

Estimación de la huella hídrica para la producción de leche en Tunja, Boyacá

Water footprint estimation from milk production in Tunja, Boyacá

Fecha de recepción: 13 de marzo de 2017
Fecha de aprobación: 23 de mayo de 2017

Emma Sofía Corredor-Camargo¹
Edisson Stiven Castro-Escobar²
Edwin Manuel Páez-Barón³

DOI: <http://doi.org/10.19053/01228420.v14.n2.2017.7144>

Resumen

Se evaluó el impacto de la producción lechera sobre el agua, estimando la Huella Hídrica (HH) en este sistema productivo. Se empleó el enfoque de la Water Footprint Network en 28 fincas del municipio de Tunja (Boyacá), mediante un muestreo no probabilístico discrecional. La HH verde se calculó utilizando el programa CROPWAT; para identificar la HH azul se tuvo en cuenta el agua consumida, la pérdida por transpiración y la incorporada al producto; la HH gris se enfocó en la contaminación por nitrógeno. La HH estimada fue de 2.007,8 l/kg, que se encuentra por encima de la media global (790 a 1.087 l/kg leche); con alto impacto de la HH verde (99,3 % de la HH total), representada en el uso de forraje como alimento básico y en el alto índice de presión hídrica en la zona. La HH azul (7,0 l/kg leche) no tiene impacto significativo. Aunque la HH gris (6,7 l/kg leche) representa un porcentaje mínimo del total, tiene gran impacto, ya que produce contaminación del recurso hídrico. En relación con el proceso productivo, se encontró que la carga animal y el porcentaje de vacas en ordeño explican el 31 % y el 36 %, respectivamente, de las variaciones en la HH total.

Palabras clave: agua virtual; Huella Hídrica (HH); impacto ambiental; producción bovina.

1 M. Sc. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (Tunja, Colombia). emma.corredor@unad.edu.co. ORCID: 0000-0002-4214-7276.

2 M. Sc. Universidad de Manizales (Manizales, Colombia). ecastro@umanizales.edu.co. ORCID: 0000-0002-7798-5050.

3 Ph. D. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (Tunja, Colombia). edwin.paez@unad.edu.co. ORCID: 0000-0002-0237-2217.

Abstract

The milk production impact on water natural mechanism was evaluated, by estimating the Water Footprint (WFP) in this productive system. The Water Footprint Network approach was used in 28 Tunja City (Boyacá, Colombia) farms, through a discretionary none probabilistic sampling. The green WFP was calculated using the CROPWAT program; to identify the blue WFP was taken into account the water consumed, the loss by transpiration and the other one incorporated to the product. The gray WFP was focused on the contamination by Nitrogen.

The estimated WFP was 2,007.8 l/kg, being almost double above the global average (790 to 1,087 l/kg milk); with high impact of the green WFP (99.3 % of the total WFP), represented in the forage use as a staple food and the high-water pressure index in the area. The blue WFP of 7.0 l/kg milk has no significant impact. Although gray WFP of 6.7 l/kg milk represents a total minimum percentage, it has a great impact since it produces water resource contamination. In relation to the productive process, it was found that the animal load and the milking cows percentage account for 31 % and 36 %, respectively, of the total WFP variations.

Keywords: environmental impact; livestock production; virtual water; water footprint.

Como citar:

Corredor-Camargo ES., Castro-Escobar ES., Páez-Barón EM. Estimación de la huella hídrica para la producción de leche en Tunja, Boyacá. *Rev. Cien. Agri.* 2017; 14(2): 7-17.

I. Introducción

Durante los últimos años se ha incrementado el interés y la preocupación por los recursos naturales, con motivo del grave y rápido deterioro observado por el uso desmedido de ellos y las pocas medidas implementadas en favor de su conservación. El crecimiento poblacional y el excesivo uso de recursos han traído consigo grandes efectos en el planeta, tales como las variaciones en la cantidad y calidad del agua, pérdida de grandes áreas de bosques y zonas naturales (1).

Lo anterior ha llevado a buscar e implementar técnicas que permitan medir el impacto de las actividades desarrolladas por el ser humano y su influencia en el medioambiente. Una de estas técnicas de cuantificación es la Huella Hídrica (HH), un indicador multisectorial, geográfica y temporalmente explícito, resultante de la evolución del concepto de agua virtual y de la gestión en la demanda de agua (2).

Para establecer los componentes específicos de la HH, Hoekstra (3) elaboró una relación entre los usos directos e indirectos del recurso hídrico y los colores del agua. El color azul representa el consumo de los cuerpos de agua dulce superficial (ríos, lagos, etc.) y subterránea, incluyendo el consumo como extracción, de tal manera que si regresa intacta, en un tiempo breve, a la fuente de la que se tomó, no se tiene en cuenta en la estimación, ya que su uso es no consuntivo, y se calcula con base en el agua evapotranspirada, el agua incorporada y la que no retorna al sistema (4). El color verde se refiere al consumo de agua lluvia almacenada en el suelo y la vegetación. Tanto la HH azul como la verde se relacionan con la evapotranspiración o la integración al producto (leche o cárnicos), y la gris, con el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar la carga de contaminación, al sobrepasar las concentraciones naturales del lugar y la calidad del recurso hídrico; siempre teniendo en cuenta que la HH es un indicador diferenciado geográfica y temporalmente, así que no se refiere únicamente al volumen del agua contaminada, sino que va más allá e incluye el lugar donde ocurre (3).

