

INFORME INA - SCIRSA

AVANCES EN EL ESTUDIO DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO CARCARAÑÁ.

INFORME EXPEDITIVO

Ing. **Marianela Montes Quinteros**
Dra. Ing. **Leticia Vicario**

OCTUBRE de 2025



AVANCES EN EL ESTUDIO DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO CARCARAÑA

RESUMEN

El presente informe tiene como objetivo contabilizar la huella hídrica de los diferentes sectores de la cuenca del río Carcarañá, los cuales ejercen múltiples presiones sobre los recursos hídricos. Consecuentemente, se recopiló y sistematizó información proveniente de diversas fuentes, adoptando la Guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura y la Unión Europea, la cual asimismo emplea la metodología y directrices del Water Footprint Network; en las que se distingue las componentes de la huella (azul, verde y gris) según la disponibilidad de la información. Cabe señalar que, debido a la disponibilidad y heterogeneidad de los datos, en cada sector se trabajó con series de distintos períodos de tiempo, utilizando valores promedios representativos de las condiciones regionales.

La evaluación abarcó los sectores agrícola, doméstico, industrial y de embalses, considerando supuestos y limitaciones asociadas a la información disponible. En el sector agrícola, se estimaron las huellas hídricas de los principales cultivos de la cuenca (maíz, soja y trigo) mediante el software CROPWAT 8.0. La huella doméstica se calculó a partir de datos poblacionales del Censo Nacional 2022, dotación de agua potable y generación de aguas residuales, considerando la DBO5 como contaminante crítico. La huella hídrica industrial se abordó de manera teórica, extrapolando datos de extracción de agua industrial per cápita provistos por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Finalmente, para el sector de embalses se evaluaron las pérdidas por evaporación estimadas a partir del conjunto de datos del producto Global Lake Evaporation Volumen (GLEV).

Los resultados muestran que el sector agrícola ejerce la mayor presión hídrica en la cuenca, en comparación con los demás sectores. Se considera que la contabilización multisectorial de la huella hídrica representa una herramienta útil para comprender la distribución del uso del agua de la cuenca y orientar futuras estrategias de gestión.

Descriptores temáticos: Huella hídrica. Cuenca. Usos múltiples del agua. Recursos hídricos.

Descriptores geográficos: Cuenca del río Carcarañá. Provincia de Córdoba. Provincia de Santa Fe. Argentina.

Referencia para citar: Montes Quinteros y Vicario. 2025. *Avances en el estudio de la huella hídrica en la cuenca del río Carcarañá. Informe científico-técnico.* Instituto Nacional del Agua (INA). Subgerencia Centro de la Región Semiárida. Sitio web: <https://www.ina.gov.ar/cirsa/index.php?seccion=20>

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1 HUELLA HIDRICA COMO HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS Y CONTEXTO EN LA CUENCA DEL RÍO CARCARAÑÁ	4
1.2 DEFINICIÓN DE HUELLA HÍDRICA	5
1.3 EVALUACIÓN DE HUELLA HÍDRICA	5
1.4 OBJETIVO GENERAL Y ALCANCE	6
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
2. DESCRIPCIÓN BREVE DE CUENCA DE ESTUDIO	7
3. MARCO METODOLÓGICO.....	7
3.1 CONTABILIDAD DE LA HUELLA HÍDRICA A NIVEL CUENCA.....	8
3.2 CONTABILIDAD DE LA HUELLA HÍDRICA PARA LOS SECTORES SELECCIONADOS DE LA CUENCA DEL RÍO CARCARAÑÁ	9
3.2.1 Sector Agrícola (maíz, trigo y soja).....	9
3.2.1.1 Huella hídrica azul y verde	9
3.2.1.2 Huella hídrica gris.....	13
3.2.2 Sector Doméstico	15
3.2.2.1 Huella Azul	15
3.2.2.2 Huella Gris.....	16
3.2.3 Sector Industrial.....	17
3.2.3.1 Huella Azul	17
3.2.3.2 Huella Gris.....	17
3.2.4 Sector Embalses	17
3.2.4.1 Huella Azul	19
3.2.4.2 Huella Gris.....	19
4. RESULTADOS DE LA CONTABILIDAD MULTISECTORIAL DE LA HUELLA HÍDRICA 20	
5. DISCUSIÓN.....	22
6. CONCLUSIÓN.....	23
7. RECOMENDACIONES	23
8. BIBLIOGRAFÍA.....	24

1. INTRODUCCIÓN

1.1 HUELLA HIDRICA COMO HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS Y CONTEXTO EN LA CUENCA DEL RÍO CARCARAÑÁ

El agua constituye el recurso más importante para la vida humana, y se lo considera estratégico para el desarrollo social, económico y ambiental. En Argentina, la variabilidad climática, el modelo de desarrollo extractivo y la presión antrópica de los distintos sectores sobre los recursos hídricos, plantean importantes desafíos para la gestión integrada de los recursos hídricos. El consumo irracional y la escasa conservación representan riesgos que atentan contra la disponibilidad de agua, en cantidad y calidad.

Con respecto a la demanda hídrica el agua para riego constituye el uso más importante de agua para Argentina, representando el 85% de la demanda, seguido por el uso doméstico, con el 13% de los cuales se estima que un 80% retorna al ambiente; y en tercer lugar el uso industrial con un 2%, cuya tasa de retorno es más difícil de estimar (Banco Mundial, 2021).

La evaluación de la huella hídrica no es más que una herramienta para entender las complejas relaciones entre las sociedades y el ambiente (Hoekstra *et al*, 2011). Es por ello, que este indicador da una idea del consumo, las pérdidas y la contaminación que se produce en el agua ya sea en un proceso, en un producto, en un grupo de personas, en un territorio delimitado, entre otras.

En este marco, resulta interesante relevar la situación a nivel cuenca, en la que se adopta como objeto de estudio a la cuenca del río Carcarañá. La misma se encuentra ubicada en el centro del país y forma parte de la macrocuenca Sistema Paraná- Paraguay- Uruguay, la cual se estima que para el 2030, comenzaría a notar estrés hídrico por los resultados dados en el balance entre la oferta y demanda (Banco Mundial, 2021).

Constituye una de las cuencas más productivas del país, con predominio de cultivos extensivos como el maíz, soja y trigo, además posee una gran población urbana y diversas actividades industriales (Subsecretaría de Recursos Hídricos: SSRH, 2010). A su vez, en la cuenca alta, a su noroeste cuenta con seis embalses, indispensables para el abastecimiento de agua potable, la regulación de crecidas, la generación de energía, el turismo, etc.

Se considera de importancia evaluar la huella hídrica en esta cuenca dada su ubicación en la región Centro, la cual presentó mayor frecuencia de eventos severos y moderados de sequías meteorológicas- agrícolas, durante el período 2020-2024 (Vicario, 2025).

En este contexto medir la huella hídrica a nivel cuenca permite dimensionar la presión de diversos sectores sobre el agua y generar información valiosa para la planificación hídrica.

1.2 DEFINICIÓN DE HUELLA HÍDRICA

En el año 2002 nace el concepto de Huella Hídrica, el cual fue desarrollado por Arjen Hoekstra, y es definida como el volumen de agua dulce total que se emplea, de manera directa o indirecta, para producir bienes y servicios, que son consumidos o contaminados por un individuo, comunidad, empresa, etc.

La huella hídrica es un indicador espacial y temporal, y está conformada por tres componentes: Huella hídrica azul, huella hídrica verde y huella hídrica gris (Hoekstra et al., 2011).

$$\text{Huella hídrica} = \text{Huella Hídrica azul} + \text{Huella Hídrica Verde} + \text{Huella hídrica gris}$$

La huella hídrica azul (HHA) se define como el consumo de aguas superficiales y subterráneas, el cual se refiere a la pérdida de agua en una masa disponible, ya sea de una zona de captación o cuenca hidrográfica. Dichas pérdidas son por evaporación, transferencia del agua a otra cuenca o al mar, incorporación de agua a un producto y/o proceso, y el no regreso del agua al mismo período de extracción; esto es notable cuando la extracción de agua se hace en un período seco y se reincorpora a un período húmedo.

La huella hídrica verde (HHV) se define como el consumo del agua proveniente de las precipitaciones, en la medida en que no se convierta en escorrentía, ni en agua subterránea, sino que se infiltra en el suelo o queda de manera temporal, en la superficie del suelo y/o vegetación. Este tipo de huella es apreciable en cultivos y explotaciones forestales.

