

Huellas hídricas verde y azul del cultivo de maíz (*Zea mays*) en provincias del centro y noreste argentino

Green and blue water footprint of corn (*Zea mays*) production in central and northeastern provinces of argentina

Alisa Alvarez ¹, José A. Morábito ^{1,2}, Carlos Schilardi ²

Originales: *Recepción: 27/02/2015- Aceptación: 22/03/2016*

RESUMEN

La huella hídrica (HH) de un cultivo indica la cantidad de agua evapotranspirada para obtener una determinada producción, distinguiendo entre el agua procedente de las precipitaciones (verde) y el agua extraída de ríos, lagos y acuíferos, aplicada mediante riego (azul). Son objetivos del trabajo estimar las HH verde y azul del maíz en provincias del centro y del noreste argentino bajo tres condiciones (secano, riego y riego y fertilidad edáfica óptimos) y analizar el impacto de estas prácticas. Se siguió la metodología internacionalmente aceptada utilizando el modelo AquaCrop. Los resultados mostraron: que el riego y la fertilización reducen la HH debido al aumento del rendimiento; que la huella hídrica verde representa el 92% de la sumatoria (verde más azul) y que la huella hídrica calculada en secano alcanza un valor medio de 803 L.kg⁻¹ (bajo riego este valor es de 602 L.kg⁻¹ y con riego y fertilidad edáfica óptimos, de 488 L.kg⁻¹). Esta información permite al productor valorar convenientemente las prácticas de riego y el uso eficiente de fertilizantes y concientiza a los administradores del recurso hídrico sobre la necesidad de diseñar políticas adecuadas para el uso sostenible del agua.

Palabras clave:

huella hídrica • maíz • AquaCrop • evapotranspiración • riego • secano

1 Centro Regional Andino. Instituto Nacional del Agua. Belgrano 210 Oeste (M55500FIF). Mendoza. Argentina. jmorabito@ina.gob.ar

2 Facultad de Ciencias Agrarias- Universidad Nacional de Cuyo. Almirante Brown 500- Luján. C. P. M5528AHB. Mendoza. Argentina.

ABSTRACT

The water footprint (WF) of a crop shows the volume of evapotranspired water required to produce a given yield. The WF splits up into the green WF, which is the volume of rainwater consumed, and the blue WF, which refers to the volume of surface and ground water applied through irrigation. The project consists in calculating the green and blue WF value for corn in central and northeastern provinces of Argentina under rainfed, irrigated, and optimum irrigation and soil fertility conditions, and in analyzing the impacts of these practices. Internationally accepted methodology and the AquaCrop model were used to simulate ETc and crop yield. It was observed that by applying irrigation and increasing fertility the WF is reduced, this is due to the increase in yield. The green WF represents 92% of the combined sum (green plus blue). The calculated mean WF (green plus blue) is 803 L.kg⁻¹ for rainfed farming, 602 L.kg⁻¹ for irrigated agriculture; and 488 L.kg⁻¹ for production under optimum irrigation and soil fertility conditions. This information helps producers to adequately assess irrigation practices and the efficient use of fertilizers, and raises awareness among water administrators of the need for suitable policies for sustainable water use.

Keywords

water footprint • corn • AquaCrop • evapotranspiration • irrigation • rainfed

INTRODUCCIÓN

Como es bien sabido, el agua es un elemento fundamental para el desarrollo de la vida en el planeta y representa un recurso esencial para el desarrollo social y económico de un país. Argentina se encuentra ubicada en el puesto diecisiete en el ranking de disponibilidad de recursos hídricos renovables del mundo (20). Posición estratégica frente a lo que hoy es uno de los principales desafíos que enfrenta la gestión sustentable de los recursos hídricos. En Argentina, aproximadamente el 70% del agua dulce disponible es utilizada en la actividad agrícola, por lo que resulta primordial el análisis de su consumo y de los impactos asociados a la actividad.

Paralelamente, como consecuencia del crecimiento de la población y el desarrollo de sociedades emergentes, el requerimiento de alimentos, fibras y

biocombustibles va en aumento, lo que incrementa la demanda de agua para riego y consecuentemente las perspectivas de escasez hídrica serán mayores (10). Globalmente el 60 % de los alimentos son producidos bajo condiciones de secano (11). La crisis del agua se presenta como un problema de mala gestión (2).

La mayoría de los estudios coinciden en que hoy -en el mundo- hay suficientes recursos hídricos para satisfacer la demanda de alimentos, aunque con disponibilidad geográfica desigual.

En el año 2002 surge el concepto de huella hídrica (water footprint) desarrollado por Hoekstra y Hung con el objetivo de obtener un indicador que relacionara el uso del agua con el consumo humano (18). Así, la huella hídrica se presenta como un indicador de sostenibilidad complementario que

permite conocer cuál es el volumen total de agua que se necesita para producir los bienes y servicios de una población.

Para la agricultura, uno de los aspectos más relevantes de la huella hídrica, es que permite diferenciar el agua consumida según su procedencia, distinguiendo entre huella hídrica azul y huella hídrica verde. De esta forma, la huella hídrica total se define como el volumen de agua consumida por unidad de producción y puede descomponerse en huella hídrica verde, que es el agua verde utilizada por unidad de rendimiento; huella hídrica azul que corresponde al agua azul por unidad de rendimiento; y por último, huella hídrica gris, refiriéndose a la contaminación, la cual se define como el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar la carga de contaminantes en base a los estándares de calidad del agua existentes en el ambiente (13). Se denomina agua azul al agua procedente de ríos, lagos y acuíferos que es aplicada mediante riego y agua verde a la procedente de las precipitaciones que queda retenida en el suelo (19). Esta distinción es importante ya que ambas poseen diferentes características en cuanto a costo de oportunidad e impacto hidrológico y medioambiental, como también son diferentes las políticas que administran y gestionan cada una de ellas (19).

Tanto el agua azul como la verde, son recursos importantes para la producción de alimentos. La agricultura de secano utiliza únicamente agua verde mientras que la agricultura de regadío consume agua verde y azul (11).

En general, estudios relacionados con la disponibilidad de agua dulce están orientados a la cuantificación del agua azul mientras que ignoran el agua verde como parte de los recursos hídricos (11).

El cultivo de maíz en Argentina ha sido determinante para el desarrollo agrícola nacional. A partir de la década del 50, con la incorporación de los adelantos tecnológicos, especialmente provenientes de la Genética, comenzó una nueva etapa de consolidación caracterizada por el aumento de los rindes unitarios.

