

Determinación de la huella hídrica azul en los cultivos forrajeros del DR-017, Comarca Lagunera, México

Determination of blue water footprint in forages crops from irrigation district 017, Comarca Lagunera, Mexico

José Luis Ríos Flores ¹, Miriam Torres Moreno ², Rafael Castro Franco ¹, Marco Antonio Torres Moreno ³, José Ruiz Torres ¹

Originales: *Recepción:* 05/05/2014 - *Aceptación:* 04/11/2014

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue la determinación de la huella hídrica azul en los cultivos forrajeros del DR-017 Comarca Lagunera, México. Mediante el uso de indicadores de productividad y eficiencia se desarrollaron modelos matemáticos que permitieron estimar la huella hídrica azul de los cultivos. Los resultados muestran que los forrajes ocuparon 45% de la superficie total agrícola, empleando 94,7% del agua subterránea, generando 33% del Valor Bruto de la Producción agrícola. Los índices de productividad física fueron en promedio 252 L kg⁻¹ (sorgo forrajero 181 L kg⁻¹, avena forrajera 413 L kg⁻¹, alfalfa L kg⁻¹). El ingreso por m³ empleado fue de US\$ 0,04 m⁻³ en promedio (maíz forrajero US\$ 0,07 m⁻³, alfalfa US\$ 0,05 m⁻³). El indicador de eficiencia social mostró que en promedio se generaron 0,048 empleos hm⁻³ (0,037 empleos hm⁻³ en alfalfa y 0,076 empleos hm⁻³ en rye grass). Finalmente bajo las mismas condiciones de cultivo, así como de mercado, la cantidad mínima que se requiere producir para tener una operación viable (punto de equilibrio) en promedio fue 39,02 t ha⁻¹. En conclusión, la producción de maíz y sorgo forrajero en la región resultó altamente eficiente y productiva en comparación con los demás cultivos forrajeros lo que se tradujo en una menor huella hídrica azul.

Palabras clave

agua virtual • productividad del agua • eficiencia del agua • huella hídrica

-
- 1 Universidad Autónoma Chapingo - Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Bermejillo, Durango, C. P. 35230. j.rf2005@hotmail.com
 - 2 Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de México (SAGARPA), Delegación-Región Lagunera-Subdelegación de Planeación y Desarrollo Rural, Cd. Lerdo, Dgo., C. P. 35000 México.
 - 3 Universidad Autónoma Chapingo – Colegio de Posgraduados - Carretera México- Texcoco Km. 36.5, Campus Montecillo, C. P. 56230, Texcoco, Estado de México.

ABSTRACT

The aim of this work was the determination of the blue water footprint in forage crops from DR-017 "Comarca Lagunera", México. By means of productivity and efficiency mathematical models were used to estimate the blue water footprint of forages crops. The results show that forages occupied 45% of the total agricultural area using 94,7% of groundwater, generating 33% of the Gross Value Production. Physical productivity rates were on average 252 L kg⁻¹ (forage sorghum 181 L kg⁻¹, forage oats 413 L kg⁻¹ alfalfa L kg⁻¹). Income per m³ was US\$ 0.04 m⁻³ on average (US\$ 0.94 m⁻³ in forage maize, US\$ 0.05 m⁻³ alfalfa forage). The social efficiency indicator showed in average 0.048 jobs per hectometer (0.037 jobs hm⁻³ in alfalfa and 0.076 jobs hm⁻³ in rye grass). Finally, under the same crop y market conditions the minimum amount for a viable operation (break-even point) was 39.02 t ha⁻¹. In conclusion, the production of corn and sorghum forage in the region was highly efficient and productive compared to other forage crops which resulted in lower blue water footprint.

Keywords

virtual water • water productivity • water efficiency • water footprint

INTRODUCCIÓN

Por sus características bromatológicas y nutritivas la alfalfa (*Medicago sativa* L.) es el principal forraje de sustento para la producción de leche en el mundo (21). La alfalfa ocupa el 57% (36.000 hectáreas) de la superficie sembrada en la región, considerada como la cuenca lechera más importante de México (10). La Comarca Lagunera es una región delimitada por varios municipios de los estados de Coahuila y Durango, cuenta con un aproximado de 400.000 bovinos (22, 26). La industria lechera de esta región genera 10.000 empleos directos y mil seiscientos millones de litros de leche por año (27). Esta población de ganado demanda para su alimentación alrededor de 3.000.000 de toneladas de forraje verde anualmente, siendo la alfalfa la principal fuente de este insumo. Sin embargo, la producción de alfalfa de esta región enfrenta serios problemas de manejo de los recursos agua y suelo. El principal problema es la escasez de agua derivada de la sobreexplotación

de agua subterránea para el riego de este cultivo y otros forrajes (30), así como la demanda de la lámina de riego anual de este cultivo, la cual varía entre 2,4 - 2,7 m. A pesar de que la producción de leche se ha considerado como un foco importante de desarrollo económico, en el aspecto tecnológico de la producción de alfalfa se presentan graves atrasos, por ejemplo, a nivel nacional el 10% de la superficie total irrigada se encuentra equipada con riego presurizado, mientras que en esta región solo el 1,0% se riega con estos sistemas (21, 22).

El concepto de la productividad del agua fue establecido en 2003 (18), como una medida sólida para determinar la capacidad de los sistemas agrícolas de convertir el agua en alimento. Sin embargo, la determinación de tal concepto en la práctica se utiliza como una herramienta de diagnóstico para determinar la eficiencia del uso del agua, ya sea alta o baja en los sistemas agrícolas o subsistemas,

y en segundo lugar proporciona una visión sólida para la determinación de las oportunidades de redistribución de agua en las cuencas, donde el objetivo sea el incremento de la productividad del agua. Ello finalmente permitirá a los tomadores de decisiones hacer juicios acerca de qué alternativas existen para resolver los problemas técnicos, en cuanto a la productividad del agua, acerca de si una región es o no eficiente en la producción agrícola. El análisis de la huella hídrica (HH) no debe ser interpretado como un elemento aislado: es una herramienta orientada a brindar información básica que, siendo analizada en el contexto regional y junto con otros indicadores de relevancia, puede ser de utilidad para los tomadores de decisiones (29). Los otros factores a considerar son climáticos, hidrológicos y geográficos, así como los modelos productivos utilizados en las distintas regiones, la evolución demográfica local y los escenarios futuros (1, 20). Ello obligadamente conduce a la necesidad de elevar la productividad y eficiencia agrícolas, maximizando la productividad de cada gota de agua, así como una mejor captación y aprovechamiento de agua de lluvia que pueda contribuir en la reducción de la huella hídrica y de la presión que ésta ejerce sobre las cuencas (14, 15, 16).