La huella hídrica gris (HHG) se define como el agua contaminada, es decir, el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar la carga de concentraciones de contaminantes dadas las concentraciones naturales del cuerpo de agua y las normas de calidad ambiental. La huella gris considera la contaminación proveniente de una fuente puntual, escorrentía o lixiviado en el suelo, superficies “impermeables” u otras fuentes difusas. La huella gris disminuye cuando existe una estación de tratamiento de aguas residuales previo al vertido.

A modo de resumen, tanto la HHA como la HHV nos dan información sobre el uso consuntivo del agua, mientras que la HHG indica la contaminación del recurso hídrico.

1.3 EVALUACIÓN DE HUELLA HÍDRICA

La evaluación de la huella hídrica consta de 4 fases (Hoekstra et al., 2011):

- I. **Definición de objetivos y alcance:** para el alcance se debe considerar si la huella hídrica es de una etapa de un proceso, de un producto, de un grupo de consumidores, de un área geográficamente delimitada, empresa, etc. Qué tipo de huella se contabilizará (azul, verde y/o gris), el truncamiento en el análisis de la cadena de suministro, que dependerá de las particularidades del proceso, del nivel de resolución espacio-temporal; y del período de datos, ya que debido a la variabilidad de la

disponibilidad del agua también varía la demanda. Por ejemplo, en un período de sequías la huella hídrica azul de un producto agrícola será mayor que en un período húmedo.

- II. Contabilidad de la huella hídrica:** aquí se observa cual es la apreciación que hace el ser humano del agua, en términos de volumen, en cierto período de tiempo. Esta etapa depende del objeto de estudio.
- III. Análisis de sostenibilidad:** esta etapa es considerada una de las más complejas, ya se compara la huella hídrica humana y lo que la naturaleza es capaz de soportar de manera sostenible. Se evalúa por cada tipo de huella la sostenibilidad tanto social, económica como ambiental.
- IV. Formulación de respuestas:** en esta etapa se indican las responsabilidades compartidas y se desarrollan planes de reducción de la huella hídrica y otras observaciones según el estudio.

1.4 OBJETIVO GENERAL Y ALCANCE

El objetivo general es generar avances en el estudio de huella hídrica en una cuenca productiva del país. En primera instancia solo se realizará una cuantificación, es decir, se contempla únicamente las fases I y II mencionadas en el apartado 1.3. Para ello, se requerirá de una exhaustiva investigación bibliográfica.

En cuanto a la fase II, se seguirán las indicaciones de la “Guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica” (Zárate *et al.*, 2017) el cual, da las bases para analizar la huella hídrica en multisectores a nivel cuenca hidrográfica. El objeto espacial de estudio es la cuenca del río Carcarañá considerando los principales sectores de uso del agua (agrícola, doméstico, industrial y embalses). El período de análisis, como así también, el tipo de huella de cada sector (hay sectores que, por escasez de información, no se contabilizaron las tres componentes) dependerá de la disponibilidad de datos por sector.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Cuantificar la huella hídrica agrícola (verde, azul y gris) de los principales cultivos de la cuenca, considerando la variabilidad climática del período de análisis, bajo 2 escenarios: cultivo de secano y bajo riego.
2. Cuantificar la huella hídrica doméstica (azul y gris) a partir de datos nacionales disponibles.
3. Estimar la huella hídrica azul industrial a través de fuentes globales.
4. Evaluar la huella hídrica azul de los embalses en términos de evaporación.
5. Analizar de forma comparativa, la magnitud y distribución de los diferentes sectores a la huella hídrica, identificando aquellos de mayor presión sobre el recurso hídrico.

2. DESCRIPCIÓN BREVE DE CUENCA DE ESTUDIO

Como se mencionó anteriormente, la cuenca seleccionada para analizar la huella hídrica, es la del río Carcarañá. La misma se extiende sobre el centro-sudeste de la provincia de Córdoba y el sur de la provincia de Santa Fe. Estudios recientes, basados en técnicas de mediciones avanzadas, indican que su superficie podría ser cercana a los 60.000 km² (Vicario, 2017).

La cuenca pertenece al sistema exorreico de la Cuenca del Plata. El río Carcarañá nace en la provincia de Córdoba, en la confluencia de los ríos Tercero (o Ctalamochita) y Saladillo, ambos con nacientes en las sierras de Comechingones y atraviesa el sur de la provincia de Santa Fe para desembocar en el río Paraná (SSRH, 2010).

En relación con el clima, la temperatura media anual se encuentra en 16°C y las precipitaciones medias anuales rondan los 700 mm, con un patrón estacional creciente hacia el oeste. El relieve de la cuenca presenta una transición desde una llanura extensa al este, pasando por suaves ondulaciones hasta quebradas y cumbres en el oeste, en la región de las sierras Comechingones. Esta diversidad topográfica influye en el flujo de los cursos de agua y en la distribución de la vegetación, por lo que se generan diferentes ecorregiones (SSRH, 2010). En la cuenca alta, la predominancia de rocas metamórficas e ígneas con suelos residuales someros, sumado a la energía del relieve, la baja protección hidrológica de la vegetación natural y la ocurrencia de precipitaciones intensas por efecto orográfico, confieren al conjunto del sistema hidrográfico una alta tendencia a la generación de crecientes repentinas. Frente a esta amenaza poblaciones serranas enfrentan situaciones conflictivas (FCEFyN, LH y CETA, 2019).

La principal actividad productiva dentro de esta cuenca es la agrícola-ganadera y posee una gran relevancia estratégica a nivel productivo ya que, debida a su ubicación dentro de la Llanura pampeana, conforma el sector agrícola más productivo del país, aproximadamente 4,3% del PBI (FCEFyN, LH y CETA, 2019). La agricultura es de tipo secano y la ganadería mestiza. Dentro de los principales cultivos se encuentra el trigo, avena, cebada, girasol, maní, maíz y alfalfa. Los departamentos cordobeses de Marcos Juárez y Río Cuarto demarcan una fuerte dependencia a este tipo de producción. El departamento de Ctalamochita se caracteriza por el aprovechamiento hidroeléctrico y el turismo generado por los embalses presentes (SSRH, 2010).

A través del Censo Nacional 2022 se estima que la cuenca alberga una población aproximada de 925.949 habitantes (INDEC: Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2022)

3. MARCO METODOLÓGICO

Se empleó como referencia la metodología de la “Guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica” (Zárate *et al.*, 2017), la cual adopta los conceptos bases y directrices del “Manual de Huella Hídrica” (Hoekstra *et al.*, 2011), con adaptaciones según las

particularidades del caso de estudio. En sectores en específico, se empleó el programa informático Cropwat 8.0 (FAO, 2008).

3.1 CONTABILIDAD DE LA HUELLA HÍDRICA A NIVEL CUENCA

Se subraya el valor de analizar la huella hídrica a nivel cuenca ya que permite entender la apropiación que hace el ser humano del agua en relación con el ciclo hidrológico (Hoekstra et al., 2011). La disponibilidad total anual de agua en una cuenca hidrográfica se obtiene a través del volumen anual de precipitación. Posteriormente existen variaciones dadas por los diferentes procesos de evapotranspiración, infiltración y escorrentía. Estos procesos definen las direcciones principales del agua dentro del ciclo hidrológico, y de ellos derivan las tres componentes de la huella hídrica: verde, azul y gris.

La Fig. 1 presenta la relación entre el balance hídrico de una cuenca y las componentes verde y azul. La huella hídrica verde se refiere al uso antrópico del agua de evaporación desde la superficie, principalmente en cultivos y/o explotaciones forestales. La huella hídrica azul se refiere al uso consuntivo del agua en la medida que dicho flujo no regrese a la cuenca en forma de flujo de retorno (Hoekstra et al., 2011).

