



ESTIMACIÓN DE LA DEUDA ECOLÓGICA POR MEDIO DE LA HUELLA HÍDRICA GRIS

EL CASO DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO SANTIAGO – GUADALAJARA

Alma Ruby Félix Puga

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR)

almaruby10@outlook.com

Salvador Peniche Camps

Universidad de Guadalajara

speniche@cucea.udg.mx

Carla Aceves Ávila

Universidad de Guadalajara

carla.aceves@cucea.udg.mx

Resumen

El objetivo de la investigación es estimar la Deuda Ecológica en la región de la Cuenca del río Santiago-Guadalajara, México, empleando indicadores de la Economía Ecológica, como la Huella Hídrica Gris (HHG). El incremento en la producción de bienes destinados a la exportación conlleva la acumulación indirecta de descargas de agua residuales, lo que genera externalidades que no se reflejan en los flujos comerciales de los productos exportados, sino que permanecen en la región como sumideros. Esta situación da lugar a una Deuda Ecológica, ya que la cuenca carece del volumen de agua necesario para absorber estas cargas contaminantes.

Palabras clave: deuda ecológica, economía del agua, huella hídrica gris, comercio internacional, América Latina.

Abstract

The objective of the research is to estimate the Ecological Debt in the region of the Santiago-Guadalajara River Basin, Mexico, using indicators from Ecological Economics, such as the Grey Water Footprint (GWF). The increase in the production of goods destined for export leads to the indirect accumulation of wastewater discharges, which generates externalities that are not reflected in the commercial flows of exported products but remain in the region as sinks. This situation gives rise to an Ecological Debt, as the basin lacks the necessary volume of water to absorb these pollutant loads.

Keywords: ecological debt, water economics, grey water footprint, international trade, Latin America.

JEL Codes: F18, N56, Q25, Q51.

1. Introducción

El medio ambiente ha sido históricamente el receptáculo que contiene todo aquello

necesario para el desarrollo económico mundial, pero también lo ha sido para los desperdicios generados por el sistema de producción. La Cuenca Alta del Río Santiago-Guadalajara (CSG), ubicada en el estado



occidental de Jalisco, México, es un ejemplo de este fenómeno, ya que recibe una cantidad significativa de contaminantes que superan la capacidad del río para su transformación. Esta carga proviene principalmente de las aguas grises de la población, el escurrimiento de las zonas agrícolas debido al uso de agroquímicos (insecticidas, fungicidas, pesticidas, etc.) que arrastran excesos de fertilizantes nitrogenados y fosforados, y los desechos industriales.

Para los propósitos de este artículo, se ha optado cuantificar los contaminantes presentes en las aguas residuales incorporadas¹ a través del sector de la manufactura². Se han excluido otros tipos de vertidos, como los del sector agropecuario o los de origen poblacional, con el fin de centrarse en la presión ejercida por el sector exportador, un factor estructuralmente determinante y exógeno que, especialmente a largo plazo, acelera e impone condiciones límite endógenas (locales) que influyen en el desarrollo y los procesos biofísicos de la CSG.

Se presentará una muestra de la carga de contaminación sinérgica asociada a 11 parámetros químicos de relevancia económica, clasificados en 9 inorgánicos y 2 orgánicos. Los contaminantes inorgánicos incluyen arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn), mientras que los contaminantes orgánicos son nitrógeno total (N) y fósforo total (P).

El objetivo es estimar la Deuda Ecológica en la región de la CSG mediante el uso de un

indicador de economía ecológica: la Huella Hídrica Gris (HHG). Esto implica cuantificar el volumen aproximado de agua dulce requerido para que la CSG pueda asimilar la carga de contaminantes y analizar los impactos primarios, tales como las alteraciones en los flujos y la calidad del agua, así como los impactos secundarios, que incluyen las afectaciones sociales.

El artículo se estructura en tres secciones: en primer lugar, se describe el contexto general del objeto de estudio; en segundo lugar, se lleva a cabo la estimación de la HHG; y en tercer lugar, se ofrece un análisis preliminar de los impactos primarios y secundarios de la HHG basado en los resultados iniciales, sin pretender un análisis exhaustivo, dado que este excede el alcance del presente trabajo.

En términos generales, este artículo constituye un esfuerzo por abordar la siguiente cuestión: ¿Cuál es la estimación de la Deuda Ecológica por medio de la HHG en la CSG?

Los resultados del análisis de 11 parámetros químicos seleccionados para el período comprendido entre 2010 y 2021 revelan que el uso del agua en la CSG ha superado su capacidad de reabastecimiento. Como consecuencia, la cuenca ha excedido su capacidad para asimilar los desechos generados, lo que ha resultado en descargas de efluentes con una carga contaminante significativa. Esta situación compromete tanto la salud humana como la sostenibilidad ecosistémica de la cuenca.

¹ El término "aguas residuales incorporadas" se refiere a la cantidad total de aguas residuales vertidas directa e indirectamente durante la producción y el servicio de los productos (Hoekstra *et al.*, 2011).

² La manufactura refiere a "las unidades económicas dedicadas principalmente a la

fabricación de productos destinados a la exportación, las cuales se benefician de un régimen aduanero especial que les permite importar materias primas, maquinaria, equipo, refacciones, partes y componentes para incorporarlos a sus procesos productivos" (INEGI, 2020).



Este escenario posee una relevancia considerable tanto a nivel teórico como metodológico, ya que plantea un debate sobre la distribución de la carga contaminante. Además, proporciona una perspectiva sobre posibles estrategias para orientar las decisiones colectivas respecto a la cuenca y, en consecuencia, mitigar la Deuda Ecológica. Tal como señaló Hoekstra (2011), "los recursos de agua dulce del planeta son limitados, por lo que debería haber preocupación ante cualquier contribución que exceda la necesidad máxima razonable desde un punto de vista técnico o social" (p. 42).

2. El vínculo entre la Deuda Ecológica y la Huella Hídrica

2.1 La Deuda Ecológica

La Deuda Ecológica representa un equilibrio tenso entre la sostenibilidad económica y la sostenibilidad ecosistémica, emergiendo de los conflictos en la valoración de las externalidades negativas dentro de las relaciones económicas internacionales. Este concepto ha sido desarrollado y conceptualizado desde diversas perspectivas académicas, sociales y políticas (Martínez Alier, Gudynas, Torras, Simms, Corral). Su primera formulación se remonta a finales de la década de 1980 en el Instituto de Ecología Política de Chile (Robledo y Marcelo, 1992), donde se destacó que los daños socioambientales causados por los países ricos generaban una "Deuda Ecológica" (Mantilla-Pinilla et al., 2018:468).

A partir de los años 90, el término ganó prominencia a través de diversos tratados y

convenios internacionales. Por ejemplo, durante la Cumbre de Río de Janeiro en 1992, un documento redactado por grupos ecologistas abordó dos cuestiones cruciales: la infravaloración de las materias primas por parte de los países del Norte en el comercio internacional y la ocupación desproporcionada del espacio ambiental (Mantilla-Pinilla et al., 2018:468).

La Deuda Ecológica permite estimar la relación tangible entre la extracción y procesamiento de materiales, el consumo de energía, las emisiones de gases de efecto invernadero, la distribución y tratamiento de agua, la pérdida de suelos, la degradación de ecosistemas, la pérdida de cubierta forestal y la generación de residuos, entre otros fenómenos. Estos factores aumentan en paralelo con el nivel de riqueza, principalmente debido al mayor uso de energía y materiales en las relaciones de mercado y la deslocalización productiva³. Como señala Pérez Rincón (2006), "el comercio internacional actúa como un 'vector ambiental' que distribuye de forma asimétrica los costos ecológicos entre los países que comercian" (p. 1).

