

| Sitio       | Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> ) |       |       | Promedio |
|-------------|------------------------------------|-------|-------|----------|
|             | 2A                                 | 3A    | 4A    |          |
| CENEB       | 6 591*                             | 7 659 | 8 125 | 7 458    |
| Sibolibampo | 8 081                              | 8 901 | 8 828 | 8 604    |
| SEMAY       | 7 337*                             | 9 435 | 8 733 | 8 502    |

\*Estadísticamente diferentes (Tukey  $\alpha = 0.05$ )

La HH<sub>consumo</sub> del trigo para cada tratamiento analizado está entre 414 - 695 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup> (Tabla 6), donde los valores de HH más alto por sitio se ubican en los tratamientos de 4 riegos para SEMAY y Sibolibampo y 2 riegos para CENEB; y los más bajos en 3 riegos para CENEB y SEMAY y 2 riegos para Sibolibampo. El valor más alto de HH<sub>consumo</sub> (694.9 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup>) estuvo influenciado directamente por el bajo rendimiento (6,591.0 t ha<sup>-1</sup>) que se obtuvo en CENEB. Además, en CENEB no se encontraron

diferencia estadística significativa en la  $HH_{\text{Consumo}}$  entre los tratamientos evaluados. En todos los casos, el CV entre tratamientos presentó valores inferiores al 10%.

**Tabla 6.** Huella hídrica azul, verde y de consumo de los sitios y tratamientos analizados. Los valores de HH y ET son los estimados mediante CROPWAT.

| Sitio       | Tipo | ET <sub>Azul</sub><br>(mm ciclo <sup>-1</sup> ) | ET <sub>Verde</sub><br>(mm ciclo <sup>-1</sup> ) | CWU <sub>Azul</sub><br>(m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ) | CWU <sub>Verde</sub><br>(m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ) | Rendimiento<br>(kg ha <sup>-1</sup> ) | HH <sub>Azul</sub><br>(m <sup>3</sup> t <sup>-1</sup> ) | HH <sub>Verde</sub><br>(m <sup>3</sup> t <sup>-1</sup> ) | HH <sub>Consumo</sub><br>(m <sup>3</sup> t <sup>-1</sup> ) |
|-------------|------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| CENEB       | 2A   | 441.3                                           | 16.7                                             | 4413.0                                                    | 167.0                                                      | 6591.0                                | 669.5                                                   | 25.3                                                     | 694.9                                                      |
|             | 3A   | 493.8                                           | 16.7                                             | 4938.0                                                    | 167.0                                                      | 7659.0                                | 644.7                                                   | 21.8                                                     | 666.5                                                      |
|             | 4A   | 539.9                                           | 16.2                                             | 5399.0                                                    | 162.0                                                      | 8125.0                                | 664.5                                                   | 19.9                                                     | 684.4                                                      |
| SEMA Y      | 2A   | 327.2                                           | 2.8                                              | 3272.0                                                    | 28.0                                                       | 7337.0                                | 446.0                                                   | 3.8                                                      | 449.8                                                      |
|             | 3A   | 388.1                                           | 2.8                                              | 3881.0                                                    | 28.0                                                       | 9435.0                                | 411.3                                                   | 3.0                                                      | 414.3                                                      |
|             | 4A   | 403.2                                           | 2.8                                              | 4032.0                                                    | 28.0                                                       | 8733.0                                | 461.7                                                   | 3.2                                                      | 464.9*                                                     |
| SIBOLIBAMPO | 2A   | 361.0                                           | 3.4                                              | 3610.0                                                    | 34.0                                                       | 8081.0                                | 446.7                                                   | 4.2                                                      | 450.9                                                      |
|             | 3A   | 451.8                                           | 4.2                                              | 4518.0                                                    | 42.0                                                       | 8901.0                                | 507.6                                                   | 4.7                                                      | 512.3                                                      |
|             | 4A   | 479.9                                           | 4.2                                              | 4799.0                                                    | 42.0                                                       | 8828.0                                | 543.6                                                   | 4.8                                                      | 548.4*                                                     |
| Promedio    | 2A   | 376.5                                           | 7.6                                              | 3765.0                                                    | 76.3                                                       | 7336.3                                | 520.7                                                   | 11.1                                                     | 531.9                                                      |
|             | 3A   | 444.6                                           | 7.9                                              | 4445.7                                                    | 79.0                                                       | 8665.0                                | 521.2                                                   | 9.8                                                      | 531.0                                                      |
|             | 4A   | 474.3                                           | 7.7                                              | 4743.3                                                    | 77.3                                                       | 8562.0                                | 556.6                                                   | 9.3                                                      | 565.9                                                      |