Los cambios en la estructura demográfica y en el uso del suelo, generados por la expansión ganadera, llevaron a una división de sistemas bosque-agricultura-ganadería, lo que impactó el ciclo hidrológico, ya que el bosque tiene un importante papel como hidrorregulador, antierosivo e hidrotector (5, 6). La distribución en el uso del agua en la ganadería está dada, principalmente, por la consumida en forma libre y la ingerida de manera indirecta a través de los alimentos, especialmente en la producción de forrajes (7). Este recurso procede del agua lluvia y del riego, siendo este un uso consuntivo, ya que el agua es extraída de la fuente original y no regresa totalmente en la misma calidad o cantidad (4). La evapotranspiración es la pérdida de vapor de agua a través de las hojas de la planta, junto a la que se evapora directamente del suelo (7), en tal sentido, es la vía más importante por la cual la producción de forraje genera detrimento del agua.

Por otra parte, en las ganaderías se producen aguas residuales que pueden generar impactos ambientales, enmarcados en la competencia por el uso del agua y la carga contaminante sobre el medioambiente. En cuanto a la contaminación dentro de la etapa predial, sin tener en cuenta la industrial, estos residuos están constituidos por la mezcla de heces, orina y agua de higiene, siendo necesario destacar nuevamente el papel de las excretas, que contienen contaminantes minerales, bacterias y otros patógenos, además de residuos de medicamentos, hormonas y metales pesados, lo que resulta en un riesgo para la salud humana y animal. Es fundamental tener en cuenta que la eutrofización de los cuerpos de agua y la carga patógena y residual varían de acuerdo con el sistema de alimentación y el manejo que se le da al estiércol y a los purines en general (8).

La media global de HH para la producción de leche es de 790 a 1.087 l/kg para la HH verde y de 49 a 82 l/kg para la HH azul; sin embargo, el valor de la HH difiere de acuerdo con factores intrínsecos del producto, como el contenido de grasa en la leche (9), la tipología del sistema (10), el tipo de alimentación, el sistema de riego, el área destinada para forrajes y las variables climáticas (11, 7).

II. Materiales y métodos

El alcance de esta investigación se basó en la estimación de la HH y en el análisis de los datos obtenidos en el contexto local. El tipo de investigación fue un estudio de caso a través de un análisis descriptivo y cuantitativo de 28 sistemas de producción bovina, ubicados en el municipio de Tunja, en el departamento de Boyacá. La selección de las unidades se realizó a través de un muestreo no probabilístico discrecional, teniendo en cuenta que fueran pequeños sistemas productivos. La caracterización de las fincas se realizó a través de la consulta de fuentes primarias, y se agruparon según los componentes empleados en el desarrollo de sus actividades; esto se efectuó a través de la aplicación de una encuesta que incluyó en el instrumento las siguientes seis categorías: caracterización de la finca, instalaciones agropecuarias, composición de la ganadería, manejo del suelo, información forestal y recurso hídrico.

A partir de la información obtenida se empleó el enfoque de la Water Footprint Network (12) de la siguiente manera: para la HH verde directa se utilizó el programa CROPWAT, basado en el método de la FAO Penman-Monteith para determinar la evapotranspiración de referencia de los cultivos (ET_o). Los datos climáticos tenidos en cuenta fueron: temperatura mínima, temperatura máxima, humedad, viento e insolación, los cuales se obtuvieron de la estación meteorológica ubicada en la granja experimental Tinguavita, en Paipa (Boyacá), mediante la base de datos Climwat 2.0. Los datos adicionales incluidos en el Software fueron el tipo de suelo mediano y el forraje como cultivo principal.

Para estimar la HH azul directa se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos: el agua evaporada, con base en el agua bebida por los animales, correspondiente al 10 % del peso corporal, de la cual el 20 % se evapora por transpiración y vapor de excretas; y el agua incorporada al producto, en este caso a la leche, correspondiente al 87 % de la producción. La estructura de cálculo es la siguiente:

$$HH_{\text{azul}} = \text{Agua azul evaporada} + \text{Agua azul incorporada}$$

Para determinar la HH gris directa se estimó el nitrógeno lixiviado, a partir de la concentración en excretas, y el uso de fertilizantes, sobre su concentración de referencia de 10 g/m³, según la WFN (12). El algoritmo de cálculo es el siguiente:

$$HH_{\text{gris}} = \text{N lixiviado de excretas} + \text{N lixiviado de fertilizantes}$$

Para estimar la HH indirecta se calculó la correspondiente al suministro de alimento balanceado comercial (concentrado), asumiendo que los principales constituyentes son cascarilla de arroz y maíz. Considerando la HH reportada para estos productos por Mekonnen y Hoekstra (13), se estimó la HH para el alimento balanceado comercial, dato que fue utilizado para el estudio de caso en cada unidad productiva. Finalmente, y después de obtener la estimación de la HH total y discriminada en la verde, azul y gris directas e indirectas, se realizó un análisis de la correlación entre los datos obtenidos de las Huellas Hídricas con los procesos productivos.