Es fundamental subrayar que el objetivo no es obtener una cuantificación exacta mediante indicadores monetarios o precios, debido a las limitaciones en la disponibilidad de recursos estadísticos e información inventariada. En cambio, la Deuda Ecológica puede ser evaluada a través de indicadores biofísicos que analicen la distribución de los flujos de energía y materiales involucrados en las operaciones del comercio internacional (Mora, Aín et al., y Gachet Otáñez, 2020).

³ La deslocalización productiva implica la utilización de componentes y procesos que se llevan a cabo en zonas geográficamente muy distantes con el fin de producir un producto específico. Esta práctica aumenta las demandas de transporte y promueve la

producción de diversas mercancías, lo que, en condiciones similares, resulta en un mayor consumo de energía y recursos, así como en un deterioro ambiental más pronunciado (Menotti y Sobhani, 1999).



Entre estos indicadores se encuentran la Contabilidad de Flujo de Materiales (CFM), el Balance Comercial Físico (BCF), la Huella Ecológica, la Huella Hídrica, el agua virtual, la biocapacidad, el suelo virtual, la energía, la Apropiación Humana de la Producción Primaria Neta (HHANNP), la Tasa de Retorno Energético (TRE o EROEI), el enfoque Input-Output Material por Unidad de Servicio (MIPS) y la Mochila Ecológica (Ecological Rucksacks) (Mantilla-Pinilla et al., 2018:475; Peinado, 2018:57).

2.2 La huella Hídrica Gris

La Huella Hídrica (HH) se basa en las ideas y metodologías propuestas por el Dr. Arjen Hoekstra, quien introdujo este concepto en 2002. Este indicador se define como una medida multidimensional del uso de agua dulce, ya sea directa o indirectamente, por una población.

La HH proporciona información sobre el lugar y el momento en que se utiliza el agua, incorporando dimensiones espaciales y temporales. La dimensión temporal se cuantifica en términos de volumen de agua por unidad de producto o por unidad de tiempo (Hoekstra et al., 2011:50). En términos espaciales, la HH facilita el análisis y comparación de los impactos de distintos contaminantes asociados a productos, procesos, consumidores, industrias o sectores económicos, abarcando diversos niveles espaciales, tales como zonas de captación, cuencas hidrográficas, provincias, estados, naciones u otras unidades espaciales hidrológicas o administrativas, así como a

nivel global (Hoekstra y Mekonnen, 2012; Liu et al., 2012, p. 2).

Desde una perspectiva metodológica, la HH se desglosa en tres componentes: dos consuntivos, la Huella Hídrica Azul (HHA) y la Huella Hídrica Verde (HHV), y un componente degradativo, denominado Huella Hídrica Gris (HHG).

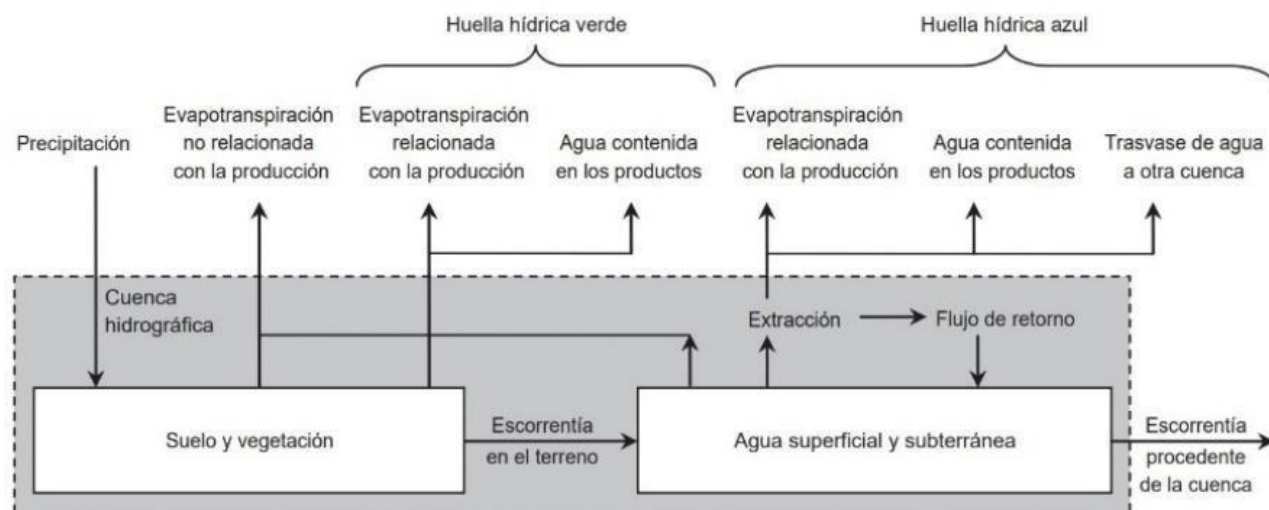
La HHA se refiere al flujo de escurrimiento, es decir, al agua que circula a través de acuíferos y ríos. Representa el volumen de agua subterránea y superficial extraída del flujo total, que puede ser evaporada o incorporada en productos. Por consiguiente, la HHA refleja la apropiación de la capacidad de extracción, dado que este flujo no regresa a la cuenca en forma de flujo de retorno. Por otro lado, la HHV se refiere al uso del flujo de evaporación⁴ desde la superficie terrestre, destinado a fines humanos, principalmente para la agricultura o la explotación forestal (Figura 1).

⁴ “Cuando ignoramos las posibles variaciones (aunque sean generalmente pequeñas) en el almacenaje de aguas de una zona de captación, una parte del volumen de las precipitaciones anuales abandonará la cuenca mediante evapotranspiración y la otra

parte, a través de la escurrimiento. El flujo evaporativo puede utilizarse para la producción de cultivos o dejarse en el ambiente para mantener los ecosistemas” (Hoekstra et al., 2011, p. 46).



Figura 1 - Huellas hídricas verde y azul en relación con el balance hídrico de una cuenca hidrográfica



Fuente: Hoekstra et al., 2011:47.

En contraste, la HHG refleja el grado de contaminación del agua dulce en una unidad homogénea, asociado con actividades antropogénicas⁵. Este indicador mide el volumen de agua dulce necesario para diluir la carga de contaminantes, en relación con las concentraciones naturales y las normas de calidad del agua, constituyendo así un indicador de la calidad del agua (Chapagain et al., 2006; Hoekstra et al., 2011). En última instancia, la suma de las diferentes Huellas Hídricas (verde, azul y gris) da como resultado la Huella Hídrica Total (HHT).

Las investigaciones que emplean la HH se han centrado en ilustrar cómo y en qué medida se establece la sutil conexión entre el consumo, manejo y uso del agua y el comercio internacional. Este análisis se realiza mediante el estudio del flujo de agua virtual implícito en las exportaciones e importaciones

de productos con altos requerimientos hídricos, así como a través del examen de la sustentabilidad o las afectaciones en los flujos de agua. Este indicador ayuda a expresar la cantidad de recursos provenientes del ambiente que son necesarios dentro de un determinado modelo de acumulación y reproducción del capital.

Es importante resaltar que la presente investigación se enfoca exclusivamente en la HHG, excluyendo la HHA y la HHV, con el objetivo de ubicar en un denominador común diversas formas de contaminación procedentes del sector manufacturero que afectan, de manera sinérgica, a la CSG.

Se ha optado por cuantificar los contaminantes presentes únicamente en las aguas residuales generadas por el sector manufacturero, excluyendo otros tipos de vertidos, como aquellos provenientes del

⁵ En este caso, se define como contaminación de origen antropogénico a la intervención humana en el ciclo biogeoquímico.



sector agropecuario o de origen poblacional. Esta elección se basa, en primer lugar, en la necesidad de precisar los componentes metodológicos de la investigación y, en segundo lugar, en el reconocimiento de que la acumulación de residuos de los procesos productivos manufactureros representa una amenaza más significativa para el medio ambiente acuático y la salud humana, debido a su mayor dificultad de depuración (De la Rosa, 2014).

