

Aproximación a la estimación de la Huella Hídrica de la minería del oro en el Municipio de Segovia, Antioquia (Colombia)

An approach to estimating the water footprint of gold mining in the municipality of Segovia, Antioquia (Colombia)

J. E. González, L. J. Montoya, B. A. Botero, D. Arévalo, V. Valencia

El siguiente artículo tiene como propósito estimar el impacto ambiental de la minería de oro mediante el indicador de Huella Hídrica en el municipio de Segovia (Antioquia), el cual permite no solo analizar el consumo real de agua en las etapas de extracción y beneficio del oro, sino que también permite cuantificar el grado de contaminación generado principalmente por los vertimientos de mercurio. En esta primera aproximación se tendrán en cuenta la Huella Hídrica Azul y la Huella Hídrica Gris. Los resultados obtenidos se convierten en una herramienta para la toma de decisiones en el municipio, ya que permiten direccionar el accionar público y privado hacia las actividades que más están afectando al recurso hídrico.

The following article aims to estimate the environmental impact of gold mining by the Water Foot Print indicator in the town of Segovia (Antioquia), which allows not only to analyze the actual consumption of water in the stages of extraction and processing of gold, but also to quantify the degree of pollution generated mainly by mercury discharges. In this first approach will be considered the Blue and Grey Water Foot Print. The results become a tool for decision making in the town, as they allow direct the public and private actions to the activities that are affecting the water resource.

Descrptores / Key words

Huella Hídrica, Mercurio, Extracción y Beneficio del Oro / Water Foot Print, Mercury, Gold Extraction and processing

Aproximación a la estimación de la Huella Hídrica de la minería del oro en el Municipio de Segovia, Antioquia (Colombia)¹

An approach to estimating the water footprint of gold mining in the municipality of Segovia, Antioquia (Colombia)

J. E. González², L. J. Montoya³, B. A. Botero⁴, D. Arévalo⁵, V. Valencia⁶

1. Introducción

Colombia es un país privilegiado en cuanto a su diversidad de recursos naturales renovables y no renovables. En el caso de los recursos naturales no renovables, se encuentra el oro, mineral que fue explotado por las culturas prehispánicas para la elaboración de artesanías empleadas en sus rituales, posteriormente los conquistadores también se beneficiaron de éste y actualmente es un recurso estratégico para el sistema económico por su alto valor comercial.

En la última década el precio del oro ha tenido un fuerte ascenso, según el Banco de la República en el año 2000 en promedio durante el mes de enero, el gramo de oro fue comprado por esta entidad en \$16,920 COP⁷, mientras que para el mismo periodo en el año 2011 el precio de compra fue de \$75,454 COP⁸ situación que ha llevado a un auge en la extracción de este material en Colombia, a tal punto que en el Plan de Desarrollo Nacional 2010 - 2014, es considerado una de las locomotoras de desarrollo de la economía nacional. Sumado a lo anterior, las mejores condiciones de seguridad y los incentivos tributarios para las grandes multinacionales han promovido inversiones importantes en exploración y extracción del mismo.

Sin embargo, el proceso de extracción y beneficio del oro tienen un gran impacto en el ambiente por el uso de sustancias químicas (mercurio y cianuro principalmente) con un alto grado de toxicidad tanto para los ecosistemas como para la especie humana. Aunque se tienen estimativos del consumo de mercurio y cianuro en la extracción de oro (Gobernación de Antioquia, 2006),

¹ Este artículo se basa en los resultados parciales del proyecto "Huella Hídrica de la cuenca del río Porce", ejecutado por el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia en convenio con otras 14 entidades públicas y privadas.

² Juan Esteban González Valencia, Ingeniero ambiental proyecto Huella Hídrica de la cuenca del río Porce, juangp83@yahoo.com.mx

³ Luis Javier Montoya Jaramillo, Ingeniero Civil, profesor tiempo completo Universidad de Medellín, ljmontoya@udem.edu.co

⁴ Blanca Adriana Botero Hernández, Ingeniera Civil, profesora de tiempo completo Universidad de Medellín, babotero@udem.edu.co

⁵ Diego Arévalo Uribe, Ingeniero Civil, Director proyecto Huella Hídrica de la cuenca del Río Porce, darevalo@cta.org.co

⁶ Verónica Valencia Gallego, Ingeniera Ambiental proyecto Huella Hídrica de la cuenca del río Porce, yerojadelina@hotmail.com

⁷ En el año 2000 el precio promedio del dólar fue de 2,088.14 COP, por lo que \$16,920 COP equivalían a US 8.10

⁸ En el año 2011 el precio promedio del dólar fue de 1,854.01 COP, por lo que \$75,454 COP equivalían a US 40.69

(Sánchez y Cañón, 2010), (Machado et al., 2010), (Corporación Autónoma Regional del Cauca, 2007), (Organización de las Naciones Unidas FAO, 2002), aún no se cuenta con indicadores que permitan establecer el impacto ambiental generado por dichos contaminantes en el recurso hídrico.