\*Estadísticamente diferentes (Tukey  $\alpha = 0.05$ )

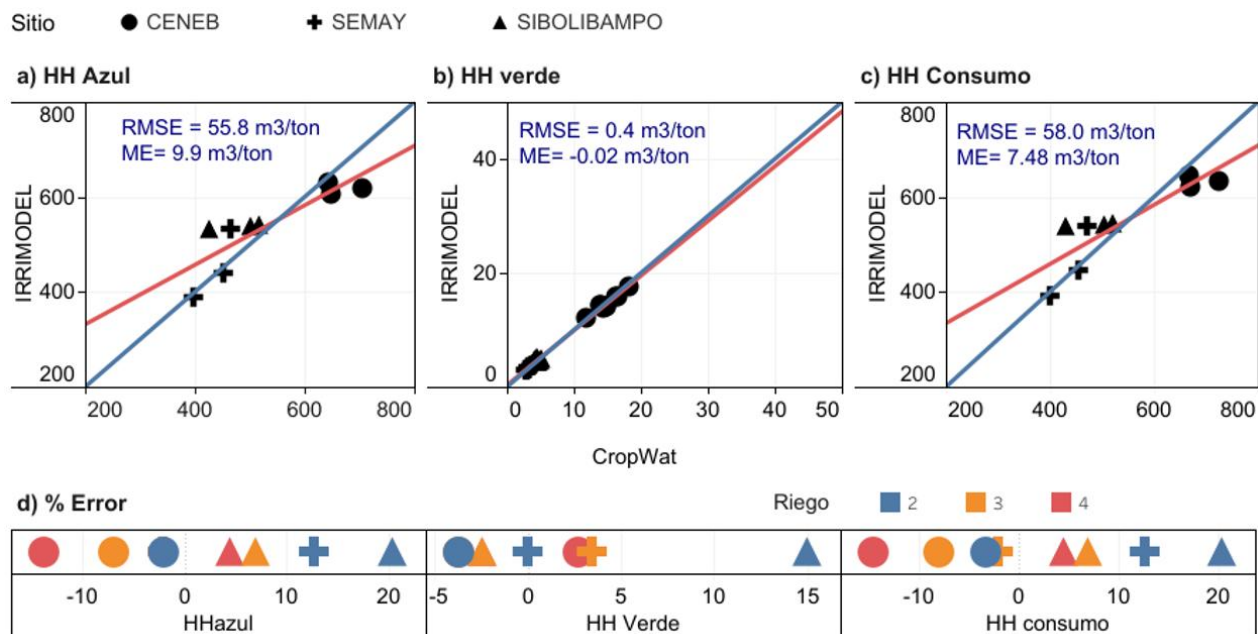
### Huella hídrica del trigo con IRRIMODEL

La comparación de ambos modelos en la estimación de la HH para los diferentes sitios, se presenta en la Figura 8. Las diferencias entre las estimaciones obtenidas con IRRIMODEL y CROPWAT alcanzaron hasta 109 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup>, valor observado en el tratamiento 2A de Sibolibampo. Esta diferencia representa aproximadamente el 20% de la huella hídrica estimada con CROPWAT y está directamente asociada a las diferencias observadas en la estimación de la ET<sub>c</sub> entre ambos modelos. No obstante, este comportamiento correspondió a un caso particular; en la mayoría de los tratamientos las diferencias relativas de huella hídrica oscilaron entre -14 y 15% (Figura 8), se encontró un valor RMSE de 58 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup> y ME de 7.48 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup> para la  $HH_{\text{consumo}}$ .