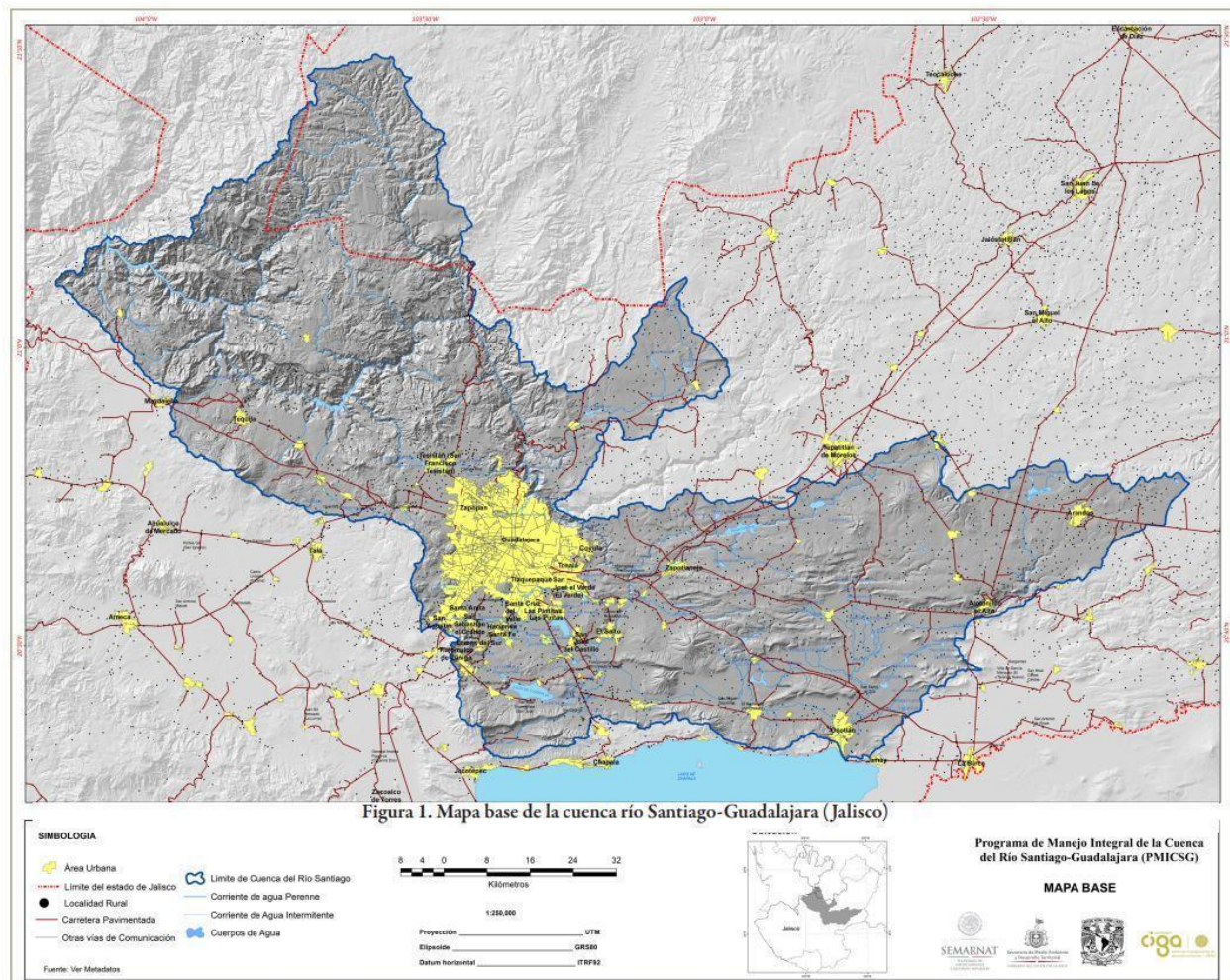
3. El caso: la Cuenca alta del río Santiago – Guadalajara

La Región Hidrológico-administrativa VIII Lerma Santiago Pacífico, a la que pertenece la CSG, abarca una extensión territorial continental de 132,916 km² (Bollo-Manent, et al., 2017:48). Esta región se sitúa en el occidente de México, específicamente en el estado de Jalisco, y se extiende a través de los estados de Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Estado de México, Michoacán, Nayarit, Querétaro y Zacatecas, colindando con 332 municipios y 18 zonas metropolitanas. Dada su vasta extensión y su grado de explotación, la región hidrológica contribuye con un 19.75% al Producto Interno Bruto (PIB) (SEMARNAT y CONAGUA, 2018), consolidándose como un elemento crucial en la economía regional.

Dentro de esta área se encuentra la subregión correspondiente a la CSG, ubicada en la Meso Región Hidrológica Centro Occidente (véase Figura 2). La CSG comienza su recorrido a 4 km al suroeste de Ocotlán, al este del lago de Chapala, a una altitud de 1,524 msnm, y sigue su curso bordeando la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), en el estado de Jalisco.



Figura 2 - Mapa base de la cuenca río Santiago – Guadalajara



Fuente: Bollo-Manent, et al., 2017:26.

La Cuenca del Río Santiago se localiza en la zona centro – occidente del territorio mexicano. Limita al norte con la Región VII Cuencas Centrales del Norte; al noreste, con la Región IX Golfo Norte; al noroeste, con la Región III Pacífico Norte; al sureste, con la Cuenca del Río Lerma; al sur con las Cuencas del Río Lerma y Costa de Jalisco y al oeste con el Océano Pacífico. Se encuentra entre los meridianos 99° 17' y 105° 28' de longitud oeste, y entre los paralelos 17° 57' y 23° 26' de latitud norte. (Lujan Godínez et al., 2018:480).

En conjunto, esta división territorial administrativa estatal abarca una extensión de 18,452.55 km², con una densidad de población de 741.32 habitantes por km² y un total de 6,324,020 habitantes (INEGI, 2020). Este dato representa un incremento del 15.4% en comparación con el Censo de Población y Vivienda de 2010 (INEGI). Este aumento puede atribuirse en parte a la presencia de importantes núcleos urbanos, como la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), aunque las áreas rurales también muestran un crecimiento progresivo tanto en población como en urbanización.



La CSG se distingue como una de las regiones con mayor concentración industrial del país, albergando importantes empresas nacionales y extranjeras que generan significativas ganancias anuales en dólares. En particular, las subcuencas de la parte alta del río Santiago producen el 92.4% del Producto Interno Bruto (PIB) de la cuenca, destacando la ZMG y Aguascalientes como centros predominantes de servicios y desarrollo industrial (CONAGUA y COCURS, 2017).

Esta realidad se refleja en la inversión extranjera directa (IED) entre 1999 y 2020, donde el sector manufacturero se erige como el principal receptor, con una cifra que alcanza los 19,035 millones de dólares (mdd). Le siguen los servicios financieros y de seguros con 4,761 mdd, y el comercio con 2,290 mdd. Estados Unidos, Alemania y España se destacan como los principales países inversores (IIEG, 2020, 2021). Este fenómeno contribuye a consolidar a Jalisco como uno de los destinos más atractivos en México para la inversión extranjera directa.

4. Apartado metodológico

Para esta investigación, se utilizará la HHG como herramienta metodológica. Este indicador está detallado en el Manual de Evaluación de la Huella Hídrica – Establecimiento del Estándar Mundial (Hoekstra et al., 2011) y ha sido desarrollado por la Red de la Huella Hídrica (Water Footprint Network, 2021).