Por tal motivo, en el marco del Proyecto “Huella Hídrica en la cuenca del río Porce”, proyecto desarrollado en Colombia durante el año 2012 y comienzo de 2013, liderado por el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia CTA, en convenio con 15 entidades nacionales e internacionales (COSUDE⁹), se decidió evaluar el indicador de la Huella Hídrica para la minería de oro en la cuenca del río Porce, en Antioquia, con el objetivo de evaluar el impacto de esta actividad en el recurso hídrico y de esta forma proponer desde un enfoque de sostenibilidad ambiental alternativas para reducir su impacto.

Para efectos de este artículo, se presentarán solamente los resultados preliminares obtenidos de aplicar un proyecto piloto en uno de los municipios que hacen parte de dicha cuenca y que corresponde al municipio de Segovia, principal productor de oro en Antioquia y Colombia en los últimos 6 años de acuerdo a los datos reportados por el Sistema de Información Minero Colombiano SIMCO¹⁰, sistema que hace parte del Ministerio de Minas y Energía de Colombia.

2. Antecedentes

El concepto de Huella Hídrica es relativamente nuevo (Hoekstra y Hung 2002), y tiene como principales antecedentes tres conceptos: Huella Ecológica, Huella de Carbono y Agua Virtual. Todos estos indicadores tienen como objetivo principal cuantificar el impacto ya sea en el agua, atmósfera, o suelo generado por el crecimiento de la población humana, pero a la vez son indicadores que permiten tomar decisiones a todo nivel (políticas públicas, políticas empresariales o simplemente cambios culturales en las sociedades).

Como principal antecedente del concepto de Huella Hídrica, está el de Agua Virtual, el cual es definido por Hoekstra y Hung (2002) como la cantidad de agua que incorpora un producto en su fase de producción. Por ejemplo para producir un kilo de granos en promedio se requieren entre 1,000 y 2,000 kg de agua. La evolución del concepto de Agua Virtual hacia la huella hídrica se enfoca en dos aspectos:

Primero se conceptualiza un indicador de agua virtual que no está relacionado con un flujo, sino que se calcula a un proceso y subsiguientes (producto, productor o consumidor y grupos de productores o consumidores. La segunda

⁹Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación en Colombia

¹⁰La información de producción de oro por municipios en Colombia, se puede consultar en la página web www.simco.gov.co

fase es cuando el indicador de impacto llamado Huella Hídrica se analiza a partir de tres componentes que están claramente diferenciadas en concepto e interpretación (Verde, Azul y Gris), además la posibilidad de analizar este indicador en diferentes escalas espaciales (cuenca hidrográfica, empresa, ciudad, nación, entre otros).

Aunque el concepto de Huella Hídrica es nuevo, tanto a escala mundial como local, se han desarrollado estudios que estimaron este indicador (principalmente para el sector agrícola) para diferentes escalas espaciales, por ejemplo a nivel de país hay estudios en China, India, España, Reino Unido, entre otros. En cuencas hidrográficas está el proyecto desarrollado en la cuenca del río Guadalquivir en España, la cuenca del río Heihe en China, en el río Nilo, entre otros. A nivel empresarial está el proyecto de Suizagua con empresas como Mineros S.A., Holcim y Nestlé que están evaluando la huella hídrica para sus procesos productivos. Algunos de los estudios más relevantes pueden ser consultados en el sitio web de la Water Footprint Network¹¹.

Para el caso concreto de Colombia, solo se tiene referencia de un estudio de Huella Hídrica, el cual se denominó Estudio Nacional de Huella Hídrica para Colombia - Caso de estudio: sector Agrícola, proyecto liderado por la World Wide Fund for Nature WWF - Colombia y actualmente se está desarrollando el proyecto Huella Hídrica de la cuenca del río Porce, del cual se derivan los resultados parciales que se presentan en esta publicación.

Considerando que el objetivo principal de este artículo es presentar los resultados de la minería de oro en el municipio de Segovia, también se consultó estudios de Huella Hídrica en este sector específico, dando como resultado una tesis realizada en la Universidad de Chile donde se determinó la Huella Hídrica en la producción del concentrado de cobre para una empresa¹².

3. Características de la zona de estudio y proceso de extracción y beneficio

El municipio de Segovia se localiza en la zona denominada Nordeste Antioqueño, la cabecera urbana se ubica a 650 msnm, tiene una temperatura media de 24°C y se encuentra a 227 Km de la ciudad de Medellín, capital del departamento de Antioquia y segunda ciudad en importancia de Colombia (Alcaldía de Segovia, 2012). Su principal actividad económica es la extracción y beneficio del oro, que representa el 39.4% de la producción total departamental y el 6.66% de la producción nacional, además se encuentra en el Distrito Minero Segovia - Remedios (BIRD Antioquia, 2008). En la Figura 1, se presenta la ubicación del municipio de Segovia en el departamento de Antioquia.

¹¹<http://www.waterfootprint.org>

¹²La tesis es "Análisis Técnico de la Huella Hídrica como indicador de sustentabilidad del uso del agua en la producción del concentrado de cobre en división el teniente de Codelco". Autor: Manuel Antonio Garcés Valenzuela. 2011. Santiago de Chile



Figura 1. Ubicación del municipio de Segovia
Fuente: elaboración propia

De acuerdo a la información registrada en el SIMCO, para el periodo 2005 - 2011, Segovia en promedio tuvo una producción de 3,421.00 kg de oro. En la Tabla 1, se presenta la producción anual comprendida en este periodo.