OBJETIVO

Determinar la huella hídrica azul de los cultivos forrajeros del Distrito de Riego 017, perteneciente a la Comarca Lagunera, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio

Se seleccionó el Distrito de Riego 017, Comarca Lagunera, que comprende parte de los estados de Coahuila y Durango. Esta región se localiza entre los meridianos 102°22' y 104°47' longitud oeste, y paralelos 24°22' y 26°23' latitud norte, a una altura de 1.200 m s. n. m. (figura 1). De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por García (6), el clima de la Comarca Lagunera es de tipo desértico con escasa humedad atmosférica y precipitación pluvial promedio de 240 mm anuales; el período de lluvia comprende de mayo a septiembre donde ocurre 70% de la precipitación. En la mayor parte de la región se tiene una evaporación anual de 2.600 mm y una temperatura media de 20°C (4).



Figura 1. Localización del área del DR-017, Comarca Lagunera, México.

Figure 1. Location area DR-017, Comarca Lagunera, Mexico.

Indicadores de eficiencia y productividad

Para lograr determinar la huella hídrica azul de los cultivos forrajeros en la Comarca Lagunera se emplearon índices de eficiencia física, expresada en kg m^{-3} (Y_1 y Y_2), de productividad económica (Y_3 - Y_7 , Y_{12} - Y_{13}) y de eficiencia social (Y_8 - Y_{11}).

La variable Y_1 , muestra la relación entre la cantidad de agua empleada en el riego (V_i) y la producción física de los cultivos forrajeros (P_i). En forma desagregada se determinó la superficie cosechada de cada forraje (S_i), y se multiplicó por la lámina de riego de cada cultivo (LR_i) en relación con la eficiencia de conducción hídrica de cada forraje (EC_i), multiplicado por el área de una hectárea (10.000 m^2). En el denominador se consideró la sumatoria de la producción física de cada forraje (P_i) producido en esa superficie " S_i ". Se expresa en litros o metros cúbicos de agua irrigada por kilogramo o tonelada de producto físico producido por el grupo de cultivos en su conjunto.

$$Y_1 = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{10.000 \sum_{i=1}^n S_i \frac{LR_i}{EC_i}}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

La variable Y_2 es la inversa de la variable Y_1 , y se expresa en kilogramo o toneladas producidas de forraje por litro o metro cúbico de agua irrigada.

$$Y_2 = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{10.000 \sum_{i=1}^n S_i \frac{LR_i}{EC_i}} \quad (2)$$

La variable Y_3 muestra la relación entre la cantidad de agua empleada en el riego (V_i) y el Valor Bruto de la Producción generado al utilizar esta cantidad de agua. Donde el numerador de esta ecuación es

el mismo numerador de Y_1 , y el denominador es el Valor Bruto de la Producción generado en la superficie (S) del grupo forrajero, lo que es igual a la sumatoria de la superficie cosechada de cada cultivo (S_i), la cual se multiplicó por el correspondiente rendimiento monetario de cada cultivo (RM_i). Expresada en litros o metro cúbico de agua irrigada por dólar US\$ de ingreso producido por el grupo de forrajes.

$$Y_3 = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{\sum_{i=1}^n S_i RM_i} = \frac{10.000 \sum_{i=1}^n S_i \frac{LR_i}{EC_i}}{\sum_{i=1}^n S_i RM_i} \quad (3)$$

La variable Y_4 , es la inversa de la variable Y_3 y se expresa en dólares US\$ de ingreso monetario promedio de cultivos forrajeros generado por litro o metro cúbico de agua irrigada.

$$Y_4 = \frac{\sum_{i=1}^n S_i RM_i}{10.000 \sum_{i=1}^n S_i \frac{LR_i}{EC_i}} \quad (4)$$

En la variable Y_5 , representa la relación entre la utilidad monetaria y el volumen de agua empleado. El numerador es la utilidad Bruta "U" generada por el grupo forrajero en su conjunto, el cual es igual a la suma de la utilidad generada por cada cultivo (U_i), a la que se multiplicó por la superficie cosechada de cada cultivo (S_i). El denominador de esta ecuación es el mismo numerador que se señala en la ecuación Y_1 . Expresada en dólares US\$ generados por litro o metro cúbico de agua irrigada.

$$Y_5 = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{\sum_{i=1}^n V_i} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i U_i}{10.000 \sum_{i=1}^n S_i \frac{LR_i}{EC_i}} \quad (5)$$

La variable Y_6 es la inversa de la variable Y_5 . Expresada en litros o metro cúbico de agua irrigada por dólar US\$1 de utilidad.

$$Y_6 = \frac{10.000 \sum_{i=1}^n S_i \frac{LR_i}{EC_i}}{\sum_{i=1}^n S_i U_i} \quad (6)$$

La variable Y_7 es la división de Y_6 , entre el precio promedio que tiene el metro cúbico de agua para el productor. Expresada como un índice mayor, menor o igual a la unidad, es adimensional. Donde mayor a 1 indica que la utilidad generada por m^3 , es superior al precio pagado por el agua, y menor a 1 señala que la utilidad generada es inferior al precio pagado por el agua.

$$Y_7 = \frac{\sum_{i=1}^n S_i U_i}{10.000 \sum_{i=1}^n S_i \frac{LR_i}{EC_i}} \quad (7)$$