El objetivo es cuantificar, durante el período comprendido entre 2010 y 2021, la HHG de once parámetros químicos de interés económico, de los cuales nueve son inorgánicos y dos orgánicos. Además, se evaluará la Apropiación Humana de Agua Dulce (Human Appropriation of Renewable Fresh Water) mediante la Contabilidad de la Huella Hídrica.

La ventaja de medir estos elementos de manera conjunta radica en que el volumen de agua necesario para que el río asimile los contaminantes se considera en un denominador común promedio para toda la cuenca. De este modo, se obtiene el nivel de Deuda Ecológica en términos de HHG del agua en la cuenca. En este contexto, el enfoque aplicado a la contabilidad de la HHG es similar al concepto de carga crítica, que en la metodología de HHG se define como "la disponibilidad de agua necesaria para diluir completamente las sustancias químicas a niveles de concentración aceptables" (Hoekstra et al., 2011:60).

La fase de contabilidad de la huella hídrica se basa en estimaciones de consumo, recopilación de datos reales de contaminación local verificables en el terreno, y el desarrollo de las cuentas. Posteriormente, en la fase de análisis de sustentabilidad, se evaluará la huella hídrica desde perspectivas medioambientales, sociales y económicas.

En términos generales, la HHG se elabora mediante variables como la disponibilidad media anual de agua, el flujo total de escorrentía, el caudal ecológico, y las concentraciones naturales y máximas permitidas de elementos químicos en aguas superficiales, determinadas generalmente por razones ecológicas.

La metodología excluye los procesos naturales que podrían mejorar la calidad del agua a lo largo del flujo, tales como la escorrentía, el agua renovable y las plantas de tratamiento, así como factores como el tipo de suelo, parámetros climáticos o interacciones entre diferentes sustancias químicas. Aunque estas variables son relevantes, requieren un análisis más detallado que no corresponde a los objetivos ni al enfoque de la presente investigación.



La contabilidad de la HHG se realiza adaptando la formulación estándar definida por Hoekstra et al. (2011), diseñada para abordar el vertido puntual de una única sustancia en una masa de agua. El cálculo se lleva a cabo dividiendo la carga contaminante (L , en masa/tiempo) entre el estándar de calidad de agua para dicho contaminante (concentración máxima aceptable, $C_{m\acute{a}x}$, en masa/volumen), menos su concentración natural en el cuerpo receptor (C_{nat} , en masa/volumen) (Hoekstra et al., 2011:58).

$$HH_{proc,gris} = \frac{L}{C_{m\acute{a}x} - C_{nat}} \quad [\text{volumen/tiempo}]$$

L = Carga de un contaminante

$C_{m\acute{a}x}$ = Concentración máxima permitida de una sustancia química en una masa de agua receptora

C_{nat} = Concentración natural de una sustancia química en la masa de agua receptora

Una vez completada la contabilización y demostrado el efecto combinado de los contaminantes (que puede ser mayor de lo esperado si se considera la concentración de sustancias químicas por separado), se subraya la importancia de la HHG como un indicador clave de la contaminación hídrica. Este indicador puede revelar que la capacidad de asimilación de la masa de agua ha sido superada.

4.1 Análisis de la Huella Hídrica Gris

El análisis de la HHG permite determinar en qué momento una zona de captación o cuenca deja de ser sostenible. Esto se realiza mediante el cálculo del Nivel de Contaminación del Agua (NCA), un indicador clave que evalúa el grado de contaminación (Hoekstra et al., 2011:117).

Desde una perspectiva de cuenca, este enfoque proporciona una comprensión

integral de cómo las actividades del sector manufacturero afectan los flujos y la calidad del agua.

La fase de análisis se divide en impactos primarios, que incluyen alteraciones en los flujos y la calidad del agua, e impactos secundarios. La comparación de la HHG con indicadores hidrológicos constituye una parte del análisis relacionado con los impactos primarios. En este contexto, el nivel de contaminación del agua en una zona de captación (x) y en un periodo de tiempo (t) se calcula en función de la proporción de la capacidad de asimilación de contaminantes utilizada en la zona de captación ($\sum HH_{gris}$) y la disponibilidad o escurrimiento real de dicha zona (E_{real}) (Hoekstra et al., 2011:117).

$$NCA[x, t] = \frac{\sum HH_{gris}[x, t]}{E_{real}[x, t]} \quad [-]$$

NCA = Nivel de contaminación en una zona de captación

$\sum HH_{gris}$ = Capacidad de asimilación de cargas de contaminantes consumida

E_{real} = Disponibilidad /escurrimiento real la esa zona de captación

t = Tiempo

x = Lugar/lugar de origen

Si la estimación de la HHG es menor que la disponibilidad de agua, aún hay suficiente agua para diluir los contaminantes a concentraciones aceptables. En contraste, un nivel de contaminación del agua igual o superior al 100% indica que la capacidad de absorción de contaminantes ha sido completamente utilizada.



Para avanzar hacia la reducción de la Deuda Ecológica, es fundamental analizar la sustentabilidad de la huella hídrica considerando los impactos secundarios dentro de una zona de captación o cuenca hidrográfica. Para llevar a cabo este análisis, se pueden utilizar modelos, evaluaciones especializadas y enfoques participativos, los cuales permiten integrar de manera integral los criterios de sustentabilidad.

Las variables ambientales habitualmente incluyen parámetros como la abundancia de ciertas especies, la biodiversidad o la pérdida de hábitat. Las variables sociales, normalmente, incluyen aspectos como la salud humana, el empleo, la distribución de la riqueza y la seguridad alimentaria. Las variables económicas incluirán los ingresos en diferentes sectores de la economía que depende del agua (en el caso de los flujos de agua reducidos o el deterioro de la calidad del agua, es posible que sectores específicos como la pesca, el turismo, la generación de hidroelectricidad y la navegación se vean afectados). (Hoekstra et al., 2011:120).

5. Resultados

5.1 Contabilización de la Huella Hídrica Gris

Los valores promedio de los parámetros de cargas contaminantes, expresados en mg/l, se obtuvieron de la base de datos abierta del Sistema de Calidad del Agua, disponible en el sitio web de la Comisión Estatal del Agua de Jalisco (CEA, 2022). Estos parámetros se registran mensualmente en puntos de muestreo ubicados en 13 sitios: 2 en el Arroyo El Ahogado, 10 en el Río Santiago y 1 en el Río Zula.

Los estándares de concentración máxima permisible para el agua ($C_{\text{máx}}$, mg/l) y la concentración natural (C_{nat} , mg/l) en condiciones de mesotrofia fueron extraídos de dos fuentes. En primer lugar, la Ley Federal de Derechos y Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2021 (NOM-001-SEMARNAT-2021) establece los límites permisibles de contaminantes de diversas fuentes de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, así como el uso eficiente de aguas nacionales. En segundo lugar, se consultaron estudios previos reportados en la literatura (Vázquez del Mercado et al., 2017; PROY-NOM-127-SSA1-2017).

Aunque se registran hasta 78 parámetros en los puntos de muestreo, en este estudio se analizaron únicamente 11 parámetros de interés económico que se destacan como componentes de las descargas residuales industriales durante el periodo de 2010 a 2021. Los contaminantes inorgánicos incluidos son Arsénico (As), Bario (Ba), Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb) y Zinc (Zn), mientras que los contaminantes orgánicos son Nitrógeno total (N) y Fósforo total (P).

La HHG, se calculó dividiendo la carga contaminante superficial (L , expresada en masa/tiempo) entre el estándar de calidad del agua para el contaminante (concentración máxima aceptable, $C_{\text{máx}}$, expresada en masa/volumen) menos su concentración natural en el cuerpo receptor (C_{nat} , expresada en masa/volumen) (Hoekstra et al., 2011:58).