## DISCUSIÓN

### Evapotranspiración real del cultivo

La ET<sub>c</sub> acumulada estimada con CROPWAT varió entre 330 y 556 mm, dependiendo del sitio y del tratamiento de riego. Estos valores se encuentran dentro de los rangos reportados para el cultivo de trigo bajo condiciones de riego en la región de estudio. Por ejemplo, Palacios-Vélez *et al.* (2011) estimaron valores de ET<sub>c</sub> acumulada aproximadamente entre 410 y 510 mm en parcelas de trigo del Distrito de Riego 038 Río Mayo; mientras que Castañeda-Ibáñez *et al.* (2018), utilizando mediciones de Eddy Covariance, reportaron valores de 492.5 mm por ciclo en el Distrito de Riego 041 Río Yaqui. A escala global, Zwart y Bastiaanssen (2004) documentaron valores de ET<sub>c</sub> para trigo que oscilan entre 200 y 600 mm por ciclo, dependiendo de las condiciones climáticas, la disponibilidad de agua y las prácticas de manejo del cultivo.



**Figura 8.** Indicadores de desempeño de IRRIMODEL respecto a CROPWAT para la estimación de la huella hídrica: a) error medio (ME) de la huella hídrica azul (HHazul); b) error medio de la huella hídrica verde (HHverde); c) error medio de la huella hídrica de consumo (HHconsumo); y d) error porcentual de la huella hídrica de consumo para cada tratamiento de riego y sitio de estudio.

La respuesta de la  $ET_c$  al aumento en el número de riegos aplicados no fue lineal. En promedio, la diferencia entre los tratamientos 2A y 3A fue de 68.1 mm ciclo<sup>-1</sup>, mientras que entre 3A y 4A fue de solo 29.8 mm ciclo<sup>-1</sup>. Este comportamiento indica que una mayor parte de la demanda hídrica del cultivo fue satisfecha con los primeros riegos. Al respecto, Allen *et al.* (1998) y Steduto *et al.* (2012) señalan que una mayor disponibilidad de agua en la zona radicular favorece la transpiración y permite que la  $ET_c$  real se aproxime a la demanda atmosférica potencial, de esta manera, una vez que el cultivo se aproxima a sus condiciones potenciales de transpiración, presentan incrementos adicionales en el suministro hídrico generando beneficios cada vez menores, lo que ocurren en este caso después del tercer riego. Además del manejo del riego, las diferencias observadas entre sitios indican que la  $ET_c$  estuvo influenciada por las condiciones ambientales locales. Aunque CENEB y Sibolibampo presentaron valores similares de  $ET_o$  acumulada, CENEB registró consistentemente mayores valores de  $ET_c$ , particularmente en los tratamientos con 3A y 4A. Por otro lado, SEMAY presentó los menores valores de  $ET_c$  en todos los tratamientos, lo cual coincide con la menor  $ET_o$  registrada durante el ciclo y refleja una menor demanda evaporativa del ambiente. Con respecto al desempeño de IRRIMODEL, los valores de RMSE obtenidos (0.75–1.53 mm día<sup>-1</sup>) fueron comparables a los reportados para otros métodos de estimación de  $ET_c$  como los basados en sensores remotos, donde comúnmente se observan errores del orden de 1 a 2 mm día<sup>-1</sup> (Senay *et al.* 2022, Ma *et al.* 2023). Asimismo, las diferencias relativas entre la  $ET_c$  acumulada estimada por IRRIMODEL y CROPWAT (2 y 25%), se encuentran dentro de los rangos de incertidumbre reportados para métodos basados en balance hídrico del suelo (Allen *et al.* 2011).