$\$ m^{-3}$

Como indicador de la importancia social del agua, se empleó el número de empleos agrícolas (Y_9). Esta eficiencia social del agua, es propuesta por algunos autores como la relación que existe entre el empleo y el agua consumida, utilizados en la evaluación de la eficiencia del agua (17). Donde el numerador es el empleo generado por cada cultivo forrajero y el denominador es el volumen de agua irrigado en hectómetros a nivel de todo el grupo forrajero.

$$Y_8 = \frac{\sum_{i=1}^n S_i J_i}{\sum_{i=1}^n S_i \left(\frac{LR_i}{EC_i} \right)} \quad (8)$$

La variable Y_9 , determinó la productividad horaria, medida como la cantidad de horas que se requieren para producir una tonelada de producto. Donde el numerador es la cantidad de horas de trabajo invertidas en toda la superficie forrajera, misma que se obtiene multiplicando el total de jornales de cada cultivo forrajero (J_i) por la superficie cosechada de cada cultivo (S_i) multiplicado por (8) para convertir los jornales en horas de trabajo. Mientras el denominador es el volumen físico de toda la producción forrajera "P", mismo que es igual a la sumatoria de las producciones individuales "Pi" de cada uno de los cultivos forrajeros.

$$Y_9 = \frac{8 \sum_{i=1}^n S_i J_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (9)$$

La variable Y_{10} , expresa la ganancia obtenida por trabajador, donde el numerador es la utilidad generado por el grupo forrajero, que proviene de la sumatoria que multiplicaría a la superficie cosechada de cada cultivo (S_i) y a la utilidad de cada cultivo (U_i), el denominador es el número de empleos permanentes generados por el grupo forrajero, que proviene de considerar que socialmente, una persona trabaja 6 días por semana durante 48 semanas al año, es decir; 288 jornadas año⁻¹, al multiplicar la superficie cosechada de cada forraje (S_i) por su correspondiente número de jornales ha⁻¹ de cada cultivo (J_i), y dividido entre 288 (jornadas año⁻¹).

$$Y_{10} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i U_i}{E} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i U_i}{\frac{1}{288} \sum_{i=1}^n S_i J_i} \quad (10)$$

La variable Y_{11} indica la ganancia por hora de trabajo, donde el numerador es el señalado en la ecuación Y_{10} , y como denominador la variable Y_9 . Se expresa en dólares US\$ de ganancia generados por hora de trabajo.

$$Y_{11} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i U_i}{8 \sum_{i=1}^n S_i J_i} \quad (11)$$

La variable Y_{12} , determinó el punto de equilibrio donde los ingresos se igualan a los costos, para un cultivo en lo individual, es la división del costo por hectárea entre el precio por tonelada. Para un agregado de cultivos, el costo total está representado en el numerador como la sumatoria donde se multiplicaría la superficie cosechada de cada cultivo (S_i) por su costo por hectárea (C_i), mientras que en el denominador se encuentra el precio promedio por tonelada de forraje, mismo que se obtiene al dividir el Valor Bruto de la Producción "VBP" de todo el grupo forrajero entre la producción física " P_i " de ese grupo forrajero. Se expresa en toneladas por hectárea.

$$Y_{12} = \frac{n \sum_{i=1}^n [C_i S_i]}{\sum_{i=1}^n V P I_i / \sum_{i=1}^n P_i} \quad (12)$$

La variable Y_{13} es adimensional, ya que divide el rendimiento físico promedio por hectárea a nivel de todo el grupo de cultivos en su conjunto (el numerador de la ecuación, que al dividir la producción física "P" entre la superficie cosechada "S", arroja un rendimiento físico promedio para todo el grupo de cultivos) entre el punto de equilibrio, dado por Y_{12} , de tal forma que si

Y_{13} es mayor a la unidad, el productor puede cumplir un crédito productivo, está en zona de ganancia, si es menor a la unidad, es vulnerable, ya que su producción no alcanza para cubrir los costos generados.

$$Y_{13} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i / \sum_{i=1}^n S_i}{Y_{12}} \quad (13)$$

Para lograr la determinación de la huella hídrica de los cultivos forrajeros en la región se emplearon fuentes de información secundaria. Se utilizó la base de datos de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación del Gobierno de México (SAGARPA) (25, 27). Los datos corresponden al ciclo agrícola 2012, de producción, rendimiento, superficie sembrada y cosechada de cada cultivo forrajero en riego. Para este estudio se define como agricultura de riego a todas aquellas tierras que tienen acceso a fuentes de agua (normalmente subterránea) adicionales a la precipitación, a la cual algunos autores denominan agua azul (12, 13, 14, 15).

Para construir los costos de producción del cultivo, se emplearon los datos de SAGARPA. Con base en estos valores, se calculó la rentabilidad del cultivo para el área de influencia del DR-017, Comarca Lagunera.

Las láminas de riego netas empleadas fueron las indicadas por el Campo Experimental del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en la Comarca Lagunera, para los cultivos de alfalfa forrajera (2,12 m), sorgo forrajero (0,88 m), maíz forrajero (0,88 m), avena forrajera (0,88 m), rye grass (0,88 m), y una eficiencia en la conducción del 75%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Uso consuntivo del agua subterránea en la producción de forrajes del DR0-017

En el ciclo agrícola analizado se establecieron 72.820 hectáreas de forrajes de riego por bombeo, ocupando 45% de la superficie agrícola del Distrito de Riego, generando US\$ 133.032.363,36 dólares, lo que representó el 33% del Valor Bruto de la Producción agrícola regional. El análisis del volumen de agua extraído a nivel regional muestra una tendencia creciente, ya que entre 1992-1995 (3) se determinó que cada año se extraían 918,5 millones de metros cúbicos (Mm^3), posteriormente en el período 2001-2003 (8) se determinó que cada año se extraían 1.013,4 Mm^3 , mientras que en este estudio se determinó que la extracción anual en el ciclo agrícola 2012 fue de 1.038,1 Mm^3 . Desagregando el volumen de agua empleado por cultivo se observa que el cultivo de alfalfa empleó 678,2 Mm^3 , lo que representa el 62,7% de la extracción total de agua subterránea para el riego de cultivos forrajeros, mientras que el maíz forrajero empleó 138,3 Mm^3 , avena forrajera 123,1 Mm^3 , sorgo forrajero 90,7 Mm^3 , y rye grass 7,9 Mm^3 .