Entre 2010 y 2021, las mediciones que superan el valor de 0 indican que parte de la capacidad de asimilación de la carga contaminante ya ha sido consumida. Esto implica que la cantidad de agua requerida para diluir los contaminantes y mantener la calidad del agua dentro de los límites



establecidos por la normativa vigente, sin considerar el efecto del escurrimiento natural y los procesos de tratamiento de aguas⁶, es de 335,594 hm³ para el fósforo (P); 71,637 hm³ para el nitrógeno (N); 22,636 hm³ para el zinc (Zn); 9,582 hm³ para el mercurio (Hg); 6,722 hm³ para el cobre (Cu); 6,502 hm³ para el cromo (Cr); 2,715 hm³ para el cadmio (Cd); 1,377 hm³ para el plomo (Pb); 825 hm³ para el níquel (Ni); 381 hm³ para el bario (Ba); y 150 hm³ para el arsénico (As), en orden descendente.

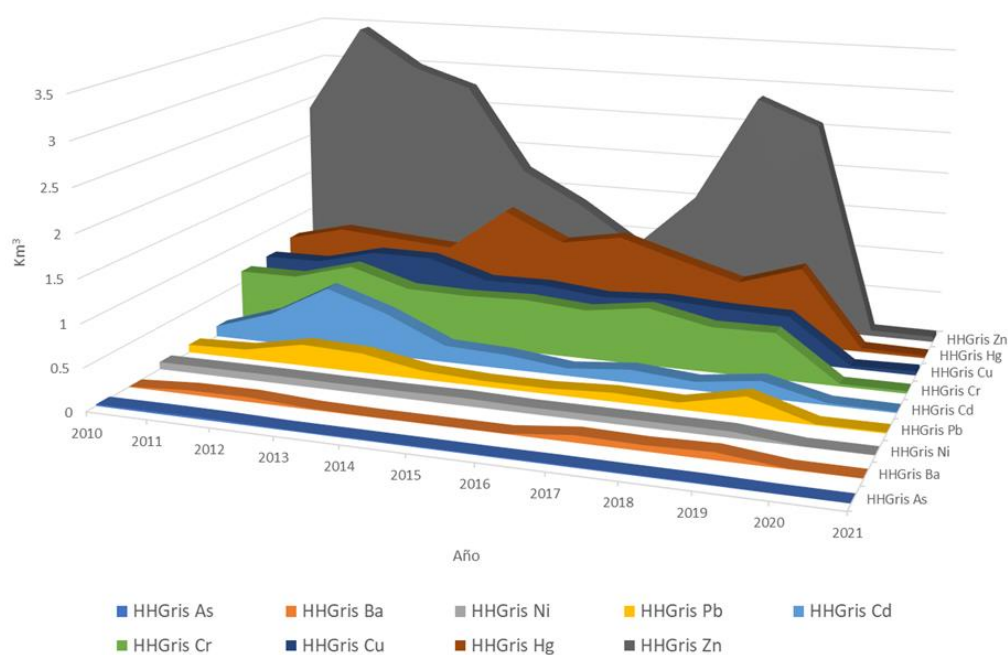
Los resultados de la contabilización de la HHG también reflejan la carga crítica con la que la región contribuye a la degradación de los recursos hídricos a nivel internacional. Estos resultados representan un indicador de la contaminación expresada en términos del volumen de agua dulce necesario para asimilar la carga de contaminantes existente. En este contexto, la contribución total de la HHG durante el periodo analizado asciende a 50,890 hm³ para la contaminación química inorgánica y 407,231 hm³ para la contaminación orgánica (Figura 3), sumando un total acumulado de 458,121 hm³, con una HHG media anual de 38,176.75 hm³ durante un periodo de 12 años (Figura 4).

La contabilización inicial de la HHG permitirá orientar su vinculación con la Deuda Ecológica de la CSG, a partir del análisis de los impactos primarios y secundarios en las secciones siguientes.

Figura 3 - Huella Hídrica Gris Inorgánica 2010 – 2021, Cuenca Río Santiago – Guadalajara

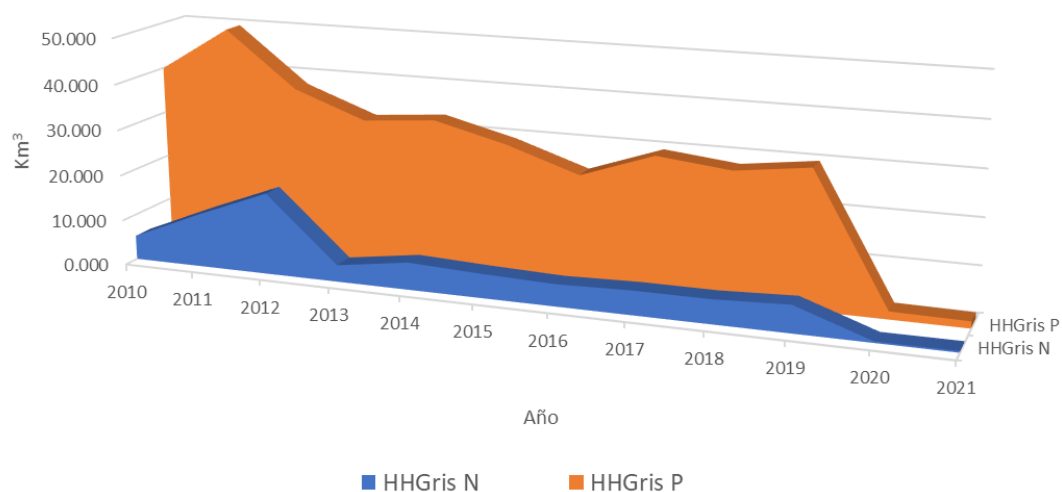
⁶ “Cuando las aguas residuales siguen un tratamiento antes de ser vertidas en el medio ambiente, obviamente se reduce la concentración de contaminantes en el efluente final y, de este modo, se reducirá la

HHG. Hay que tener en cuenta que la HHG de un proceso depende de la calidad del efluente en la forma en que se vierte al medio y no de la calidad antes del tratamiento” (Hoekstra *et al.*, 2011, p. 63).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4 - Huella Hídrica Gris Orgánica 2010 – 2021, Cuenca Río Santiago – Guadalajara



Fuente: Elaboración propia.



5.2 Resultados del análisis de la Huella Hídrica Gris: Impactos primarios y secundarios

5.2.1 Impactos primarios

En el análisis de los impactos primarios durante el período 2010-2021, se observó que el volumen total de escurrimiento natural acumulado en la región de la CSG fue de 20,093 hm³, mientras que la disponibilidad media anual de agua fue de 4,870 hm³. Al dividir la capacidad de asimilación de la carga contaminante de la HHG inorgánica, que asciende a 50,890 hm³, entre la disponibilidad total, se obtiene un índice de 10.44. Este valor sugiere un impacto muy alto en la calidad del agua de la CSG en su conjunto.

Las cargas críticas de HHG inorgánica que exceden la disponibilidad, en orden descendente, son: Zinc (Zn) con 17,765.9 hm³; Mercurio (Hg) con 4,711.9 hm³; Cobre (Cu) con 1,851.9 hm³; y Cromo (Cr) con 1,631.9 hm³. Estos valores suman un total aproximado de 25,961.6 hm³ de Apropiación Humana de Agua Dulce (Figura 5).

En cuanto a las cargas críticas de HHG orgánica, el Nitrógeno (N) y el Fósforo (P) en conjunto superan el escurrimiento natural en 387,137.56 hm³ y la disponibilidad media anual en 402,360.9 hm³, resultando en una Apropiación Humana de Agua Dulce aproximada de 382,267.46 hm³ (Figura 7).