En conjunto, los resultados indican que IRRIMODEL reproduce la dinámica temporal de la  $ET_c$ , por lo que puede ser una alternativa operativa para estudios de evapotranspiración cuando no se

dispone de información detallada para implementar modelos más complejos. Sin embargo, la incorporación de coeficientes de estrés hídrico o funciones de ajuste asociadas al contenido de agua en el suelo podría mejorar el desempeño de IRRIMODEL, particularmente durante las etapas finales del cultivo y después de los riegos.

### Evapotranspiración azul y verde del cultivo

La contribución de la  $ET_{\text{verde}}$  fue baja en todos los sitios debido a los valores bajos de precipitación registrados durante el ciclo del cultivo (83 mm en CENEB, 7.1 mm en SEMAY y 10.8 mm en Sibolibampo). Aunque en CENEB se registró un evento de lluvia de cerca de 52 mm, no toda esta agua contribuyó a la  $ET_c$  del cultivo. La fracción efectivamente aprovechada depende de la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, del estado de humedad previo al evento y de la profundidad efectiva de la zona radicular (Allen *et al.* 1998). Cuando la precipitación excede la capacidad de retención del suelo, una parte del agua puede perderse por escurrimiento superficial o percolación profunda, reduciendo así su contribución a la  $ET_{\text{verde}}$ .

La mayor parte de la  $ET_c$  correspondió al componente azul, lo que indica que, bajo las condiciones áridas y semiáridas del sur de Sonora, las diferencias en la  $HH_{\text{consumo}}$  están determinadas principalmente por el manejo del riego más que por las aportaciones de precipitación. Esto resalta la importancia de programar los riegos considerando tanto el estado hídrico del suelo como las etapas fenológicas de mayor sensibilidad al déficit hídrico. En sistemas de producción de trigo es frecuente que se apliquen eventos de riegos con intervalos reducidos sin una evaluación explícita de la disponibilidad de agua en la zona radicular, lo que puede incrementar el consumo de agua y disminuir la productividad del agua (Steduto *et al.* 2012).

### Componente de la huella hídrica del trigo

Los valores de  $HH_{\text{consumo}}$  estimados ( $414 - 695 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ ) en este estudio están por debajo del valor promedio global reportado por Mekonnen y Hoekstra (2011), bajo condiciones de riego y temporal, con un  $HH_{\text{consumo}}$  de  $1,619 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  para el cultivo del trigo ( $HH_{\text{azul}}$  de  $1,277 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  y  $HH_{\text{verde}}$  de  $342 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ ). Sin embargo, diversos estudios basados en el enfoque de Requerimiento de Agua de los Cultivos (RAC) han reportado un amplio rango de  $HH_{\text{consumo}}$  que se encuentra entre  $237 - 1,647 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  (Feng *et al.* 2021); dentro del cual se ubican los valores obtenidos en este estudio. Mekonnen y Hoekstra (2010) reportaron que la  $HH_{\text{consumo}}$  promedio del trigo en México durante el periodo de 1996-2005 fue de  $892 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ , con una  $HH_{\text{azul}}$  ( $559 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ ) mayor a la  $HH_{\text{verde}}$ . Lo anterior indica que la  $HH_{\text{azul}}$  para el sitio CENEB supera el promedio nacional reportado (para esos años), mientras que en el sitio SEMAY y Sibolibampo los valores de  $HH_{\text{azul}}$  son menores al promedio. Los resultados indican que el incremento en el número de riegos condujo a mayores valores de  $CWU_{\text{azul}}$ ; sin embargo, el efecto sobre el rendimiento y la huella hídrica no fue proporcional entre sitios y tratamientos. Aunque el  $CWU_{\text{azul}}$  promedio aumentó de  $3,765 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  en 2A a  $4,743 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  en 4A, la  $HH_{\text{consumo}}$  promedio fue prácticamente igual entre los tratamientos 2A ( $531.9 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ ) y 3A ( $531.0 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ ), mientras que el tratamiento 4A presentó el valor más alto ( $565.9 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ ). Esto indica que el agua adicional aplicada en el cuarto riego no se tradujo en incrementos proporcionales del rendimiento.