En la actualidad, la distribución geográfica del maíz se concentra principalmente en la denominada zona núcleo: el 30% de la superficie sembrada corresponde a la provincia de Córdoba, el 29% a Buenos Aires y el 12 % a Santa Fe. El 29% restante se distribuye entre La Pampa y Santiago del Estero.

En el ámbito nacional el maíz es la quinta cadena agroindustrial en orden de importancia, luego de la soja, la carne bovina, la leche y el trigo.

Si se incorporaran las actividades que tienen al maíz como insumo, tales como la producción de carne bovina, porcina y aviar, o la lechería, alcanzaría una importancia dentro de las cadenas agroindustriales nacionales de magnitud similar a la de la soja. El producto bruto generado por el maíz en la campaña 2006/07 alcanzó un valor equivalente a 5.446 millones de dólares (3).

Dada la relevancia del cultivo, su utilización en otras cadenas productivas, la posibilidad de uso como biocombustible, etc. es fundamental el análisis de indicadores de sustentabilidad de los recursos hídricos utilizados en su producción.

A su vez, al ser el maíz un producto de exportación, la estimación de su huella hídrica es de gran utilidad para analizar los flujos de agua virtual que acompañan a dichas exportaciones.

Se plantea como hipótesis que la HH del maíz adecuadamente regado y fertilizado será menor que la HH del mismo cultivo en secano debido al aumento de la producción.

En el presente trabajo se busca estimar la huella hídrica verde y azul para el maíz, en algunas provincias del centro y del noreste argentino bajo tres condiciones: (a) secano, (b) riego y (c) óptimas condiciones de riego y fertilidad edáfica, y analizar el impacto de estas prácticas sobre la HH para concientizar a productores y administradores del recurso hídrico. Para esto se utilizó la metodología presentada en el "Manual de evaluación de Huella Hídrica" (14). En ella se considera que la huella hídrica total, es decir los litros de agua consumidos por unidad de producto, está compuesta por la huella hídrica verde, la huella hídrica azul y la huella hídrica gris. Esta última no ha podido ser estimada debido a la falta de disponibilidad de datos para ello y solo se ha calculado las huellas verde y azul.

Los datos para la estimación de la huella hídrica se basaron en simulaciones realizadas mediante el modelo AquaCrop (FAO) (8) que simula el desarrollo de la biomasa potencial del cultivo y la producción esperable en respuesta al agua disponible (18). Se trata de un modelo simple, robusto y confiable, que considera variables climáticas, prácticas de manejo, características de los cultivos y suelos, como también las condiciones iniciales de humedad edáfica.

El modelo simula también el balance hídrico arrojando valores de evaporación del suelo y transpiración del cultivo. Presenta la ventaja de ser relativamente sencillo en comparación con otros similares, obteniendo resultados confiables (6, 18) y se ha utilizado con buen ajuste en varias regiones agrícolas del mundo (12).

METODOLOGÍA

El primer paso fue la calibración de la respuesta del cultivo al riego y en situación de secano utilizando el modelo AquaCrop (8).

Una vez realizada esta operación se estimó la huella hídrica para tres condiciones diferentes, dos que se presentan normalmente y una tercera considerada como recomendada:

- Secano y fertilidad al 60% (S).
- Riego y fertilidad al 80% (RFN).
- Riego programado con AquaCrop, sin limitaciones de fertilidad (100%) o "riego óptimo" (RFO).

El área de estudio comprendió a las provincias del centro y noreste Argentino (Santa Fe, Córdoba, Santiago del Estero, Entre Ríos, Corrientes, Chaco, Formosa y Misiones). Se dispuso utilizar información procedente de 10 estaciones meteorológicas espacialmente localizadas en la zona, para una serie continua de 20 años (1990-2010) cuyos datos fueron aportados (21).

La secuencia de pasos fue la siguiente: una vez calibrado, se modeló la producción del cultivo mediante AquaCrop (8) para las estaciones meteorológicas seleccionadas dentro de la región maicera del país. Se tuvo en cuenta las particularidades del área, básicamente clima y suelos más representativos de cada lugar considerando:

- densidad de siembra: 75.000 plantas por hectárea.
- índice de cosecha: 50
- profundidad de la freática: 3m
- método de riego: por superficie (surcos)

Las estaciones seleccionadas fueron: Ceres y Reconquista (Santa Fe), Formosa y Las Lomitas (Formosa), Laboulaye y Pilar (Córdoba), Montecaseros (Corrientes), Paraná (Entre Ríos), Posadas (Misiones) y Roque Sáenz Peña (Chaco), tabla 1 (pág. 165).

Tabla 1: Estaciones meteorológicas seleccionadas.

Table 1: Selected weather stations.

Estación	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud (m s. n. m.)	Estación	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud (m s. n. m.)
Ceres aero	29°53'	61°57'	88	Reconquista-aero	29°11"	59°40'	49
Laboulaye	34°08'	63°24'	138	P. R. Sáenz Peña	26°49'	60°27'	90
Las Lomitas	24°42'	60°35'	130	Formosa-aero	26°12'	58°14'	60
Paraná-aero	31°47'	60°29'	62	Posadas	27°22'	55°58'	133
Pilar-obs.	31°40'	63°53'	338	Montecaseros	30°16'	57°39'	54

La condición 1) "secano" se tuvo en cuenta ya que es la forma predominante de producción de maíz en la zona de estudio y la condición 2) "riego", ya que se pretende analizar el impacto en la HH de maíz consumiendo agua azul (riego). La condición 3) "optima fertilidad y humedad edáfica" se simuló con el fin de tener un valor "ideal" de referencia. Con respecto a la fertilidad del suelo, se consideró -para secano- un nivel del 60 % y, bajo riego, del 80%. Este criterio se basó en el postulado de que, en condiciones de riego, los agricultores consideran la fertilización como una práctica complementaria.

Se simularon 20 años (1990-2010) en situación de secano (S), con riegos denominados "oportunos", es decir generados en el programa por el operador en forma manual, determinando la lámina y el momento adecuado de riego en función del agotamiento del agua en la zona radical, evitando que la planta sufra estrés hídrico (RFN). Por último, en la tercera situación (RFO) se generaron los programas de riego mediante la especificación de un tiempo y una lámina de agua a aplicar asumiendo, la simulación de una condición óptima que asegure la producción potencial.