Índices de productividad física y económica

El análisis de los conceptos que generan el Costo total ha^{-1} , tanto en términos relativos como en términos absolutos, indica la importancia relativa de cada concepto. Los resultados muestran que los conceptos asociados al riego en todos los cultivos forrajeros son mayores en términos cuantitativos al representar 25% del costo total, mientras que los costos asociados a la siembra y fertilización representaron el 20% del costo total. El agua empleada para el riego de los cultivos forrajeros es extremadamente impor-

tante por ser el principal factor limitante en tanto determina la producción del cultivo. Sin embargo, aún cuando el costo del riego fue $\frac{1}{4}$ del costo total, el precio del agua es muy bajo (US\$ 0,02 m^{-3}) en promedio, oscilando desde US\$ 0,03 m^{-3} , en el rye grass hasta US\$ 0,02 m^{-3} en avena forrajera. Los precios del agua son importantes para la mejora de la demanda y de la conservación de este recurso (22, 28). Sin embargo, los precios del metro cúbico no evidencian el valor real del agua; algunos agricultores estadounidenses pagan entre US\$ 0,01 a US\$ 0,05 m^{-3} empleado en el riego, mientras que la población en general paga US\$ 0,30 a US\$ 0,80 m^{-3} por el agua tratada de uso doméstico (9). Los agricultores de Israel para la producción de tomate, pagan US\$ 0,57 m^{-3} , mientras para la producción de maíz grano pagan US\$ 0,13 y US\$ 0,12 para la producción de trigo (23), lo que evidencia que el precio del metro cúbico de agua en el DR-017 es muy bajo comparado con otras regiones agrícolas del mundo, lo que contribuye con un uso ineficiente del recurso.

El análisis de la eficiencia del agua se observa en la tabla 1 (pág. 100), el cual muestra los indicadores productivos, económicos y sociales. El uso eficiente del agua es uno de los índices más ampliamente empleados en una gran variedad de cultivos en España (7, 19, 24), sin embargo en México existe muy poca información y en algunos cultivos nula información al respecto. En el presente estudio el indicador de eficiencia física promedio de cultivos forrajeros fue 3,98 $kg m^{-3}$ (tabla 1, pág. 100), encontrándose un índice mayor en el cultivo de sorgo forrajero con 5,51 $kg m^{-3}$, lo que muestra una mayor eficiencia de este cultivo para convertir el agua en forraje, ya que solo empleó 181 L kg^{-1} , en comparación con los otros cultivos forrajeros evaluados en este trabajo.

Tabla 1: Indicadores de eficiencia física (Y_1 y Y_2), económica (Y_3 a Y_6) y social (Y_7 a Y_{11}) del agua de riego de bombeo en los cultivos forrajeros del Distrito de Riego (DR) 017 Comarca Lagunera, México. Cifras en Dólares US\$¹.

Table 1: Indicators of physical efficiency (Y_1 and Y_2), economic (Y_3 to Y_6) and social (Y_7 to Y_{11}) irrigation water pumping in forage crops from Irrigation District (ID) 017 Laguna District, Mexico. Amounts in Dollars US\$.

Variable económica	Alfalfa	Maíz forrajero	Avena forrajera	Sorgo forrajero	Rye grass	Grupo forrajero
$Y_1 = \text{L kg}^{-1}$	264	190	413	181	290	252
$Y_2 = \text{kg m}^{-3}$	3,79	5,28	2,42	5,51	3,44	3,98
$Y_3 = \text{L US}\$1^{-1}$ ingreso bruto	8,852	4,567	13,862	5,319	13,038	7,529
$Y_4 = \text{Ingreso bruto US}\m^{-3}	\$ 0,11	\$ 0,22	\$ 0,07	\$ 0,19	\$ 0,08	\$ 0,13
$Y_5 = \text{Utilidad bruta US}\m^{-3}	\$ 0,05	\$ 0,07	-\$ 0,04	\$ 0,04	-\$ 0,07	\$ 0,04
$Y_6 = \text{Utilidad bruta L US}\1^{-1}	19,523	14,258	-22,241	23,160	-15,145	24,220
$Y_7 = \text{Utilidad bruta m}^{-3} / \text{US}\m^{-3}	1,80	2,82	-1,87	1,78	-2,12	1,94
$Y_8 = \text{Empleos hm}^{-3}$	0,37	0,69	0,68	0,71	0,76	0,48
$Y_9 = \text{h t}^{-1}$	2,22	3,03	6,44	2,98	5,06	2,28
$Y_{10} = \text{Ganancia trabajador}^{-1} \text{ US}\$$	\$ 14,028	\$ 10,115	-\$ 6,643	\$ 6,052	-\$ 8,739	\$ 8,501
$Y_{11} = \text{Ganancia h}^{-1} \text{ US}\$$	\$ 6,1	\$ 4,4	-\$ 2,9	\$ 2,6	-\$ 3,8	\$ 4,6
$Y_{12} = \text{Punto de equilibrio (t ha}^{-1}\text{)}$	43,89	31,64	34,69	37,48	56,53	39,02
$Y_{13} = \text{Vulnerabilidad crediticia}$	1,83	1,47	0,62	1,30	0,54	1,45

Fuente: Elaboración propia 1. Tomado como referencia el tipo de cambio del Banco de México del día 6 de Octubre del 2014.

Source: Own elaboration 1. Taken as a reference exchange rate of the Bank of Mexico's Day October 6 from 2014.

Sin embargo, los valores del índice de productividad física se ubican por debajo de los indicadores determinados por (Al-karaki y Al-Hashimi, 2012) quienes bajo condiciones controladas de hidroponía determinaron un índice de 585 kg m^{-3} en sorgo forrajero y 521 kg m^{-3} en alfalfa (2), mientras que en esta evaluación el índice para el cultivo de alfalfa fue de $3,79 \text{ kg m}^{-3}$.