En CENEB y SEMAY la menor  $HH_{\text{consumo}}$  se obtuvo con tres riegos, mientras que en Sibolibampo se registró con dos riegos. Estos resultados indican que existe un umbral de suministro hídrico a partir

del cual los beneficios productivos son marginales, por lo que incrementos adicionales en la lámina aplicada tienden a reducir la productividad del agua y aumentar la huella hídrica. Molden *et al.* (2010) y Chukalla *et al.* (2015) señalaron que esquemas de riego optimizados pueden reducir la  $HH_{\text{consumo}}$  del cultivo al maximizar el rendimiento por unidad de agua consumida.

En el caso del sitio CENEB se presentaron los valores más altos de  $ET_{\text{azul}}$ , combinados con los rendimientos más bajos del estudio. Como consecuencia, la  $HH_{\text{azul}}$  y  $HH_{\text{consumo}}$  fueron mayores, alcanzando valores superiores a  $690 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  en el tratamiento de 2A. Hoekstra *et al.* (2011), señala que, en sistemas agrícolas con menor eficiencia productiva del agua, el incremento en el consumo hídrico no siempre se traduce en mayores rendimientos, resultando una  $HH$  elevada. Los resultados sugieren que las diferencias observadas en CENEB no solo estuvieron asociadas al manejo del riego, sino también a las condiciones climáticas durante el ciclo de cultivo. La fecha de siembra más tardía expuso al cultivo a periodos con mayor demanda evaporativa, reflejada en la  $ET_o$  acumulada más alta del estudio (872 mm), lo que incrementó el consumo de agua del cultivo sin un aumento proporcional en el rendimiento y, en consecuencia, elevó la  $HH_{\text{consumo}}$ .

### Estimación de huella hídrica con IRRIMODEL

Una de las principales limitantes para la estimación de la  $HH_{\text{consumo}}$  en México es la escasa disponibilidad de información para cuantificar la  $ET_c$  real a escala parcelaria. Los enfoques BAS, considerados entre los más precisos para este propósito, requieren información detallada sobre láminas y fechas de riego, propiedades físicas del suelo, etapas fenológicas y variables climáticas. Aunque este nivel de detalle permite reducir la incertidumbre en la estimación de la  $HH$ , su aplicación a escalas regionales resulta compleja debido a la limitada disponibilidad de datos. En este contexto, modelos simplificados como IRRIMODEL representan una alternativa atractiva para la estimación de la  $ET_c$  y la  $HH_{\text{consumo}}$ , ya que utilizan principalmente información de temperatura y grados días de desarrollo acumulado (GDDA), aprovechando la estrecha relación entre la fenología del cultivo y las condiciones térmicas (Porter y Gawith 1999). Bajo este enfoque, y con información disponible básica como fechas de siembra y cosecha junto con datos climáticos, sería posible generar estimaciones espaciales de la  $HH$  a escalas más amplias que las alcanzadas mediante mediciones directas o balances de agua detallados.

Los resultados obtenidos sugieren que, a pesar de las diferencias observadas respecto a CROPWAT, IRRIMODEL puede proporcionar estimaciones razonables de la  $ET_c$  y de la  $HH_{\text{consumo}}$ , con errores generalmente inferiores al 15% y con un RMSE de  $58 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ . Sin embargo, debe considerarse que tanto CROPWAT como IRRIMODEL son aproximaciones del proceso real, por lo que la incertidumbre verdadera únicamente podría determinarse mediante mediciones directas de los parámetros de la  $HH$  en campo con equipo calibrado (Feng *et al.* 2021) aunque estos equipos suelen ser muy costosos.