Para determinar el aporte del conjunto de factores que explican la HH total se realizó una modelación econométrica, teniendo en cuenta las variables más importantes que integran la HH, y el modelo se validó por Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) para establecer las variables que hacían más robusta la estimación.

III. Resultados y discusión

A. Composición y manejo de la ganadería

La estructura de las fincas muestreadas se basa en minifundios o pequeñas unidades productivas, cuyas áreas van de 1 a 10 ha (con una media de 4 ha); en total, el área de estudio fue de 113 ha, de las cuales el 81.4 % se encuentran destinadas a la producción de forraje; el 14.6 %, a la producción agrícola, y el 4 %, al área forestal, es decir, esta última representa el componente de menor participación en la parte integral de la fincas.

El número de bovinos en las unidades muestreadas fue de 281, clasificados por edad, sexo y etapa productiva: 130 vacas en producción (media de 4,8 por finca), 39 vacas secas (media de 1,4 por finca), 76 terneras o terneros (media de 2,7 por finca), 30 novillas de vientre (media de 1,0 por finca) y 6 machos (media de 0,2 por finca). En cuanto a las razas utilizadas, se relacionaron así: Normando, 129; Holstein, 80; Ayrshire, 23; Criollo, 23, y otras razas y cruces, 20.

B. Manejo del suelo, residuos y recurso hídrico

En referencia a los sistemas de pastoreo implementados en las unidades productivas se observó que el 80 % de estas implementan un sistema de pastoreo rotacional, y el 20 %, un manejo de los animales con estaca. El 100 % de las unidades utilizan como alimentación principal el forraje, teniendo al kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) como principal representante, con el 85 % del suministrado a los animales, y el 15% restante corresponde a forrajes mejorados, predominando en estos el raigrás (*Lolium multiflorum*). Solamente una de las fincas cuenta con análisis de suelo, por lo que en las demás no se conocen con exactitud los requerimientos minerales para el establecimiento y desarrollo de las praderas; sin embargo, el 100 % de las unidades utilizan fertilizantes nitrogenados de origen sintético, con frecuencia de una o dos veces al año, en cantidades que dependen de la formulación del producto, mientras que el uso de fertilizantes orgánicos está centrado en la gallinaza, utilizada únicamente en tres de las unidades productivas, y de manera adicional a los fertilizantes químicos.

Con respecto a la eficiencia productiva, el promedio es de 4.454,4 l/ha/año, que es inferior al reportado por Delgado y Franco (14), de 5.361 a 7.919 l/ha/año, para producciones especializadas ubicadas en la Sabana de Bogotá. En cuanto al uso de alimento balanceado comercial, se identificó que la mayor parte de las fincas no lo utilizan en el sistema nutricional de los animales; solamente el 35,7 % de las unidades productivas lo suministran, teniendo un uso promedio de 834,3 kg/año. Para las fincas que no utilizan alimentos complementarios se estima que la HH indirecta es nula.

Para el análisis de la fertilización se tuvo en cuenta la cantidad de nitrógeno empleado en cada unidad productiva (kg/ha/año); los cálculos se basaron en las diversas concentraciones de los fertilizantes químicos, en la frecuencia de aplicación (de una o dos veces al año) y en las cantidades aplicadas/ha, que dependen de la formulación del producto. El promedio de nitrógeno utilizado fue de 219,6 kg/ha/año; no fue posible incluir en la cuantificación el nitrógeno proveniente de la gallinaza utilizada en las unidades productivas como fertilización adicional a la fertilización química, ya que los propietarios no conocían la cantidad exacta aplicada.

C. Estimación de la Huella Hídrica

La precipitación efectiva (PE) para el pasto por año se identificó en 636,2 mm; constante que fue aplicada a cada sistema productivo acorde con el área de producción de forraje. La HH verde directa tuvo un promedio de 1.943,2 l/kg leche por finca; la indirecta, de 50,8 l/kg leche por finca, y la suma de estas para la zona fue de 1.994 l/kg leche por finca; nueve de las unidades productivas sumaron el 59,8 % de la HH verde estimada. Por otra parte, la estimación de la HH azul directa fue de 3,5 l/kg leche; la de la HH azul indirecta, de 3,5 l/kg leche, y la sumatoria de las dos para la zona fue de 7,0 l/kg leche por finca; el valor de HH azul fue mayor del promedio en 11 de las 28 fincas, con una acumulación del 67,56 % del total de HH azul estimada.