Por otro lado, en condiciones similares no controladas (11), en Arabia Saudita se determinó un índice de 1.478 kg m^{-3} , para una asociación de cultivos forrajeros (alfalfa, pánico azul, zacate rhodes, y zacate sudan).

El indicador de la variable Y_3 , muestra que se requirieron en promedio $7,529 \text{ L}$ para generar US\$1 dólar de ingreso, oscilando entre $4,567 \text{ L}$ en maíz forrajero hasta $13,862 \text{ L}$ en avena forrajera, lo cual muestra que son necesarias grandes cantidades de agua para generar US\$ 1 dólar de ingreso, es decir; el empleo de 1 m^3 de agua en la producción de forrajes generó US\$ 0,13 de ingreso bruto (Y_4), observándose que el sorgo forrajero obtuvo más ingreso, al generar US\$ $0,19 \text{ m}^{-3}$. El índice de productividad económica en alfalfa forrajera fue US\$ $0,05 \text{ m}^{-3}$ en el DR-017 mientras que el mismo índice para el cultivo de alfalfa en el Valle de California fue de US\$ $0,045 \text{ m}^{-3}$ y US\$ $0,036 \text{ m}^{-3}$ en Arizona (28).

El índice de la Y_5 , refleja el beneficio generado por metro cúbico de agua. Este índice mostró ser más elevado en el cultivo de maíz forrajero al generar US\$ $0,07 \text{ m}^{-3}$, con respecto a los obtenidos en la alfalfa forrajera (US\$ $0,05 \text{ m}^{-3}$) y sorgo forrajero (US\$ $0,04 \text{ m}^{-3}$), ya que los cultivos de avena y rye grass generaron utilidades negativas. En este sentido, la información que existe sobre la eficiencia económica generada por metro cúbico empleado en riego es escasa, y en cultivos forra-

jeros es nula. Existen algunos trabajos desarrollados en el mediterráneo para hortalizas, frutales, cereales y oleaginosas; en este sentido, algunos autores determinaron en trigo que la utilidad bruta fue de € $0,23 \text{ m}^{-3}$ (lo que equivale a US\$ 0,28), mientras que en girasol y maíz grano fue de € $0,53 \text{ m}^{-3}$ (equivalente a US\$ 0,66) (7, 24), lo que muestra que a pesar de que el cultivo de maíz forrajero en el DR-017 fue eficiente económicamente en relación con los otros forrajes, éste resultó ineficiente al compararlo con los resultados obtenidos en otras regiones.

Por otro lado, si se toma en cuenta que el beneficio generado por metro cúbico en promedio fue de US\$ $0,04 \text{ m}^{-3}$, esto implicaría que para generar US\$ 1 dólar americano de utilidad bruta sería necesario invertir un total de $24,220 \text{ L}$ (Y_6), ya que mientras que en el cultivo de alfalfa se requieren de $19,523 \text{ L US}^{-1}$, en cultivos como la avena y el rye grass se observa que aún cuando se incrementara la inversión de litros de agua para la producción, la rentabilidad del cultivo no estaría favoreciendo el ingreso generado, lo que implica un uso no sustentable del agua. El indicador de la variable Y_7 , muestra la relación que existe entre el ingreso generado y el precio del metro cúbico. Así el índice promedio para los forrajes en conjunto fue de 1,94; lo que indica que de cada dólar que el productor de forraje pagó por cada metro cúbico de agua, se obtuvo en retorno ese dólar y US\$ 0,94 adicionales. Se determinó que el maíz forrajero fue el cultivo más eficiente al obtener un índice de 2,82; mientras que los cultivos ineficientes en este rubro fueron el rye grass y la avena forrajera. Por ello se menciona que de todos los sectores de la economía, la agricultura es el más sensible a la escasez de agua, ya que emplea aproximadamente el 70% de las extracciones globales de agua dulce, por lo

que es el sector con más opciones de ajuste o de redistribución del agua hacia sectores que pudieran generar más riqueza (30).

Indicadores de eficiencia social

En cuanto a la eficiencia social del agua, que es la cantidad de empleos generados por hectómetro de agua, el indicador fue 0,048 (Y_8) en promedio para los cultivos forrajeros. Este indicador es bajo en relación con otros cultivos como las hortalizas y los frutales, que requieren de una gran cantidad de mano de obra para actividades que no se realizan en los forrajes. De los cinco cultivos evaluados el rye grass (0,076 empleos hm^{-3}) y el sorgo forrajero (0,071 empleos hm^{-3}), mostraron ser los más eficientes socialmente hablando, en relación con cultivos como la alfalfa (0,037 empleos hm^{-3}), lo que ubicó al cultivo de alfalfa como el menos eficiente en términos sociales. En este sentido, solo en algunas regiones de España se han generado este tipo de indicadores (7) mencionándose que en ese país el índice de empleos generados oscila entre 24-62 empleos hm^{-3} en la producción de hortalizas y frutales, mientras que la producción de cultivos en invernadero generan hasta 190 empleos hm^{-3} .

La variable Y_9 indica la productividad horaria, es decir; la cantidad de horas de trabajo que se invierten por toneladas de forraje. De este análisis se observa que en promedio la productividad horaria fue de 2,28 $h t^{-1}$ como promedio para el grupo de forrajes, lo que indica que para producir una tonelada de forraje en promedio se requieren invertir 2,28 horas de trabajo. Asimismo se determinó que el cultivo que resultó más eficiente en términos de productividad horaria fue la alfalfa (2,22 $h t^{-1}$), mientras que el menos productivo fue el de avena, con 6,44 $h t^{-1}$.