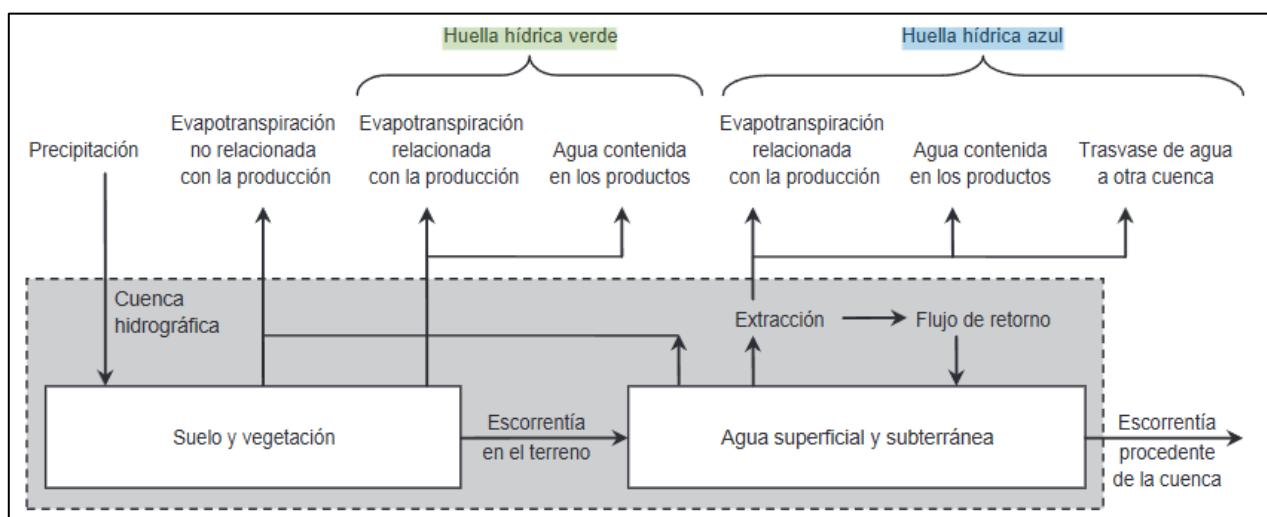


Fig. 1. Huellas hidráticas verde y azul en relación con el balance hídrico de una cuenca hidrográfica (Fuente: Hoekstra et al., 2011)

Por último, la huella gris, se define como el volumen teórico necesario para asimilar los contaminantes y que la calidad del cuerpo receptor se mantenga acorde según la normativa ambiental.

La cuantificación de la huella hídrica para una zona geográfica delimitada, como es el caso del presente informe, suele estructurarse por sectores (agrícola, industrial, doméstico, etc.) con el propósito de comprender las contribuciones relativas de las diferentes áreas a la huella total de la cuenca. En consecuencia, el estudio se enfocó en el estudio de la huella hídrica del sector agrícola, doméstico, industrial y embalses.

3.2 CONTABILIDAD DE LA HUELLA HÍDRICA PARA LOS SECTORES SELECCIONADOS DE LA CUENCA DEL RÍO CARCARAÑÁ

3.2.1 Sector Agrícola (maíz, trigo y soja)

La agricultura conforma la principal actividad económica de la cuenca de estudio, donde se destaca el cultivo de cereales (maíz, trigo y sorgo) y oleaginosas (soja, maní y girasol) (FCEFyN, LH y CETA, 2019). Según el Censo Nacional Agropecuario 2018, la provincia de Córdoba (que abarca la mayor parte de la cuenca), presenta una superficie destinada a oleaginosas de 3.921.454 ha, de las cuales el 89% corresponde a soja, el 11% a maní y el 0,5% girasol. En cuanto a cereales, se registraron 2.800.798 ha, de las cuales el 71% corresponde a maíz, 27% trigo y un 1% sorgo (INDEC, 2018).

A raíz de esta representatividad, se decidió evaluar la huella hídrica de los cultivos de maíz, trigo y, como cultivo oleaginoso, soja; únicamente en la porción de la cuenca que corresponde a la provincia de Córdoba.

3.2.1.1 Huella hídrica azul y verde

La estimación de la huella agrícola azul y verde se basa en el proceso de evapotranspiración, el cual representa el principal consumo de agua de los cultivos.

La huella hídrica verde está asociada a la porción de la evapotranspiración cubierta por el agua proveniente de las precipitaciones efectivas, mientras que la huella hídrica azul corresponde a la porción suplementada por riego cuando las lluvias no son suficientes para el requerimiento hídrico del cultivo. En consecuencia, la proporción relativa de ambas depende de la necesidad de agua que requiera el cultivo; la cual está en función de la pérdida de agua del cultivo procedente de su evapotranspiración.

La evapotranspiración es la cantidad de agua transpirada por el cultivo y evaporada desde la superficie del suelo en donde está emplazado. Está condicionada por factores concurrentes en el suelo (capacidad de retención del agua, exposición a rayos solares, etc.), naturaleza de la vegetación, fase vegetativa en el que se encuentra el cultivo (la evapotranspiración varía a lo largo del ciclo vegetativo), las condiciones meteorológicas que favorecen o atenúan la evaporación (precipitaciones, humedad atmosférica, vientos, radiación solar, etc.) y las prácticas de manejo (Fuentes y García, 1999; Allen *et al.*, 2006).

Se distinguen tres tipos de evapotranspiración de un cultivo, véase Fig. 2 (Allen *et al.*, 2006):

- Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o): está vinculado únicamente a las variables climáticas, independientemente del tipo de cultivo, su desarrollo, factores del suelo y las prácticas de manejo. Es decir que, para calcular este tipo de evapotranspiración se requiere únicamente datos meteorológicos.
- Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c): es el tipo de evapotranspiración de un cultivo el cual se encuentra desligado de enfermedades, que posee buena fertilización, se desarrolla bajo óptimas condiciones de suelo y agua y, alcanza la máxima producción bajo las condiciones climáticas que lo acompañan. Es decir,

se considera que no existen restricciones en el desarrollo del cultivo por estrés hídrico o salino, densidad del cultivo, plagas y enfermedades presencia de malezas o baja fertilidad.

- Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c\ adj}$): se refiere a la evapotranspiración de cultivo que crece bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes a la anterior definición. En la misma infiere la presencia de plagas y enfermedades, salinidad y fertilidad del suelo y limitación o exceso de agua.

En este estudio se consideró la evapotranspiración bajo condiciones estándar (ET_c), estimada mediante el software de acceso público CROPWAT 8.0 (FAO, 2008) como una aproximación de la demanda hídrica óptima de los cultivos seleccionados en la cuenca del río Carcarañá. Se modelaron las necesidades de agua de cada cultivo por hectárea, en el período vegetativo.

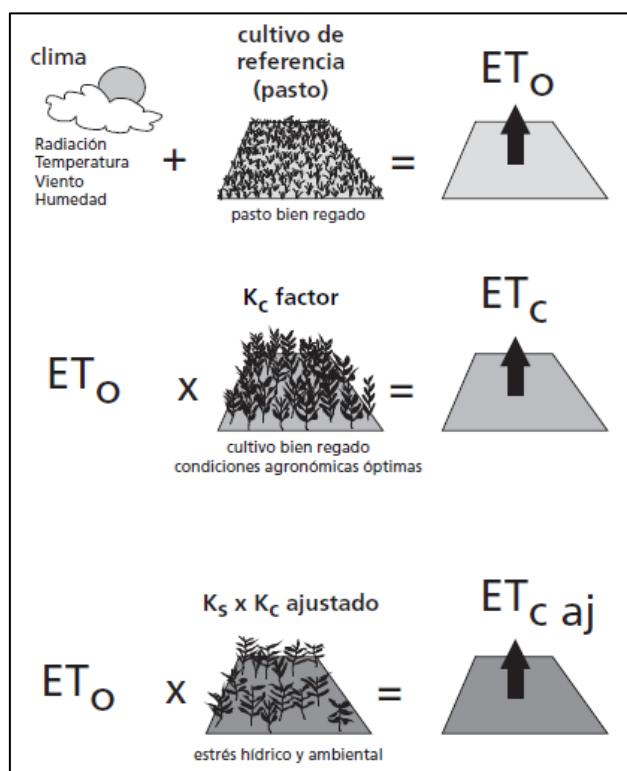


Fig. 2. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), bajo condiciones estándar (ET_c) y bajo condiciones no estándar ($ET_{c\ adj}$) (Fuente: Allen et al., 2006)

Las necesidades de agua de un cultivo, dada la definición de evapotranspiración adoptada, se cumplen cuando son iguales a la evapotranspiración real del cultivo (ET_c), es decir:

$$NAC = ET_c = ETo \times K_c$$

Donde: ET_o es la evapotranspiración de referencia y K_c el coeficiente de cultivo. Como se observa de la ecuación, el valor de ET_c es calculado a través de un coeficiente K_c , para este caso, único del cultivo el cual tiene incorporado las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación en el suelo mientras que, la evapotranspiración de referencia ET_o reúne las condiciones del tiempo atmosférico.

La evapotranspiración de referencia se determinó mediante el método de Penman-Monteith (Monteith, 1985), utilizado por el programa informático CROPWAT 8.0. A pesar de que, el objetivo del software es programar el riego y estimar rendimientos, se emplea para inferir sobre las huellas hídricas verde (precipitación efectiva) y azul (riego).

