

GUÍA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DE LA

# HUELLA HÍDRICA

DEL SECTOR MINERO COLOMBIANO

**GUÍA METODOLÓGICA PARA LA  
EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA  
DEL SECTOR MINERO COLOMBIANO**

República de Colombia

Germán Arce Zapata  
**Ministro de Minas y Energía**

Carlos Andrés Cante  
**Viceministro de Minas**

Jorge Valencia Marín  
**Director General Unidad de  
Planeación Minero Energética - UPME**

Wilson Sandoval Romero  
**Subdirección de Minería - UPME**

**EQUIPO DE TRABAJO CTA:**

Santiago Echavarría Escobar  
**Director General**

Janet Barco Mejía  
**Directora Línea Agua y  
Medio Ambiente**

John Zapata Ochoa  
**Coordinador de Proyecto**

**Profesionales de proyectos**

Juan Esteban González  
Andrea Guzmán  
Natalia Cardona  
Sebastián Ospina

**EQUIPO GSI-LAC**

Diego Arévalo Uribe  
Verónica Valencia

**ISBN: 978-958-8470-36-8**

**Derechos Reservados**

**Diseño y Diagramación**

Bombillo Amarillo

Bogotá D.C., Colombia

Diciembre de 2016



## Tabla de Contenido

- ♦ 1. OBJETIVOS ..... 8
  - ♦ 1.1 Objetivo general ..... 8
  - ♦ 1.2 Objetivos específicos ..... 8
- ♦ 2. INTRODUCCIÓN..... 8
- ♦ 3. MARCO CONCEPTUAL ..... 12
  - ♦ 3.1 Conceptos de uso, demanda y consumo ..... 12
  - ♦ 3.2 Conceptos relacionados con el indicador de Huella Hídrica y sus tres colores ..... 14
  - ♦ 3.3 Fases de la evaluación de la Huella Hídrica ..... 16
  - ♦ 3.4 Descripción de indicadores del Estudio Nacional del Agua 2014..... 17
    - ♦ 3.4.1 Índice de uso del agua-IUA ..... 17
    - ♦ 3.4.2 Índice de agua no retornada a la cuenca-IARC ..... 18
  - ♦ 3.5 Clasificación de los minerales y generalidades de procesos de extracción y beneficio ..... 19
- ♦ 4. EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA DEL SECTOR MINERO 28
  - ♦ 4.1 Definición del alcance..... 28
  - ♦ 4.2 Cuantificación de la demanda y la Huella Hídrica..... 29
    - ♦ 4.2.1 Demanda hídrica del sector minero..... 29
    - ♦ 4.2.2 Huella Hídrica Azul HHA..... 31
    - ♦ 4.2.3 Huella Hídrica Gris HHG..... 33
    - ♦ 4.2.4 Generación de resultados por subzona hidrográfica 37
  - ♦ 4.3 Análisis de sostenibilidad ..... 38
    - ♦ 4.3.1 Análisis de sostenibilidad hídrica ..... 38
      - ♦ 4.3.1.1 Análisis de sostenibilidad hídrica sectorial a partir de la Huella Hídrica Azul ..... 38
      - ♦ 4.3.1.2 Análisis de sostenibilidad hídrica multisectorial a partir de la Huella Hídrica Azul..... 40
      - ♦ 4.3.1.3 Aplicación del Índice de Uso del Agua IUA ..... 40
      - ♦ 4.3.1.4 Aplicación del Índice IARC..... 42
    - ♦ 4.3.2 Análisis de sostenibilidad socio económica ..... 44
    - ♦ 4.3.3 Análisis de sostenibilidad integral ..... 50
  - ♦ 4.4 Formulación de respuesta ..... 51
- ♦ 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 55
- ♦ BIBLIOGRAFÍA ..... 56

## Lista de Tablas

- ♦ Tabla 1. Información de los caudales de entrada por mina ..... 30
- ♦ Tabla 2. Información de los caudales de entradas para estimar la HHA por mina..... 31
- ♦ Tabla 3. Información de los caudales de salidas para estimar la HHA por mina..... 32
- ♦ Tabla 4. Matriz de análisis de sostenibilidad para el sector minero .. 39
- ♦ Tabla 5. Categorías de calificación del IUA y el IARC multisectorial 43
- ♦ Tabla 6. Indicadores socioeconómicos propuestos para la evaluación de la Huella Hídrica..... 48
- ♦ Tabla 7. Matriz de integración del análisis de sostenibilidad componente hídrico..... 50
- ♦ Tabla 8. Matriz de integración de resultados – indicadores socio económicos a nivel sectorial..... 50
- ♦ Tabla 9. Matriz de integración de resultados – indicadores socio económicos a nivel territorial..... 51

## Lista de Figuras

- ♦ Figura 1. Conceptualización de la demanda, extracción y uso, ENA 2014 ..... 13
- ♦ Figura 2. Conceptualización de la Huella Hídrica, ENA 2014..... 14
- ♦ Figura 3. Conceptos relacionados a la Huella Hídrica Azul ..... 15
- ♦ Figura 4. Conceptos relacionados a la Huella Hídrica Verde ..... 15
- ♦ Figura 5. Conceptos relacionados a la Huella Hídrica Gris ..... 15
- ♦ Figura 6. Fases de la evaluación de Huella Hídrica ..... 16
- ♦ Figura 7. Clasificación oficial de minerales. Adaptado de (MINMINAS, 2003)..... 19
- ♦ Figura 8. Representatividad de minerales según su clasificación ..... 21
- ♦ Figura 9. Esquema proceso de explotación: Carbón ..... 22
- ♦ Figura 10. Esquema proceso de explotación: Oro ..... 23
- ♦ Figura 11. Esquema proceso de explotación: Hierro.....24
- ♦ Figura 12. Esquema proceso de explotación: Arenas y gravas.....25
- ♦ Figura 13. Esquema proceso de explotación: Arcilla..... 26
- ♦ Figura 14. Esquema proceso de explotación: Esmeraldas .....27
- ♦ Figura 15. Fase 1 Definición del alcance para el sector minero colombiano..... 28
- ♦ Figura 16. Flujo de entradas de agua por título minero ..... 29
- ♦ Figura 17. Balance hídrico por título minero..... 31
- ♦ Figura 18. Esquema general para la estimación de la HHG ..... 34
- ♦ Figura 19. Generación de los resultados de HHA y HHG por subzona hidrográfica .....37
- ♦ Figura 20. Categorías para clasificar la relevancia de la HHA del sector minero por subzona hidrográfica ..... 38
- ♦ Figura 21. Articulación de los resultados de demanda con el Índice IUA..... 41
- ♦ Figura 22. Articulación de los resultados de la HHA en el Índice IARC .....42
- ♦ Figura 23. Paso a paso para la construcción de los indicadores para el análisis de sostenibilidad del sector minero: carbón y oro a partir de la relación con la Huella Hídrica..... 44
- ♦ Figura 24. Propuesta del índice socioeconómico agregado.....47
- ♦ Figura 25. Indicadores socioeconómicos propuestos.....47
- ♦ Figura 26. Esquema general para la formulación de respuestas.....52
- ♦ Figura 27. Articulación de actores y estrategias de intervención ..... 53

## Lista de Ecuaciones

- ♦ Ecuación 1. Índice IUA .....17
- ♦ Ecuación 2. Índice IARC ..... 18
- ♦ Ecuación 3. Entradas de agua por fuente de abastecimiento..... 30
- ♦ Ecuación 4. Huella Hídrica Azul mina..... 32
- ♦ Ecuación 5. Cálculo general de la HHG ..... 35
- ♦ Ecuación 6. Indicador de Huella Hídrica Gris (L/unidad de producción) por distrito ..... 35
- ♦ Ecuación 7. Huella Hídrica Gris a partir de un indicador ..... 35
- ♦ Ecuación 8. IUA multisectorial ..... 41
- ♦ Ecuación 9. IARC multisectorial..... 43
- ♦ Ecuación 10. Indicador integrado..... 45
- ♦ Ecuación 11. .... 45



## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GENERAL

Construir una Guía Metodológica de evaluación del indicador de Huella Hídrica para el sector minero colombiano y para su respectiva articulación con otros indicadores de alcance nacional

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ♦ Establecer las fases y el alcance para la evaluación de Huella Hídrica en el sector minero en Colombia
- ♦ Determinar los requerimientos conceptuales, metodológicos y de información necesarios para aplicar el indicador de Huella Hídrica en el sector minero
- ♦ Generar un mecanismo de articulación de los resultados de la evaluación de la Huella Hídrica del sector minero con los indicadores definidos en el Estudio Nacional del Agua 2014
- ♦ Realizar una aproximación a la evaluación de la Huella Hídrica del oro y carbón en Colombia y su articulación con los indicadores del ENA 2014

## 2. INTRODUCCIÓN

El Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 “Todos por un nuevo país” establece como uno de sus objetivos, “Consolidar el sector minero como impulsor del desarrollo sostenible del país con

responsabilidad social y ambiental”, para lo cual se planteó construir una serie de herramientas que puedan apoyar aspectos técnicos de la actividad minera como guías de buenas prácticas, reglamentos técnicos, protocolos, manuales y todas aquellas que se consideren necesarias para establecer los lineamientos técnicos del sector.

En este sentido y de conformidad con lo definido en el Decreto 1258 de 2013, la UPME tiene como objeto plantear en forma integral, indicativa, permanente y coordinada con las entidades del sector minero energético y dentro de sus funciones específicas la de proponer indicadores para hacer seguimiento al desempeño del sector minero y energético, como insumo para la formulación de la política y evaluación del sector, así como realizar diagnósticos y estudios que permitan la formulación de planes y programas orientados a fortalecer el aporte del sector minero y energético a la economía y la sociedad en un marco de sostenibilidad ambiental. De igual manera, y de manera más específica, la subdirección de Minería, tiene la tarea de revisar la normatividad referente al sector minero, en los aspectos ambientales, sociales, entre otros, y proponer los ajustes que sean necesarios para orientar el sector hacia la sostenibilidad.

Es desde este punto de vista que resulta vital para el subsector minero, determinar la relación existente entre el desarrollo de la actividad y el impacto y/o efectos ambientales que esta ocasiona sobre el medio natural, especialmente sobre el recurso hídrico. Para ello, desde el año 2014 la Subdirección de Minería de la

UPME ha venido realizando una serie de estudios técnicos orientados a establecer dicha relación de manera técnica con información levantada directamente en las explotaciones mineras de las diversas zonas del país. El propósito principal de estos ejercicios técnicos, es brindar información técnica verídica que sirva de base para generar un debate argumentado sobre los verdaderos impactos que ocasiona la minería formalizada sobre el recurso hídrico del país y, sobre todo, con el ánimo de generar orientaciones para impulsar la implementación de mejores prácticas por parte de las empresas mineras, que contribuyan con un crecimiento de la economía basado en criterios de sostenibilidad ambiental.