En cuanto a las fechas de siembra, en el trabajo se consideró dos fechas representativas: 15 de octubre para el

área de influencia de las estaciones meteorológicas de Formosa, Posadas, Paraná, Pilar, Reconquista y Montecaseros; y el 20 de noviembre para el resto (Las Lomitas, Ceres, Laboulaye y Roque Sáenz Peña). Estas fechas son las que normalmente usan los agricultores considerando las condiciones climáticas de cada región.

Las condiciones iniciales de humedad del suelo se estimaron en función de las precipitaciones ocurridas en cada zona considerando dos meses previos a la siembra.

Es pertinente destacar que, en las localidades de Ceres, Reconquista y Pilar, en varias oportunidades se incrementaron las condiciones iniciales de humedad presuponiendo que -ante situaciones de escasez hídrica en los meses previos a la siembra y disponiendo de infraestructura/equipamiento para regar- el productor aplicaría un riego previo al inicio del ciclo, con el objeto de asegurar un nivel razonable de humedad inicial.

Estimación de la huella hídrica

Obtención de los datos

Los valores de evaporación y transpiración durante el ciclo del cultivo se obtuvieron por separado utilizando el modelo AquaCrop y, posteriormente, mediante la sumatoria de los mismos se calculó ETC.

La lámina de riego simulada en la condición RFN fue decidida por el operador del programa en función del nivel de agotamiento del agua en el suelo, para no reducir significativamente los rendimientos. Para la condición RFO el programa calcula la lámina de riego para lograr la máxima producción con la óptima fertilidad.

Los valores de rendimiento de los cultivos se obtuvo de la simulación en AquaCrop.

Para la situación de cultivo en secano se consideró los años en los que hubo cosecha (para el cálculo del valor promedio no se tuvo en cuenta aquellos años donde las precipitaciones fueron escasas y por lo tanto la producción no justificaba su recolección). Para obtener el promedio de producción en los casos de riego se tuvo en cuenta los 20 años analizados.

Estimación de huella hídrica

Como indica la metodología, la huella hídrica verde se refiere al volumen de agua de lluvia consumida durante el proceso de producción (ecuación 1). Esto es particularmente relevante para los productos agrícolas y forestales, en cuanto se refiere a la evapotranspiración del agua de lluvia total (14).

$$WF_{green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \quad (1)$$

donde:

WF_{green} = huella hídrica verde (L.kg⁻¹).

CWU: componente verde en el uso del agua (L.ha⁻¹).

Y: rendimiento del cultivo (kg.ha⁻¹).

La huella hídrica azul (ecuación 2) hace referencia al uso consuntivo del agua de riego, proveniente de fuentes de agua de origen superficial (producto de

la escorrentía) o subterráneo (en ambos casos este agua no vuelve a la cuenca en forma de flujo de retorno). Representa el volumen que ha sido efectivamente retirado del flujo de escorrentía total, por lo que muestra la "capacidad de apropiación del suministro" (14) y -por lo tanto- sería la fracción evapotranspirada que ha sido cubierta por el agua de riego aplicada al cultivo.

$$WF_{blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad (2)$$

donde:

WF_{blue} = huella hídrica azul (L.kg⁻¹).

CWU = componente azul en el uso del agua (L.ha⁻¹).

Y = rendimiento del cultivo (kg.ha⁻¹).

En el presente, trabajo la huella hídrica se calculó mediante la suma de la huella hídrica verde y la huella hídrica azul; es decir, el cociente entre la evapotranspiración del cultivo (verde en condiciones de secano y, verde más azul en los casos de riego) y el rendimiento (ecuación 3):

(3)

HH Total (verde más azul) = ET_c / rendimiento

Vale la pena destacar que la huella hídrica verde corresponde al agua de lluvia utilizada por los cultivos (componente verde).

A su vez, en este caso, como se trataba de riegos oportunos y con láminas adecuadas (que no generaban escurrimiento ni percolación profunda o eran despreciables), se estimó la huella hídrica azul como la lámina de riego aplicada y la huella hídrica verde como la diferencia entre la cantidad total de agua evapotranspirada por el cultivo y el agua aplicada mediante riego, asumiendo que la totalidad del agua de riego es aprovechada por la planta.

A partir de estos resultados se obtuvo los valores promedio de huella hídrica y se trazó mapas de isolíneas para visualizar e interpretar mejor los resultados (se elaboró mapas de huella hídrica verde más azul y de cada una de ellas por separado).

Por último, se compararon los valores estimados en este trabajo con los valores de referencia citados para Argentina por Raes *et al.* (2009) y con otros estudios que han estimado la huella hídrica de maíz en distintas regiones del mundo.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos para las estaciones analizadas se muestran en la tabla 2.

Se puede observar que al aplicar riego y aumentar la fertilidad se reduce la huella

hídrica del cultivo de maíz. Esto se debe al aumento de los rendimientos producido por la conjunción del agua de riego y el aumento de la fertilidad.

Si se analizan los coeficientes de variación de los 20 años estudiados para la huella hídrica (verde más azul), se observa que en la mayoría de las estaciones el riego reduce la variabilidad y en otras esta se mantiene constante.

En el caso de riego óptimo el coeficiente de variación respecto del riego aumenta -en algunos casos- en un 1% y en otros se mantiene constante.

En la figura 1 (pág. 168), se observa que en condiciones de secano las isolíneas de huella hídrica (verde más azul) aumentan en la dirección nor-oeste, es decir, a medida que se reducen las precipitaciones.

Tabla 2. Huella hídrica (verde más azul): valores promedio (L.kg⁻¹) y coeficiente de variación (%) para los tres escenarios analizados

Table 2. Water footprint (green plus blue): average (L.kg⁻¹) and variation coefficient (%) values for three scenarios analyzed.