En resumen, los resultados para el periodo 2010-2021 (Figuras 5 y 7) indican que el uso del agua en la cuenca ha excedido su tasa de reabastecimiento y capacidad de absorción de desechos. Esto implica que las cargas críticas de HHG que sobrepasan los indicadores hidrológicos están en proceso de reducir el caudal ecológico en 408,229.06 hm³ a través

de la Apropiación Humana de Agua Dulce, lo que representa una extracción significativa de agua destinada a mantener el equilibrio de los procesos biofísicos en la CSG para la asimilación de los contaminantes químicos presentes.

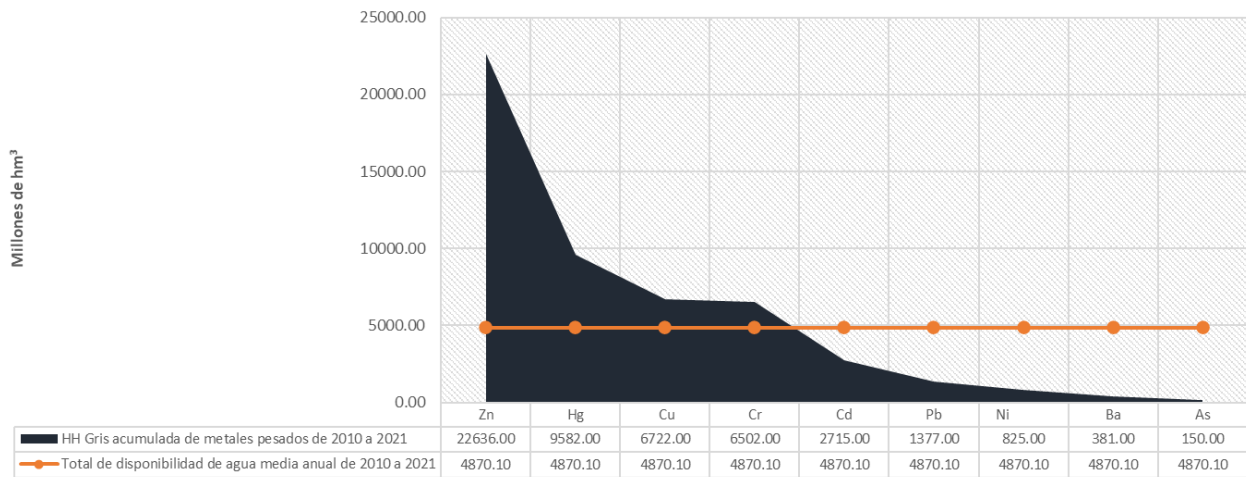
A pesar de la gravedad que la acumulación progresiva de la carga crítica de HHG representa para la seguridad hídrica, no se ha registrado una disminución en el uso de contaminantes en los últimos años. Esto se evidencia al examinar la muestra temporal de HHG correspondiente al año 2021, en la que la disponibilidad media anual fue de 23,405 hm³ y el escurrimiento natural fue de 1,708.175 hm³.

La acumulación de las cargas críticas de HHG inorgánica que superan la disponibilidad (Zn, Cu, Cr y Hg) y representan la Apropiación Humana de Agua Dulce asciende a 172.43 hm³ (Figura 6). En comparación, la carga crítica de HHG orgánica fue de 123.74 hm³ (Figura 8). Esto refleja que, a pesar de la reducción en la disponibilidad media anual de agua para diversos usos, no se ha observado una disminución correspondiente en los efluentes utilizados como sumideros.

Es importante señalar que, aunque algunos contaminantes inorgánicos como el Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Níquel (Ni), Bario (Ba) y Arsénico (As) no superan la disponibilidad media anual en la CSG, su contribución combinada como carga crítica de HHG en una zona de captación o cuenca hidrográfica podría representar un riesgo ecológico y humano a corto y largo plazo.

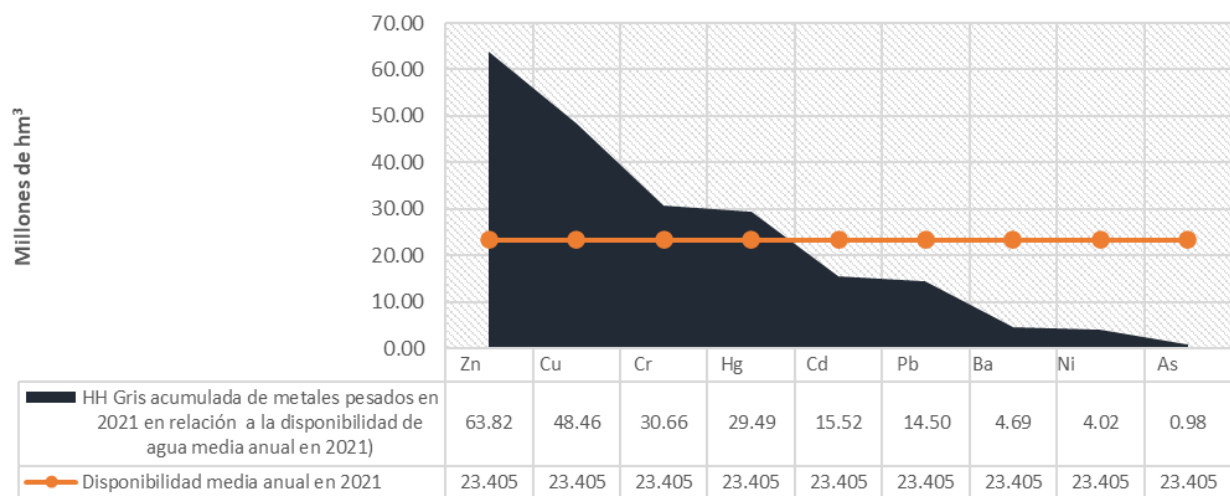


Figura 5 - Huella Hídrica Gris Inorgánica en comparación con la disponibilidad media anual 2010 – 2021



Fuente: Elaboración propia.

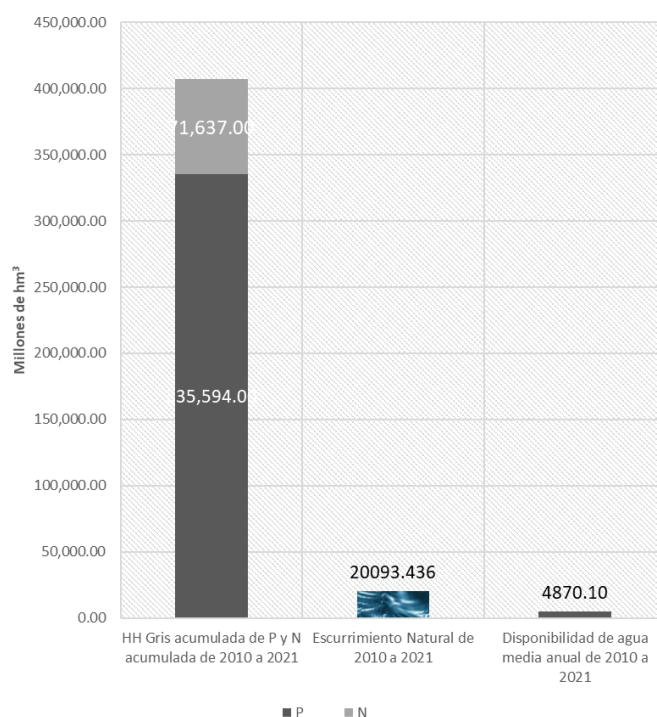
Figura 6 - Huella Hídrica Gris Inorgánica en comparación con la disponibilidad media anual 2021



Fuente: Elaboración propia.