La estimación de la HH gris directa fue de 1,3 l/kg leche; esta se basó en la cantidad de nitrógeno lixiviado a partir de la producción de excretas y de los fertilizantes utilizados; aunque no se tuvo en cuenta la gallinaza utilizada como fertilizante, ya que no se conoce la cantidad de producto suministrado por ha, se evidencia que se aplica de manera adicional al fertilizante químico, lo cual ejerce el efecto contrario del objetivo de los abonos orgánicos. La HH gris indirecta tiene un promedio de 5,3 l/kg leche. La HH gris total para la zona tiene un promedio de 6,7 l/kg leche por finca. El valor es mayor del promedio en 11 de las 28 fincas, con una acumulación del 88,95 % del total de HH gris de la muestra.

La HH total, resultado de la sumatoria de los colores del agua estimados para la muestra, es de 2.007,8 l/kg leche por finca. Se evidencia en la Figura 1 que el mayor porcentaje corresponde a la HH verde (99,32 %), superando ampliamente a la azul (0,35%) y a la gris (0,33%). De acuerdo con estos resultados, la HH verde estimada se encuentra por encima de la media global (790 a 1.087 l/kg leche) calculada por Mekonnen y

Hoekstra (13). Su alto porcentaje concuerda con investigaciones en las que se aproxima al 98 % de la HH total, como las desarrolladas por Alvarenga *et al.* (14), Mekonnen y Hoekstra (9) y Sánchez *et al.* (7). Se evidencia, además, que del valor de la HH verde, el correspondiente a la directa tiene la mayor contribución, con un promedio de 1.943,2 l/kg leche.

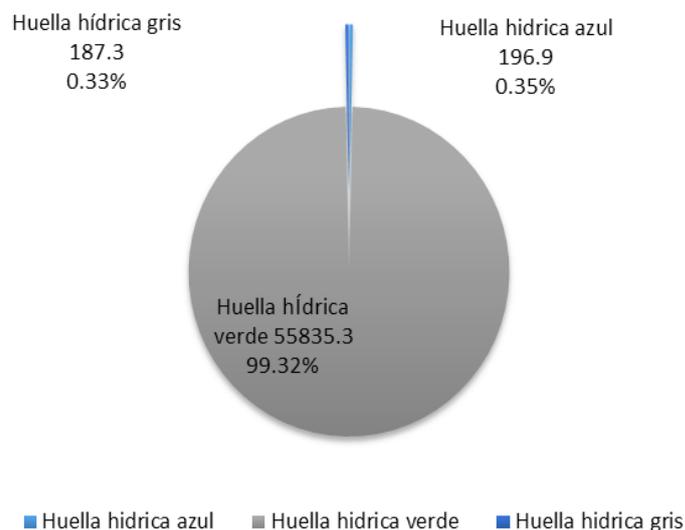


Fig. 1. Porcentajes de los colores del agua en la huella hídrica total/litro de leche.

Este hallazgo se soporta en el tipo de alimentación ofrecida a los animales, basada en el forraje; en tal sentido, la HH verde indirecta generada por el suministro de alimento balanceado comercial en estas fincas no es relevante. De acuerdo con Mekonnen y Hoekstra (13), la HH de productos de origen animal se relaciona con el agua empleada para la alimentación, siendo menor la eficiencia en la conversión alimenticia en aquellos sistemas basados en pastoreo, lo que explicaría la baja producción de leche en las unidades muestreadas. La HH azul aporta un mínimo porcentaje a la HH total, lo cual se debe, en gran parte, a que las unidades productivas no utilizan riego; la HH directa y la HH indirecta son equitativas, con un promedio cada una de 3,5 l/kg leche, según lo planteado por Hendy *et al.*, citados por Mekonnen y Hoekstra (9). En general, la HH azul de los

alimentos balanceados comerciales es 43 veces mayor que la correspondiente a los forrajes; en este caso en particular, esta relación no se da, debido al bajo suministro de alimento balanceado comercial. Aunque la HH gris representa un porcentaje mínimo del total, su impacto es alto, ya que se relaciona con la contaminación del recurso hídrico; en este caso en particular, con la cantidad de nitrógeno procedente del uso de fertilizantes de manera subjetiva, sin que exista un análisis de suelo que lo justifique.

D. Parámetros productivos vs. Huella Hídrica estimada

1) Eficiencia productiva vs. Huella Hídrica: Al realizar el análisis de relación entre la producción de litros por ha/año y la HH verde, se obtiene

una correlación negativa, con un coeficiente de -0,43; mientras que al contrastarla con la HH azul estimada, se evidencia una correlación positiva baja, con un coeficiente de 0,28. Con respecto a la HH gris, la correlación es positiva, con un coeficiente de 0,18, y con la HH total estimada se evidencia un coeficiente de -0,43; esta correlación negativa refleja que hay una tendencia de relación entre la baja eficiencia en estos sistemas productivos y un mayor impacto sobre el recurso hídrico, debido particularmente al aporte que hace la HH verde y a la correlación negativa existente entre las dos variables; en tal sentido, el impacto en este caso se genera por la competencia por el uso del suelo como recurso ecosistémico y por la baja eficiencia de él para la producción de forraje. Las fincas que están por encima de la media en

eficiencia productiva tienen un menor aporte a la HH total estimada.