En consonancia con lo anterior, la UPME ha emprendido un trabajo que contempla por lo menos tres fases, dos de las cuales se desarrollaron durante los años 2014 y 2015<sup>1</sup>. La última fase, se planteó para que se desarrollara en el presente año (2016), donde se usará la información generada en los estudios anteriores con el fin de desarrollar el marco metodológico para el cálculo del indicador de Huella Hídrica del subsector minero, bajo el enfoque introducido por el IDEAM en el Estudio Nacional del Agua 2014<sup>2</sup>.

La Huella Hídrica (HH), bajo un enfoque territorial, es una herramienta complementaria para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH), que como se verá en el desarrollo de esta Guía se basa en la aplicación de tres conceptos previos: agua azul, agua verde y agua gris. La HH se relaciona con el uso del agua para un proceso antrópico; una parte del volumen usado no retorna a la cuenca de donde fue extraído o retorna con una calidad diferente a la original, por lo que esta se refiere al impacto

<sup>1</sup>La fase 1 que se ejecutó en 2014, consistió en la realización de un estudio orientado a estimar áreas realmente intervenidas por la minería, los volúmenes de agua y la energía eléctrica consumida por la actividad minera y los costos de producción en las principales minas de explotación (Unidad de Planeación Minero Energética - Universidad Industrial de Santander, 2014). La Fase 2 tuvo lugar en el año 2015 en trabajo conjunto con el Ministerio de Minas y Energía, donde se analizaron los efectos causados por la minería de carbón y oro en la calidad y disponibilidad del recurso hídrico (Unidad de Planeación Minero Energética - Universidad de Córdoba, 2015).

<sup>2</sup>La versión ENA 2014 incluye como novedad temática la Evaluación Multisectorial de la Huella Hídrica. Este aporte se realizó a partir de una alianza estratégica entre el IDEAM, la Embajada Suiza a través de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA) y la consultora Good Stuff International Latinoamérica y el Caribe (GSI-LAC).



territorial del uso en términos de reducción de la disponibilidad de agua (tanto en calidad como en cantidad), a partir de un proceso antrópico determinado. (IDEAM, et.al. 2015).

Para el subsector minero en específico, debido a la carencia de información sobre consumo de agua, el ENA 2014 no pudo hacer estimaciones que advirtieran sobre la HH de la Minería, por lo que para ese estudio la información consignada sobre demanda hídrica se estimó a partir de informaciones obtenidas de algunas empresas y de la opinión de expertos. Lo anterior, ha develado la necesidad de ampliar las fuentes de información y refrendar con información primaria de carácter oficial los vacíos de información existentes para aplicar la evaluación de la HH en las actividades propias del subsector minero.

Teniendo como punto de partida el contexto anterior, se pone a disposición del sector una Guía sobre la Aproximación Metodológica y Conceptual a la Evaluación de la Huella Hídrica en el Sector Minero Colombiano, con la pretensión de que, a partir de la publicación de la misma, se puedan ir llenando los vacíos de información para que en los próximos ENA se pueda dar cuenta de los requerimientos y de los impactos reales que sobre el recurso hídrico, tiene este importante sector de la economía colombiana.

Esta Guía consta de 5 Capítulos, en los que se aborda de manera sistemática y explicativa los pasos a seguir para la determinación de la HH en el sector minero, teniendo presente la distribución en subsectores mineros de conformidad con la Resolución UPME 256 de 2014.

### 3. MARCO CONCEPTUAL

#### 3.1 CONCEPTOS DE USO, DEMANDA Y CONSUMO

Tradicionalmente los conceptos de demanda, uso, extracción y consumo se han utilizado para determinar la cantidad de agua que ingresa en un determinado proceso, sin embargo, en la medida que los estudios y los indicadores de gestión del recurso hídrico han evolucionado, se ha profundizado en la diferenciación de estos conceptos. Por tal motivo, para la implementación de esta guía, es necesario definir qué se entiende por cada uno de ellos, adoptando los lineamientos propuestos por el Estudio Nacional del Agua 2014 (IDEAM, 2015).

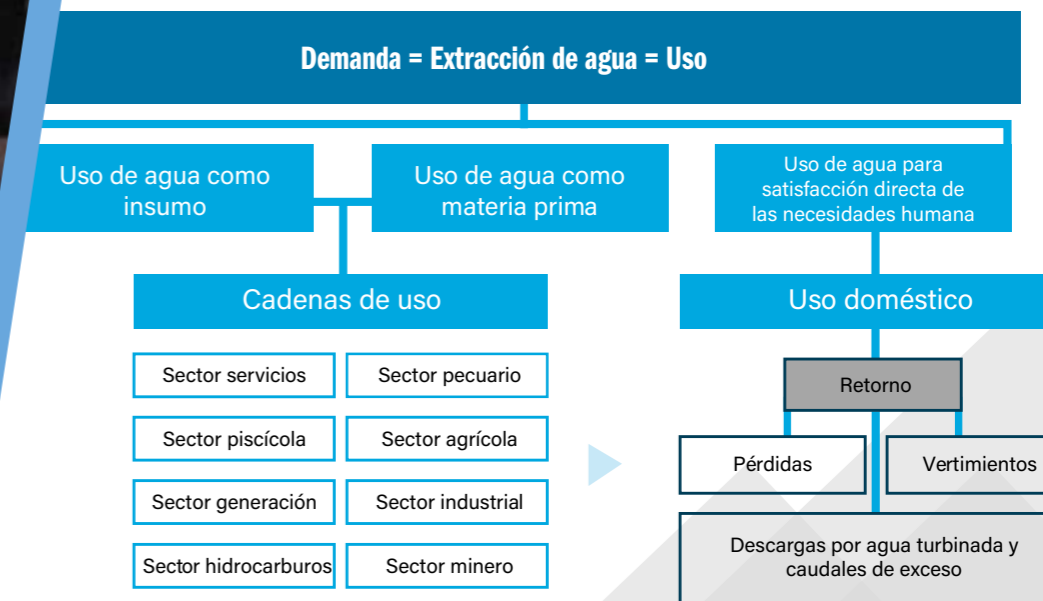
Como primera medida el ENA 2014 parte de que los conceptos de demanda, extracción y uso tienen el mismo significado y se define como “la sustracción de agua del sistema natural destinada a suplir las necesidades y los requerimientos de consumo humano, producción sectorial y demandas esenciales de los ecosistemas existentes sean intervenidos o no. La extracción y, por ende, la utilización del recurso implica sustracción, alteración, desviación o retención temporal del recurso hídrico, incluidos en este los sistemas de almacenamiento que limitan el aprovechamiento para usos compartidos u otros usos excluyentes”.

En el caso de la Huella Hídrica Azul, se entiende que ésta es un subconjunto de la demanda hídrica



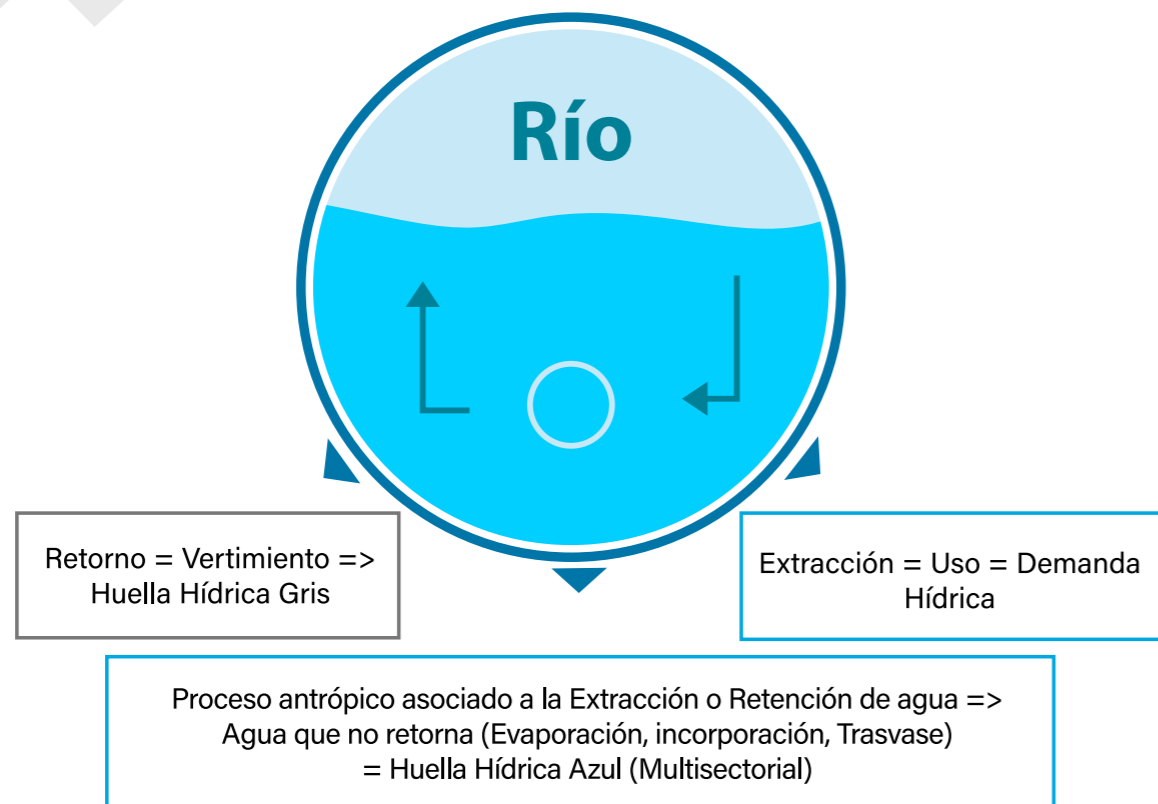
y corresponde a la porción de agua que es extraída de fuentes hídricas superficiales y/o subterráneas que no retorna al sistema de donde fue extraído previamente. La Huella Hídrica Azul puede ser igual a la demanda, cuando se extrae para trasvase de una cuenca a otra, dado que no hay retorno. En las Figura 1 y Figura 2 se presentan los esquemas de conceptualización de demanda, uso, extracción y Huella Hídrica Azul definidos en el ENA 2014.