Los datos de entrada incluyeron información sobre clima, precipitaciones, cultivo y suelo, se especifica cada una en la Tabla 1.

La humedad disponible del suelo se estimó a partir de las contantes hídricas de los suelos de Córdoba y del mapa de agua útil a 2m de profundidad (Faule et al., 2024). Dado que el objetivo del presente estudio es una estimación inicial de la huella hídrica agrícola a escala de cuenca y, en ausencia de mediciones puntuales de humedad de suelo al inicio de los ciclos, se asumió un agotamiento inicial de la humedad del suelo (ADT) del 50 % de la humedad disponible total (CC - PM). Esta elección responde a un criterio intermedio y conservador ampliamente utilizado en aplicaciones regionales de CROPWAT (Smith, 1992; FAO-56), y resulta coherente con las condiciones climáticas de la provincia de Córdoba, donde el periodo invernal suele ser seco.

Tabla 1. Información para el cálculo de la evapotranspiración de un cultivo

Ítem	Datos de entrada requeridos	Fuente de información	Variable/s calculada/s	Método de cálculo
Clima	Temperatura mínima y máxima mensual [°C]	(Omixom, 2025)	Radiación solar [MJ/m ² /día] y Evapotranspiración de referencia mensual (ET_o) [mm/día]	Penman-Monteith
	Humedad relativa mensual [%]			
	Viento mensual [km/día]			
	Insolación mensual [hs.]			
Precipitación	Precipitación mensual [mm]	(Omixom, 2025)	Precipitación efectiva mensual [mm]	FAO
Cultivo	Fecha de siembra y cosecha	(Allen et al., 2006)	No aplica	No aplica
	Kc			
	Etapa inicial, desarrollo, medio, final de temporada y total [días]			
	Profundidad radicular [m]			
	Agotamiento crítico			
	Función respuesta rendimiento			
	Altura de cultivo [m]			
Suelo	Humedad del suelo disponible total (CC-PM) [mm/m]	(Faule et al., 2024)	No aplica	Humedad del suelo inicialmente disponible [mm/m]
	Tasa máxima de infiltración de la precipitación [mm/día]	Valor predeterminado		

		de 30 mm/día (Smith, 1992)		
	Profundidad radicular máxima [cm]	(Allen <i>et al.</i> , 2006)		
	Agotamiento inicial de humedad del suelo [%]	Se asume un 50%		

Los datos climáticos se obtuvieron de las estaciones de la red OMIXOM (Omixom, 2025) ubicadas dentro de la cuenca (se trató de seleccionar como mínimo una estación por departamento que comprende la cuenca). Aunque las estaciones consideradas presentan diferentes períodos de registro de datos, desde el año 2015, se utilizaron promedios mensuales de las variables climáticas necesarias. Dada la coherencia climática regional para el periodo en cuestión, se considera que las diferencias en el rango temporal no afectan la representatividad del resultado de la huella, en cuanto al orden de magnitud.

Se asocia según la ubicación de cada estación meteorológica, el agua útil a 2m de profundidad (Faule *et al.*, 2024), tal como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Estaciones meteorológicas utilizadas y el agua útil según la ubicación, para la contabilización de la huella hídrica azul y verde del sector agrícola

Departamento	Estación Omixom	Fecha de instalación	Años de datos (hasta el 24/06/2025)	Agua útil a 2m	
San Justo	El Fortín AgriculturaCba	10/7/2017	8	209	279
Río Segundo	Sin estación dentro de la cuenca				
Calamuchita	Villa del Dique AgriculturaCba	24/08/2017	8	0	79
Tercero Arriba	Tancacha AgriculturaCba	8/6/2021	4	280	341
Unión	Viamonte AgriculturaCba	8/3/2019	6	138	208
	Canals AgriculturaCba	24/07/2015	9	79	138
Gral. San Martín	UNVM AgriculturaCba	22/09/2016	8	209	279
	Etruria AgriculturaCba	14/8/2018	6	138	208
Marcos Juárez	Cabañas María Lucía (Leones Norte) APRHI	31/03/2021	4	280	341
	Marcos Juárez AgriculturaCba	1/8/2018	6	280	341
	Cavanagh AgriculturaCba	10/6/2021	4	138	208

Río Cuarto	Río Cuarto AgriculturaCba	23/05/2016	9	138	208
Juárez Celman	La Carlota AgriculturaCba	10/12/2015	9	138	208
Pre. Roque Sáenz Peña	La Cesira AgriculturaCba	6/3/2024	1	138	208

Se modelaron 2 escenarios: Cultivo bajo riego y cultivo de secano. En el primero, necesidades de agua del cultivo superan las precipitaciones efectivas se realiza un riego programado; en el segundo escenario se opta por no regar.

Para el escenario de riego, se consideró que el momento de riego es a agotamiento crítico y que la eficiencia de riego es del 70%. Una vez cargados los datos al programa se obtuvieron los resultados en el apartado “Programación de riego de los cultivos”, en los que se identificaron las distintas variables obtenidas para calcular tanto la evapotranspiración de agua verde y agua azul en el periodo total vegetativo, donde (Zárate et al., 2017):

$$ET_{verde} = \min(Requerimiento\ hídrico\ cultivo, Precipitación\ efectiva) + \text{déficit de humedad en la cosecha}$$

$$ET\ azul = \min(Requerimiento\ de\ riego, Irrigación\ efectiva)$$

$$Irrigación\ efectiva = Uso\ real\ de\ agua\ de\ cultivo - Evapotranspiración\ de\ agua\ verde$$

Siendo el requerimiento hídrico del cultivo igual al uso potencial de agua de cultivo; el déficit de humedad es la fracción del agua que no alcanza a reponerse al momento de la cosecha.

Para el caso del escenario de secano, la evapotranspiración de agua verde es igual a la evapotranspiración total del cultivo y no existe evapotranspiración de agua azul.

Los resultados obtenidos del modelo se integraron con las superficies cultivadas por departamento (INDEC, 2018) para estimar el volumen total de agua verde y azul por cultivo en hectómetros cúbicos por período.

También se podría evaluar la huella hídrica del producto agrícola según su rendimiento, pero no es el objetivo del presente estudio.

3.2.1.2 Huella hídrica gris

Para calcular la huella hídrica gris (HHG) del sector agrícola existen 2 caminos: uno que se centra en fuentes de contaminación difusa (aplicación de fertilizantes, plaguicidas, herbicidas, fungicidas, etc.) y otro, que considera las fuentes puntuales (vertimientos puntuales agrícolas).

En el caso de fuentes de contaminación difusa, que son aquellos que provienen de la aplicación extendida superficial de fertilizantes (nitrógeno, fósforo, etc.) y agroquímicos, se estima la HHG como (Hoekstra et al., 2011):

$$HH_{proc,gris} = \frac{\alpha * TA}{(C_{máx} - C_{nat})} * Sup.\ de\ cultivo\ tratado$$

Donde: $HH_{proc,gris}$ es la huella hídrica de un cultivo [volumen/tiempo]; α es la fracción de la sustancia química lixiviada [% sustancia contaminante]; TA es la tasa de aplicación de la sustancia química por superficie [masa/área]; $C_{máx}$ la concentración máxima permisible del contaminante efluente en cuestión según normativa ambiental [masa/volumen]; C_{nat} es la concentración natural del contaminante en cuestión, en otras palabras, si no existiera ningún tipo de actividad antrópica sobre el cuerpo de agua receptor; y finalmente la *Sup. de cultivo tratado* que, para este caso, también podría haberse reemplazado por el rendimiento del cultivo, el cual estaría en el denominador, no obstante, no es el objeto resultado del presente estudio dar a conocer la HHG por producto agrícola.

Para el segundo caso, de fuentes de contaminación puntuales, se calcula la HHG (Zárate *et al.*, 2017):

$$HH_{proc,gris} = \frac{L}{C_{máx} - C_{nat}} = \frac{Efl * C_{ef} - Extr * C_{real}}{C_{máx} - C_{nat}}$$

Donde: $HH_{proc,gris}$ es la huella hídrica de un proceso en concreto [volumen/tiempo], L es la carga de contaminante [masa/tiempo]; Efl el volumen del efluente [volumen/tiempo]; $Extr$ el volumen de agua extraída [volumen/tiempo]; C_{ef} la concentración del efluente [masa/volumen]; C_{real} la concentración real del contaminante en el agua extraída [masa/volumen]; $C_{máx}$ la concentración máxima permisible del contaminante efluente en cuestión según normativa ambiental; y finalmente, C_{nat} es la concentración natural del contaminante en cuestión, en otras palabras, si no existiera ningún tipo de actividad antrópica sobre el cuerpo de agua receptor.