Año	Producción (Kg)
2005	2,004.50
2006	1,805.31
2007	3,361.53
2008	5,518.48
2009	7,162.08
2010	1,707.97
2011	2,387.16
Promedio	3,421.00

Tabla 1. Producción anual de oro, Municipio de Segovia
Fuente: SIMCO

En el municipio de Segovia predomina la minería de veta, en la cual el oro viene mezclado con otros materiales y minerales del suelo, por lo que es necesario en el proceso de beneficio utilizar mercurio (amalgama) y cianuro (cianuración) para su extracción.

De forma general, el proceso de extracción y beneficio del oro de veta, según GEMMA (2007) inicia con la extracción del mineral (mezcla de materiales del suelo en la cual está el oro), en esta fase no se presenta consumo de agua. Posteriormente inicia un proceso de reducción del tamaño del material, con el fin de optimizar el proceso de amalgamación. Cuando el mineral tiene el tamaño adecuado se deposita en unos tanques denominados “cocos” en los

cuales se adiciona agua y mercurio para formar la amalgama (mezcla semisólida de mercurio y oro). La amalgama, es llevada a fundición para separar el oro del mercurio. En esta fase el mercurio se evapora, generando problemas por contaminación atmosférica (Veiga, 2010).

El material residual de los cocos se denomina colas, en las cuales hay un porcentaje de oro que no formó amalgama, estas colas son las que entran al proceso de cianuración con el fin de extraer la mayor cantidad de oro posible.

En los casos donde se presenta minería de aluvión el proceso es totalmente diferente, ya que el oro es más fácil de extraer, por lo que solamente se utiliza la fase de amalgamación (menor consumo de mercurio que en el oro de veta), por lo que el impacto ambiental generado por este tipo de extracción es menor tanto en los ecosistemas como en las poblaciones aledañas a las explotaciones en relación al mercurio pero tiene alta incidencia en el aporte de sedimentos en los cauces. En algunos casos, en la minería de aluvión no se requiere el uso de mercurio ya que el oro no se encuentra mezclado con otros minerales.

4. Metodología

La metodología para estimar la Huella Hídrica se puede consultar en el estudio The Water Foot Print Assessment Manual, Setting the Global Standard (Hoekstra et al., 2011). En dicho estudio se definen los 3 conceptos de la Huella Hídrica: Azul, Verde y Gris

4.1 Huella Hídrica Azul

Es el consumo de agua o la cantidad de agua superficial o subterránea que se utiliza para un proceso o producto.

Para contabilizar la Huella Hídrica Azul se debe tener en cuenta las siguientes características:

- El agua que se evapora durante el proceso
- El agua que es incorporada al producto
- El agua que no retorna a la misma cuenca de captación
- El agua retorna a la misma cuenca de captación pero en periodos climáticos diferentes (invierno, verano)

Para la estimación de la Huella Hídrica Azul, inicialmente se calcula un indicador que hace referencia al consumo de agua en m^3 por kg de oro producido, para este cálculo se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$\text{Indicador HHA} = \frac{\text{Caudal}_{\text{entrada}} - \text{Caudal}_{\text{salida}}}{\text{Producción}} \quad (1)$$

Con esta ecuación se asume que la diferencia entre el caudal de entrada y de salida, se da por cualquiera de las 4 características mencionadas anteriormente. Otra alternativa consiste en determinar en el proceso donde se puede generar huella azul por evaporación, fugas, entre otros y estimar dicho valor. Luego el indicador HHA se multiplica por la producción total en los diferentes años, para así obtener la Huella Hídrica Azul Total.

4.2 Huella Hídrica Verde

Hace referencia al consumo de agua proveniente de la precipitación pero que no hace parte de la escorrentía superficial directa ni de las recargas de acuíferos subterráneos. Generalmente esta agua es evapotranspirada por las plantas, por lo que es un concepto asociado al tema agrícola - forestal. Por tal motivo la Huella Hídrica Verde no se tiene en cuenta para la Huella Hídrica del oro en Segovia.

4.3 Huella Hídrica Gris

Es un valor teórico que representa el volumen de agua necesario para diluir la concentración del contaminante hasta el punto en que se garantice la calidad ambiental del afluente receptor. Para este caso se calcula el indicador de HHG mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Indicador HHG} = \frac{(\text{Carga Contaminante} / \text{Producción})}{(C_{max} - C_{nat})} \quad (2)$$

La carga contaminante hace referencia a la alteración en la calidad físico-química del agua durante el proceso. La carga puede ser calculada de diferentes formas dependiendo de la información disponible, sin embargo, el criterio general para su estimación es:

$$\text{Carga Contaminante} = Q_{efl} \times C_{efl} - Q_{ent} \times C_{ent} \quad (3)$$

Q_{efl} : Caudal de vertimiento o de salida

C_{efl} : Concentración del contaminante en el efluente

Q_{ent} : Caudal de entrada

C_{ent} : Concentración del contaminante antes de ingresar al proceso

C_{max} : Concentración máxima del contaminante que no afecte la calidad del agua

C_{nat} : Concentración natural del contaminante en la fuente hídrica

Luego este indicador se multiplica por la producción para hallar la Huella Hídrica Gris Total.