2) Carga animal vs. Huella Hídrica: Al relacionar la carga animal con los colores de la HH estimada se evidencia una correlación negativa con la HH verde, de -0,33; mientras que con la HH azul la correlación negativa tiende a cero (0,002) y con la HH gris fue de 0,11. Esto se ve reflejado en la HH total estimada, con correlación negativa de -0,33. En la Figura 2 se evidencia una correlación entre el aumento de la carga animal y la disminución de la HH total. Los resultados obtenidos muestran que la baja eficiencia del área utilizada para la producción de leche por número de animales genera mayor impacto sobre la cantidad y la calidad de agua. Las fincas que están por encima del promedio en la carga animal/ha generan menor aporte a la HH, debido a este parámetro productivo.

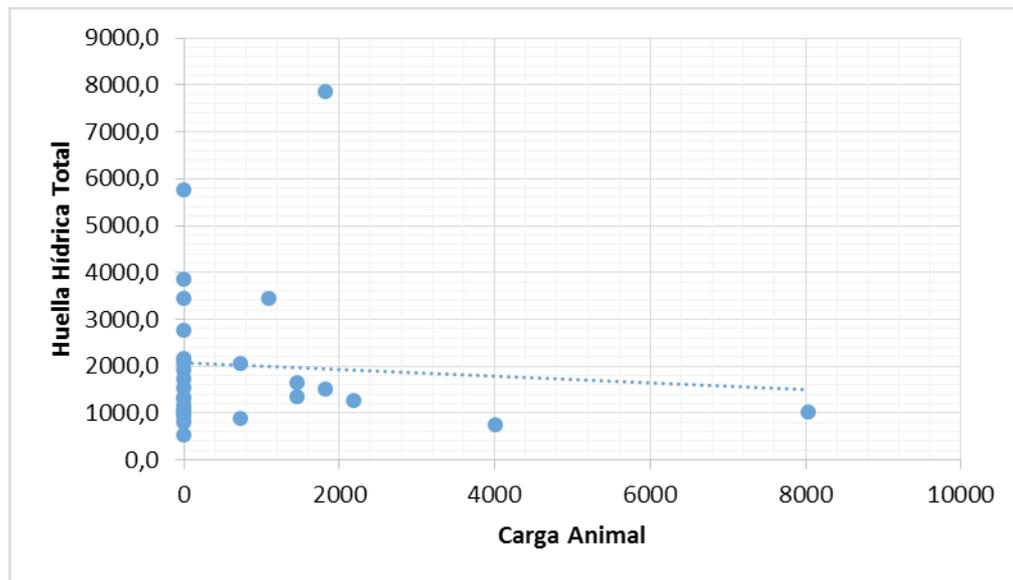


Fig. 2. Carga animal vs. huella hídrica.

3) Uso de fertilizantes vs. Huella Hídrica: Al relacionar el uso de fertilizantes con la HH verde estimada se evidencia que existe tendencia hacia una correlación positiva de 0,18; mientras que con la HH azul estimada la correlación es negativa (-0,29), al igual que con la HH gris (-0,28), y con la HH total estimada se encuentra una correlación positiva (0,18). Los resultados obtenidos pueden indicar que, al aumentar la cantidad

de fertilizantes, la frecuencia de aplicación o la concentración de nitrógeno del producto químico, se puede incrementar la HH total, representada en su mayor parte por la HH verde; esto, sumado a que la fertilización y la eficiencia productiva tienen una correlación nula, muestra la necesidad de realizar análisis de suelo y mejorar el manejo para la producción de forraje. En las fincas en que la cantidad de nitrógeno aplicado al forraje al año

es superior al promedio, este parámetro estaría aportando en mayor proporción a la HH total.

4) Porcentaje de vacas en ordeño vs. Huella Hídrica: Al relacionar el porcentaje de vacas en ordeño con la HH verde estimada, se observa tendencia hacia una correlación negativa de -0,27; con la HH azul, de -0,31; con la HH gris, de -0,25,

y con la HH total estimada, de -0,27. La Figura 3 muestra que la HH total disminuye al aumentar el porcentaje de vacas en ordeño. Los resultados sugieren que el aumento del número de hembras en ordeño, reemplazando la cantidad de vacas secas y de machos, sin afectar la carga animal, podría disminuir el impacto de este parámetro sobre el recurso hídrico.