## CONCLUSIONES

El manejo del riego influyó en la evapotranspiración, el rendimiento del cultivo y la huella hídrica del trigo en los sitios evaluados. La  $HH$  del trigo en los tres sitios para el año agrícola 2022-2023 fluctuó entre  $414 - 695 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ , donde el tratamiento de 3 riegos presentó el mejor desempeño global,

con el mayor rendimiento promedio ( $8,665 \text{ kg ha}^{-1}$ ) y los valores promedios más bajos de  $HH_{\text{azul}}$  ( $521.2 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ ) y  $HH_{\text{consumo}}$  ( $531.0 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ ). La evaluación de IRRIMODEL mostró que este modelo puede proporcionar estimaciones de la  $HH_{\text{consumo}}$  con diferencias generalmente inferiores al 15% respecto a CROPWAT. Debido a que requiere principalmente datos de temperatura y grados días de desarrollo acumulado, su implementación demanda una cantidad considerablemente menor de variables que los enfoques convencionales de balance de agua en el suelo. Por ello, IRRIMODEL puede representar una alternativa para el seguimiento de la HH a escala parcelaria y regional, especialmente en zonas donde la información sobre riego, suelo y estado hídrico del cultivo es limitada.

## AGRADECIMIENTOS

Al proyecto denominado Gestión del riego en el cultivo de trigo, apoyada con la plataforma INIFAP-IRRIMODEL (Etapas 1: Calibración del modelo integral y adecuación de la plataforma).

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

## LITERATURA CITADA

- Allen RG, Pereira LS, Howell TA, Jensen ME (2011) Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management* 98(6): 899-920. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.015>
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. 300p.
- Castañeda-Ibáñez CR, Flores-Magdaleno H, Martínez-Menes M, Esparza-Govea S, Fernández-Reynoso D, Prado-Hernández V, Pascual-Ramírez F (2018) Estimación de la evapotranspiración mediante un balance de energía utilizando sensores remotos. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 5(15):537-545. <https://doi.org/10.19136/era.a5n15.1647>
- CESAVE - SIAFESON (2023) Red de estaciones meteorológicas automatizadas de Sonora. <https://remas.siafeson.org.mx/>. Fecha de consulta: 31 julio de 2023.
- Chattaraj S, Chakraborty D, Sehgal VK, Paul RK, Singh SD, Daripa A, Pathak H (2014) Predicting the impact of climate change on water requirement of wheat in the semi-arid Indo-Gangetic Plains of India. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 197: 174-183. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.07.023>
- Chukalla AD, Krol MS, Hoekstra AY (2015) Green and blue water footprint reduction in irrigated agriculture: Effect of irrigation techniques, irrigation strategies and mulching. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(12): 4877-4891. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4877-2015>
- Elbeltagi A, Deng J, Wang K, Hong Y (2020) Crop water footprint estimation and modeling using an artificial neural network approach in the Nile Delta, Egypt. *Agricultural Water Management* 235: 106080. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106080>