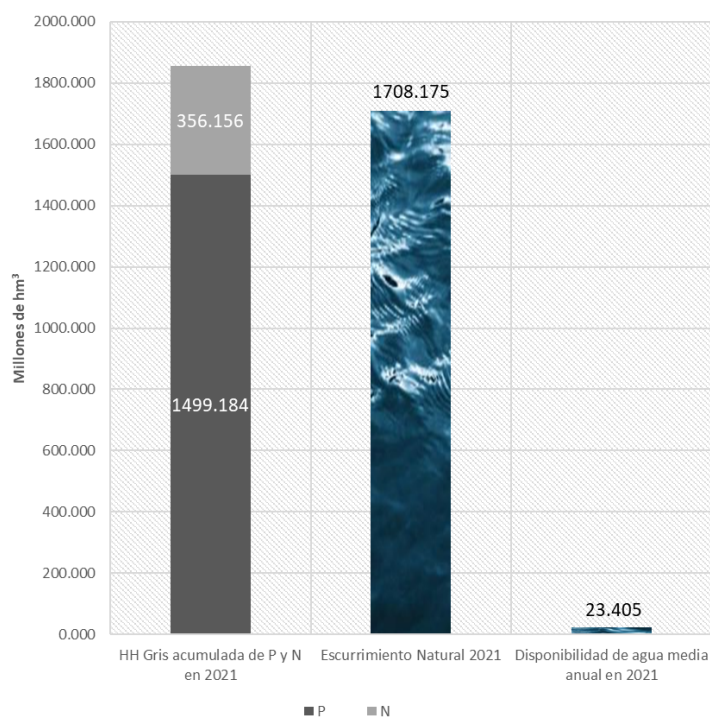


Figura 7 - Huella Hídrica Orgánica en comparación con la disponibilidad media anual de 2010 a 2021: Cuenca Río Santiago – Guadalajara



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8 - Huella Hídrica Orgánica en comparación con disponibilidad media anual en 2021



Fuente: Elaboración propia.



5.2.2 Impactos secundarios

El análisis de la sustentabilidad en términos de impactos secundarios puede revelar efectos nocivos para la salud humana (Hoekstra et al., 2011). Cuando un país importa más aguas grises de las que exporta a través de su balanza comercial, se convierte en un importador neto de aguas grises, externalizando así su contaminación hídrica a otros países. En contraste, si un país exporta más aguas grises de las que importa, se considera un exportador neto de aguas grises, siendo subcontratado por otros países para manejar esta carga contaminante.

En el contexto global actual, resulta esencial comprender cómo la HHG deslocalizada por algunos países convierte a naciones como México en acreedores de una Deuda Ecológica. Un ejemplo de ello es la región de la CSG, donde los componentes químicos de interés económico no se transfieren a través de los flujos comerciales de los productos exportados, sino que permanecen en la región como sumideros, a pesar de que la cuenca ya no dispone del volumen de agua necesario para asimilar dichas cargas.

Adicionalmente, las oportunidades de crecimiento basadas en la demanda externa se presentan en un entorno donde la especialización en industrias altamente contaminantes carece del apoyo técnico y organizativo necesario para implementar procesos de producción que prioricen los aspectos biofísicos y la gestión integral del agua. Esto incluye la adhesión a criterios internacionales de sustentabilidad, así como la adopción de nuevas tecnologías, infraestructura vernácula o Soluciones

Basadas en la Naturaleza (SbN) (CEPAL, 2021:2).

Dado que aún no se ha producido una reconfiguración significativa en algunas ramas industriales, el crecimiento sostenido de las exportaciones conlleva una mayor demanda de materiales y energía, expresada en toneladas, derivada de la extracción de metales, minerales no metálicos (utilizados en la construcción e industria), biomasa (como madera y alimentos) y portadores de energía fósil, todos los cuales se incorporan al proceso económico.

La presión para alcanzar el desarrollo económico mediante la matriz exportadora oculta una devastadora sustractabilidad⁷ del agua (Ostrom, 2000). La HHG permite vislumbrar esta conexión sutil entre el comercio internacional y el uso del agua para satisfacer la demanda final, planteando así el debate sobre el origen de la responsabilidad en la contaminación hídrica y la manera en que debería distribuirse esta carga (Davis y Caldeira, 2010; Zhao et al., 2019).

Además, esta dinámica subraya una paradoja: mientras se busca el desarrollo económico a través de la presión de la matriz exportadora, las regiones que contribuyen significativamente al Producto Interno Bruto (PIB) son precisamente las que exponen a sus habitantes a diversos riesgos derivados de las actividades económicas que se realizan en ellas (Zarco, 2010:116). Estos riesgos incluyen la pérdida de los servicios ecosistémicos proporcionados por la cuenca, lo que incrementa los riesgos para la salud y el bienestar de las comunidades.

⁷ “La sustractibilidad indica que un recurso no puede ser consumido o sus beneficios no pueden ser percibidos simultáneamente por diferentes usuarios, es decir una vez yo me

beneficie o extraiga una unidad del recurso es muy difícil que otra persona se pueda beneficiar de la misma unidad del mismo” (Ostrom, 2000, p. 395).



6. Conclusión

Este artículo se enmarcó en la línea de estudios dedicados a estimar la escala y el valor de la apropiación neta de recursos extraídos a través del comercio internacional (Cazcarro et al., 2016; Serrano et al., 2016; Zhi et al., 2015; Zhao et al., 2019; Hoekstra y Mekonnen, 2012; Liu et al., 2012). Su principal contribución consistió en la estimación y análisis derivado de la aplicación de un indicador proveniente de la Economía Ecológica.

El análisis de la huella hídrica gris (HHG) revela que, en la región de la Cuenca Alta del Río Santiago – Guadalajara (CSG), ha aumentado la transferencia de sumideros y, de manera simultánea, la Deuda Ecológica. Esta situación se debe a la carga de contaminación sinérgica, que incluye 11 parámetros químicos de interés económico (9 inorgánicos y 2 orgánicos).

Se estimó que la HHG representa una apropiación humana de agua dulce de 25,961.6 hm³ para contaminantes inorgánicos y de 382,267.46 hm³ para contaminantes orgánicos, lo que provoca una disrupción significativa en la capacidad de la región para recibir, absorber y almacenar agua.

En virtud de lo anterior, se concluye que la HHG contribuye a una Deuda Ecológica para la región de la CSG, dado que los componentes químicos de interés económico no se transfieren a través de los flujos comerciales de los productos exportados, sino que permanecen en la región en forma de sumideros. Este problema persiste incluso cuando la cuenca ya no dispone del volumen de agua necesario para asimilar dichas cargas, situación que evidencia cómo la presión para lograr el desarrollo económico mediante la matriz exportadora oculta la devastadora sustractabilidad del agua.

La asimilación de la HHG en la CSG dependerá de una serie de factores hidrológicos y de la naturaleza química de cada componente, pero principalmente de la reducción de su uso en los procesos de producción industrial. Esta reducción ayudaría a mitigar el grave conflicto socioambiental que enfrenta el territorio de la cuenca y contribuiría a promover un aprovechamiento del agua basado en la sostenibilidad, la distribución equitativa y la eficiencia en su uso.

Solo se obtendrá un beneficio social tangible o, al menos, un costo social razonable cuando la HHG sea "sustancialmente menor o igual a 0" (Hoekstra et al., 2011:121). Alcanzar este objetivo requiere identificar la responsabilidad externa (además de la interna) en la descarga de contaminantes, explorar la distribución equitativa de esta carga entre los países y reorientar las estrategias hacia la reducción y transformación desde el momento del vertido de contaminantes (Peinado, 2018:56; Hoekstra, 2011; Zhao et al., 2019).