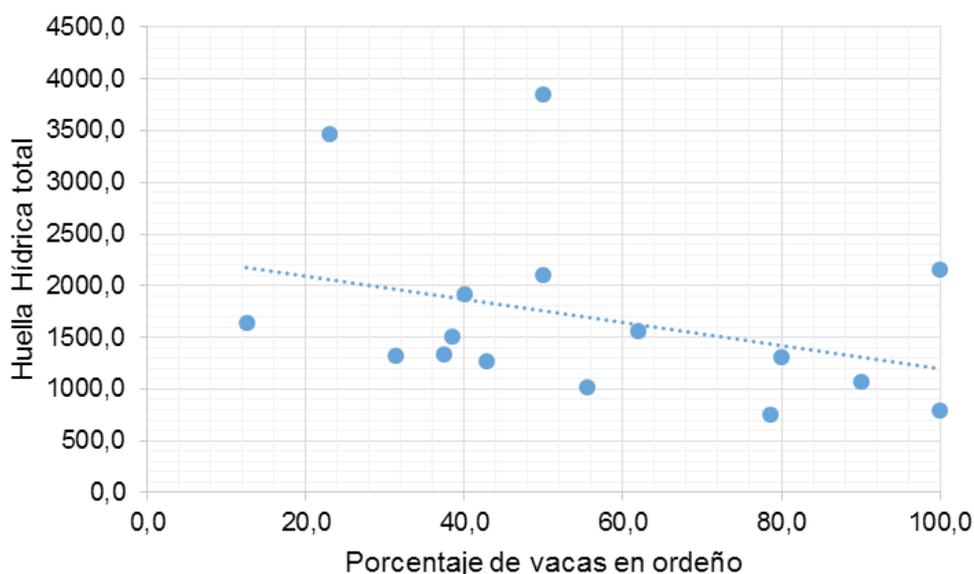


Fig. 3. Porcentaje de vacas en ordeño vs. huella hídrica.

5) Suministro de concentrado vs. Huella Hídrica: Al relacionar el uso de alimento balanceado comercial con la HH verde, se muestra una tendencia hacia una correlación negativa cercana a cero (-0,07); con la HH azul la correlación presenta una tendencia positiva (0,62); con la HH gris estimada es negativa (-0,07), y con la HH total se evidencia una correlación negativa cercana a cero (-0,07). Los resultados indican que existe la posibilidad de que la HH total disminuya levemente al aumentar la cantidad de alimento balanceado suministrado; aunque la correlación se aproxima a cero, el ser negativa puede estar relacionado con el aumento en la eficiencia productiva en las unidades que lo suministran. Es importante tener en cuenta que en el 64,3 % de las fincas no se brinda alimento balanceado comercial a los animales; por ello, en estas este parámetro en particular no tiene impacto sobre la HH.

E. Estimación de las relaciones de causalidad de la HH

Para determinar el aporte del conjunto de factores que explican la HH total, se realizó una modelación econométrica teniendo en cuenta las variables más importantes que integran la HH. En principio, se realizaron pruebas de bondad de ajuste, para lo cual fue necesario aplicar transformaciones logarítmicas a la HH total, a la verde, la azul y la gris, y, además, a los indicadores del porcentaje de vacas en ordeño y al uso de fertilizantes; esto con el ánimo de corregir los sesgos estadísticos que permitieran validar con más precisión los coeficientes de correlación y presentar las determinaciones en términos de elasticidades (variaciones porcentuales). Cabe aclarar que más allá de fijarse en las valoraciones de cada parámetro, interesa también el signo de

la relación, porque de alguna manera es indicador para contrastar los argumentos teóricos presentados con anterioridad. En la Tabla I se muestran los resultados del modelo:

Tabla I. Manejo del suelo y forraje.

Variables	HH total
Cabezas/ha	-0.312*** (0.108)
Producción	-0.000116*** (3.53e-05)
Porcentavacas	-0.363* (0.186)
Fertilizantes	0.211 (0.139)
Constant	9.205*** (1.054)
Observations	28
R-squared	0.542

Robust standard errors in parentheses

*** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$

En términos generales, el modelo de la HH total tiene un coeficiente de determinación aceptable ($R^2 = 54,2\%$). Para el caso de la relación con el número de cabezas de ganado se estima que esta variable explica el 31 % de las variaciones en la HH total y, además, tiene el signo esperado y es estadísticamente significativa. Esto es indicador de algunas tendencias, como que la HH total podría disminuir al aumentar la eficiencia del área por carga animal. Por su parte, la relación con la producción de leche es muy débil, pese a tener significancia estadística; no obstante, según el signo estimado, el aumento de la eficiencia en la unidad productiva con respecto a la producción de leche podría disminuir marginalmente la HH total.

La relación con el porcentaje de vacas en ordeño por finca indica que cada aumento en esta variable explica la disminución de los valores de la HH total en un 36,3 %; esta relación también

es estadísticamente significativa. Finalmente, se determinó que los procesos de fertilización tienden a aumentar la HH total debido a los contenidos de nitrógeno, que afectan directamente la HH gris; se estima que cada aumento en la fertilización de las áreas de forraje aumenta el efecto de la HH en un 21 %; en otras palabras, la HH total tiende a incrementarse por cada kg de nitrógeno aplicado.