Estaciones meteorológicas	Secano (a)		Riego (b)		Riego óptimo (c)	
	Huella hídrica (verde más azul) (L.kg ⁻¹)	CV (%)	Huella hídrica (verde más azul) (L.kg ⁻¹)	CV (%)	Huella hídrica (verde más azul) (L.kg ⁻¹)	CV (%)
Ceres-aero	799	10	590	5	480	6
Laboulaye	733	6	567	5	461	6
Las Lomitas	810	6	621	6	500	6
Paraná-aero	771	6	601	6	486	6
Pilar-observatorio	845	21	577	5	472	6
Reconquista-aero	856	13	614	6	499	7
P.R. Sáenz Peña	806	6	605	3	494	3
Formosa-aero	875	5	671	4	537	4
Posadas	773	6	591	5	477	5
Montecaseros	761	5	586	5	473	6
Promedio	803	-	602	-	488	-

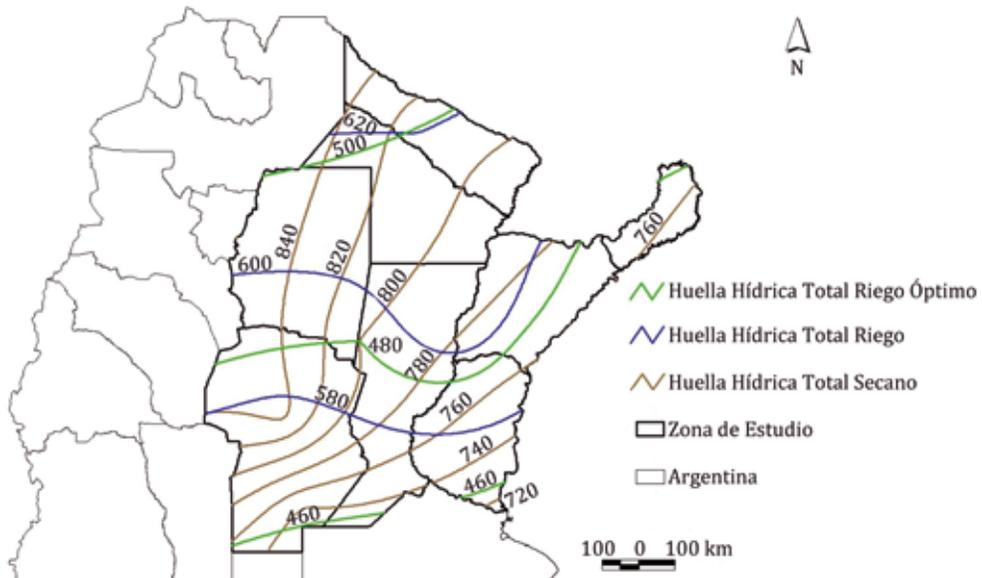


Figura 1. Huella hídrica total (verde más azul) para maíz en el centro y noreste de Argentina (L.kg⁻¹) para las tres condiciones del estudio

Figure 1. Total corn water footprint (green plus blue) in central and northeastern of Argentina (L.kg⁻¹) for the three studied conditions.

Si se analizan las isólinas correspondientes a la condición bajo riego se observa que -en general- los valores son menores que en secano (580 a 620 vs 730 a 840 L.kg⁻¹, respectivamente). Esto se debe a que si bien aumenta la cantidad de agua utilizada (lluvia + riego), al mejorar las condiciones de humedad edáfica y de fertilidad, se incrementa la producción del cultivo, disminuyendo la huella hídrica.

En este caso la huella hídrica (verde más azul) crece hacia el norte del área de estudio y se mantiene homogénea en sentido este-oeste. Por último, cuando el análisis se refiere a las condiciones riego y fertilidad óptimas, ocurre lo mismo que para la opción riego con valores que varían desde 460 a 540 L.kg⁻¹. Esto significa que bajo estas condiciones, la huella hídrica

(verde más azul) es menor que la obtenida en condiciones de riego y fertilidad al 80%. Se observa además, una mayor uniformidad de los valores en el sentido este-oeste del área, atribuible al riego.

Con respecto a la diferenciación entre huella hídrica azul y huella hídrica verde, la figura 2 permite observar que para el caso de riego más fertilidad edáfica al 80%, la huella hídrica verde aumenta hacia al noreste (incremento de las precipitaciones) y constituye la mayor proporción, mientras que en las zonas de menor precipitación aumenta la necesidad de riego de los cultivos y, consecuentemente, la huella hídrica azul.

Para el caso riego y fertilidad edáfica óptima se observa un incremento de los valores de huella hídrica verde hacia el este del área de estudio.

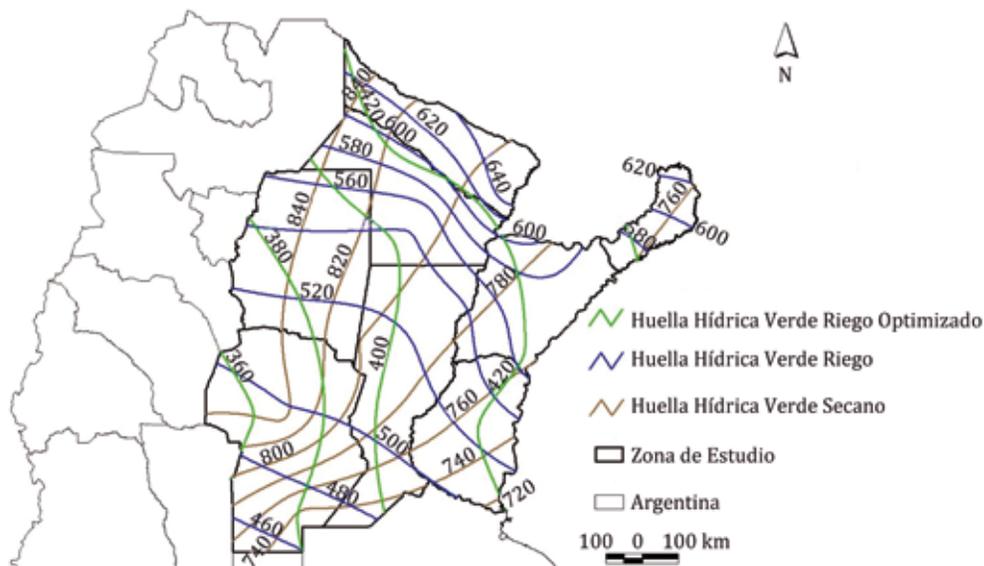


Figura 2. Huella hídrica verde del cultivo de maíz ($L.kg^{-1}$) en tres condiciones: secano y fertilidad edáfica al 60%, riego y fertilidad edáfica al 80%, riego y fertilidad edáfica óptimos.

Figure 2. Green water footprint of corn production under different conditions: rainfed farming and 60% soil fertility; irrigation and 80% soil fertility; and optimum irrigation and soil fertility.

Al compararla con la huella hídrica verde en la situación de riego más fertilidad edáfica al 80%, se observa que a pesar de aplicar mayor cantidad de agua mediante riego, los valores son menores (incremento de la producción por mayor disponibilidad de agua junto con una óptima fertilidad).

Si se analiza la huella hídrica azul (figura 3, pág. 170) puede verse que -en ambos casos (riego y riego óptimo)- su valor aumenta hacia el oeste, coincidiendo con la disminución de las precipitaciones en este sentido. En el caso de riego optimizado (8) los valores de huella hídrica azul resultan mayores.