Figura 1. Conceptualización de la demanda, extracción y uso, ENA 2014



Fuente: Tomado de (IDEAM, 2015)

Figura 2. Conceptualización de la Huella Hídrica, ENA 2014



Fuente: Tomado de (IDEAM - COSUDE - CTA - GSI LAC, 2015)

### 3.2 CONCEPTOS RELACIONADOS CON EL INDICADOR DE HUELLA HÍDRICA Y SUS TRES COLORES

Tomando como base el manual de evaluación de Huella Hídrica (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011), el indicador de Huella Hídrica está conformado por 3 indicadores representados por los colores azul, verde y gris. Los indicadores

de Huella Hídrica Azul y Verde son para evaluar consumos de agua, mientras que la Huella Hídrica Gris se relaciona con el nivel de contaminación. Por la naturaleza y significado de cada una de las tres huellas hídricas, se recomienda presentar sus resultados de forma desagregada. A continuación se describe cada uno de estos indicadores (ver Figura 3, Figura 4 y Figura 5).

Figura 3. Conceptos relacionados a la Huella Hídrica Azul

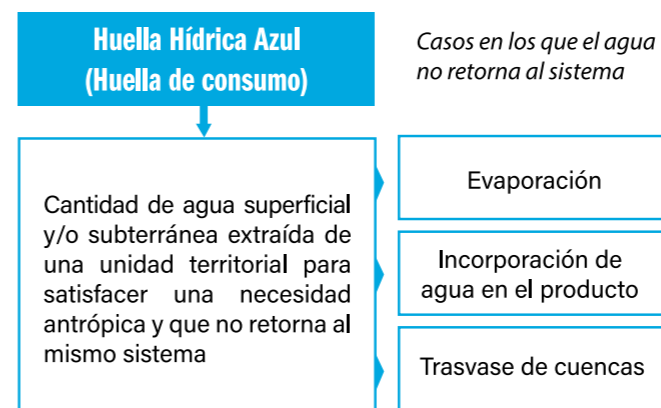


Figura 4. Conceptos relacionados a la Huella Hídrica Verde

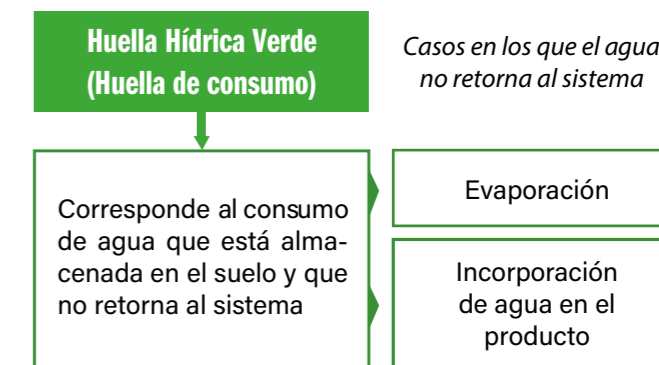
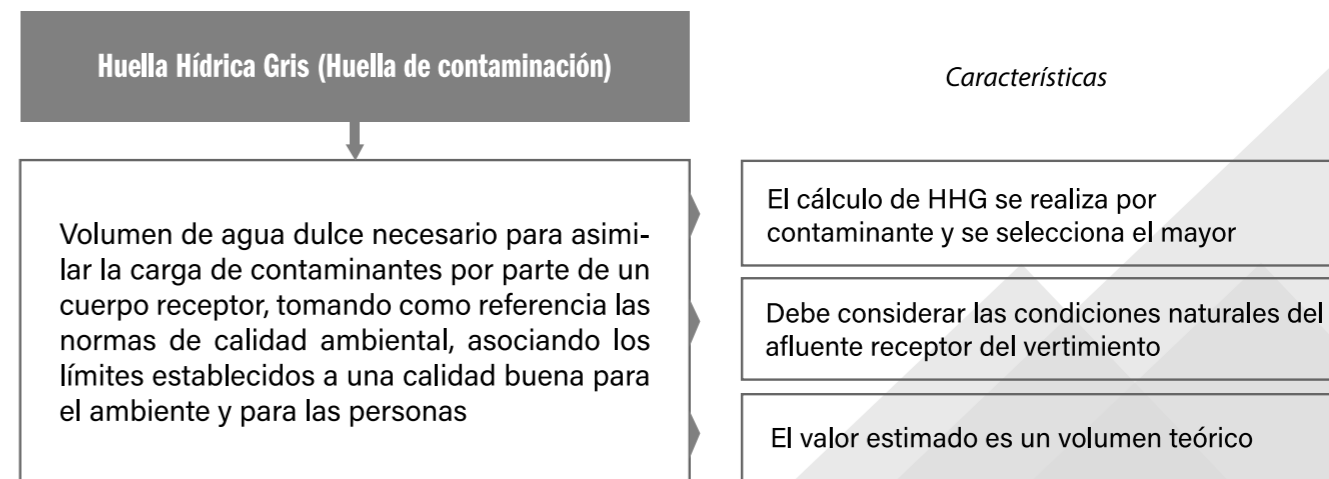


Figura 5. Conceptos relacionados a la Huella Hídrica Gris



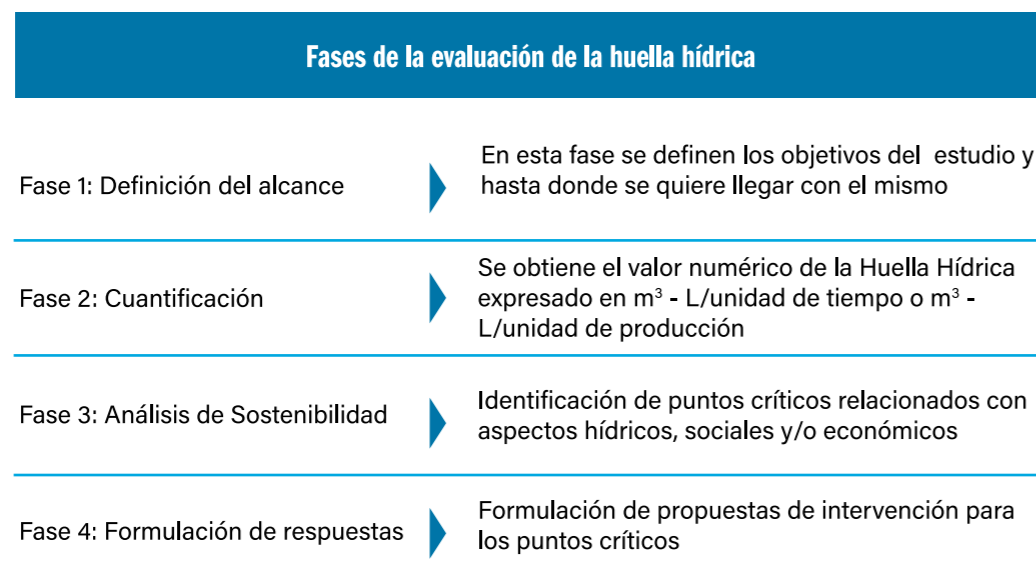
### 3.3 FASES DE LA EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA

Tradicionalmente la Huella Hídrica se ha representado por un valor numérico, que consiste en indicar los metros cúbicos de agua consumidos para producir un producto (m<sup>3</sup> de agua/unidad producida), sin embargo, la evaluación de la Huella Hídrica es mucho más que una simple cuantificación del consumo de agua o del nivel de contaminación y se deben considerar variables territoriales que permitan un análisis holístico. Por tal motivo la metodología de evaluación de la Huella Hídrica (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011), definió que la evaluación de Huella Hídrica requiere la ejecución de 4 fases o etapas (ver Figura 6).

Estas fases permiten no solo cuantificar la Huella Hídrica de un producto, un proceso o de una unidad

territorial, sino también hacer un análisis de sostenibilidad en el que principalmente se compara la Huella Hídrica con la oferta hídrica disponible de un territorio. Esto significa que la cuantificación de la Huella Hídrica toma relevancia en el momento que se compara con los recursos hídricos disponibles de un territorio, por lo tanto la Huella Hídrica es un indicador territorial. Las 4 fases inician con un proceso de planeación en el que se definen aspectos como las fuentes de información, la escala espacial y territorial, entre otros. Un segundo paso considera la cuantificación como tal de la Huella Hídrica, la fase 3 comprende el análisis de sostenibilidad (identificar puntos críticos) el cual puede adicionalmente relacionar indicadores sociales y económicos, y por último la fase 4 corresponde a la formulación de respuestas para los puntos críticos identificados.

Figura 6. Fases de la evaluación de Huella Hídrica



### 3.4 DESCRIPCIÓN DE INDICADORES DEL ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA 2014

En el ENA 2014 se dispone de una batería de indicadores que permiten monitorear el recurso hídrico básicamente desde tres componentes: oferta, calidad y demanda. Algunos de los indicadores definidos en el ENA 2014, son el Índice de Uso del Agua-IUA, el Índice de Agua No Retornada a la Cuenca- IARC y el Índice de alteración potencial de la calidad del agua-IACAL.

A continuación, se hace una descripción de los indicadores definidos en el ENA 2014 que están

relacionados con la Huella Hídrica Azul, y en los cuales se incluirá el sector minero dentro del análisis multisectorial.

#### 3.4.1 ÍNDICE DE USO DEL AGUA-IUA

El Índice de Uso del Agua, es un indicador que permite relacionar la cantidad de agua demandada o utilizada por los diferentes sectores con relación a la oferta hídrica disponible de un territorio, principalmente delimitado por cuencas hidrográficas. De acuerdo al ENA 2014, el IUA se calcula de la siguiente manera (ver Ecuación 1).

Ecuación 1. Índice IUA

$$IUA_{\text{subzona hidrográfica}} = \frac{\sum \text{Demanda}_{\text{multisectorial subzona hidrográfica}}}{\text{Oferta hídrica disponible}_{\text{subzona hidrográfica}}} \times 100$$

$IUA_{\text{subzona hidrográfica}}$  = Índice de uso del agua por subzona hidrográfica, adimensional

$\sum \text{Demanda}_{\text{multisectorial subzona hidrográfica}}$  = sumatoria de la demanda de los sectores económicos analizados (doméstico, agropecuario, industrial, energético, minero, otros) en una cuenca hidrográfica (subzona hidrográfica), m<sup>3</sup>/año

$\text{Oferta hídrica disponible}_{\text{subzona hidrográfica}}$  = corresponde al caudal disponible en la cuenca hidrográfica (subzona hidrográfica) una vez descontado el caudal ambiental, m<sup>3</sup>/año

### 3.4.2 ÍNDICE DE AGUA NO RETORNADA A LA CUENCA-IARC

Como complemento al Índice de Uso de Agua IUA, se definió el Índice IARC el cual permite relacionar la Huella Hídrica Azul multisectorial y la oferta hídrica disponible en un territorio (cuena hidrográ-

fica). El objetivo del índice IARC es determinar el porcentaje de apropiación de agua de una cuena por parte de los sectores económicos presentes en la misma con relación a la oferta hídrica del territorio. El modelo de cálculo para el IARC definido en el ENA 2014 (IDEAM - COSUDE - CTA - GSI LAC , 2015) se presenta en la Ecuación 2.