- Ercoli L, Arduini I, Mariotti M, Masoni A (2010) Post-anthesis dry matter and nitrogen dynamics in durum wheat as affected by nitrogen and temperature during grain filling. *Cereal Research Communications* 38(2):294-303. <https://doi.org/10.1556/crc.38.2010.2.16>
- FAO (2012) Coping with water scarcity An action framework for agriculture and food security. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 100p. <https://www.fao.org/4/i3015e/i3015e.pdf>. Fecha de consulta: 27 de enero del 2026.
- Farrell C, Turpin S, Suppen N (2011) Assessment of the water footprint of wheat in Mexico. In: Finkbeiner M (ed) Towards life cycle sustainability management. Springer. pp. 161-170. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1899-9\\_16](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1899-9_16)
- Feng B, Zhuo L, Xie D, Mao Y, Gao J, Xie P, Wu P (2021) A quantitative review of water footprint accounting and simulation for crop production based on publications during 2002-2018. *Ecological Indicators* 120: 106962. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106962>
- Flores Lopez LI, Bautista-Capetillo C (2015) Green and blue water footprint accounting for dry beans (*Phaseolus vulgaris*) in primary region of Mexico. *Sustainability* 7(3): 3001-3016. <https://doi.org/10.3390/su7033001>
- Garay ÁS, Ramón J, Alcalá V, Hernández J, Fermín O, Romero S (2022) Estimación de la huella hídrica de la producción de caña de azúcar para los ingenios de la cuenca del Papaloapan. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 13(1): 103-113. <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V13I1.2581>
- Gómez-Tagle AF, Gómez-Tagle A, Fuerte-Velázquez DJ, Barajas-Alcalá AG, Quiroz-Rivera F, Alarcón-Chaires PE, Guerrero-García-Rojas H (2022) Blue and green water footprint of agro-industrial avocado production in Central Mexico. *Sustainability* 14(15): 9664. <https://doi.org/10.3390/SU14159664/S1>
- Hoekstra AY, Chapagain AK, Aldaya MM, Mekonnen MM (2011) Manual de evaluación de la huella hídrica: Establecimiento del estándar mundial. Aenor. Madrid, España. 244p.
- Huang J, Xu C, Ridoutt BG, Chen F (2015) Reducing agricultural water footprints at the farm scale: A case study in the Beijing region. *Water* 7(12): 7066-7077. <https://doi.org/10.3390/w7126674>
- INIFAP (2017) Agenda Técnica Agrícola de Sonora. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Ciudad de México, México. 302p. [https://vun.inifap.gob.mx/VUN\\_MEDIA/BibliotecaWeb/\\_media/\\_agendas/4143\\_4840\\_Agenda\\_T%c3%a9cnica\\_Sonora\\_2017.pdf](https://vun.inifap.gob.mx/VUN_MEDIA/BibliotecaWeb/_media/_agendas/4143_4840_Agenda_T%c3%a9cnica_Sonora_2017.pdf). Fecha de consulta: 27 de enero de 2026.
- Karandish F, Šimůnek J (2019) A comparison of the HYDRUS (2D/3D) and SALTMED models to investigate the influence of various water-saving irrigation strategies on the maize water footprint. *Agricultural Water Management* 213: 809-820. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.023>
- Koradia A, Yadav B, Pandey A, Chowdary VM, Chandrasekar K (2025) Crop water footprint assessment: A review of methodological Approaches, scale Variability, and data constraints. *Water Resources Management* 39(14): 7361-7384. <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04323-2>
- Li Z, Feng B, Wang W, Yang X, Wu P, Zhuo L (2022) Spatial and temporal sensitivity of water footprint assessment in crop production to modelling inputs and parameters. *Agricultural Water Management* 271: 107805. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107805>
- Ma Y, Sun S, Li C, Zhao J, Li Z, Jia C (2023) Estimation of regional actual evapotranspiration based on the improved SEBAL model. *Journal of Hydrology* 619:129283. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129283>
- Mekonnen MM, Hoekstra AY (2010) A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat. *Hydrology and Earth System Sciences* 14(7): 1259-1276. <https://doi.org/10.5194/HESS-14-1259-2010>