Con respecto a las láminas aplicadas, se observa que en el riego programado

por AquaCrop (8) y sin limitaciones de fertilidad, estas son mayores que en condiciones de riego con fertilidad edáfica al 80% (tabla 3, pág. 170). La lámina promedio aplicada en la zona de estudio en condiciones de riego con fertilidad edáfica al 80% fue de 44 mm y, en condiciones de riego óptimo y sin limitaciones de fertilidad, de 106 mm (incremento promedio de 62mm).

La ETC del maíz en secano para el área de estudio alcanzó valores medios de 562 mm en el ciclo, mientras que en el caso de riego y riego con fertilidad óptima, los valores obtenidos fueron de 591 y 596 mm respectivamente. El agua azul representó hasta un 20% de la ETC en la situación riego y hasta un 35% en riego y fertilidad óptima.

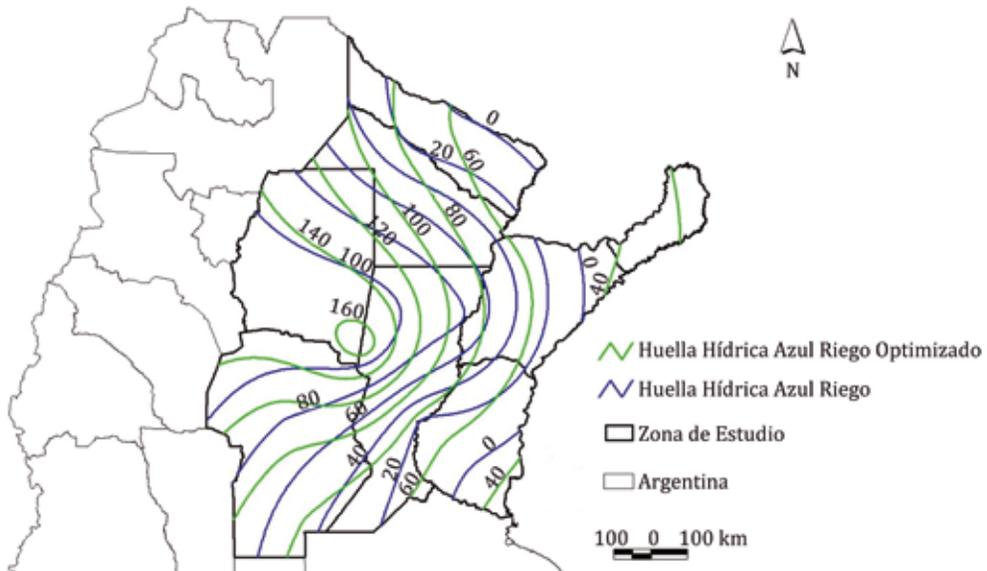


Figura 3. Huella hídrica azul del cultivo de maíz ($L.kg^{-1}$) en dos condiciones: riego y fertilidad edáfica al 80%, riego y fertilidad edáfica óptimos

Figure 3. Blue water footprint of corn production under different conditions: irrigation and 80% soil fertility; and optimum irrigation and soil fertility.

Tabla 3. Láminas medias de riego y riego óptimo, variabilidad e incremento para las distintas estaciones meteorológicas analizadas

Table 3. Mean and optimal irrigations depths (mm), variability and incremental irrigation depth for each meteorological station analyzed.

Estaciones	Lámina media riego (mm)	CV	Lámina media Riego óptimo (mm) (programado por AquaCrop)	CV	Incremento de riego (mm)
Ceres-aero	114	0,76	205	0,55	91
Laboulaye	44	0,95	94	0,89	50
Las Lomitas	5	2,44	83	1,48	79
Paraná-aero	14	2,94	86	1,24	72
Pilar-observatorio	78	0,65	131	0,58	53
Reconquista-aero	83	0,93	182	0,74	99
P.R. Sáenz Peña	59	1,16	107	0,82	48
Formosa-aero	13	2,74	54	2,49	41
Posadas	21	2,06	53	1,44	32
Montecaseros	14	1,97	65	1,09	51
Promedio	44		106		62

En la tabla 4 se registra la producción media para las distintas estaciones meteorológicas seleccionadas, en las condiciones planteadas en el estudio, secano, riego con fertilidad edáfica al 80% y de riego sin limitaciones de fertilidad.

Puede verse que el incremento de producción promedio obtenido con riego y fertilidad edáfica al 80% respecto de secano fue del 39%, el resultante de aplicar riego y fertilidad edáfica óptima respecto de secano fue 73% y el debido a riego y fertilidad edáfica óptima respecto de riego y fertilidad edáfica al 80% resultó del 25%.

Resulta interesante resaltar que al aplicar riego -más allá de los incrementos de producción- lo importante es que el agricultor se asegura todos los años una buena cosecha (estabilidad), independientemente de la ocurrencia de precipitaciones.

DISCUSIÓN

Según Mekonnen y Hoekstra (2010), quienes estimaron la huella hídrica mundial analizando 126 cultivos en el período 1996-2005, la contribución de la huella hídrica verde a la huella hídrica de consumo total (verde más azul) fue de 86%.

Los valores medios mundiales de huella hídrica verde para maíz, en secano y en agricultura de regadío para el período 1996-2005 fueron: 1.082 L kg⁻¹ y 595 L kg⁻¹, respectivamente. La huella hídrica azul media mundial en condiciones de regadío es de 294 L.kg⁻¹.

Los valores encontrados en el presente trabajo para el centro-noreste argentino fueron: huella hídrica verde, en secano, 26% por debajo del promedio mundial; huella hídrica verde bajo riego, cercano al promedio mundial (557 L.kg⁻¹ vs 595 L.kg⁻¹) y huella hídrica azul, considerablemente menor que el promedio mundial (45 L.kg⁻¹ vs 294 L.kg⁻¹).

Tabla 4. Producción del cultivo (kg.ha⁻¹) en condiciones de secano, en riego con fertilidad edáfica al 80% y riego y fertilidad edáfica óptimas

Table 4. Yields (kg.ha⁻¹) under different conditions: rainfed farming; irrigation and 80% soil fertility; and optimum irrigation and soil fertility.