De acuerdo con (Dorward, A., 2013), existen otras dos formas de expresar la productividad laboral, para los indicadores estructurales, pudiendo ser medida por el Producto Interno Bruto (PIB) generado en relación con el número de personas empleadas, por el número de horas trabajadas. Así, se determinó que cada trabajador dedicado a la producción de forraje en promedio agregó al PIB de esa cadena productiva US\$ 8,501 de ganancia por año, determinándose que el trabajador dedicado a producir alfalfa fue el más productivo, al generar US\$ 14,028 de ganancia. Estos índices se encuentran estrechamente relacionados con la cantidad de forraje producido y al precio en el mercado del producto. A este respecto existe una discusión generalizada sobre la productividad agrícola vista como productividad laboral, ya que generalmente se utilizan indicadores implícitos o explícitos relacionados con la productividad del cultivo. En este sentido se determinó que la ganancia por hora de trabajo invertida (Y_{11}), en promedio para la producción de forrajes es de US\$ 4,6 h^{-1} , siendo el cultivo de alfalfa el más eficiente al generar US\$ 6,1 h^{-1} , en comparación con los demás cultivos forrajeros.

La variable Y_{12} muestra que bajo las mismas condiciones de cultivo, así como de mercado, la cantidad mínima que se requiere producir para tener una operación viable (punto de equilibrio) es de 39,02 $t ha^{-1}$ en promedio para el DR-017, 43,89 $t ha^{-1}$ en alfalfa forrajera, 56,53 $t ha^{-1}$ en rye grass y de 31,64 $t ha^{-1}$ en maíz forrajero. Tomando en consideración la producción obtenida en cada uno de los cinco forrajes, el cultivo de avena forrajera y rye grass se ubicaron por debajo del punto de equilibrio, con 21,3 $t ha^{-1}$ y 30,4 $t ha^{-1}$, respectivamente, lo que los ubica como ineficientes económicamente.

Por otro lado, los cultivos de alfalfa, maíz forrajero y sorgo forrajero se ubicaron por encima del punto de equilibrio, resultando ser ampliamente productivos, con $80,31 \text{ t ha}^{-1}$, $46,55 \text{ t ha}^{-1}$ y $48,65 \text{ t ha}^{-1}$ respectivamente.

La variable Y_{13} , evalúa la vulnerabilidad crediticia del cultivo, desde la perspectiva de cuántas veces cubre el rendimiento físico por hectárea al punto de equilibrio. De esa forma, la tabla 1 indica que en el caso de la alfalfa, el rendimiento físico por hectárea ($80,31 \text{ t ha}^{-1}$), alcanzó a cubrir 1,83 veces las $43,89 \text{ t ha}^{-1}$ que tuvo como punto de equilibrio, lo cual señala que el cultivo tuvo una Relación Beneficio/Costo igual a 1,83. Mientras que cultivos como el de avena forrajera y rye grass obtuvieron índices de 0,62 y 0,54 respectivamente, lo que los señalaría como cultivos no rentables económicamente.

Análisis de posibles escenarios sobre el patrón de cultivos en la Comarca Lagunera

Los cultivos de maíz, sorgo y alfalfa forrajera mostraron indicadores de eficiencia y productividad del agua superiores en relación con los determinados en los cultivos de avena forrajera y el rye grass, por lo que, posterior al análisis de la huella hídrica se plantearon las siguientes interrogantes ¿Qué impacto se tendría sobre la huella hídrica si el patrón agrícola de forrajes estuviese compuesto exclusivamente de maíz y sorgo forrajeros? y ¿qué pasaría si en la región analizada solo se cultivara alfalfa? Para responder tales cuestionamientos se evaluaron dos posibles escenarios.

Escenario 1: Patrón de cultivos conformado por maíz y sorgo forrajero

En el escenario 1 se evaluó el efecto que se tendría si en la Comarca Lagunera solo se cultivara maíz y sorgo forrajero (en la misma proporción que actualmente ostentan: 1,524 ha de maíz por cada 1,00 ha de sorgo), determinándose que este escenario sería más benigno que el actual, al emplearse solamente el 53% del volumen de agua actualmente empleado al pasar de $1,038.1 \text{ Mm}^3$ a 546 Mm^3 , lo que impactaría sobre la producción física anual, misma que descendería 16% (de 4,126 millones a 3,45 millones de toneladas de forraje), lo que provocaría que el Valor Bruto de la Producción forrajera descendería US\$ 3,4 millones (al pasar de US\$ 137,8 a US\$ 134,4), es decir; la masa de ganancia producida regionalmente, sería 97,5% igual a la situación actual, por lo que no habría variación significativa en la generación de riqueza. En cuanto a la huella hídrica del grupo forrajero, en la tabla 2 (pág. 104) se muestra que la huella hídrica se reduciría de 252 L kg^{-1} a 158 L kg^{-1} , lo que implicaría que la productividad del metro cúbico se elevaría de $3,98 \text{ kg m}^{-3}$ a $6,32 \text{ kg m}^{-3}$.

En términos económicos, la huella hídrica disminuiría 40%, implicaría que de 24,220 L que se requieren para producir US\$ 1 de ganancia, bajo este escenario solo se demandarían 14,433 L, es decir; no solo se incrementaría la productividad física del agua de riego con esta modificación en el patrón de cultivos, también se elevaría 68% la productividad económica del agua, ya que la ganancia por metro cúbico incrementaría de US\$ 0,04 m^{-3} a US\$ 0,069 m^{-3} .

En el ámbito social el número de empleos permanentes disminuiría 9% (al pasar de 4,975 empleos a 4,506 empleos permanentes).

Table 2: Evaluación de dos posibles escenarios y sus efectos sobre la huella hídrica azul de la Comarca Lagunera.
Table 2: Evaluation of two possible scenarios and their effects on the blue water footprint of the Laguna Region.