Al modelo se le hicieron correcciones de heterocedasticidad y, posteriormente, pruebas para determinar la consistencia; la prueba de Jarque Bera para heterocedasticidad dio como resultado $JB = 0,66$, que está dentro de los límites aceptables, por encima de 0,1, que es lo esperado. Además, no se encontró ninguna tendencia en los residuales de la estimación, teniendo estos una distribución normal. Para la multicolinealidad, la prueba del vector de inflación de varianza dio 1,38, muy por debajo del límite, que es 10, lo cual indica que no hay problemas de multicolinealidad. Igualmente, se aplicó la prueba de endogenidad de Ramsey, cuyos resultados fueron aceptables para la estimación ($\text{Prob} > F = 0,8324$, por encima de 0,1, que es lo esperado). De esta manera, la modelación es consistente con los resultados presentados en la sección anterior, de tal forma que en el agregado de condiciones que explican la HH tiene más relevancia el factor de la proporción de vacas en ordeño, la eficiencia en carga animal y los procesos de fertilización de los potreros.

IV. Conclusiones

La producción bovina tiene diversos impactos sobre el recurso hídrico, según sea intensiva o extensiva, acorde con la dinámica de sus interacciones productivas. La intensiva, al utilizar mayor cantidad de alimento balanceado comercial y de productos químicos, tendrá HH azul y HH gris más altas, y la extensiva, debido al amplio uso de forraje, presentará una HH verde mayor. De acuerdo con Mekonnen y Hoekstra (9), los problemas de agua dulce, en general, se relacionan con la escasez y la contaminación, y, en menor medida, con la competencia; en tal sentido,

los sistemas intensivos generan mayor presión; sin embargo, es necesario profundizar en cada caso, ya que las particularidades en los procesos productivos podrían disminuir el impacto. En esta investigación, el número de cabezas por hectárea y el porcentaje de vacas en ordeño fueron los parámetros que explicaron en gran parte la HH total, por lo que al mejorarlos no solamente podría disminuir el impacto ambiental, sino que también contribuiría a aumentar la eficiencia productiva. Debido a esa complejidad que caracteriza los sistemas de producción bovina, los resultados de la HH en diferentes investigaciones tienen amplia variabilidad metodológica, especialmente en lo que respecta a la obtención de datos. En tal sentido, la comparación entre resultados es dispendiosa, debido a la sensibilidad de estos, a los objetivos de los estudios y a sus alcances, así como a los supuestos usados (10).

La HH total, resultado de la sumatoria de los colores del agua estimados para la muestra, tuvo un promedio de 2.007,8 l/kg leche por finca; el mayor porcentaje correspondió a la HH verde (99,32 %), superando ampliamente la HH azul y la HH gris. La HH verde estimada en las unidades muestreadas tiene un importante impacto, dado que está por encima de la media global (790 a 1.087 l/kg); además, según lo expresan Campuzano *et al.* (15), en la zona existe un alto índice de presión hídrica a los ecosistemas, por lo que estos estarían aportando a la demanda de agua verde y compitiendo así por este recurso necesario para la provisión de servicios ecosistémicos. Del valor de la HH verde, la correspondiente a la directa tiene un promedio de 1.943,2, siendo el mayor porcentaje de la HH total; esto se sustenta en el tipo de sistema productivo, el uso del suelo, el forraje como alimento base y la baja eficiencia productiva. Aunque Colombia cuenta con abundantes fuentes de agua dulce, existen grandes variaciones en la distribución del recurso tanto espacial como temporalmente. De acuerdo con la CEPAL (16), alrededor del 60 % de la población colombiana vive en la cuenca Magdalena-Cauca, donde se

cuenta con tan solo el 13 % de la disponibilidad nacional de agua; es importante considerar que la zona de estudio (Boyacá y Tunja) se encuentra dentro de esta área, considerada como de escasez de agua moderada o grave. Por su parte, el impacto de la HH azul estimada no es representativo, ya que aporta un porcentaje mínimo a la total, y las fincas muestreadas se encuentran en una subzona hídrica en la que el índice de agua no retornada a la cuenca es bajo (15). Del valor obtenido, la directa y la indirecta resultan ser equivalentes; estos hallazgos se relacionan con el forraje como alimento principal, el no uso de riego y el bajo suministro de alimento balanceado comercial. Sin embargo, es importante destacar que el consumo de agua está implícito en la producción de leche, ya que el cálculo incluye el agua incorporada al producto, lo que se ve reflejado en la correlación positiva entre esta y la eficiencia productiva.

Aunque la HH gris representa un porcentaje mínimo del total, su impacto es alto, ya que se relaciona directamente con la contaminación del recurso hídrico. Cabe destacar dos aspectos de gran relevancia: primero, el valor estimado se centra en la cantidad de nitrógeno procedente del uso de fertilizantes sin que exista un análisis de suelo que lo justifique, y, segundo, los predios en los que se utiliza abono orgánico lo realizan de manera adicional a la formulación química, sin que su impacto se pueda medir, ya que no se conoce la cantidad exacta aplicada. Por otra parte, la HH gris indirecta es superior a la directa, incluso en estos sistemas productivos en los que el suministro de concentrado es bajo. Al relacionar los parámetros productivos con la HH estimada, tanto la carga animal por hectárea como el porcentaje de vacas en ordeño se pueden analizar en conjunto, ya que las dos tienen correlación negativa con cada uno de los colores del agua y con la HH total. En tal sentido, articular la producción eficiente de forraje con la cantidad de animales productivos por área es otra medida recomendable para disminuir el impacto sobre el recurso hídrico; esto se podría hacer fácilmente en los predios muestreados

disminuyendo la cantidad de vacas secas y de machos. De acuerdo con Menéndez *et al.* (18), el incremento en el porcentaje de vacas en ordeño se ve reflejado en el aumento de la producción de leche por hectárea y total, lo cual, además, tendría efectos económicos positivos.