Estaciones	Secano (kg.ha ⁻¹)	Riego (kg.ha ⁻¹)	Riego Óptimo (kg.ha ⁻¹)	Incremento riego respecto a secano (%)	Incremento riego óptimo respecto a secano (%)	Incremento riego óptimo respecto a riego (%)
Ceres-aero	6651	9762	12088	47	82	24
Laboulaye	7146	9808	12043	37	69	23
Las Lomitas	7368	9837	12346	34	68	26
Paraná-aero	7343	9816	12384	34	69	26
Pilar-observatorio	6315	9758	11996	55	90	23
Reconquista-aero	6702	9789	12114	46	81	24
P.R. Sáenz Peña	7038	9800	12070	39	71	23
Formosa-aero	7332	9836	12387	34	69	26
Posadas	7267	9818	12325	35	70	26
Montecaseros	7333	9834	12390	34	69	26
Promedio	7050	9806	12214	39	73	25

Si se comparan los valores de huella hídrica del maíz estimados en este trabajo con los obtenidos en otras regiones maiceras del mundo (17) se tiene que: en Chile presenta valores promedio de huella hídrica azul de 400 L.kg⁻¹ y de huella hídrica verde de 56 L.kg⁻¹ (maíz de grano).

Se observa aquí que, a diferencia de lo que sucede en Argentina, la huella azul (88%) es más significativa que la verde (12%) debido a que en el vecino país la producción se sostiene fundamentalmente con riego.

Por su parte, Sun, S. K. *et al.* (2013), en Beijing, China (período 1978-2008), utilizando el modelo CROPWAT 8.0 (22), obtuvieron una huella hídrica media de 1.031 Lkg⁻¹ (56% correspondiente a huella hídrica verde, 25% a huella hídrica azul y 19% a huella hídrica gris). El valor de la huella hídrica verde resulta similar al estimado en este estudio en condiciones de riego y el de huella hídrica azul, superior al obtenido en Argentina (45 Lkg⁻¹).

Dabrowski J. M. *et al.* (2009), encontraron -para maíz en Sudáfrica, el mayor productor de la región-una huella hídrica verde de 868 Lkg⁻¹ y una huella hídrica azul de 117 Lkg⁻¹.

Según Chapagain y Hoekstra (2004), la producción de una tonelada de maíz en Sudáfrica requiere aproximadamente 1.609 m³ de agua.

En Dabrowski *et al.* (2009), se resalta la importancia y el cuidado que se debe tener en el uso de valores de contenido de agua virtuales a gran escala.

En los resultados del presente trabajo se observó que, al mejorar las condiciones del cultivo en lo referente a la disponibilidad de agua y fertilidad edáfica, se redujo la huella hídrica obtenida como sumatoria de las huellas verde y azul. Esto se debe a que la huella hídrica es el cociente entre la cantidad de agua consumida y la producción obtenida.

La mayor disponibilidad de agua junto con incrementos de fertilidad, determinaron un aumento importante de la producción que se tradujo en una disminución de la huella hídrica frente a las condiciones de secano. Este comportamiento se observó también por Mekonnen y Hoekstra (2010), donde para la mayoría de los cultivos, la huella hídrica promedio mundial (azul más verde) por tonelada de cosecha fue menor para los cultivos de regadío que para los cultivos de secano. Esto se explica debido a que los rendimientos son más altos en condiciones de riego (hay más agua disponible para satisfacer las necesidades de agua de los cultivos y la evapotranspiración real se aproxima a la evapotranspiración potencial). En condiciones de secano, la evapotranspiración real es menor que la potencial.

Puede decirse que un manejo adecuado del cultivo (estrategias acertadas de riego y fertilización, entre otros) genera una menor huella hídrica, mejorando el uso del recurso agua. En ese sentido, Morábito *et al.* (2015), resaltan la importancia de contar con servicios de monitoreo y gestión de riego, como herramienta de apoyo a la toma de decisiones, donde los criterios de cuándo regar y cuánta agua aplicar, basándose en parámetros agronómicos del cultivo y características del suelo y clima se combinan con un modelo matemático que permita determinar la ETo.

Al analizar la distribución espacial de la huella hídrica se observó hacia el noroeste de la zona de estudio, un incremento de la huella hídrica verde en condiciones de secano. Esto es debido a que los rendimientos están sujetos a las precipitaciones, por ende, al disminuir la lluvia, en ese sentido disminuye también la producción y por lo tanto la huella hídrica resulta mayor.

Con respecto a la huella hídrica (verde más azul), en ambas situaciones de riego el incremento de la misma hacia el norte podría deberse a un aumento de la evapotranspiración. Asimismo, se estima que la uniformidad de valores obtenidos en sentido este-oeste es una consecuencia del riego (disminuye variabilidad, uniformiza la producción).

Al desglosar la huella hídrica en sus componentes verde y azul se observó que -en condiciones de riego- la mayor proporción está dada por la huella hídrica verde (alrededor del 92% para las estaciones analizadas), esto corresponde a un valor medio de huella hídrica verde de 557 L.kg⁻¹. Esto coincide con lo estimado por Aldaya (2007), trabajo donde se afirma que cerca del 90% del agua consumida en la producción de maíz en Argentina es agua verde y se estima un contenido en agua virtual de 595 L.kg⁻¹. Esta estimación es contrastada con la producción de maíz en España donde el contenido de agua virtual fue de 727 L.kg⁻¹ para el año 2001, siendo prácticamente el 90% del agua consumida, agua azul.

Las cifras reflejan una mayor eficiencia en el uso del agua para producir maíz en Argentina, además de consumir principalmente agua verde (19).

El agua verde tiene -en general- un costo de oportunidad menor que el agua azul (23), se debe a su alta imprevisibilidad y a la menor factibilidad de usos alternativos, por lo tanto sería deseable incentivar su utilización "in situ" mediante labores culturales apropiadas, para maximizar su aprovechamiento: prácticas como el barbecho y la siembra directa, así como siembras transversales a la máxima pendiente que reducen el escurrimiento superficial.

Fernandez (2014) estimó un valor de huella hídrica verde en secano en dos sitios de la provincia de Buenos Aires

(Pergamino y Quequén) de 631 L.kg⁻¹, por debajo de lo estimado para secano, en el presente trabajo (803 L.kg⁻¹ huella hídrica verde promedio). Esto podría deberse a los altos rendimientos de maíz obtenidos en estos sitios.

En Osorio Ulloa (2013) se menciona que -según estimaciones de la Water Footprint- Argentina, junto con China y Brasil, presentan las huellas hídricas totales más altas en comparación con los valores obtenidos en los principales países productores de maíz, influenciadas principalmente por los valores de huella hídrica verde.

Los mapas que se presentan en este trabajo indican que en los sectores de mayores lluvias se presentan valores más altos de huella hídrica verde y más bajos de huella hídrica azul, ya que la mayor parte de las necesidades del cultivo son cubiertas por las precipitaciones.