Variable	ESCENARIO 1			ESCENARIO 2		SITUACIÓN ACTUAL	Diferencias en términos absolutos		Escenario 1 / Situación actual	Escenario 2 / Situación actual
	Establecimiento de maíz y sorgo forrajero			Establecimiento exclusivamente de alfalfa			Escenario 1 menos Situación actual	Escenario 2 menos Situación actual		
	Maíz forrajero	Sorgo forrajero	TOTAL							
Superficie (ha)	43,971	28,849	72,820	72,820		72,820	0	1,0	1,0	
Rendimiento (t ha ⁻¹)	46,55	48,65	47,38	80,31		56,67	- 9,29	0,84	1,42	
Producción (t)	2,046,849	1,403,510	3,450,359	5,848,182		4,126,616	- 676,257	0,84	1,42	
Precio/ton (US\$ t ⁻¹)	41	35		31						
Costo/ha (US\$ ha ⁻¹)	1,356	1,278		1,351						
Jornales ha ⁻¹	18	18		22						
Lámina de riego (mm)	0,75	0,75		2						
Volumen de agua (Mm ³)	330	216	546	1,311		1,038	-492	0,53	1,26	
VBP (Millones de dólares US\$)	\$ 84,90	\$ 49,4	\$ 134,4	\$ 179,9		\$ 137,8	-\$ 3,45	0,975	1,306	
Costo global (Millones de dólares US\$)	\$ 59,6	\$ 36,9	\$ 96,5	\$ 98,3		\$ 94,9	\$ 1,57	1,017	1,036	
Ganancia global (Millones de dólares US\$)	\$ 25,3	\$ 12,6	\$ 37,8	\$ 81,6		\$ 42,9	-\$ 5,02	0,883	1,904	
Relación Beneficio- Costo	1,42	1,34	1,45	1,83		1,45				
Nº de empleos permanentes	2,690	1,816	4,506	5,631		4,975	- 469	0,91	1,13	
Indicadores de Huella hídrica a nivel de todo el grupo forrajero										
L kg ⁻¹			158	224		252	- 93	0,63	0,89	
Kg m ⁻³			6,32	4,46		3,98	2,34	1,59	1,12	
L por US\$ 1 de ganancia			14,433	16,064		24,220	- 9,787	0,60	0,66	
Ganancia US\$ m ⁻³			\$ 0,069	\$ 0,062		\$ 0,04	\$ 0,028	1,68	1,51	

Fuente: Elaboración propia.
 Source: Own elaboration.

Sin embargo aún cuando se observó tal disminución, se debe considerar que la sustentabilidad considera tres elementos interrelacionados: ambiental, económico y social, por lo que; se concluyó que este escenario mostró indicadores de sustentabilidad superiores a los determinados en el contexto actual, lo que favorece a este escenario en términos de eficiencia física y de productividad económica. Este escenario indica que de modificarse el patrón de cultivos forrajeros actual, y estableciendo exclusivamente maíz y sorgo forrajero se disminuiría la presión que ejerce el patrón actual sobre los recursos hídricos de la Comarca Lagunera.

Escenario 2: Patrón de cultivos conformado exclusivamente por alfalfa forrajera

En este escenario se consideró que la superficie total actualmente cosechada de 72, 820 ha fuera establecida exclusivamente de alfalfa forrajera, el volumen de agua se elevaría 26% al pasar de 1,038 Mm³ a 1,311 Mm³, lo que implicaría que la producción física se elevaría en 42% (al pasar de 4.126 a 5.848 millones de toneladas de forraje), y que de mantenerse el precio del forraje, incrementaría el Valor Bruto de la Producción forrajera en 30,6%, mientras que las ganancias se elevarían en 90,4%, asimismo el empleo crecería 13%.

Aún cuando aquí se evalúa esta posibilidad como un segundo escenario, en la práctica, durante los últimos 30 años este cultivo ha ido desplazando a otros cultivos entre los que se encuentran los hortofrutícolas y los oleaginosos, ocupando actualmente cerca del 40% del patrón agrícola regional. Sin embargo habría que considerar que es un cultivo con uso consuntivo del agua alto en una zona árida en la que se tiene apenas 240mm anuales de precipitación.

Bajo este contexto, la huella hídrica se reduciría de 252 L kg⁻¹ a 224 L kg⁻¹, lo que implicaría que la productividad física incrementaría 12% (al pasar de 3,98 Kg m⁻³ a 4,46 kg m⁻³). Por otro lado la eficiencia económica muestra que de los 24.220 L que actualmente se requieren para producir US\$1 de ganancia se reduciría a 16.064 L. Asimismo se determinó que la productividad económica del agua se elevaría 51%, al pasar de US\$ 0,04 m⁻³ a US\$ 0,062 m⁻³ (tabla 2, pág. 104).

CONCLUSIÓN

El agua es un recurso primordial en las zonas áridas y semiáridas de México, en tanto que su aporte limita la producción de la agricultura. Sin embargo, en este estudio se observó que el precio real del agua es muy bajo en relación con otras zonas agrícolas del mundo. La determinación de índices de productividad física y monetaria pueden ser empleados como indicadores de eco-eficiencia, rendimiento y presión sobre el medio ambiente.

Se logró el objetivo del estudio al determinar la huella hídrica azul de los cultivos forrajeros de la Comarca Lagunera, encontrándose que la eficiencia y productividad del agua en cultivos como el maíz y el sorgo forrajero producido en el DR-017 Comarca Lagunera, fueron altos tanto en términos productivos como socio-económicos, en relación con el cultivo de alfalfa, lo que los promueve como opción de cultivos orientados a elevar la productividad del agua en la región.

Asimismo de acuerdo con el análisis de los posibles escenarios se concluye que si el patrón forrajero de la Comarca Lagunera se estableciera únicamente con maíz y sorgo forrajeros, la presión sobre los recursos hídricos disminuiría, además de que la producción de forraje se mantendría y el empleo no se vería considerablemente afectado.