Ecuación 2. Índice IARC

$$IARC_{\text{subzona hidrográfica}} = \frac{\sum \text{Huella hídrica azul}_{\text{multisectorial subzona hidrográfica}}}{\text{Oferta hídrica neta}_{\text{subzona hidrográfica}}}$$

$IARC_{\text{subzona hidrográfica}}$  = Índice de agua no retornada a la cuena, adimensional

$\sum \text{Huella hídrica azul}_{\text{multisectorial subzona hidrográfica}}$  = sumatoria de la Huella Hídrica Azul de los sectores económicos analizados (doméstico, agropecuario, industrial, energético, minero, otros) en una cuena hidrográfica (subzona hidrográfica), m<sup>3</sup>/año

$\text{Oferta hídrica neta}_{\text{subzona hidrográfica}}$  = corresponde al caudal disponible en la cuena hidrográfica (subzona hidrográfica) una vez descontado el caudal ambiental, m<sup>3</sup>/año

En consecuencia, las próximas publicaciones del Estudio Nacional del Agua podrán incluir en sus resultados de HHA al sector minero de Colombia, el cual no había sido incluido porque no se contaba con una metodología de aplicación para el sector minero ni se tenían los instrumentos para la recolección de información.

### 3.5 CLASIFICACIÓN DE LOS MINERALES Y GENERALIDADES DE PROCESOS DE EXTRACCIÓN Y BENEFICIO

La Clasificación Oficial de Minerales (COM) para el sector minero Colombiano se presenta en la Figura 7, esta clasificación fue propuesta por el Ministerio de Minas y Energía con base en parámetros internacionales.

Figura 7. Clasificación oficial de minerales. Adaptado de (MINMINAS, 2003)



A continuación, se describe cada clasificación según el DANE:

- ♦ Carbón mineral: esta clasificación contempla diferentes tipos de carbón, sin importar su estado de transformación, uso y proceso de explotación.
- ♦ Minerales de torio y uranio: en este caso hacen parte los minerales con contenido de uranio o torio, por ejemplo, la peblendita.
- ♦ Minerales metálicos: hacen parte minerales y concentrado de hierro (excepto pirritas de hierro tostadas), minerales y concentrados de metales no ferrosos con excepción de minerales y concentrados de Torio y Uranio y la extracción de metales preciosos.
- ♦ Roca o piedra, arena y arcilla: se incluyen los materiales naturales para la construcción principalmente.
- ♦ Otros minerales: en esta están la explotación de minerales para la fabricación de abonos y productos químicos, explotación de sal, extracción de piedras preciosas y la extracción de otros minerales no metálicos.

A cada una de estas clasificaciones les corresponden diferentes minerales que comparten ciertas características, algunos de estos minerales sobresalen dentro del sector minero ya sea por el número de unidades productivas mineras (UPM) o por su producción a nivel nacional. Para analizar estos panoramas se realizó un análisis de la siguiente información:



- ♦ Censo minero 2010-2011 (Ministerio de Minas y Energía, 2012).
- ♦ Estadísticas de producción de minerales (SIMCO, 2014).
- ♦ Producción de minas y canteras (Agencia Nacional de Minería, 2014).
- ♦ Evaluación de la situación actual y futura del mercado de los materiales de construcción y arcillas en las ciudades de Bogotá, Medellín, Bucaramanga, Barranquilla, Santa Marta y Eje Cafetero (2014).

De la información obtenida se analizaron 15 minerales, estos fueron clasificados en minerales preciosos metálico, metálicos, no metálicos, combustibles y piedras preciosas. Para cada una de estas clasificaciones se determinó el mineral más representativo con base en el porcentaje de las UPM y de producción de cada uno de estos dentro de la clasificación a la que pertenecen, en la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos.

Figura 8. Representatividad de minerales según su clasificación



De la Figura 9 a la Figura 14 se presentan los esquemas del proceso de extracción y beneficio para los minerales representativos de cada una de las clasificaciones y la relación con el agua que ingresa al proceso. Para cada esquema se tienen la cuantificación de entrada de agua que corresponde a características de la fuente de captación, el caudal y concentración de sustancias contaminantes específicas a evaluar, luego se presentan

algunos procesos que se realizan en la fase de extracción y de beneficio de cada mineral y el uso doméstico que se genere en la mina, a cada uno de estos procesos se asigna donde se podría generar una Huella Hídrica Azul o una Huella Hídrica Gris y por último se realiza una cuantificación de las salidas de los procesos en términos de caudal, concentración final de las sustancias contaminantes y el tipo de fuente receptora del vertimiento.

Figura 9. Esquema proceso de explotación: Carbón

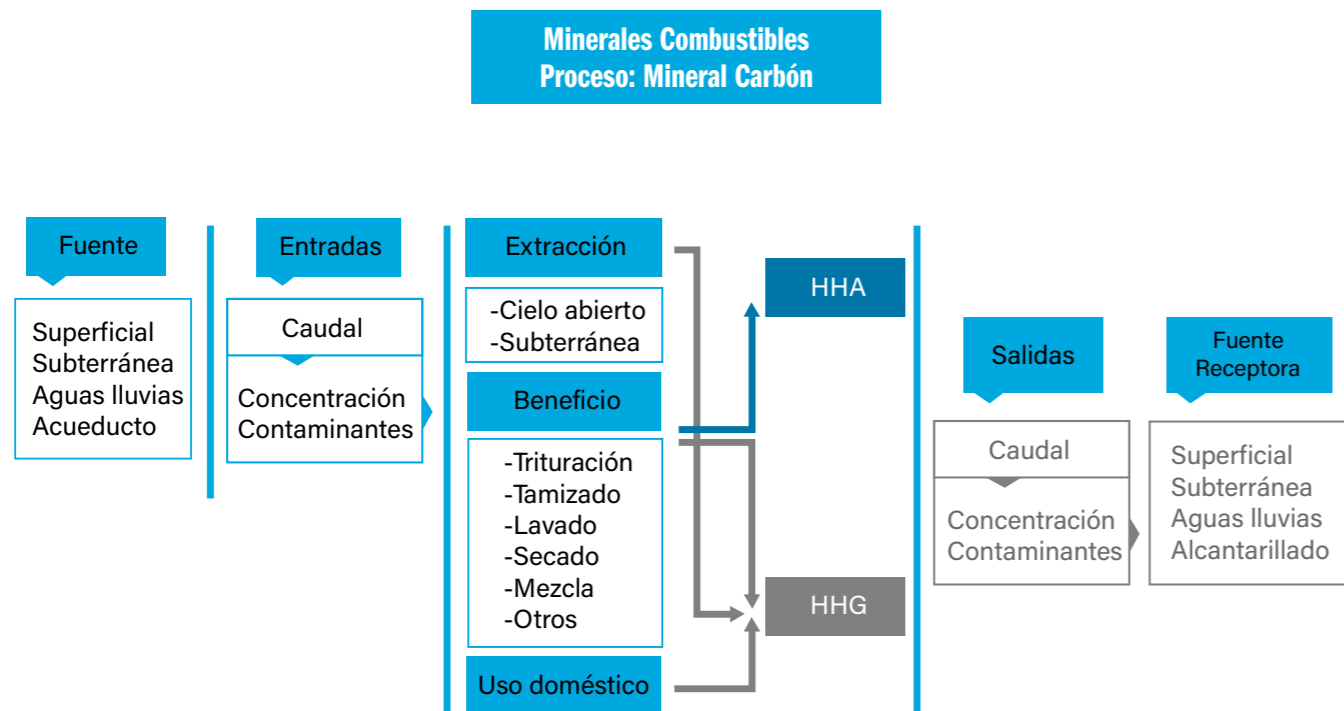


Figura 10. Esquema proceso de explotación: Oro

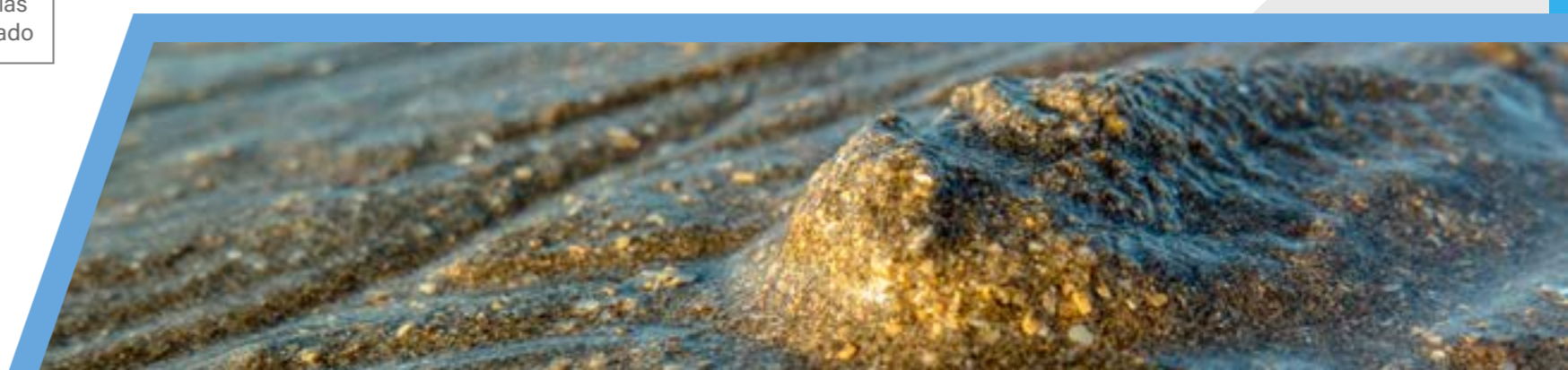
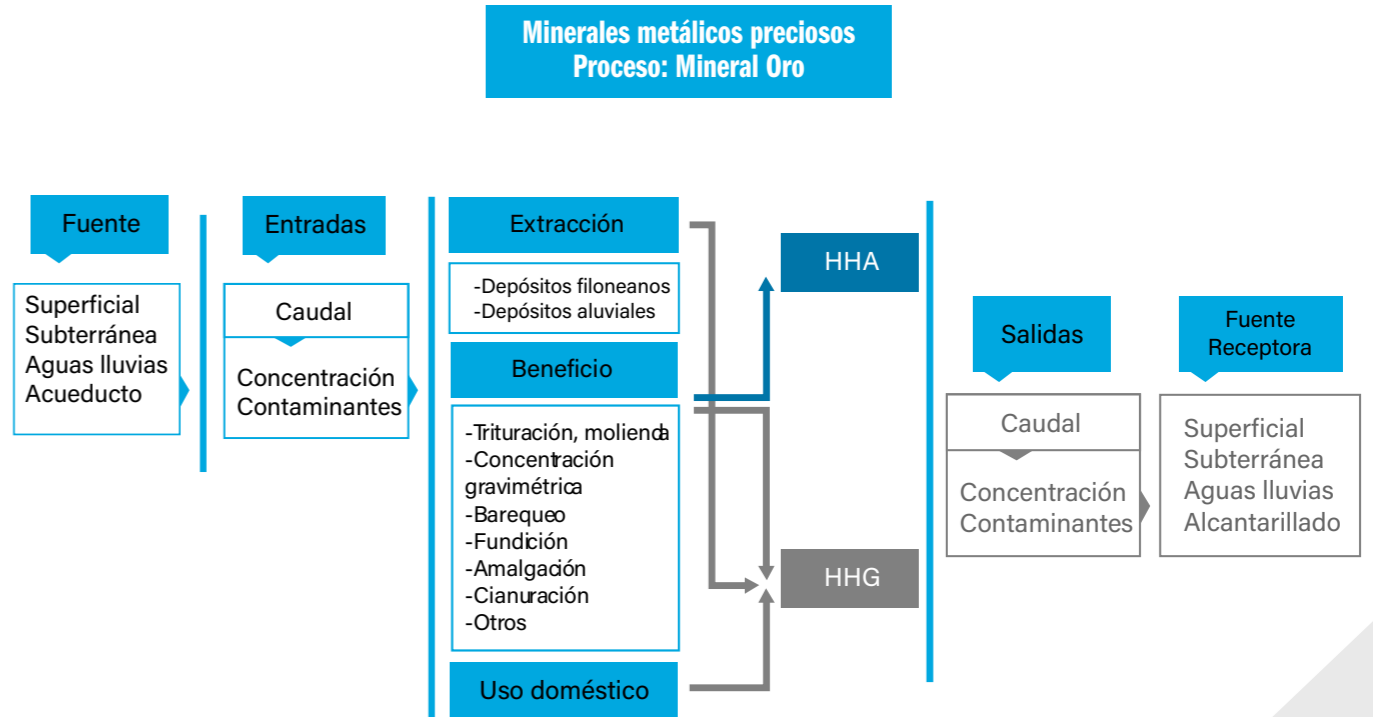