Comparando los resultados de huella hídrica verde en secano y fertilidad edáfica al 60% obtenidos en este trabajo (figura 4, pág. 175) con los valores de referencia estimados por Mekonnen y Hoekstra (2010), para las distintas provincias argentinas, se observan diferencias que van de 380 a 70 L.kg⁻¹, siendo menores los valores estimados en este trabajo. Esto puede deberse a que los autores mencionados utilizaron el modelo CROPWAT 8.0. (22) en lugar de AquaCrop (8).

Podría pensarse que este último arroja resultados más confiables, producto de la simulación precisa de la relación agua-suelo-planta-atmósfera, obteniendo valores de huella hídrica más cercanos a la realidad.

Las diferencias podrían deberse también a las fechas de siembra, las duraciones de las etapas del ciclo y demás parámetros de cultivo considerados.

Mekonnen y Hoekstra (2010), indican que las diferencias entre resultados obtenidos con distintos programas pueden deberse a una variedad de causas, incluyendo el tipo de modelo, la resolución espacial, el período considerado y datos respecto de los cultivos y áreas de regadío (período de crecimiento, parámetros de cultivo, suelo y clima).

Fernandez (2014), indica que debe tenerse en cuenta la complejidad y el mecanismo de los modelos a la hora de comparar resultados ya que el grado de precisión depende de aquellos.

Mekonnen y Hoekstra (2010), señalan que aunque existen grandes diferencias en los modelos aplicados y supuestos, todos están de acuerdo sobre el rol dominante del agua verde en la producción global de cultivos.

Respecto de la huella hídrica gris, Mekonnen y Hoekstra (2010), mencionan que el maíz -junto con el trigo y el arroz- presentan valores elevados que en su conjunto representan alrededor del 56% de la huella hídrica gris a nivel global.

Por lo tanto, sería importante estimar la huella hídrica gris en Argentina, ya que en el cultivo de maíz se aplican fertilizantes nitrogenados que -si superan las necesidades del cultivo- se pierden por escorrentía y/o lixiviación produciendo impactos negativos en el ecosistema.

En Osorio Ulloa (2013) se encontró que la huella hídrica gris es uno de los factores de mayor incidencia en la huella hídrica total del cultivo.

Los valores de producción en secano simulados en este trabajo se compararon con los obtenidos por: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (24), AACREA para Argentina (2001/12) (3) y Agropost para Argentina 2010 (9) para la zona de estudio (figura 5, pág. 175).

De la comparación surge que los valores simulados se aproximan a los valores de INTA, superándolos -en promedio- en

un 7-8%. Esta diferencia podría deberse a que el modelo no incluye la afectación de la producción por otras causas, como problemas de plagas y enfermedades locales -puede mencionarse el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*), la plaga más importante del maíz en Argentina- (4) y las reducciones de rendimientos generados por ineficiencias de los sistemas de cosecha.

CONCLUSIONES

Siendo Argentina uno de los principales países exportadores de maíz es importante contar con estimaciones de huella hídrica, una herramienta útil para conocer cuánta agua se exporta de forma indirecta como también para estimar huellas hídricas de otros productos que lo incluyen en su proceso productivo.

No debe olvidarse que la huella hídrica es un indicador complementario para evaluar la sustentabilidad en el uso de recursos naturales y por lo tanto debe analizarse e interpretarse de forma más integral.

Es necesario además avanzar en la valoración de los impactos de la huella hídrica, considerando la utilización (racional e irracional) de agua para riego en conjunto con el uso de fertilizantes.

Utilizar esta información de manera adecuada puede ayudar a la toma de conciencia de parte del productor, mejorar la toma de decisiones de los administradores del recurso y a elaborar políticas adecuadas para el uso cada vez más sostenible del agua.

La huella hídrica verde en secano alcanza -para el área de estudio- un valor medio de 803 L.kg⁻¹, con valores extremos de 875 y 733 L.kg⁻¹ y la huella hídrica (verde más azul) bajo riego es de 602 L.kg⁻¹ mientras que para la situación de riego y fertilidad edáfica óptimos (potencialidad actual) de 488 L.kg⁻¹.

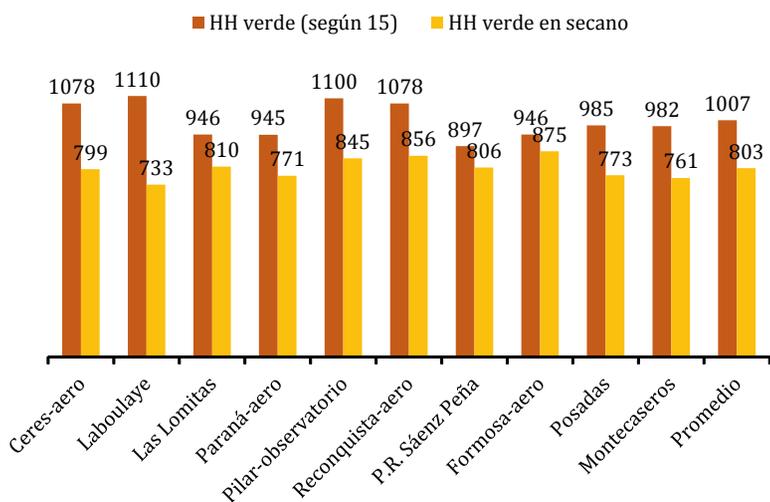


Figura 4. Comparación de los resultados obtenidos con los datos de huella hídrica verde y azul estimados por Mekonnen & Hoekstra (2010).

Figure 4. Comparison of the results obtained with the green and blue water footprint data estimated by Mekonnen & Hoekstra (2010).

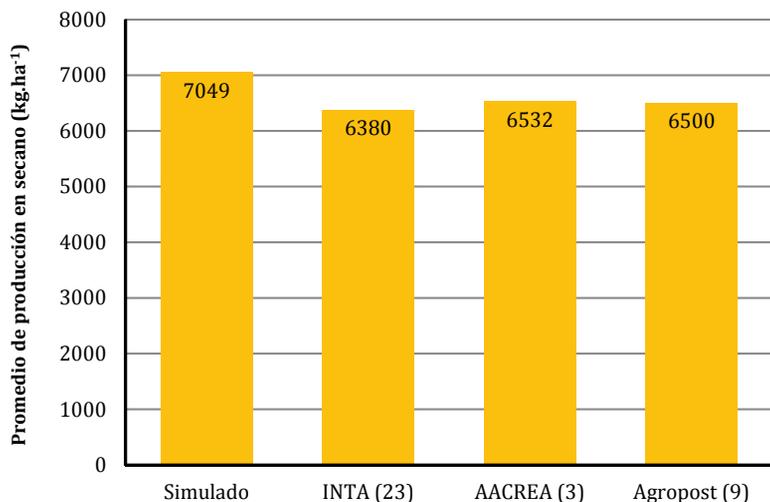


Figura 5. Comparación de la producción media de maíz simulada para el área de estudio y condiciones de secano con los valores de las referencias (3, 9 y 23).