De cara al futuro, adoptar estrategias adaptativas por sí solas no será suficiente; se necesitarán acciones transformadoras que aborden los cambios en la disponibilidad, el uso y la calidad del agua. Esto es crucial porque, aunque los recursos de agua dulce son limitados, enfrentarán una demanda creciente por parte de los sectores agropecuario, industrial y poblacional en las próximas décadas.

Para iniciar esta reconfiguración, es esencial adoptar marcos de análisis alineados con la Economía Ecológica. Estos marcos deben examinar críticamente las corrientes hegemónicas en la economía y profundizar en los límites y alcances de la comprensión y valoración de los daños ecológicos dentro de la contabilidad económica.

Por lo tanto, es fundamental cuestionar y reformular los paradigmas establecidos,



reconociendo y atendiendo las necesidades reales de los territorios, que a menudo trascienden las prioridades del Estado y del mercado.

Referencias

Bollo-Manent, M.; Hernández Santana, José; Salazar, R.; Rivera, A. & Díaz, A.; Vega, Y.; Lemoine-Rodríguez, Richard; Andalón, M.; García, A.; Mendoza, F.; García, G.; Pacheco, JA; Sánchez, Luis Giovanni; Muñiz-Jauregui, Jesús; Cantú, M.Mendoza; Solis Castillo, Berenice & López, R.; Sanchez, Oscar; Quevedo, Alexander; y Ramírez, D.Silva, 2017. Situación ambiental de la cuenca del Río Santiago Guadalajara. Editorial de la SEMADET, SEMARNAT, Guadalajara, México. Pp. 48 y 26.

Cazcarro, I.; Duarte, R.; and Sánchez-Chóliz, J., 2016. Downscaling the grey water footprints of production and consumption. *Journal of Cleaner Production* Vol. 132: 171–183.

CEA, 2022. Datos Abiertos del Sistema de Calidad del Agua: Río Santiago. Comisión Estatal del Agua de Jalisco. Guadalajara, México.

CEPAL, 2021. Financiamiento para el desarrollo en la era de la pandemia de COVID-19 y después. Informe Especial COVID-19 No. 10. P. 2.

Chapagain, A. K.; Hoekstra, A. Y.; Savenije, H. H. G.; and Gautam, R., 2006. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton-producing countries, *Ecological Economics* Vol. 60: 186–203.

CONAGUA y COCURS, 2017. Programa de Gestión de la Cuenca del Río Santiago. Gerencia Operativa del Consejo de Cuenca del Río Santiago. Editorial de la CONAGUA y COCURS, Guadalajara, México.

Davis, S.J., Caldeira, K., 2010. Consumption-based accounting of CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* Vol. 107: 5687–5692.

De la Rosa Portillo, Laura Esther, 2014. Análisis espacio-temporal del monitoreo de la calidad del agua del río Grande de Santiago, y sus implicaciones a la salud ambiental. Editorial de la Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México. Pp. 43, 48.

Frankel, Jeffrey A., 2003. The Environment and Globalization. National Bureau of Economic Research, Working Paper No. 10090. P. 3.

Hoekstra, A. Y.; Chapagain, A. K.; Aldaya, M. M.; and Mekonnen, M. M., 2011. Manual de Evaluación de la Huella Hídrica. Establecimiento del Estándar Mundial. Editorial AENOR Internacional, S.A.U., Madrid, España. Pp. 42, 47, 50, 58, 60, 117, 120 y 121.

Hoekstra, A. Y.; and Mekonnen, M. M., 2012. The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* Vol. 109: 3232–3237. P. 2.

IIEG, 2020. Ficha informativa 9 de diciembre de 2020: Producto Interno Bruto de Jalisco en 2019. Editorial del Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco, Guadalajara, Jalisco.

IIEG, 2021. Ficha informativa, 19 de mayo de 2021: Inversión Extranjera Directa en Jalisco en el primer trimestre de 2021. Editorial del Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco, Guadalajara, Jalisco.



INEGI, 2020. Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.

Liu, Cheng; Kroeze, C.; Hoekstra, Arjen; and Gerbens-Leenes, Winnie, 2012. Past and future trends in grey water footprints of anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to major world rivers. *Journal of Ecological Indicators* Vol 18: 42–49.

Lujan Godínez, Ramiro; Michel Parra, J. Guadalupe; Vizcaíno Rodríguez, Luz Adriana; Mayoral Ruiz, Pedro Alonso; y Caro Becerra, Juan Luis, 2018. Gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Santiago: una perspectiva. Memoria en extenso. XVII Congreso Internacional XXIII Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias* Vol. 9: 479–490. P. 480.

Mantilla-Pinilla, Eduardo; Carbal-Herrera, Adolfo; Gutierrez-Suarez, Betsimar; y Mejía-Mena, Leidy, 2018. Sintagma gnoseológico de la deuda ecológica. *Revista Panorama Económico* Vol. 26: 481-502. Pp. 468 y 475.

Menotti, Victor y Sobhani, Ladan, 1999. Globalization and Climate Change. *The Ecologist* Vol. 29, nº 3.

Mora, Aín; Piccolo, Paula; Peinado, Guillermo; y Ganem, Javier, 2020. La Deuda Externa y la Deuda Ecológica, dos caras de la misma moneda. El intercambio ecológicamente desigual entre Argentina y el resto del mundo. *Cuadernos de Economía Crítica* Vol. 7: 39-64.

Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y., 2011. National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption. Daugherty Water for Food Global Institute: Faculty Publications, Value of Water Research Report Series No. 50, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.

Ostrom, Elinor, 2000. El Gobierno de los Bienes Comunes, La evolución de las instituciones de acción colectiva. Fondo de Cultura Económica, México. P. 395.

Peinado, Guillermo, 2018. Economía Ecológica y comercio internacional: el Intercambio Ecológicamente Desigual como visibilizador de los flujos ocultos del comercio internacional. *Revista Economía* Vol. 70: 53-69. Pp. 56 y 57.

Pérez Rincón, Mario Alejandro, 2006. Comercio internacional y medio ambiente en Colombia. Universidad Autónoma de Barcelona, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Departamento de Economía y de Historia Económica, España. P.1.

Robledo, M. L. y Marcelo, W., 1992. La deuda ecológica, una perspectiva sociopolítica. Editorial del Instituto de Ecología Política, Santiago de Chile.

SEMARNAT Y CONAGUA, 2018. Atlas de Agua en México. Editorial de SEMARNAT Y CONAGUA, México.

Serrano, A., Guan, D., Duarte, R., Paavola, J., 2016. Virtual Water Flows in the EU27: A Consumption-based Approach. *Journal of Industrial Ecology* Vol. 20: 547-558.

Vázquez del Mercado Arribas, Rita y Lambarri Beléndez, Javier, 2017. Huella hídrica en México: análisis y perspectivas. Coordinación de Comunicación, Participación e Información, Subcoordinación de Vinculación, Comercialización y Servicios Editoriales del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, México.

Zarco Arista, Alba Esmeralda; Espinosa García, Ana Cecilia; Mazari Hiriart, Marisa, 2010. Riesgo potencial a la población derivado de las actividades económicas. Editorial del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México. P. 116.

Zhao, Xu; Liao, Xiawei; Chen, Bin; Tillotson, Martin; Guo, Wei; and Li, Yiping, 2019. Accounting global grey water footprint from both consumption and production perspectives. *Journal of Cleaner Production* Vol. 225: 963-971.



Zhi, Y.; Yang, Z.; Yin, X.; Hamilton, P.B.; y Zhang, L., 2015. Using gray water footprint to verify economic sectors' consumption of assimilative capacity in a river basin: model and a case study in the Haihe River Basin, China. *Journal of Cleaner Production* Vol. 92: 267-273.