5. Resultados

Las fuentes principales de información para el cálculo de la Huella Hídrica son (Veiga et al., 2011) y (Gobernación de Antioquia, 2006). En el estudio de la Gobernación de Antioquia (2006) se recopiló información de producción, consumo de agua, caudal vertido para dos minas de oro ubicadas en el municipio de Segovia. Como no se tenía información de otras minas, se procedió a estimar la Huella Hídrica Azul (HHA) en base a esta información para luego extrapolarla a toda la producción del municipio.

5.1 Huella Hídrica Azul

La primera alternativa para estimar la HHA tuvo en cuenta el caudal de entrada y el de salida, la información utilizada fue la siguiente (ver Tabla 2):

Parámetro	Mina 1	Mina 2
Caudal entrada (m ³ /mes)	2,612	700
Caudal de salida (m ³ /mes)	2,180	*584.50
% de retorno de agua	0.17	0.165
Consumo de agua (m ³ /mes)	432	115.5
Producción (Kg/mes)	4.74	4.41

Tabla 2. Información para el cálculo de la HHA, metodología 1

*Este valor no fue suministrado en el estudio, por lo tanto se calculó en base al factor de retorno de la Mina 1.

Aplicando la Ecuación 1 para las Minas 1 y 2, se obtiene que el indicador HHA es de 91.14 y 26.25 m³/kg de oro producido respectivamente y el promedio es de 58.69 m³/kg.

En la metodología 1, el cálculo incorpora todas las pérdidas de agua en el proceso, tanto por evaporación en las piscinas de cianuración como pérdidas en la infraestructura de los entables. Para estimar la HHA bajo una segunda metodología, se analizó en que etapas se consume la mayor cantidad de agua, de esta forma se determinó que la HHA principalmente se genera en el proceso de cianuración donde se presenta evaporación. La información para el cálculo de la HHA con la metodología 2 es la siguiente:

Parámetros	Mina 1	Mina 2
Volumen de agua por mes (m ³)	2,612.00	700.00
Altura promedio de Tanques (m)	1.50	1.50
Espejo de agua (m ²)*	1,741.33	466.67
Evaporación (mm/año)**	1,380	1,380
Evaporación (m/mes)	0.12	0.12
Pérdidas por evaporación (m ³ /mes)	200.25	53.67
Producción (Kg/mes)	4.74	4.41

Tabla 3. Información para el cálculo de la HHA, metodología 2

*Dato obtenido de consultar en la mina la altura promedio de los tanques de cianuración

**Dato obtenido del Hidrosig

En este caso, el indicador HHA se estimó calculando la evaporación a partir del consumo de agua en la Mina 1:

$$\text{Área_agua} = \frac{\text{Vol Agua}}{\text{Altura tanques de cianuración}} = \frac{2,612.00 \text{ m}^3}{1,5 \text{ m}} = 1,741.33 \text{ m}^2$$

$$\text{Pérdidas por evaporación} = \frac{\text{Evaporación}}{\text{X Agua}} = 0.12 \frac{\text{m}}{\text{mes}} \times 1,741.33 \text{ m}^2 = 200.25 \frac{\text{m}^3 \text{ Agua}}{\text{mes}}$$

$$\text{Indicador HHA} = \frac{\text{Pérdidas por evaporación}}{\text{Producción mensual}} = \frac{200.25 \frac{\text{m}^3 \text{ Agua}}{\text{mes}}}{4.74 \frac{\text{Kg Au}}{\text{mes}}} = 42.24 \frac{\text{m}^3 \text{ Agua}}{\text{Kg Au}}$$

Aplicando este procedimiento para la Mina 2, el indicador HHA es 12.17 m³/kg y el promedio de las Minas 1 y 2 es de 27.21 m³/kg. Los resultados de Huella Hídrica Azul para el municipio de Segovia (Tabla 4), se obtienen de multiplicar la producción anual de oro por el promedio del indicador de Huella Hídrica Azul de las Minas 1 y 2 obtenidos en cada metodología, por ejemplo, el promedio del indicador HHA de la metodología 1 es de 58.69 m³/kg, multiplicado por la producción de 2005 (2,004.50 kg de oro), da una Huella Hídrica Azul de 117,644.11 m³ de agua.