Actualmente, no existe información detallada de los vertimientos puntuales agrícolas sobre la cuenca. Sin embargo, se logró realizar una estimación de HHG por fuentes de contaminación difusas, a través de las superficies tratadas con agroquímicos y fertilizantes por cultivo y departamento (INDEC, 2018). Dichas superficies son ajustadas proporcionalmente al área de cada departamento comprendido en la cuenca, por lo que se reconoce la simplificación, sin embargo, esto se considera adecuado para una primera estimación al igual que los supuestos posteriormente mencionados en este apartado.

Es necesario tener en cuenta sólo el contaminante más crítico (Hoekstra *et al.*, 2011). En consecuencia, se adoptó al nitrato (NO_3^-) como contaminante crítico, por su alta movilidad y propensión a la lixiviación (Di y Cameron, 2002).

Como concentración máxima permisible, se utilizó el valor establecido por la Provincia de Córdoba, en el Decreto 847/16. En ausencia de datos locales, se consideró una fracción de lixiviación $\alpha = 0,10$, es decir, 10% de la dosis aplicada llega al cuerpo de agua receptor (Hoekstra *et al.*, 2011); y la concentración natural se asumió nula. La dosis de fertilizante nitrogenado se basó en el informe “Fertilidad y nutrición de suelos” (MAGyP, 2021), tomando a la urea, cuyo contenido de nitrógeno es del 46%.

Resumidamente, se presenta en la Tabla 3 los datos requeridos para contabilizar la HHG de los cultivos:

Tabla 3. Datos requeridos y fuente de información para el cálculo de la HHG del sector agrícola

Datos requeridos	Valor/ Unidad	Fuente de información	Enlace
Fracción del contaminante lixiviada	10 %	Se considera que la cantidad de nitrógeno que alcanza la masa de agua receptora es del 10% de la tasa de fertilizante aplicado según el Manual de evaluación de la Huella Hídrica (Hoekstra et al., 2011)	https://www.waterfootprint.org/resources/The_WaterFootprintAssessmentManual_Spanish.pdf
Dosis promedio de fertilizantes nitrogenados (UREA) aplicados en cultivos de maíz, trigo y soja	[kg/ha]	Fertilidad y nutrición de suelos (MAGyP, 2021).	https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe-fertilidad-nutricion-suelos-200mt-magyp.pdf
N aplicado= 0,46*UREA	[kg/ha]	No aplica.	No aplica.
Concentración máxima permisible de nitrógeno en cuerpos de agua	10 [mg/L]	Decreto 847/16. ANEXO 1: Estándares de calidad para vertido de los efluentes líquidos. Efluentes líquidos vertidos a cuerpos de agua superficiales- Estándares químicos.	https://boletinoficial.cba.gov.ar/wp-content/4p96humuzp/2016/07/847-dec.pdf
Concentración natural de nitrógeno en cuerpos de agua	0 [mg/L]	Se adoptó un valor de 0 por falta de información según el Manual de evaluación de la Huella Hídrica (Hoekstra et al., 2011).	https://www.waterfootprint.org/resources/The_WaterFootprintAssessmentManual_Spanish.pdf
Superficie tratada con fertilizantes	[ha]	Censo Nacional Agropecuario 2018 (INDEC, 2018).	https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-3-8-87

3.2.2 Sector Doméstico

La huella hídrica del sector doméstico considera en el análisis los procesos de extracción, potabilización, uso, tratamiento y descarga del agua a cursos superficiales o subterráneos. Para ello, se considera en los cálculos de huella hídrica el agua consumida en los procesos analizados y que no es devuelta al sistema (Hoekstra et al., 2012).

En otras palabras, la huella hídrica del sector doméstico se refiere al consumo directo de agua por la población (uso consuntivo) y al volumen necesario para asimilar las cargas contaminantes generadas y vertidas en el tratamiento y disposición de las aguas residuales. Se emplearon datos poblacionales a partir del Censo Nacional 2022 (INDEC, 2022), tanto la porción de la cuenca que pertenece a la provincia de Córdoba como de Santa Fe.

3.2.2.1 Huella Azul

Para contabilizar la huella azul del sector doméstico se tuvo en cuenta la Población dentro de la cuenca que posee agua por red pública, dado que se estima que el 91% de la población de la

cuenca posee agua de red; y la dotación de diseño diaria de agua potable de 250 L/hab/día (ENOHSA, 2025).

$$HH_{azul} = Población * dotación diaria * 365 días * fracción de consumo consuntivo$$

Se considera que solo el 10% de la dotación diaria de agua potable corresponde a consumo consuntivo, es decir, agua que no retorna a la cuenca en el mismo período hidrológico.

El 90% restante puede retornar al sistema a través de aguas residuales o infiltraciones, y en consecuencia, esto pasaría a ser parte de otras componentes de la huella hídrica, como la huella gris asociada al tratamiento o vertido de efluentes.

Este supuesto se adopta de forma simplificada ante la falta de información detallada sobre los caudales efectivamente retornados o tratados, siguiendo criterios de estudios nacionales e internacionales donde el consumo doméstico consuntivo se considera entre el 8% y el 15% del total suministrado (Hoekstra *et al.*, 2011; Mekonnen & Hoekstra, 2011).

3.2.2.2 Huella Gris

Los vertimientos cloacales del sector doméstico se asume que son fuentes de contaminación puntuales, consecuentemente, se calcula la HHG como (Hoekstra *et al.*, 2012):

$$HH_{proc,gris} = \frac{L}{C_{máx} - C_{nat}} = \frac{Población con cloacas * Generación diaria de DBO_5 per capita * 365 días}{C_{máx} - C_{nat}}$$

Donde: $HH_{proc,gris}$ es la huella hídrica de un proceso en concreto [volumen/tiempo], L es la carga de contaminante [masa/tiempo]; $C_{máx}$ la concentración máxima permisible del contaminante efluente en cuestión según normativa ambiental; y C_{nat} es la concentración natural del contaminante en cuestión.

Para poder obtener el valor de carga de contaminante (L) se estableció como contaminante crítico a la Demanda Biológica Orgánica a 5 días (DBO5), y como contribución de la carga orgánica cloacal por habitante se adoptó una generación de DBO5 de 60 g/hab/día (IPCC, 2006). Se tuvo en cuenta la población dentro de la cuenca, con desagüe y descarga de agua del inodoro a red pública (INDEC, 2022), ya que se estima que el 54% de la población dentro de la cuenca cuenta con red de cloacas. Además, se presume que las personas que cuentan con un sistema de red cloacal, implícitamente disponen de un sistema de tratamiento al final de su red de distribución. Por consiguiente, al garantizar un tratamiento adecuado se sobreentiende que las aguas residuales cumplirán con estándares mínimos para su posterior descarga a un cuerpo receptor de agua.

El Decreto 847/16 de la Provincia de Córdoba, Anexo I de Estándares de calidad para vertido de los efluentes líquidos a cuerpos de agua superficiales, indica que la DBO5 máxima permisible es de 40 o 30 mg/L. Para este estudio se tomó un valor de referencia máxima de 30 mg/L y se asumió una concentración natural de DBO5 del cuerpo de agua receptor de 0 mg/L, ante la falta de información local específica.

3.2.3 Sector Industrial

El cálculo de la huella hídrica del sector industrial fue uno de los mayores desafíos de este estudio, debido a la escasez de información pública en lo que respecta con los volúmenes de agua utilizados, los procesos industriales involucrados y las cargas contaminantes generadas dentro de la cuenca. Por lo que se recurrió a estadísticas de publicaciones internacionales para realizar una estimación aproximada.

El principal condicionante radica en que no existen datos desagregados por tipo de industria a nivel cuenca, por lo que no fue posible inferir la huella consultando con bibliografía adicional específicas para cada rubro. De lo contrario se debería realizar un programa de campañas en territorio para recabar la información necesaria, lo cual excede el alcance del presente trabajo.

3.2.3.1 Huella Azul

La huella hídrica azul del sector industrial se calcula a través de un balance de agua del proceso industrial, en la que se resta el caudal de salida al de entrada, y se estima que la diferencia ha sido evaporada o incorporada durante el proceso, o a través de información sobre el volumen de agua en concesiones (Zárate et al., 2017).