Figure 5. Comparison of average corn yield simulated under rainfed conditions in the study area with values published by the INTA (3, 9 and 23).

El riego reduce la huella hídrica y, a su vez, plantea un valor potencial objetivo que el productor podría alcanzar si realizase un adecuado manejo del agua y de la fertilización.

Espacialmente la huella hídrica verde del maíz en secano aumenta hacia el noroeste y la huella (verde más azul) bajo riego se incrementa esencialmente hacia el norte del área de estudio.

Por su parte, la huella hídrica verde bajo riego se incrementa hacia el noreste y en condiciones de riego óptimo lo hace hacia el este.

La huella hídrica azul -para ambas situaciones de riego- se hace más relevante hacia el oeste debido a la menor ocurrencia de precipitaciones, lo que implica una mayor demanda de agua de riego.

Por último, los resultados permiten esperar que láminas de riego promedio de 44 mm (con un máximo de 114 mm) generen incrementos productivos medios -respecto de secano- del orden del 39% (con un máximo de 55% y un mínimo de 34%) y láminas medias de 106 mm (máximo de 205 y mínimo de 53 mm), sumadas a niveles adecuados de fertilidad, permitirían obtener un incremento medio de producción del 73% respecto de secano (con un máximo de 90% y un mínimo de 68%). Esta información permite al productor valorar convenientemente las prácticas de riego y el uso eficiente de fertilizantes en el proceso productivo y concientiza a los administradores del recurso hídrico sobre la necesidad de diseñar políticas adecuadas para el uso sostenible del agua.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aldaya, M. M. 2007. How strategically important is green water in international crop trade. Dissertation for M.Sc. in Environmental Policy and Regulation. London School of Economics.
2. Aldaya, M. M.; Niemeier, I.; Zarate E. 2011. Agua y globalización: retos y oportunidades para una mejor gestión de los recursos hídricos. *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros*. 230:61-83.
3. Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola - AACREA, 2014. Maíz: técnicas probadas para una producción rentable.
4. Ayala, O. R.; Navarro, F.; Virla, E. G. 2013. Evaluation of the attack rates and level of damages by the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), affecting corn-crops in the northeast of Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina*. 45(2): 1-12.
5. Chapagain, A. K.; Hoekstra, A. Y. 2004. Water Footprints of Nations. Volume 2: Appendices. Value of Water Research Report Series N° 16, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands.
6. Cortés Bello, C. A. 2013. Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de caña de azúcar en el departamento del Valle del Cauca. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Colombia.
7. Dabrowski J. M.; Masekoameng, E.; Ashton P. J. 2009. Analysis of virtual water flows associated with the trade of maize in the SADC region: importance of scale. *Hydrol. Earth Syst. Sci*. 13: 1967-1977.
8. Dirk, R.; Steduto, P.; Hsiao, T.; Fereres, E. 2012. AquaCrop. FAO. Rome, Italy.
9. Donadio, P. 2014. Manejo eficiente de maíces de alto potencial. *Agropost. Manejo agropecuario de exportación. Parte II*. 133 (16-18).
10. Fereres, E.; Orgaz, F.; Gonzalez-Dugo, V. 2011. Reflections on food security under water scarcity. *J. Exp. Bot*. 62: 4079-4086.

11. Fernandez, P. 2014. Water consumptions in different crop sequences in the pampean region to analyses the possibilities to integrate more maize in crop rotation to produce biofuels. Facultad de Agronomía. UBA, Buenos Aires, Argentina.
12. Flores-Gallardo, H.; Ojeda-Bustamante, W; Flores-Magdaleno, H.; Sifuentes-Ibarra, H.; Mejía-Sáenz, E. 2013. Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop. *Agrociencia*. 47: 347-359.
13. Hoekstra, A. Y; Chapagain, A. J.; Aldaya, M. M.; Mekonnen, M. M. 2009. Water Footprint Manual. State of the Art 2009. Water Footprint Report. Water Footprint Network.
14. Hoekstra, A. Y; Chapagain, A. K.; Aldaya, M. M.; Mekonnen, M. M. 2010. Manual de Evaluación de la huella hídrica. Definiendo una norma global.
15. Mekonnen, M. M. and Hoekstra, A. Y. 2010. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, Value of Water Research Report Series No. 47, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
16. Morábito, J.; Salatino, S.; Hernández, R.; Schilardi, C.; Álvarez, A.; Rodríguez Palmieri, P. 2015. Distribución espacial de la evapotranspiración del cultivo de referencia y de la precipitación efectiva para las provincias del centro-noreste de Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina*. 47(1): 109-125.
17. Osorio Ulloa, A. 2013. Determinación de la huella del agua y estrategias de manejo de recursos hídricos. Serie Actas N°50. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Intihuasi. Chile.
18. Raes, D.; Et Al. 2009. AquaCrop - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Journal of Agronomy*. 438-447.
19. Rodríguez Casado, R.; Garrido, A.; Llamas M. R.; Varela-Ortega, C. 2008. La huella hidrológica de la agricultura española. Número 2. *Papeles de Agua Virtual*. Ed. Fundación Marcelino Botín.
20. San Luis Agua S. E; Ministerio del Campo, Gobierno de la Provincia de San Luis. 2014. Cálculo y análisis de la huella hídrica de la Provincia de San Luis. Sectores agrícola y pecuario.
21. Servicio Meteorológico Nacional. 2012. Estadística climatológica. Buenos Aires. Argentina.
22. Smith, M. 1999. Cropwat Windows version 8.0. FAO. Italia.
23. Sun, S. K.; Wu, P. T.; Wang, Y. B.; Zhao, X. N. 2013. Temporal variability of water footprint for maize production: the case of Beijing from 1978 to 2008. *Water Resource Manage*. 27: 2447-2463.
24. Zunino, F. M. 2014. Rendimientos promedios de maíz en secano en provincias maiceras de Argentina, validados por productores e INTA. Consulta personal, florzunino@gmail.com