Año	Producción (Kg de oro)	Huella Hídrica Azul Metodología 1 (m ³ de agua)	Huella Hídrica Azul Metodología 2 (m ³ de agua)	Diferencia entre las metodologías 1 y 2 (m ³ de agua)
2005	2,004.50	117,644.11	54,542.45	63,101.66
2006	1,805.31	105,953.64	49,122.49	56,831.15
2007	3,361.53	197,288.20	91,467.23	105,820.97
2008	5,518.48	323,879.59	150,157.84	173,721.75
2009	7,162.08	420,342.48	194,880.20	225,462.28
2010	1,707.97	100,240.76	46,473.86	53,766.9
2011	2,387.16	140,102.42	64,954.62	75,147.8
Promedio	3,421	200,778.49	93,085.41	107,693.08

Tabla 4. HHA de la extracción y beneficio del oro en Segovia
Fuente: elaboración propia

La escasez de información y datos (solamente 2 minas) generan una incertidumbre en el cálculo de la HHA, esto se evidencia por ejemplo en el año 2009 donde se presentó la mayor producción de oro. La HHA a partir de la metodología 1 da como resultado 420,342.48 m³ de agua, mientras que con la metodología 2 para el mismo año (2009) la HHA es de 194,880.20 m³ de agua, esta diferencia se debe a que en la primera metodología se tiene en cuenta todas las pérdidas de agua en el proceso, mientras que en la segunda como se mencionó anteriormente solo contempla las pérdidas por evaporación del agua en las piscinas de cianuración. La segunda metodología se realizó con el fin de proporcionar una herramienta práctica en casos donde no se posee la información requerida para la primera metodología.

5.2 Huella Hídrica Gris

Debido a la dificultad para encontrar información en los entables mineros que permitiera estimar la Huella Hídrica Gris (HHG) tomando como base la Ecuación 2, fue necesario primero determinar cual era el consumo anual de mercurio en Segovia y en segundo lugar estimar que porcentaje del mercurio es vertido en las fuentes hídricas. De esta manera se tiene una carga contaminante de mercurio para todo el municipio, que corresponde al mismo concepto de carga contaminante de la Ecuación 3. En la Tabla 5, se presenta la información para estimar la HHG.

Parámetro	Valor
Consumo de Hg(Ton/año)*	22.40
% de pérdidas de Hg en efluentes*	0.46
Producción promedio de oro (Kg/año)	3,421
% Recuperación oro por Mercurio*	0.50
Concentración máxima (mg/L)**	0.006
Concentración natural (mg/L)	0.00

Tabla 5. Información para estimar la HHG

*Esta información fue obtenida de (Veiga et al., 2011)

** (Boulay et al., 2011)

De la Tabla 5, es importante mencionar que para este estudio se asumió que el proceso productivo del oro se realiza con mercurio y cianuro, por lo tanto fue necesario estimar que porcentaje del oro se obtiene con cada una de las sustancias químicas. En el estudio de Veiga et al., (2011) se definió que a partir de la amalgama (mercurio) se obtiene entre un 40 - 50% del oro, mientras que el porcentaje restante corresponde a la cianuración. Para efectos de este cálculo se asume que el 50% del oro se obtiene con mercurio y el otro 50% con cianuro. En el caso de la concentración natural, se asume que en las fuentes hídricas no hay aportes naturales de mercurio a los recursos hídricos, por lo tanto el valor adoptado es de 0 mg/L de Hg. Aplicando las Ecuaciones 2 y 3 se tiene lo siguiente:

$$Carga\ contaminante = \frac{Consummo\ Hg}{año} \times \% \text{ pérdidas Hg en afluentes}$$

$$Carga\ contaminante = \frac{22,400.00\ Kg\ Hg}{año} \times 0,46 = 10,304.00 \frac{Kg\ Hg}{año}$$

$$Indicador\ HHG = \frac{\left(\frac{Carga\ contaminante}{Producción} \right)}{(C_{max} - C_{nat})}$$

$$Indicador_{HHG} = \frac{\frac{10,304.00\ kg\ Hg}{año}}{\frac{1,710.50\ kg\ oro}{año}} = 1,003,994.93 \frac{m^3\ agua}{Kg\ Au}$$

$$= \frac{1,003,994.93 \frac{m^3\ agua}{Kg\ Au}}{\left(0,006 \frac{mg\ Hg}{L} - 0,00 \frac{mg\ Hg}{L} \right) * \frac{1.00\ Kg\ Hg}{10^6\ mg\ Hg} * \frac{1,000.00\ L}{1m^3}}$$

En el municipio de Segovia los entables mineros tienen diferentes estrategias en cuanto al uso del mercurio, en algunos casos implementan la retorta para reutilizarlo nuevamente en el beneficio, en otros casos simplemente no se recupera. Como no se tiene un estimativo de cuantos entables recuperan mercurio y en que porcentaje, se proponen 4 escenarios para estimar la HHG total modificando el porcentaje de mercurio recuperado en los entables mineros, de los cuales el escenario 1 fue el único reportado y corresponde a un 50.00% de recuperación de Hg (Veiga et al., 2010). En la Tabla 6, se presentan los diferentes escenarios.

Escenario	% Recuperación del Hg en el beneficio	% de Hg emitida al aire	% de Hg vertida en fuentes hídricas	% Total de Hg utilizado
1	50% (modelo de cálculo)	3.3	46.7	100
2	80%	3.3	16.7	100
3	20%	3.3	76.7	100
4	0%	3.3	96.7	100

Tabla 6. Escenarios para estimar la Huella Hídrica Gris
Fuente: elaboración propia

En la Tabla 7, se presenta los resultados de la HHG total para los años 2005 - 2011 en el municipio de Segovia para los diferentes escenarios.