En ausencia de este tipo de información, se consideró estimar el valor de consumo de agua de producción industrial (Mekonnen y Hoekstra, 2011), a partir de la base de datos de AQUASTAT (FAO, 2010). La misma provee datos de la extracción de agua industrial per cápita durante el año 2020-2022, siendo el valor promedio para Argentina de 88,29 m³/hab/año (valor imputado por la FAO). Asimismo, se asume que el 5% de dicho valor corresponde al consumo real (huella hídrica azul), la estimación se obtiene de la siguiente forma:

$$HH_{azul} = \text{Población} * \text{extracción promedio de agua industrial per capita anual} * 5\%$$

3.2.3.2 Huella Gris

Para calcular la huella gris sería necesario conocer los caudales y concentraciones de los contaminantes a la entrada y salida de cada proceso industrial dentro de la cuenca.

Como regulación provincial de Córdoba existe el Registro de Actividades Antrópicas Generadoras de Efluentes (RAAGE), que cuenta con un total de 475 industrias que se encuentran registradas en la cuenca de las que ha tomado conocimiento la administración (FCEFYN, LH y CETA, 2019). Sin embargo, no posee información pertinente a las variables mencionadas con acceso público, lo que impidió realizar una contabilización de dicha componente hídrica.

3.2.4 Sector Embalses

La cuenca del río Carcarañá posee un importante sistema de embalses, correspondiente al Sistema de presas de la cuenca alta del río Tercero, cuya función principal es la generación de energía hidroeléctrica. Este sistema contempla dos complejos hidroeléctricos (Fig. 3):

1. Complejo Hidroeléctrico Río Grande: constituido por las presas Cerro Pelado y Arroyo Corto.
2. Complejo Hidroeléctrico Río Tercero: integrado por las presas Embalse Río Tercero, Central Ing. Cassaffousth (2º Usina), Ing. Reolín (3º Usina) y Piedras Moras.

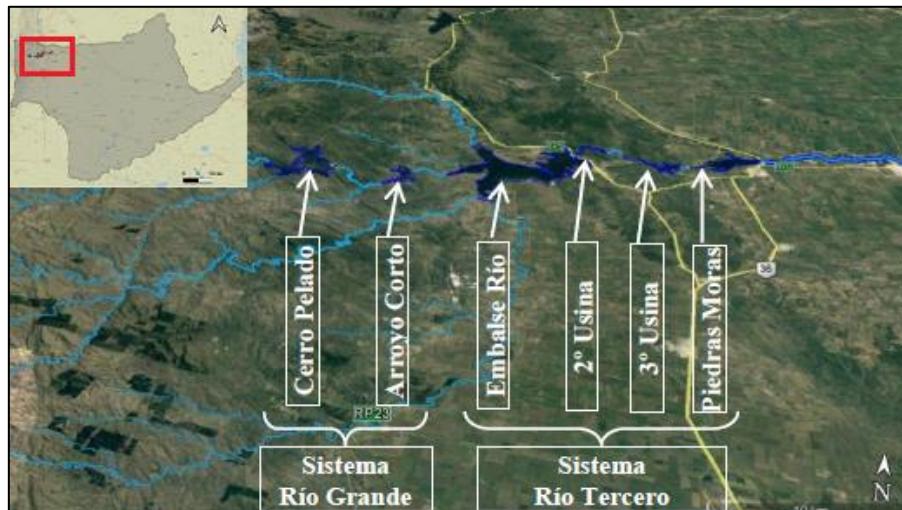


Fig. 3. Sistema de presas en la cuenca alta de río Tercero (Fuente: FCEFyN, LH y CETA, 2019).

Cada una de estas infraestructuras cumplen diversas funciones (véase Tabla 4), por lo cual constituyen obras hidráulicas estratégicas en la regulación y el aprovechamiento del recurso hídrico dentro de la cuenca.

Tabla 4. Sistema de presas en la cuenca alta de río Tercero y sus principales funciones

Sistemas de presas en la alta cuenca del río Tercero	Propósito 1	Propósito 2	Propósito 3
Cerro Pelado	Generación de energía	Regulación de caudales	Turismo
Arroyo Corto			
Embalse Río Tercero	Abastecimiento de agua potable	Generación de energía	Industrial
Central Ing. Cassaffousth	Generación de energía	Compensador	
Ing. Reolín	Generación de energía		
Piedras Moras	Abastecimiento de agua potable	Riego	Generación de energía

Estas infraestructuras hidráulicas modifican la hidrodinámica natural del río, pasando de un curso fluvial a un lago artificial. Por consiguiente, altera la disponibilidad del recurso hídrico tanto para los ecosistemas como para las comunidades aguas abajo.

En términos de huella hídrica, la presencia de embalses implica que parte del agua que, en condiciones naturales, se infiltraría al suelo y/o sería aprovechada por la vegetación (huella hídrica verde), pasa a estar expuesta directamente a la atmósfera, incrementando las pérdidas por evaporación. La magnitud de este fenómeno dependerá de la región en la que se ubique el embalse (en regiones áridas será más relevante).

3.2.4.1 Huella Azul

Como se mencionó anteriormente, los embalses representan una fuente significativa de consumo hídrico debido a las perdidas por evaporación desde la superficie embalsada de agua. Este volumen de agua que se pierde durante la evaporación es lo que se contabiliza como huella hídrica azul, ya que representa agua que se sustrae de la cuenca y ya no está disponible para otros usos aguas abajo o para la recarga de acuíferos.

Para calcular la evaporación de los embalses puede aplicarse métodos basados en balances hídricos o fórmulas semiempíricas. La ecuación de Penman-Monteith es recomendada para este tipo de estudios (Hoekstra *et al.*, 2011).

En el presente trabajo, la huella hídrica azul de los embalses se estimó utilizando el producto Global Lake Evaporation Volumen (GLEV) (Zhao *et al.*, 2022), el cual calcula la evaporación de más de un millón de lagos y embalses a nivel global mediante teledetección óptica (resolución espacial de 900 m²) y modelos hidrometeorológicos, abarcando un período de tiempo que va desde 1985 a 2018.

Se obtuvieron datos promedios de la serie histórica existente, de evaporación (mm) y áreas del espejo de agua (km²) correspondientes a los embalses ubicados en la cuenca del río Carcarañá.

Los resultados fueron contrastados con valores de estudios en embalses argentinos diferentes de los que componen la cuenca en estudio; de características similares debido a que no se hallaron registros publicados de evaporación de los embalses pertinentes. Se utilizaron como referencia los datos de evaporación reportados para el embalse San Roque (Taravella, 2002) y los cálculos derivados del modelo matemático de la cuenca del río Atuel a cargo del Instituto Nacional del Agua para el embalse El Nihuil. Esta comparación permitió validar el orden de magnitud de las estimaciones obtenidas a partir de GLEV y verificar su coherencia con condiciones locales.

La huella hídrica azul de los embalses se estimó de la siguiente forma:

$$HH_{azul} = V_{evap} = E * A$$

Siendo V_{evap} el volumen evaporado promedio [volumen/tiempo]; E la evaporación media en el tiempo abarcado [longitud/tiempo]; y A la superficie media del embalse [área]. También se podría evaluar la huella hídrica por generación eléctrica, pero no es el objetivo del presente estudio.

3.2.4.2 Huella Gris

La huella hídrica gris en los embalses se refiere a la contaminación dada por un proceso de eutrofización derivado del ingreso de nutrientes (nitrógeno y fósforo) especialmente por escorrentías agropecuarias, asentamientos urbanos, incendios forestales, efluentes cloacales e industriales, etc.

Para su contabilización, se debería contar con una fuente de datos de aquellos contaminantes, sus concentraciones y caudales que ingresan y salen a cada cuerpo de agua artificial.

Ante la ausencia de dicha información para los embalses de la cuenca del río Carcarañá, en este trabajo no se realizó la contabilización de la huella hídrica gris en este sector.

4. RESULTADOS DE LA CONTABILIDAD MULTISECTORIAL DE LA HUELLA HÍDRICA

En la Tabla 5 se resumen los valores estimados de la huella hídrica (azul, verde y gris) para los diferentes sectores evaluados dentro de la cuenca del río Carcarañá. Los resultados se expresan en hectómetros cúbicos por período. Cabe aclarar que, en el caso del sector agrícola, la estimación corresponde al ciclo de siembra de cada especie (Allen et al., 2006), mientras que para los sectores restantes la contabilización se realizó por año.

Tabla 5. Valores estimados de la huella hídrica por sector, en la cuenca del río Carcarañá

Sector		HHA [hm ³ /tiempo]	HHV [hm ³ /tiempo]	HHG [hm ³ /tiempo]	HH Subtotal [hm ³ /tiempo]
Agrícola	Riego	10.320	5.351	1.303	16.974
	Secano	0	8.701		10.004
Doméstico		8	-	364	372
Industrial		4	-	-	4
Embalses		7	-	-	7

Nota: “-” indica que no se contabilizó dicha componente de la huella hídrica por escasez de información.