- Mekonnen MM, Hoekstra AY (2011) The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences* 15 (5):1577-1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- Mendoza-Pérez C, Ojeda-Bustamante W, Sifuentes-Ibarra E, Quevedo-Nolasco A, Flores-Magdaleno H, Ramírez-Ayala C, Ascencio-Hernández R (2019) Estimación de la evapotranspiración de referencia mediante atmómetro con fines de calendarización de riego. *Idesia (Arica)* 37(4): 65-72. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019000400065>
- Mendoza-Pérez C, Sifuentes-Ibarra E, Macías-Cervantes J, Ramírez-Ayala C, Flores-Magdaleno H (2018) Uso de programa IRRIMODEL para la programación de riego por goteo en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.). *Agro Productividad* 11(1): 49-55. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.352816>
- Molden D, Oweis T, Steduto P, Bindraban P, Hanjra MA, Kijne J (2010) Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agricultural Water Management* 97(4): 528-535. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.023>
- Ojeda-Bustamante W, Sifuentes-Ibarra E, Unland-Weiss H (2006) Programación integral del riego en Maíz en el Norte de Sinaloa, México. *Agrociencia* 40(1): 13-25.
- Palacios-Vélez E, Palacios-Sánchez JE, Palacios-Sánchez L A (2011) Agricultura de riego asistida con satélites. *Tecnología y Ciencias del Agua* 2(2): 69-82.
- Pask A, Pietragalla J, Mullan DM, Chávez-Dulanto PN, Reynolds MP (2013) Fitomejoramiento fisiológico II: Una guía de campo para la caracterización fenotípica de trigo. CIMMYT. México. 140p.
- Peñaloza-Sánchez AM, Bustamante-González Á, Vargas-López S, Jaramillo-Villanueva JL, Quevedo-Nolasco A (2020) Water footprint of onion (*Allium cepa* L.) and husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) crops in the region of Atlixco, Puebla, Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua* 11(5): 1-30. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2020-05-01>
- Pereira LS, Allen RG, Smith M, Raes D (2015) Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management* 147: 4-20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>
- Porter JR, Gawith M (1999) Temperatures and the growth and development of wheat: a review. *European journal of agronomy* 10(1): 23-36. [10.1016/S1161-0301\(98\)00047-1](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(98)00047-1)
- Sánchez-Cohen I, Delgado-Ramírez G, Esquivel-Arriaga G, Bueno-Hurtado P, Román-López A (2016) Forage water footprint in the Comarca Lagunera. In: Pérez-Espejo RH, Constantino-Toto RM, Dávila-Ibáñez HR (eds) *Water, food and welfare: Water footprint as a complementary approach to water management in Mexico*. Springer. pp. 199-214. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-28824-6\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-28824-6_18)
- Senay GB, Friedrichs M, Morton C, Parrish GE, Schauer M, Khand K, Kagone S, Boiko O, Huntington J (2022) Mapping actual evapotranspiration using Landsat for the conterminous United States: Google Earth Engine implementation and assessment of the SSEBop model. *Remote Sensing of Environment* 275: 113011. [10.1016/j.rse.2022.113011](https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113011)
- Si J, Chen Y, Cheng L, Tang Z, Zhang Y (2025) The application of water footprint for assessing the crop water resources stress in Nanjing City, China. *Ecological Indicators* 177: 113744. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113744>
- SIAP (2025) Anuario estadístico de la producción agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. [https://nube.agricultura.gob.mx/cierre\\_agricola/](https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/). Fecha de consulta: 29 enero de 2026.
- Sifuentes E, Macías J, Ojeda W, González VM, Salinas DA, Quintana JG (2016) Gestión del riego enfocada a variabilidad climática en el cultivo de papa: aplicación al Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 7(2):149-168.
- Smith M (1992) CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. FAO Irrigation and Drainage Paper 46, FAO, Roma, Italia. 126p.
- Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D (2012) Crop yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No.66, FAO, Roma, Italia. 503p.

- Tanaka JS, Huba GJ (1989) A general coefficient of determination for covariance structure models under arbitrary GLS estimation. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology* 42(2): 233-239. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8317.1989.tb00912.x>
- Xinchun C, Mengyang W, Rui S, La Z, Dan C, Guangcheng S, Xiangping G, Weiguang W, Shuhai T (2018) Water footprint assessment for crop production based on field measurements: A case study of irrigated paddy rice in East China. *Science of the Total Environment* 610-611: 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.011>
- Zwart SJ, Bastiaanssen WGM (2004) Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management* 69(2): 115-133. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.04.007>