Año	Producción (Kg de oro)	HHG (millones de m ³ de agua)			
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
2005	1,002.25	1,021.57	365.31	1,677.82	2,115.32
2006	902.65	920.05	329.01	1,511.10	1,905.12
2007	1,680.76	1,713.16	612.63	2,813.69	3,547.38
2008	2,759.24	2,812.42	1,005.73	4,619.11	5,823.58
2009	3,581.04	3,650.06	1,305.27	5,994.86	7,558.05
2010	853.98	870.45	311.27	1,429.62	1,802.41
2011	1,193.58	1,216.59	435.05	1,998.12	2,519.15

Tabla 7. Huella Hídrica Gris, municipio de Segovia
Fuente: elaboración propia

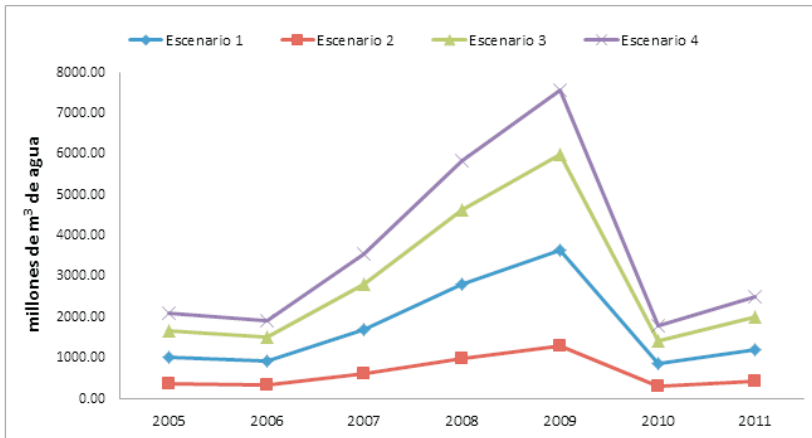


Gráfico 1. HHG Municipio de Segovia
Fuente: elaboración propia

6. Análisis de resultados

Antes de iniciar con los análisis de resultados, es importante mencionar que no se han identificado estudios para este mismo mineral (oro) que permita comparar los resultados preliminares obtenidos. Por lo tanto se utilizarán resultados de Huella Hídrica de otros sectores como el agrícola en Colombia para tener una idea del impacto generado por la minería de oro. También se analizarán los resultados obtenidos en la minería de cobre en Chile.

Comparando los resultados de la Huella Azul del oro en Segovia con los obtenidos en el estudio (World Wide Fund for Nature, 2012) para el sector

agrícola, el departamento de Antioquia donde se ubica Segovia registra una Huella Azul para todos los cultivos de 17.30 millones de m³ de agua. La HHA del oro en Segovia (Metodología 1), en promedio está en 200,778.49 m³, lo que representa el 1.16% de la HHA del sector agrícola. En el caso de Segovia en este mismo estudio no se registra HHA, por lo que la actividad minera puede considerarse una de las actividades que más incorpora agua en sus procesos productivos o donde más se presenta evaporación en los mismos.

En relación a los datos obtenidos en Segovia para la HHG (varían entre 870.45 millones - 3,650.06 millones de m³ de agua para el escenario 1 o actual), comparando estos resultados con los del World Wide Fund fo Nature (2012), las cifras son preocupantes considerando que toda la HHG del sector agrícola en Antioquia es de 206.62 millones de m³ de agua, cifra ampliamente superada por la HHG del sector minero en Segovia, indicando que la minería de oro en este municipio tiene un impacto en los recursos hídricos más altos que los ocasionados por el sector agrícola en todo el departamento de Antioquia. En cuanto a la HHG del sector agrícola en el municipio de Segovia, se vuelve más crítica la situación, ya que para ésta se registra una HHG de 50,000.00 m³ de agua, ratificando el alto impacto de la minería en las fuentes hídricas del municipio. Peor situación se presenta en la HHG del río Porce, donde la agricultura requiere de 17.10 millones de m³ de agua para diluir la concentración de contaminante (valor también superado por la HHG de la minería en Segovia).

En Colombia la agricultura genera una HHG de 2,097.99 millones de m³ de agua (World Wide Fund fo Nature, 2012), mientras que la HHG promedio de Segovia es de 1,743 millones de m³, estos resultados indican que la minería de oro en Segovia tiene un impacto muy similar a toda la agricultura de Colombia. Aunque sería necesario tener datos de una muestra estadísticamente representativa de minas en Segovia para tener mayor confiabilidad en los resultados, se identifica que el sector minero presenta un fuerte impacto por la cantidad y concentración de mercurio que está vertiendo en las fuentes hídricas.

En relación al estudio elaborado para la minería de cobre en Chile (Garcés, 2011), aclarando que los procesos de beneficio en este caso son totalmente tecnificados y donde se implementan prácticas para la reducción en el consumo de agua (situaciones muy diferentes a las que se presentan en el beneficio del oro en la zona de estudio), se observa que en el escenario mas desfavorable el indicador de HHA es de 31.40 m³/Ton de cobre, mientras que para obtener un kilogramo de oro se requieren en promedio 27.21 m³ de agua. Esta diferencia puede ser explicada por la baja tecnificación en los procesos de beneficio del oro lo que conlleva a una sobre explotación del recurso hídrico.