Figura 11. Esquema proceso de explotación: Hierro

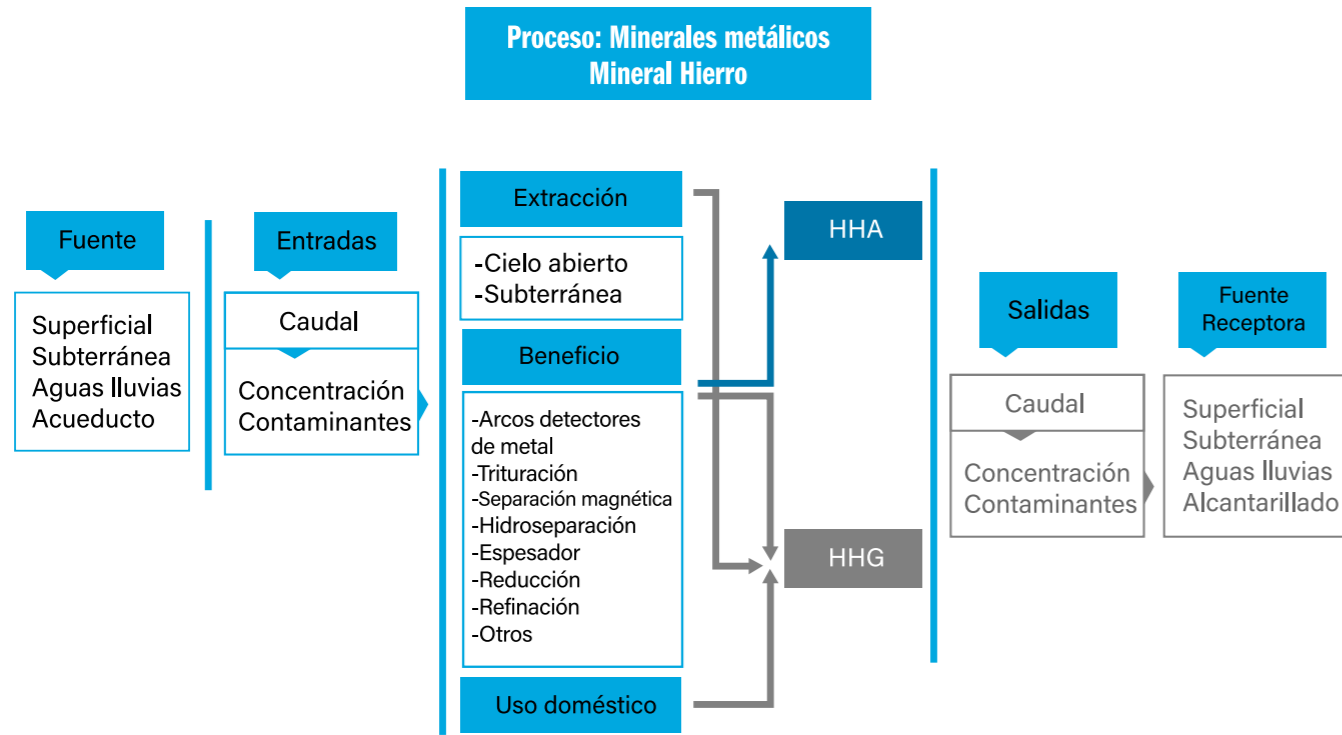


Figura 12. Esquema proceso de explotación: Arenas y gravas

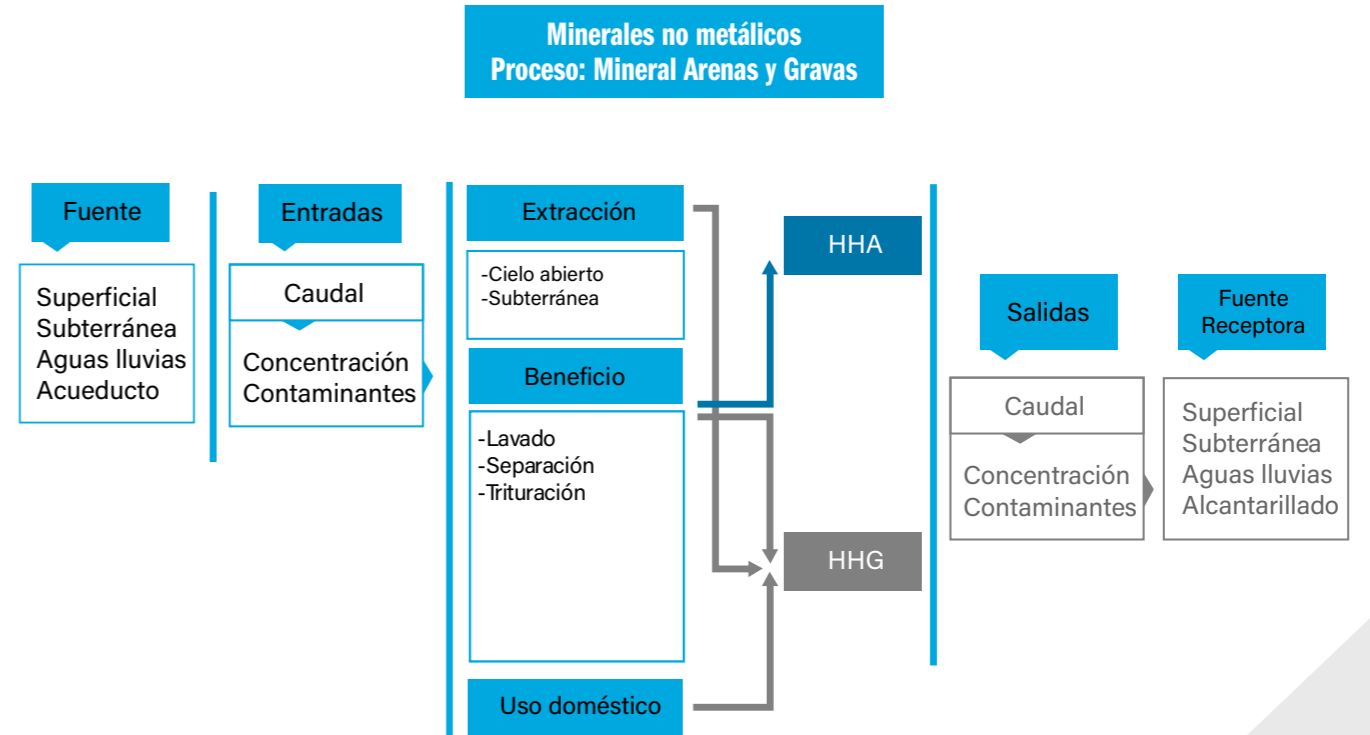


Figura 13. Esquema proceso de explotación: Arcilla

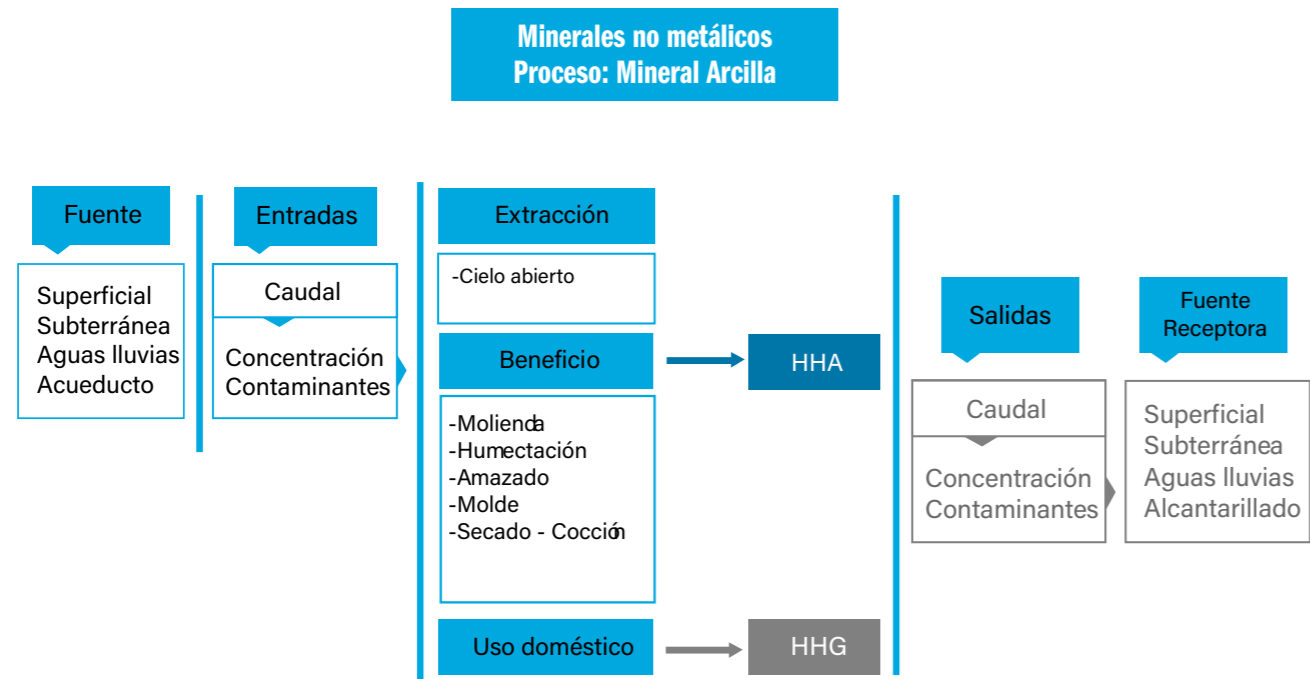
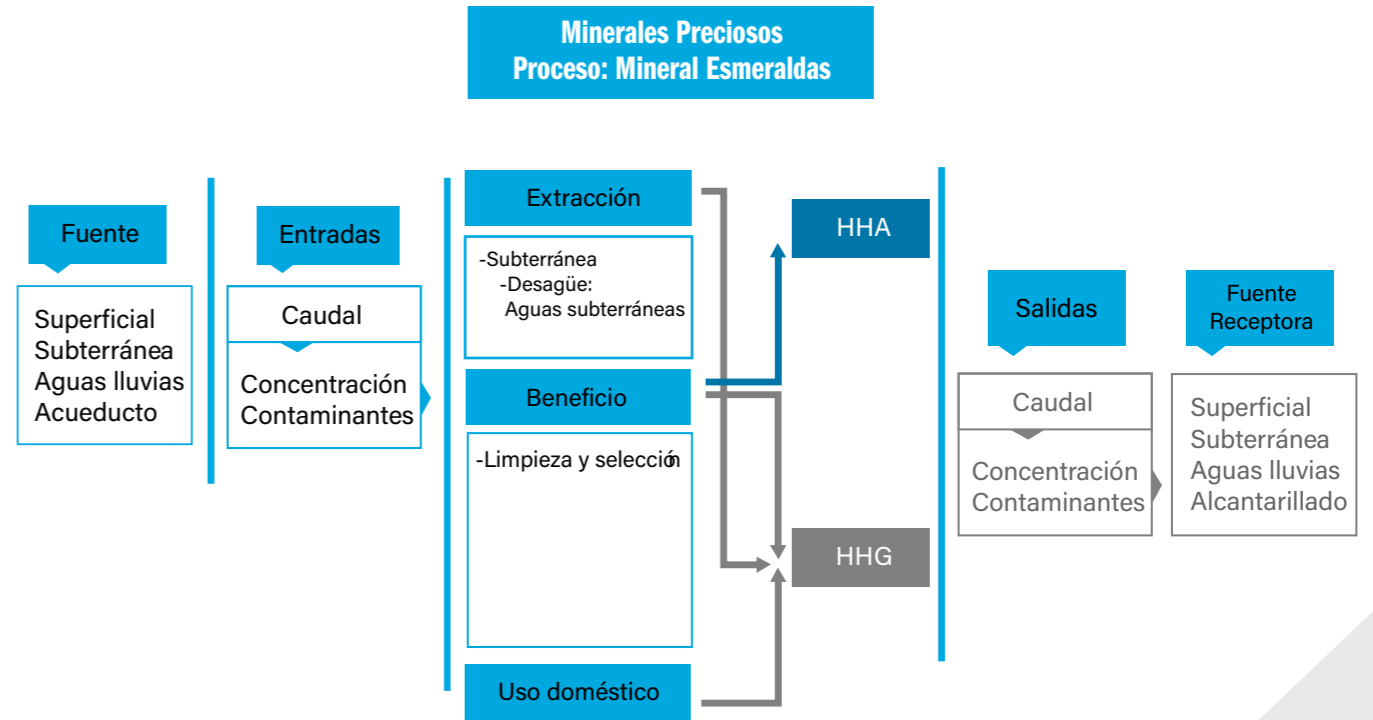


Figura 14. Esquema proceso de explotación: Esmeraldas

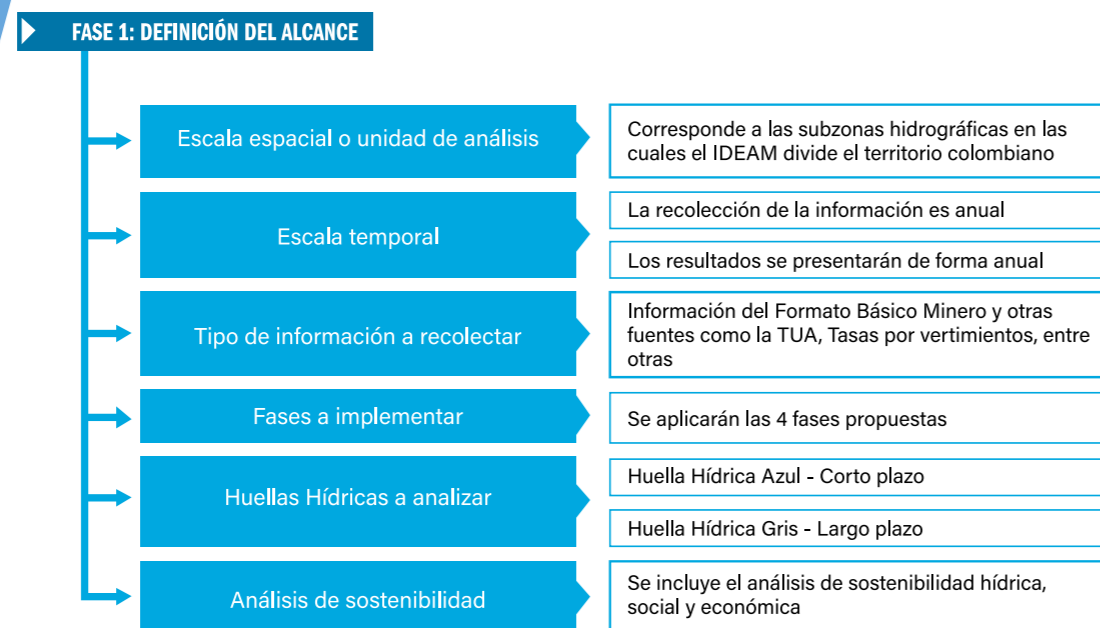


## 4. EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA DEL SECTOR MINERO

### 4.1 DEFINICIÓN DEL ALCANCE

Corresponde a la fase más importante de todo el proceso de evaluación de Huella Hídrica, ya que en ésta se definen aspectos importantes como la escala espacial, la escala temporal, cuáles de las fases serán incluidas en el estudio<sup>3</sup>, que elementos se considerarán en el análisis de sostenibilidad, entre otros aspectos. Para el caso específico de esta Guía en la Figura 15, se define el alcance para la evaluación de Huella Hídrica en el sector minero.

Figura 15. Fase 1 Definición del alcance para el sector minero colombiano



<sup>3</sup> No necesariamente todas las fases se deben aplicar- esto depende de los objetivos del estudio y de los intereses de las entidades financiadoras del proyecto.

Es necesario aclarar que todos los aspectos que se deben definir en la Fase 1 tienen la misma importancia y no necesariamente llevan un orden determinado. Para el caso específico de la Huella Hídrica Gris (aplicación en el largo plazo), lo que se definirá es una ruta metodológica general para el levantamiento de la información necesaria para su cálculo, ya que actualmente no se cuenta con los datos suficientes en cantidad y con rigor científico para determinar este indicador.