La Fig. 4. muestra la distribución de la huella hídrica por sector, evidenciando que los sectores doméstico, industrial y de embalses presentan valores de huella azul y verde significativamente menores en comparación con el sector agrícola, por lo que el gráfico se presenta en una escala compartida.

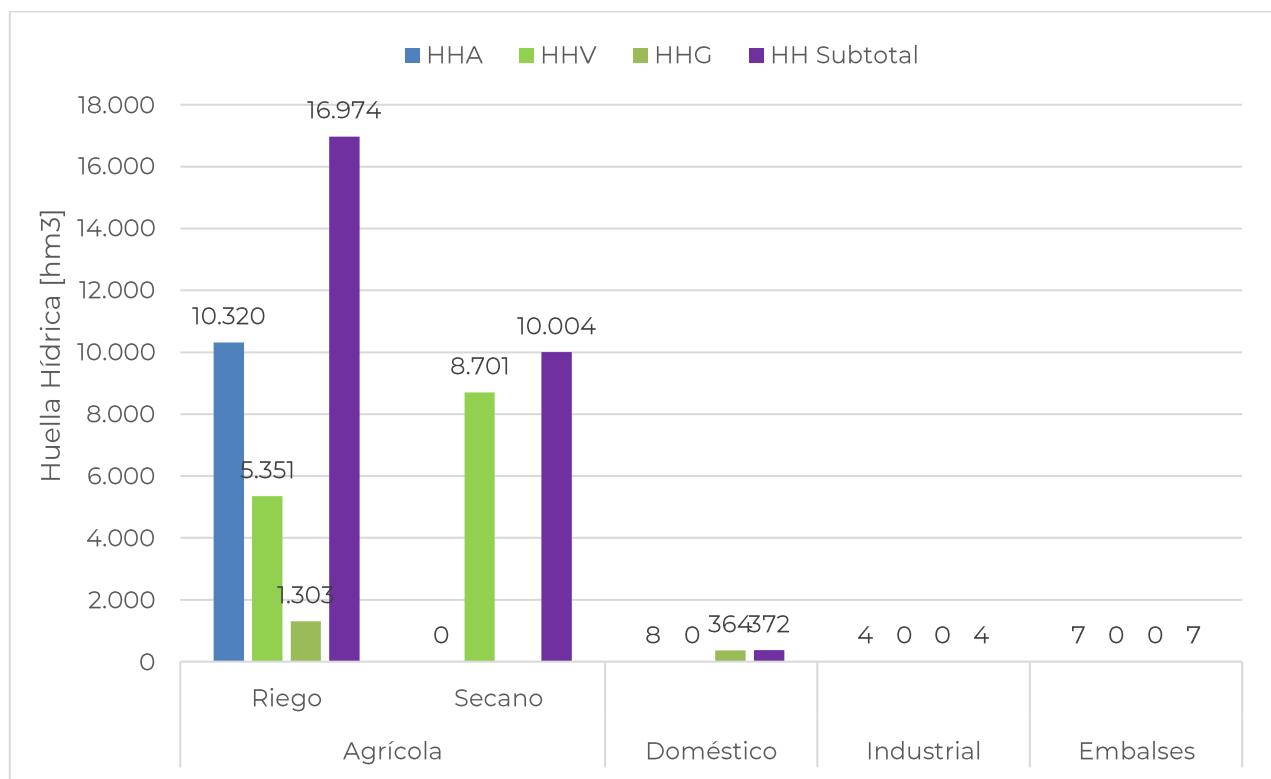


Fig. 4. Huella hídrica en los diferentes sectores analizados

Asimismo, se destaca que la huella hídrica subtotal bajo condiciones de riego, es aproximadamente un 70% mayor que la correspondiente a secano. Esta diferencia radica principalmente por el incremento de la huella hídrica azul, asociada al uso consumutivo de agua e el periodo abordado para suplir el déficit hídrico del cultivo, no cubierto por la precipitación efectiva.

Dado el predominio de la huella hídrica de consumo (verde y azul) en el sector agrícola, se disgregaron los resultados según los cultivos analizados para los dos escenarios simulados, tal como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Huella hídrica verde y azul estimada por cultivo y escenario en la cuenca del río Carcarañá.

Cultivo	Superficie cultivada en la cuenca [ha]	Escenario cultivo a secano		Escenario riego	
		HHV [hm ³ /período]	HHA [hm ³ /período]	HHV [hm ³ /período]	HHA [hm ³ /período]
Trigo	437.278	1.865	No corresponde	1.339	2.259
Maíz	849.520	3.346		2.135	3.872
Soja	1.632.898	3.490		1.877	4.190
TOTAL	2.919.696	8.701		5.351	10.321

En el escenario de secano, el cultivo con mayor huella hídrica verde en su ciclo vegetativo dentro de la cuenca es la soja, seguido por el maíz y el trigo. Se debe considerar que la soja representa la mayor contribución, con respecto a la superficie total cultivada de los tres cultivos en el período de datos. Resulta interesante presentar, en la Tabla 7, aquellos departamentos dentro de la cuenca que pertenecen a la provincia de Córdoba, que poseen mayor y menor huella hídrica verde y azul por cultivo en cada escenario simulado.

Tabla 7. Valores máximos y mínimos de la huella hídrica (verde y azul) por cultivo y escenario en la cuenca del río Carcarañá

Escenario	Tipo de Huella			Cultivo		
				Trigo	Maíz	Soja
Secano	Huella Hídrica Verde	Máx.	Valor [hm ³ /período]	546	639	949
			Departamento	Unión	Marcos Juárez	Marcos Juárez
	Mín.		Valor [hm ³ /período]	1	40	27
			Departamento	Calamuchita	Calamuchita	Calamuchita
Riego	Huella Hídrica Verde	Máx.	Valor [hm ³ /período]	416	479	480
			Departamento	Unión	Marcos Juárez	Marcos Juárez
		Mín.	Valor [hm ³ /período]	1	26	12
			Departamento	Calamuchita	Calamuchita	Calamuchita
	Huella Hídrica Azul	Máx.	Valor [hm ³ /período]	806	891	1072
			Departamento	Unión	Unión	Unión
		Mín.	Valor [hm ³ /período]	2	67	58
			Departamento	Calamuchita	Calamuchita	Calamuchita

Se observa que los valores máximos se concentran principalmente en los departamentos de Unión y Marcos Juárez, asociados a mayores superficies agrícolas y requerimientos hídricos, mientras que los mínimos corresponden al departamento de Calamuchita, caracterizado por su relieve montañoso y menor extensión agrícola.

5. DISCUSIÓN

La contabilización multisectorial de la huella hídrica en la cuenca del río Carcarañá permitió obtener una primera aproximación cuantitativa de los principales usos consuntivos del recurso hídrico. Las comparaciones entre valores totales no son posibles, ya que no todos los componentes de la huella (azul, verde y gris) pudieron ser estimados debida a las limitaciones en la disponibilidad de información.

No obstante, al analizar específicamente la huella hídrica azul (que representa el consumo de agua y fue contabilizado en todos los sectores evaluados) es posible una comparación, teniendo en cuenta que estas observaciones están sujetas a diversos supuestos y condicionantes en la metodología realizada.

En este aspecto, los resultados indican de manera preliminar que, el sector agrícola constituye el principal consumidor de agua en la cuenca, lo cual corresponde a la gran superficie cultivada y los requerimientos hídricos para el período de datos analizado. En cambio, los demás sectores representan un valor mínimo del consumo total. Asimismo, la variabilidad espacial observada en los valores de huella hídrica agrícola se relaciona con la distribución de los usos del suelo y las características edafológicas y climáticas de la cuenca. Los departamentos de Unión y Marcos Juárez presentan los mayores valores, mientras que en Calamuchita los mínimos, que podría corresponder a su topografía serrana y menor desarrollo agrícola.

Con respecto a la diferencia entre la huella hídrica en los dos escenarios simulados, se observa que, si bien el riego mejora la productividad y reduce la dependencia climática, aumenta significativamente la presión sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos.

Los valores de huella hídrica azul del sector doméstico son bajos, recordando que se asignó que una gran parte de la dotación media adoptada no refleja el consumo consuntivo. Por otro lado, la huella hídrica azul del sector industrial se basa en una estimación teórica por lo que, su valor representa una gran incertidumbre y podría ser refinada con información sobre los tipos de industrias en la cuenca y el consumo de agua. La huella hídrica azul del sector de embalses se limitó únicamente a la componente de evaporación superficial, es decir la componente azul.