BIBLIOGRAFÍA

1. AgroDer. 2012. Huella hídrica en México en el contexto de norteamérica. WWF (World Wide Fund for Nature) México y AgroDer. México DF. Disponible en: <http://www.huellahidrica.org/Reports/> (last acceded February 20, 2014).
2. Al-Karaki, G.; Al-Hashimi, M. 2012. Green fodder production and water use efficiency of some forage crops under hydroponic conditions. International Scholarly Research Network ISRN Agronomy. 12: 1-5.
3. Cruz, A.; Levine, G. 1998. El uso de las aguas subterráneas en el Distrito de Riego 017, Región Lagunera, México. IWMI, Serie Latinoamericana: No. 3. Disponible en http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/Latin_American_Series/pdf/3.pdf/ (last acceded January 02, 2014).
4. De la Cruz, E.; Gutiérrez, E.; Palomo, A.; Rodríguez, S. 2003. Amplitud combinatoria y heterosis de líneas de maíz en la Comarca Lagunera. Revista Fitotecnia Mexicana. 26(4): 279-284.
5. Dorward, A. 2013. Agricultural labor productivity, food prices and sustainable development impacts and indicators. Food Policy. 39: 40-50.
6. García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la república mexicana. UNAM. México, DF. 246 p.
7. García, G. J.; Contreras, L. F.; Usai, D.; Visani, C. 2013. Economic assessment and socio-economic evaluation of water use efficiency in artichoke cultivation. Open Journal of Accounting. 2(2): 45-52.
8. García, S. J.; Guzmán, S. E.; y Fortis, H. M. 2006. Demanda y distribución del agua en la Comarca Lagunera. Agrociencia. 40: 269-276.
9. Gleick, P. H. 2004. Global freshwater resources: Soft-path solutions for the 21st century. Science. 302: 1524-1528.
10. Godoy, A. C.; Pérez, G. A.; Torres, E. C. A.; Hermosillo, I. J.; Reyes, J. L. 2003. Uso de agua, producción de forraje y relaciones hídricas en alfalfa con riego por goteo subsuperficial. Agrociencia. 37(2): 107-115.
11. Hashim, M. A. A.; Al-Dosari, S. A.; Asl-Gaadi, V. C.; Patil, E. H. M.; Rangaswamy, T. A.; Samdani, M. A. 2012. Determination of water requirement and crop water productivity of crops grown in the Makkah Region of Saudi Arabia. Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 6(9): 196-206.
12. Hoekstra, A. Y. 2006. The global dimension of water governance: Nine reasons for global arrangements in order to cope with local water problems. Value of Water Research Report Series N° 20. UNESCO-IHE, Delft, Netherlands. Disponible en: http://www.waterfootprint.org/Reports/Report_20_Global_Water_Governance.pdf/(last acceded May 20, 2014).
13. Hoekstra, A. Y. 2008. Water neutral: Reducing and offsetting the impacts of water footprints. Value of Water Research Report Series No 28, UNESCO-IHE, Delft, Netherlands. Disponible en: <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report28-WaterNeutral.pdf/> (last acceded May 22, 2014).
14. Hoekstra, A. Y. 2009. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. Ecological Economics. 68(7): 1963-1974.
15. Hoekstra, A. Y.; Chapagain, A. K. 2007. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. Water Resources Management. 21(1): 35-48.
16. Hoekstra, A. Y.; Chapagain, A. K.; Aldaya, M.; Mekonnen, M. M. 2011. The water footprint assessment manual setting the global standard. Earthscan, London, UK. 227p.
17. Hussain, I.; Turrall, H.; Molden, D.; Ahmad, M. 2007. Measuring and Enhancing the Value of Agricultural Water in Irrigated River Basins. Irrigation Science. 25(3): 263-282.
18. Kijne, J. W.; R. Barker; Molden, D (eds.) 2003. Water productivity in agriculture: Limits and Opportunities for Improvement. CABI Publication, Wallingford UK. 332p.

19. Lorite, I. J.; García, V. M.; Carmona, M.; Santos, A. A.; Soriano, M. A. 2012. Assessment of the irrigation advisory services, recommendations and farmers. *Irrigation Management: A Case Study in Southern Spain. Water Resources Management.* 26(8): 2397-2419.
20. Mekonnen, M. M.; and Hoekstra, A. Y. 2010. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat. *Hydrology and Earth System Sciences.* 14: 1259-1276.
21. Montemayor, J. A.; Aguirre, H. W.; Fortis, M.; Olague, J.; Rodriguez, J. C.; Chavarria, J. 2006. Uso del agua en la alfalfa (con riego sub superficial II). *Semana Internacional de Agronomía. Universidad Juárez del Estado de Durango. Facultad de Agricultura y Zootecnia – UJED. Venecia. Gómez Palacio Durango, México.* 75: 47-53.
22. Núñez, H. G.; Chew, Y. I.; Reyes, J. I. 2000. Producción y utilización de la alfalfa en la zona norte de México. GHJ editores. Libro técnico No.2. SAGARPA-INIFAP.CIRNOC.CELALA. Matamoros, Coahuila, México. 171 p.
23. Pimentel, D.; Berger, B.; Filiberto, D.; Michelle, N.; Wolfe, B.; Karabinakis, E.; Clark, S.; Poon, E.; Abbett, E.; Nandagopal, S. 2014. Water resources: Agricultural and environmental issues. *Bioscience* 54(10): 909-918.
24. Romero, A. P.; García, G. J.; Botía, O. P. 2006. Cost-benefit analysis of a regulated deficit-irrigated almond orchard under subsurface drip irrigation conditions in south-eastern Spain. *Irrigation Science.* 24(3): 175-184.
25. SAGARPA, 2012. Anuarios estadísticos de la producción agropecuaria. Región Lagunera. SAGARPA. Coahuila-Durango, Cd. Lerdo, Dgo., México. 167p.
26. Salazar, S. E.; Trejo, E. H. I.; Vázquez, V. C.; López, M. J. D. 2007. Producción de maíz bajo riego por cintilla, con aplicación de estiércol bovino. *Python* 76:169-185.
27. SIAP, 2009. Anuarios estadísticos de la producción agropecuaria. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. SAGARPA-SIAP. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/> / (last accessed May 30, 2014).
28. Takele, E.; Kallenbach, R. 2001. Analysis of the impact of alfalfa forage production under summer water - limiting circumstances on productivity, agricultural and growers returns and plant stand. *Journal of Agronomy and Crop Science.* 187: 41-46.
29. UN-Water, 2012. The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under uncertainty and risk. *World Water Assessment Programed (WWAP).* Unesco, Paris, France. 861 p.
30. Vázquez, V. C.; García, H. J. L.; Murillo, A. B.; Orona, C. I.; Zúñiga, T. R.; Rueda, P. E. O.; Preciado, R. P. 2010. Rendimiento y valor nutritivo de forraje de alfalfa (*Medicago sativa* L.) con diferentes dosis de estiércol bovino. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias.* 1(4): 363-372.