### 4.2 CUANTIFICACIÓN DE LA DEMANDA Y LA HUELLA HÍDRICA

Una vez definido el alcance, se continúa con el proceso de cuantificación de la demanda y la Huella Hídrica Azul. Como principal fuente de información para estimar los indicadores se tiene definido el Formato Básico Minero<sup>4</sup>, sin embargo, existen otros mecanismos o herramientas como la Tasa por Uso del Agua - TUA, los reportes de vertimientos y concesiones de agua. Adicionalmente los estudios que realizan la UPME y la información que reporta el sector minero a las autoridades ambientales<sup>5</sup> también son insumos importantes para la aplicación de los indicadores. Para el indicador de Huella Hídrica Gris se definirá un plan general de mediano a largo plazo que permita la recolección de información suficiente para la aplicación de este indicador.

<sup>4</sup> Se entrega el Anexo 1, el cual contiene las preguntas que se incluirán en el Formato Básico Minero para recolectar la información necesaria para estimar la demanda y la Huella Hídrica azul por título minero

<sup>5</sup> De acuerdo a la Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible una vez al año las empresas mineras deben reportar la caracterización de los parámetros definidos en la misma.

#### 4.2.1 DEMANDA HÍDRICA DEL SECTOR MINERO

Adoptando la definición de demanda propuesta por el IDEAM (IDEAM, 2015) y abordada en el numeral 3.1, para el caso concreto del sector minero la demanda hídrica se estimará a partir de la información que reporten las empresas mineras con relación a los flujos de entrada de agua al proceso de extracción y beneficio, para los cuales se consideraron 4 fuentes de abastecimiento: acueducto, lluvia, superficial y subterránea. Ésta última considera el agua subterránea extraída mediante la construcción de pozos y el agua de bocamina o de pit. La Figura 16 representa conceptualmente el cálculo de la demanda hídrica del sector minero, la Tabla 1 indica la información que se debe recolectar para el cálculo y en la Ecuación 3 se observa el modelo de cálculo.