La huella hídrica gris, que fue evaluada únicamente en los sectores agrícola y doméstico, muestra que la agricultura es el principal contribuyente, aunque su cálculo implica supuestos importantes, por lo que los valores deben interpretarse con precaución.

En los sectores restantes no se logró contabilizar la huella gris debida a la carencia de datos. Para el sector industrial se requiere información sobre caudales de efluentes y sus concentraciones; y

para el sector de embalses información asociada a los procesos de eutrofización y vertidos, específicos.

6. CONCLUSIÓN

La contabilización multisectorial de la huella hídrica en la cuenca del río Carcarañá permitió conocer por primera vez el orden de magnitud de los principales usos del agua.

Los resultados evidencian que el sector agrícola ejerce el mayor consumo del recurso hídrico en la cuenca, con huellas hídricas azul y verde de tres a cuatro órdenes de magnitud superiores a los sectores industrial y de embalses.

A pesar de las limitaciones en la disponibilidad de los datos y los condicionantes propios del desarrollo, este trabajo establece un avance en el conocimiento para futuros estudios de la huella hídrica en la cuenca y en otros sectores de la provincia.

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda que, ante el futuro avance en la disponibilidad de información que pueda emplearse para contabilizar la huella hídrica en cualquiera de sus sectores, se profundice en la evaluación y desarrollo de este indicador.

Dado el alto valor de la huella hídrica azul estimada para el sector agrícola, especialmente bajo el escenario de riego, se considera necesario evaluar la disponibilidad real del recurso hídrico en la cuenca y la factibilidad de sostener dicho volumen. En este sentido, se sugiere analizar alternativas de reúso de agua para riego, como estrategia para disminuir la huella azul y promover una gestión más eficiente del agua en este sector.

Asimismo, se sugiere incorporar al sector pecuario en posteriores evaluaciones. Si bien inicialmente, se consideró su inclusión dentro del análisis multisectorial, su estimación requiere de información detallada sobre sistemas de producción, requerimientos hídricos de los animales, origen de los alimentos, gestión de efluentes, entre otros aspectos que actualmente no se encuentran disponibles a nivel cuenca. Por este motivo, se decidió no incorporarlo en esta primera aproximación, ya que su estudio demanda un abordaje interdisciplinario, de recursos y tiempo que exceden a este trabajo.

Se recomienda profundizar en la cuantificación de la huella hídrica gris de los diferentes sectores, aun así, se requieren de simulaciones o planteos de escenarios que permitan obtener una aproximación más representativa de dicha componente en los sectores no evaluados y otros de interés.

Con el fin de mejorar la resolución espacial de las estimaciones, y a su vez generar comparaciones y validar los resultados obtenidos en el presente estudio, se propone incorporar datos ráster del Water Footprint Network (WFN) para mejorar y comparar las estimaciones realizadas.

También, se sugiere que la huella hídrica a nivel cuenca se disagregue temporalmente (preferentemente por mes) para reflejar la variabilidad asociada al ciclo hidrológico. En este trabajo se consideraron valores promedios anuales o por período de cultivo, debido a la heterogeneidad de la información disponible entre sectores, lo cual impidió una comparación homogénea de manera mensual. Sin embargo, se recomienda que en futuras evaluaciones se incorporen estimaciones mensuales, especialmente por sector.

Finalmente, antes de continuar con la fase tres de análisis de sostenibilidad, se considera importante contar con una estimación más robusta y detallada por sector, e incluso por subsector (recomendable para el sector industrial), que permita evaluar adecuadamente las sostenibilidad social, económica y ambiental de los diversos usos del recurso hídrico en la cuenca.

De esta manera, se fortalecería la base técnica necesaria para consolidar la huella hídrica como una herramienta complementaria hacia un manejo integral y sostenible del agua en la cuenca del río Carcarañá.

8. BIBLIOGRAFÍA

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO, 298(0).

Banco Mundial. (2021). Argentina. Valorando el Agua. Diagnóstico de la seguridad hídrica. Banco Mundial, Washington, DC. <https://cdi.mecon.gob.ar/bases/docelec/az5416.pdf>

Di, H. J., & Cameron, K. C. (2002). Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies. Nutrient cycling in agroecosystems, 64(3), 237-256.

Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento (ENOHSa). (2025). Capítulo 2: Estudios preliminares para el diseño de las obras. Guías Agua Potable. <https://www.argentina.gob.ar/enohsa/guias-agua-potable>

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFyN) y Laboratorio de Hidráulica (LH) y Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA). (2019). *Bases de un Plan director de Gestión de los Recursos Hídricos de la Cuenca Interjurisdiccional del Río Carcarañá.* <http://200.16.30.250/public/carcarana/informeFinal.pdf>

Faule, L., Lanfranco, M. F., Severina, I., Giubergia, J. P., & Vicondo, M. E. (2024). Estimación de las constantes hídricas de los suelos de Córdoba y mapa de agua útil.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2010). Base de datos en línea AQUASTAT, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma, <http://faostat.fao.org> (consultado el 21 de agosto de 2025).

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2008). CROPWAT. <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/es/>

Fuentes Yagüe J. y García Legaspi G. (1999). *Técnicas de riego: Sistemas de riego en la agricultura*. Mundi-Prensa México, S.A de C.V

Gobierno de la Provincia de Córdoba. (2016). Decreto N°847/16: Reglamentación de Estándares Y Normas Sobre Vertidos para La Preservación del Recurso Hídrico Provincial. Boletín Oficial de la Provincia de Córdoba. <https://boletinoficial.cba.gov.ar/wp-content/4p96humuzp/2016/07/847-dec.pdf>

Hoekstra, Arjen Y., Chapagain Ashok K., Aldaya Maite M. y Mekonnen Mesfin M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard*.

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). (2018). Resultados del Censo Nacional Agropecuario 2018. Cultivos según período de ocupación. Ministerio de Economía de la Nación. <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-3-8-87>

Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. (2011) National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption, Value of Water Research Report Series No. 50, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands. <https://www.waterfootprint.org/resources/Report50-NationalWaterFootprints-Vol1.pdf>

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP). (2021). Fertilidad y nutrición de suelos. <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe-fertilidad-nutricion-suelos-200mt-magyp.pdf>

Monteith, J. L. (1985). Evaporation from land surfaces: progress in analysis and prediction since 1948. Advances in Evapotranspiration, 4-12.

Omixom. (2025). Sistema de Gestión CLIMA. <https://new.omixom.com/next>

Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). (2006). Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Cap. 5: Desechos. https://www.ipcc-nccc.iges.or.jp/public/gp/spanish/gpgau_m_es.html

Smith, M. (1992). *CROPWAT: A Computer Program for Irrigation Planning and Management* (Vol. 46, FAO Irrigation and Drainage Paper). Food & Agriculture Organization of the United Nations. ISBN 9251031061.

Subsecretaría de Recursos Hídricos (SSRH). (2010). Cuenca del río Carcarañá. <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/31.pdf>

Taravella, R.A. (2002). "Identificación y cuantificación de los componentes del Balance Hídrico en el Embalse San Roque." Tesis de Grado. F.C.E.Fy N. UNC. 274 p.

Van Veenhuizen, R. (2000). Revisión de bases técnicas. <https://www.fao.org/4/ai128s/ai128s02.pdf>

Vicario, Leticia. (2017). *Identificación y evaluación de sequías en cuencas seleccionadas de la Región Centro de Argentina*. Tesis Doctoral. Doctorado en Ciencia de la Ingeniería. Facultad de Ciencia Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Acceso en sitio web: <http://hdl.handle.net/11086/6291>

Vicario, Leticia. (2025). Análisis de distintos tipos de sequías a nivel regional en el territorio argentino (2020-2024). Informe científico-técnico. Instituto Nacional del Agua (INA). Subgerencia Centro de la Región Semiárida. Sitio web: <https://www.ina.gob.ar/cirsa/index.php?seccion=20>

Zhao, G., Li, Y., Zhou, L., Gao, H. (2022) Pérdida de agua por evaporación de 1,42 millones de lagos globales. Nature Communications. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31125-6>

Zárate Torres, E., Fernández Poulussen, A., y Kuiper, D. (2017). Guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica. San José, C.R.: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), Unión Europea. ISBN 978-92-9248-670-9. Acceso en sitio web: <https://www.euroclima.org/component/edocman/guia-metodologica-para-la-evaluacion-de-la-huella-hidrica-en-una-cuenca-hidrografica?Itemid=0>