El análisis de la participación del alimento balanceado comercial en la HH total estimada resulta complejo, ya que en el 64,3 % de las fincas no se suministra; entonces, la influencia de este parámetro en esos predios fue nula; la correlación se aproximó a cero: con la HH verde y la HH azul es negativa, mientras que con la HH gris es positiva. No en todas las unidades que utilizan alimento balanceado comercial se evidenció aumento en la producción de leche; esto, sumado a lo mencionado anteriormente sobre la HH del pienso, justificaría una recomendación de implementar sistemas silvopastoriles y producir alimento dentro de las fincas, en lugar de introducir concentrado en la dieta de los animales.

Referencias

- (1) Carreño-Campo C., Hoyos-Támara N. La huella ecológica: un indicador potencial de sustentabilidad. *Fragua*. 2004; 3(6): 17-34.
- (2) Zarate E., Kuiper D. Evaluación de Huella Hídrica de banana para pequeños productores en Perú y Ecuador. Good Stuff International – Switzerland. Technical Assistance for Sustainable Trade & Environment (TASTE Foundation). 2013.
- (3) Hoekstra AY., Chapagain AK. Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources. Blackwell Publishing, Oxford, UK, 2008.
- (4) WFN. Water Footprint Network. Una mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica. 2012. Disponible en: <http://www.huellahidrica.org/Reports/Arevalo-2012-Huella-HidricaColombia.pdf>.
- (5) Ardila A., Vergara W. El sector pecuario frente al cambio climático: una realidad incómoda. *Rev. Cienc. Anim.* 2012; 5: 107-120.
- (6) Renda A. Papel de los sistemas agroforestales en el escenario agrario de las cuencas hidrográficas de Cuba. *Pastos y Forrajes*, 2006; 29(4).
- (7) Sánchez C., Delgado R., Bueno H., Román L. Huella hídrica de los forrajes en la Comarca Lagunera. México D.F.-UAM. Editado por Bárbara A. Willaarts, A., Ramón M. 2014. Disponible en: http://bidi.xoc.uam.mx/tabla_contenido_libro.php?id_libro=425.
- (8) Pinos-Rodríguez JM., García-López JC., Peña-Avelino LY., Rendón-Huerta JA., Tristán-Patiño F. Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Agrociencia*. 2012; 46: 359-370.
- (9) Mekonnen MM., Hoekstra AY. A. Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products. *Ecosystems*. 2012; 15: 401-415. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10021-011-9517-8>.
- (10) Manazza JF. Cuantificación y valoración económica del uso consuntivo del agua en los principales productos de las cadenas lácteas de La Pampa y San Luis. San Luis: Ediciones INTA, 2012.
- (11) Alvarenga RA., De Léis CM., Cherubini E., Zanghelini GM., Galindo BM., Soares SR. Estimating the water footprint of milk produced in the southern region of Brazil. *Proceedings of the 9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector*, 2014.
- (12) WFN. Water Footprint Network. The water footprint assessment manual: setting the global standard, 2011.
- (13) Mekonnen MM., Hoekstra AY. 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. 2011. Disponible en: <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report47-waterFootprintCrops-Vol1.pdf>.
- (14) Delgado-Bernal FA., Franco-Gómez CA. Análisis de productividad de ganado lechero Holstein y Jersey en dos fincas de la sabana de Bogotá. Universidad de la Salle. Facultad de Administración Agropecuaria Bogotá, D.C. 2006.
- (15) Campuzano-Ochoa CA., González-Valencia JE., Guzmán-Cabrera AC., Rodríguez-Ortiz CM., Arévalo-Urbe D., Parada-Puig G. Evaluación multisectorial de la huella hídrica en Colombia. Resultados por subzonas hidrográficas en el marco del Estudio Nacional del Agua 2014. Embajada Suiza-Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo –COSUDE–. Good Stuff International Latinoamérica y El Caribe –GSI-LAC–, la Corporación Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia –CTA–, 2015.
- (16) CEPAL. Evaluaciones del desempeño ambiental. Colombia. OECD Environmental Performance Reviews: Colombia. 2014. Disponible en: http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36663/lcl3768_es.pdf?sequence1.
- (17) Mahecha L. El silvopastoreo: una alternativa de producción que disminuye el impacto ambiental de la ganadería bovina. *Rev Col Cienc Pec.* 2002; 15(2).
- (18) Menéndez-Buxadera A., Caunedo J., Fernández M. Relación entre el porcentaje de vacas en ordeño y la producción láctea total del rebaño. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 2004; 38 (4).