Para la HHG, en el estudio de Garcés (2011) se obtiene un indicador de 38.10 m³/Ton de cobre y para la minería de oro la HHG es de 1,003,994.93 m³ de agua/kg de oro. Aunque en ambas actividades se generan diferentes contaminantes (en el cobre los contaminantes principales son sulfatos y molibdenos, mientras que en el oro son mercurio y cianuro), se evidencia un mayor impacto ambiental generado por el beneficio del oro, lo que corrobora la necesidad de proponer e implementar medidas para reducir el uso del mercurio.

Del Gráfico 1, se analizan algunos aspectos importantes, por ejemplo, en el escenario 2 donde se plantea una recuperación del 80.00% del mercurio (solamente el 16.30% del mercurio sería vertido en las fuentes hídricas), se observa que la HHG en promedio de los años 2005 - 2011 es de aproximadamente 623.00 millones de m³ de agua (valor superior a la HHG agrícola de Antioquia), por lo tanto así se implementen tecnologías de producción más limpia, el impacto ambiental por esta actividad sigue siendo muy alto. Las autoridades ambientales en conjunto con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Ministerio de Minas y Energía, deben articular esfuerzos con el sector privado para reducir continuamente el uso del mercurio hasta llegar al punto de no requerir dicha sustancia, ya que reducciones importantes en la cantidad de mercurio vertido en las fuentes hídricas no reflejan una mejora considerable en la calidad del recurso hídrico. Esto indica que es necesario llevar a cero el consumo de mercurio para evitar los altos impactos ambientales generados por esta sustancia en el agua, suelo, aire y en las comunidades aledañas a las explotaciones de oro.

La información del Gráfico 1, es importante para entidades públicas o privadas (autoridades ambientales, municipales, gubernamentales, empresas, asociaciones, entre otros), ya que puede servir de guía para establecer metas de recuperación del mercurio y analizar como la HHG va disminuyendo. En el caso de Segovia, aumentar el porcentaje de recuperación del mercurio del 50.00 al 80.00%, representa una disminución en la HHG del 64.30% o de 560.00 millones de m³ de agua (año 2010). En cambio si el porcentaje de recuperación disminuye del 50.00 al 20.00%, la HHG aumentaría en un 64.00% o 656.00 millones de m³ de agua para el año 2010.

El Gráfico 1, también tiene como objetivo abarcar todas las posibles prácticas con el manejo del mercurio, desde aquellas que tienen 0.00% de recuperación hasta las que pueden tener porcentajes importantes de recuperación de mercurio, por ejemplo, si en Segovia en el año 2009, todos los entables tuvieron 0.00% de recuperación de mercurio, la HHG es de más de 7,000.00 millones de m³ de agua, mientras que si todos los entables hubieran recuperado el 80.00%, el volumen de agua para diluir la concentración del mercurio sería aproximadamente de 1,000.00 millones de m³ en el año 2009 (reducción del 83%).

7. Conclusiones

Los resultados que se presentan en este artículo, son una primera aproximación a la estimación del indicador de Huella Hídrica en la minería de oro en el municipio de Segovia, por lo tanto se deben realizar nuevas investigaciones para generar resultados con un mayor nivel de confiabilidad.

A pesar que los resultados no son estadísticamente representativos, se identifica una tendencia del fuerte impacto ambiental ocasionado por el uso y vertimiento de mercurio en las fuentes hídricas. Estos resultados corroboran lo que otros estudios han reportado donde se califica al municipio de Segovia como la zona más contaminada por mercurio per cápita en el mundo, tanto en sus recursos hídricos como atmosféricos (Veiga et al., 2011), (Veiga, 2010) y (Álvarez et al., 2011). El problema por contaminación del mercurio no solo afecta la calidad de la aguas, también el mercurio tiene la capacidad de reaccionar con microorganismos propios de las fuentes hídricas y convertirse en metil mercurio, el cual se puede bioacumular y biomagnificar en los seres vivos (en toda la cadena alimenticia hasta llegar a los humanos), algunos de estos resultados pueden ser consultados en Mancera y Álvarez (2006).

Para este análisis no se tuvo en cuenta el cianuro para estimar la HHG (se aplica la misma metodología para la HHG de mercurio) ya que cálculos preliminares dieron como resultado valores inferiores a los obtenidos por el mercurio, por lo que el valor a considerar es el de éste último. Esto no indica que el cianuro no afecte las fuentes hídricas, todo lo contrario es catalogado como un contaminante de interés sanitario por su alto nivel de toxicidad, simplemente para la metodología de la HHG solo se considera para el contaminante con mayor HHG, y en este caso corresponde al mercurio.