Figura 16. Flujo de entradas de agua por título minero

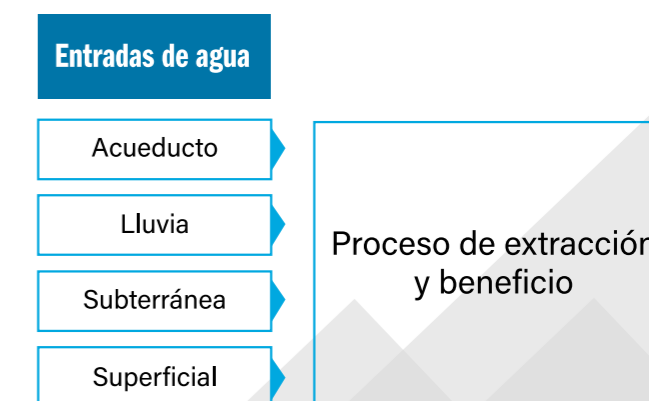


Tabla 1. Información de los caudales de entrada por mina

Fuente de abastecimiento	Caudal (L/s)
Acueducto	
Lluvia	
Subterránea	
Superficial (ríos, quebradas, lagos)	

Ecuación 3. Entradas de agua por fuente de abastecimiento

$$EA_{\text{mina}} = \sum EA_{\text{acueducto}} + \sum EA_{\text{lluvia}} + \sum EA_{\text{subterránea}} + \sum EA_{\text{superficial}}$$

$EA_{\text{mina}}$	= Caudal de entrada a la mina, m <sup>3</sup> /año
$EA_{\text{acueducto}}$	= Caudal de entrada proveniente de acueducto, m <sup>3</sup> /año
$EA_{\text{lluvia}}$	= Caudal de entrada proveniente de la lluvia, m <sup>3</sup> /año
$EA_{\text{subterránea}}$	= Caudal de entrada proveniente de fuentes subterráneas, m <sup>3</sup> /año
$EA_{\text{superficial}}$	= Caudal de entrada proveniente de fuentes superficiales, m <sup>3</sup> /año

Es importante mencionar que en la propuesta de actualización del Formato Básico Minero, quedaron incluidas las preguntas necesarias para estimar la demanda hídrica por mina, e incluso se puede estimar la demanda por tipo de fuente de abastecimiento (ver Anexo 1).

#### 4.2.2 HUELLA HÍDRICA AZUL HHA

Para estimar la HHA se parte de la base metodológica (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen,

2011), que propone un balance de las entradas y salidas de agua de la mina. Se considera que la diferencia en el volumen de agua a la entrada y salida de la mina corresponde a la evaporación y/o incorporación de agua en el producto. Conceptualmente, la Figura 17 presenta el esquema de cálculo de la HHA por título minero, las Tabla 2 y Tabla 3 indican la información necesaria para los cálculos y en la Ecuación 4, se observa el modelo de cálculo para estimar la HHA para una mina.

Figura 17. Balance hídrico por título minero

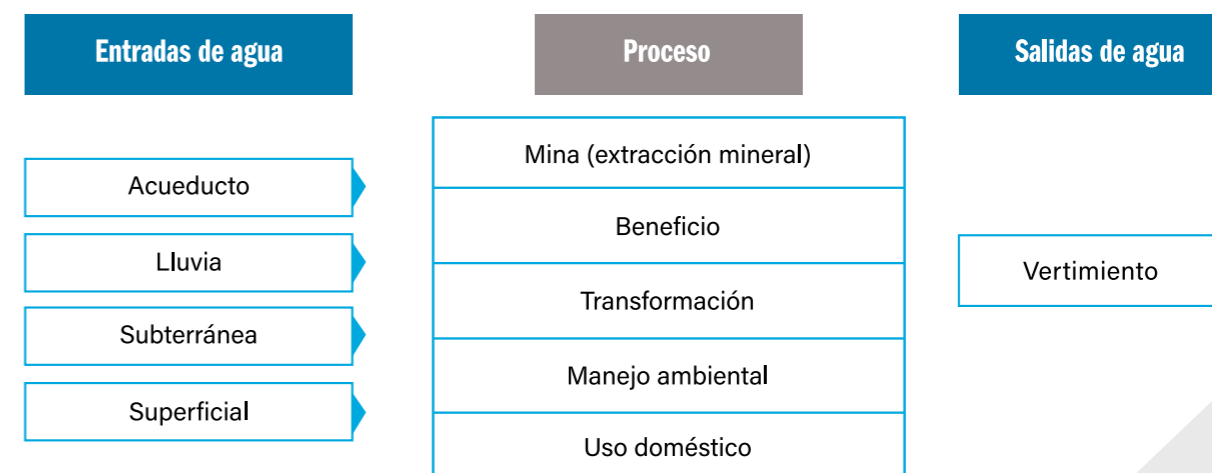


Tabla 2. Información de los caudales de entradas para estimar la HHA por mina

Fuente de abastecimiento	Caudal (m <sup>3</sup> /año)	Principal proceso que abastece	Fuente de abastecimiento	Caudal (m <sup>3</sup> /año)	Principal proceso que abastece
Acueducto			Subterránea o de mina		
Lluvia			Superficial (ríos, quebradas, lagos)		

Tabla 3. Información de los caudales de salidas para estimar la HHA por mina

Vertimiento	Caudal (m <sup>3</sup> /año)
Vertimiento total*	

\*El vertimiento total hace referencia a la suma de todos los vertimientos que realiza la mina

Ecuación 4. Huella Hídrica Azul mina

$$HHA_{mina} = EA_{mina} - SA_{mina}$$

<b>HHA<sub>mina</sub></b>	= Huella Hídrica Azul de la mina, m <sup>3</sup> /año
<b>EA<sub>mina</sub></b>	= Entrada total de agua a la mina, m <sup>3</sup> /año (Ecuación 3)
<b>SA<sub>mina</sub></b>	= Vertimiento total de agua de la mina, m <sup>3</sup> /año

El Formato Básico Minero permite la recolección de la información para estimar la HHA, incluso se convierte en un filtro de verificación de los datos ingresados por el usuario, ya que por balance el volumen del vertimiento no puede ser mayor que la sumatoria de los volúmenes de captación, si se presenta esta situación



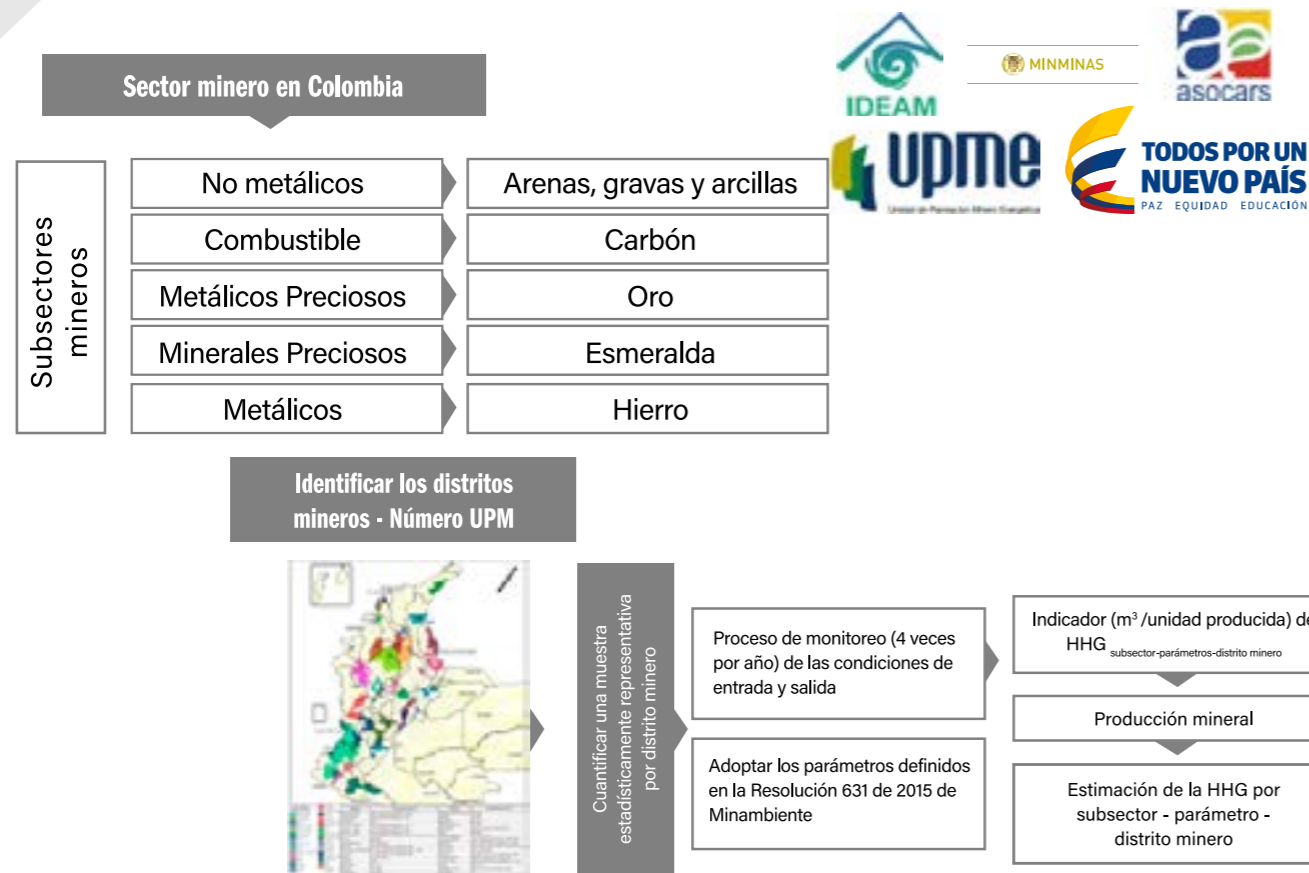
indica que se puede estar presentando un error en el ingreso de la información al sistema. En el Anexo 1 se presenta el instructivo para incluir las preguntas clave en el Formato Básico Minero para el cálculo de la Demanda y la Huella Hídrica Azul del sector minero.

Otras fuentes de información como la Tasa por Uso de Agua o los reportes de las concesiones de agua y los permisos de vertimientos, son instrumentos que pueden servir para complementar la base de información o para tener reportes en los casos que el Formato Básico Minero presente inconsistencias.

#### 4.2.3 HUELLA HÍDRICA GRIS HHG

Metodológicamente se definió, que para estimar la HHG del sector minero es necesario proponer e implementar un plan de mediano a largo plazo, el cual consiste básicamente en determinar para los diferentes minerales las principales zonas de producción (distritos mineros) y realizar monitoreos que permitan obtener un indicador de HHG (por indicador se entiende m<sup>3</sup>/unidad producida) por cada una de las zonas estudiadas y por tipo de mineral. Con este indicador de HHG y la producción se podría estimar la HHG por mina y posteriormente calcularla a diferentes escalas territoriales (municipal, departamental o subzona hidrográfica). En la Figura 18 se observa de forma general el plan a ejecutar para generar información relacionada con la HHG.

Figura 18. Esquema general para la estimación de la HHG



Una vez realizado el plan de monitoreo y obtenida la información, el proceso de cálculo de la HHG para cada una de las minas visitadas y del indicador de HHG (m<sup>3</sup>/unidad producida) es el siguiente: La Ecuación 5 corresponde a la

ecuación propuesta en la metodología de evaluación de Huella Hídrica (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011) y se debe aplicar para las minas objeto de medición de acuerdo a la Figura 18.