El oro es un recurso abundante en Colombia, ratificado por la llegada de multinacionales que buscan su extracción, además el Gobierno Nacional está brindando las garantías normativas, jurídicas, tributarias y de seguridad para fomentar esta actividad. Por lo tanto este auge minero debe ir acompañado de unas estrategias integrales orientadas básicamente en la adquisición de tecnologías (producción más limpia) que permitan seguir explotando el recurso pero afectando en menor proporción al ambiente.

Otro aspecto de gran relevancia es la legalización de la actividad minera, ya que un porcentaje importante de ésta se hace sin cumplir todos los requerimientos normativos lo que dificulta el seguimiento que deben realizar las autoridades mineras y ambientales.

Cada una de las empresas que realizan extracción y beneficio de oro, deben implementar este indicador, ya que permite determinar que tan buen uso se hace del agua y que tanto contaminan al recurso hídrico. Además en el

mediano y largo plazo, este indicador se convertirá en un factor relevante de competencia comercial, principalmente en los mercados internacionales.

Aunque ya se ha mencionado, la principal recomendación para futuras investigaciones es obtener mayor información de las minas, esto garantiza mayor confiabilidad en los resultados.

Para complementar los resultados y tener un visión más amplia sobre la sostenibilidad ambiental de la minería de oro en Segovia, es necesario evaluar aspectos como la oferta hídrica de la zona, con esto se identifica si el sector está demandando más agua de la que hay disponible, o si está afectando la disponibilidad del recurso aguas abajo donde ésta se utiliza en otros usos. También se pueden hacer análisis de carácter social, por ejemplo estimar el número de empleos que se generan y en que condiciones laborales, y de esta forma se analiza si la minería es una actividad sostenible desde los aspectos sociales, económicos y naturales.

8. Bibliografía

1. Alcaldía Segovia. (2012).

<<http://www.segoviaantioquia.gov.co/presentacion.shtml?apc=mffx-1-&s=i>>[Consulta 24/08/2012].

2. **Álvarez, J.; Sotero, V.; Brack, A.; Ipenza, C.** (2011). Minería aurífera en Madre de Dios, Una Bomba de Tiempo. Lima: Instituto de Investigaciones de la Amazonía peruana IIAP y Ministerio de Medio de Ambiente de Perú.

3. **BIRD Antioquia.** (2008). Potencial Minero Antioqueño, Visión General. Medellín: LEA y la Enciclopedia de Antioquia.

4. **Boulay, A.; Bulle, C.; Deschenes, L.; Margni, M.** (2011).

LCA Characterization of freshwater use on human health and through compensation. Berlín: Springer.

5. **Corporación Autónoma Regional del Cauca.** (2007).

Contaminación por mercurio y otros, Distrito minero de Buenos Aires, Cauca. Apoyo a proyectos de producción más limpia en minería para los distritos mineros del Cauca. Popayán.

6. **Garcés, M. A.** (2011). Análisis técnico de la huella hídrica como indicador de sustentabilidad del uso del agua en la producción del concentrado de cobre en División El teniente de Codelco. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

7. GEMMA Grupo de estudios en Georrecursos, Minería y Medio Ambiente. (2007). Implementación de mejores prácticas para el mejoramiento de la productividad de la minería aurífera del nordeste antioqueño. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

8. Gobernación de Antioquia. (2006). Diagnóstico para la implementación de sistemas de gestión ambiental en el distrito minero Segovia - Remedios. Medellín

9. Hoekstra, A. Y.; Hung, P. Q. (2002). Virtual Water Trade. A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. The Netherlands: IHE Delft.

10. Hoekstra, A. Y.; Chapagain, A. K.; Aldaya, M. M.; Mekonnen, M. M. (2011). The water foot print assessment manual, setting the global standard. London - Washington DC: Earthscan.

11. Machado, L. G.; Ospina, J. H.; Henao, N. A.; Marín, F. D. (2010). Problemática ambiental ocasionada por el mercurio proveniente de la minería aurífera tradicional, en el corregimiento de Providencia, Antioquia. Medellín: Universidad de Antioquia.

12. Mancera, N. J.; Álvarez, R. (2006). "Estado del conocimiento de las concentraciones de mercurio y otros metales pesados en peces dulceacuícolas de Colombia". Revista Acta Biológica Colombiana, Vol 11 No 1, p. 3-23.

13. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO. (2002). Propuesta de prevención y manejo de la contaminación por mercurio en la región de la Mojana. Bogotá.

14. Sánchez, D. E.; Cañón, J. E. (2010). Análisis documental del efecto de vertimientos domésticos y mineros en la calidad del agua del río Condoto (Chocó, Colombia). Revista Gestión y Ambiente, Vol 13 No 3 de Diciembre, p.115-130.

15. Veiga, M. (2010). Antioquia, Colombia: the world's most polluted place by mercury: impressions from two fields trips. Vancouver: University of British Columbia.

16. Veiga, M.; Cordy, P.; Salih, I.; Al Saasi, S.; Console, S.; García, O.; Mesa, L.A.; Velásquez P. C.; Roeser, M. (2011). Mercury contamination from artisanal gold mine in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution. Revista Science of the Total Environment, 410-411 (2011), p. 154-160.

17. World Wide Fund for Nature. (2012). Una Mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica. Bogotá: WWF.