Ecuación 5. Cálculo general de la HHG

$$HHG_{mina-indicador} = \frac{Caudal_{salida} \times Con_{salida-parámetro} - Caudal_{entrada} \times Con_{entrada-parámetro}}{C_{limite\ permissible-parámetro} - C_{nat-parámetro}} \times Producción_{mina}$$

Ecuación 6. Indicador de Huella Hídrica Gris (L/unidad de producción) por distrito

$$Indicador\ HHG_{zona-parámetro} = \frac{\sum HHG_{mina}}{Número\ de\ minas}$$

Ecuación 7. Huella Hídrica Gris a partir de un indicador

$$HHG_{mina} = Indicador\ HHG_{zona-parámetro} \times Producción_{mina}$$

$HHG_{mina-indicador}$	= Huella Hídrica Gris de una mina para un contaminante en función de su producción, L/Kg
$Caudal_{salida}$	= Caudal de salida o de vertimiento de la mina, L/año
$Con_{salida-parámetro}$	= Concentración de un parámetro a la salida de la mina, mg/L
$Caudal_{entrada}$	= Caudal de entrada a la mina, L/año
$Con_{entrada-parámetro}$	= Concentración de un parámetro a la entrada de la mina, mg/L
$C_{limite\ permissible-parámetro}$	= Concentración máxima permisible del contaminante para mantener en buenas condiciones la calidad del afluente receptor del vertimiento, mg/L
$C_{nat-parámetro}$	= Concentración natural del contaminante (sin intervención antrópica), mg/L
$Indicador\ HHG_{zona-parámetro}$	= Corresponde al cálculo en Litros por unidad producida para una determinada zona y un parámetro específico, dependiendo del mineral analizado se puede utilizar kilogramos o toneladas
$Producción_{mina}$	= Hace referencia a la producción de la mina, kilogramos o toneladas

La ecuación para el cálculo de la Huella Hídrica Gris (Ecuación 5) se compone de dos partes; el numerador hace referencia a la carga aportada únicamente por el proceso minero, por tal motivo, a la carga final vertida se le resta la carga con que al agua ingresa al sistema de producción, ya que esta carga fue aportada por otros procesos que se encuentran aguas arriba de la actividad minera. El segundo componente es el denominador, en éste se evalúa el potencial de asimilación de una fuente hídrica para un determinado contaminante con el fin de garantizar que el vertimiento no afectará la calidad del agua y por ende se mantiene en buenas condiciones. El denominador está conformado por una resta entre la concentración máxima del contaminante para que mantenga en buenas condiciones la calidad del agua de la fuente receptora y la concentración natural del mismo contaminante, esta concentración natural no está afectada por ninguna actividad antrópica y es la que se genera por procesos naturales en la cuenca.

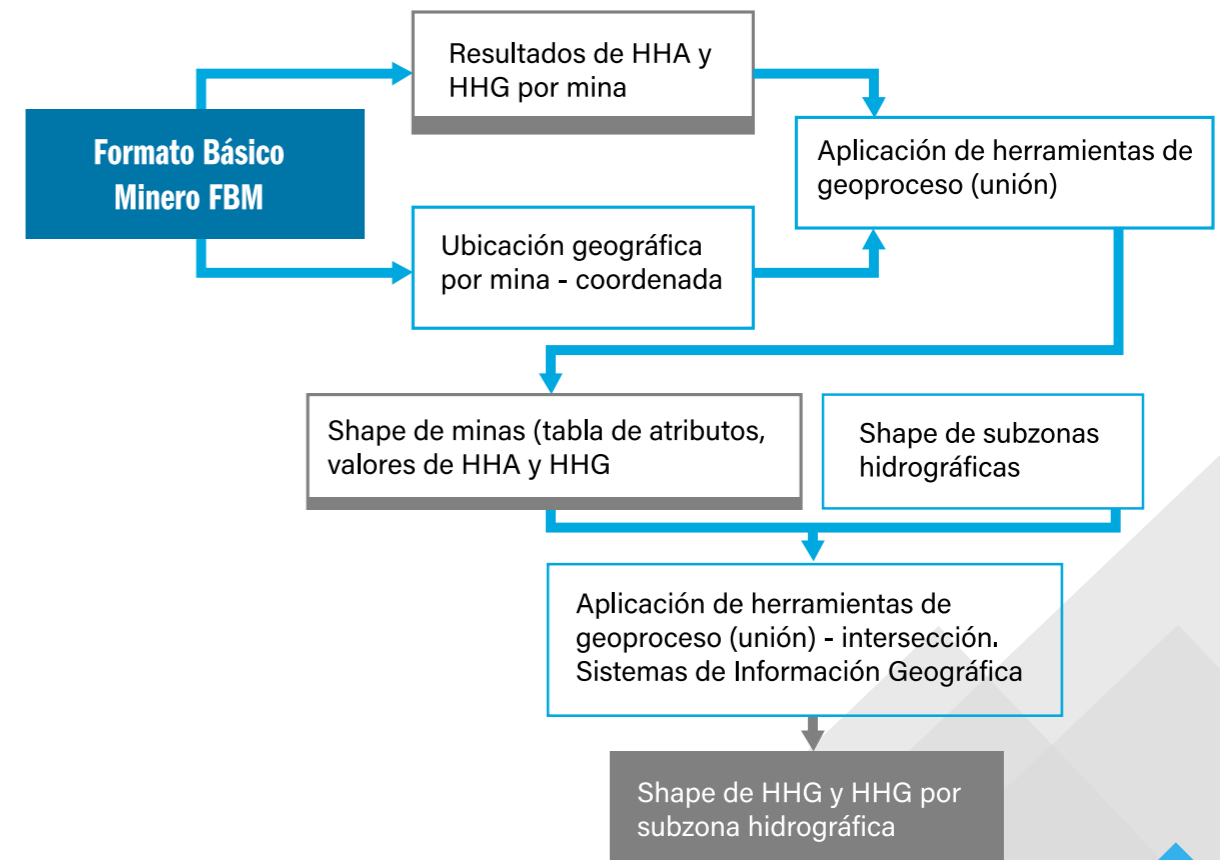
El proceso de cálculo de la HHG es complejo ya que requiere estimar variables que en condiciones normales son de difícil medición y a la vez son costosas en términos económicos. Por tal motivo, se propone estimar un indicador de HHG para una zona específica y un contaminante determinado, esto significa, por ejemplo, para un distrito minero con actividad aurífera, determinar una muestra representativa de UPM, y a cada una de ellas se les calcula la HHG pero en función de su producción (Ecuación 5). Una vez estimado el indicador de HHG por mina, se promedia el valor obtenido en cada mina y así se obtiene el indicador de HHG que para este caso corresponde a un distrito minero (zona) y para un contaminante en específico (Ecuación 6). Aquellas minas que hacen parte del distrito minero pero que no fueron objeto de mediciones, entonces utilizan el indicador de HHG por zona y para un contaminante estimado y lo multiplican por su producción (Ecuación 7) para obtener valores de L/Kg.

#### 4.2.4 GENERACIÓN DE RESULTADOS POR SUBZONA HIDROGRÁFICA

Considerando que los resultados de la implementación de esta Guía deben articularse con la escala espacial definida en el ENA 2014, es necesario explicar el procedimiento para llevar los

resultados obtenidos por título minero a escala de subzona hidrográfica. En la Figura 19 se presenta el esquema para generar los resultados de HHA y HHG por subzona hidrográfica.

Figura 19. Generación de los resultados de HHA y HHG por subzona hidrográfica



### 4.3 ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD

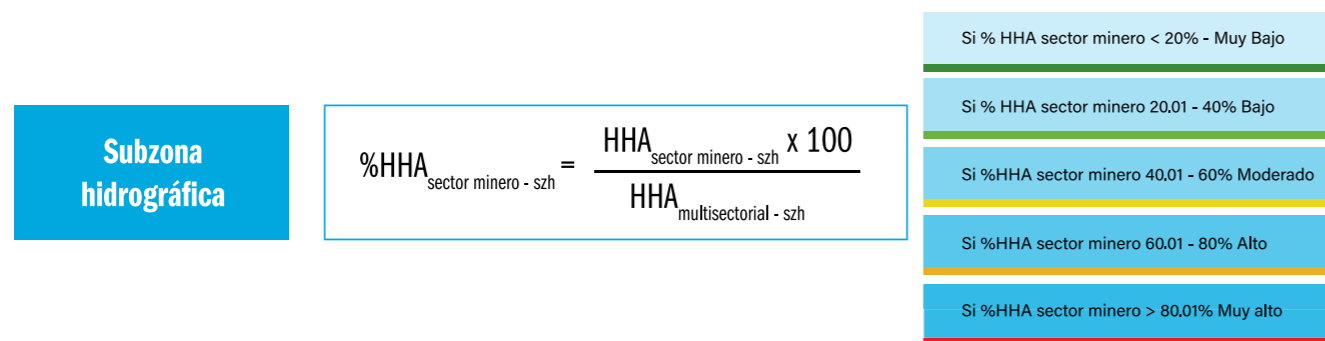
De acuerdo al alcance definido en la Figura 15, el análisis de sostenibilidad estará integrado por indicadores hídricos y socio económicos que en principio se analizan individualmente pero que se integran en una tabla de resultados finales. En el caso del análisis de sostenibilidad hídrica a partir de la HHA, éste se realizará en dos sentidos, el primero consiste en determinar la sostenibilidad del sector minero por subzona hidrográfica a partir del indicador de HHA sector minero y del IARC multisectorial. El segundo análisis, permite incluir los resultados de demanda y HHA del sector minero en los indicadores IUA y IARC evaluados en el ENA 2014, permitiendo la articulación de la minería con otros sectores económicos y evaluando de forma integral el impacto generado sobre el recurso hídrico.

#### 4.3.1 ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD HÍDRICA

##### 4.3.1.1 ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD HÍDRICA SECTORIAL A PARTIR DE LA HUELLA HÍDRICA AZUL

El análisis de sostenibilidad hídrica del sector minero a partir de la Huella Hídrica Azul, toma como variables el porcentaje de representatividad de la HHA del sector minero frente a otros usuarios del agua para una misma unidad territorial (subzona hidrográfica) y el índice IARC multisectorial. En la Figura 20, se presentan las categorías para clasificar la HHA del sector minero con relación a los demás sectores usuarios del recurso hídrico en la cuenca (subzona hidrográfica).

Figura 20. Categorías para clasificar la relevancia de la HHA del sector minero por subzona hidrográfica



Una vez definido el porcentaje de la HHA del sector minero con relación a los otros usuarios en la subzona hidrográfica se define una matriz de doble entrada en la que se comparan estos valores con los resultados del Índice de Agua no Retornada a la Cuenca IARC (en la Tabla 5 se presentan las categorías definidas en el ENA 2014 para clasificar el índice IARC). Esta matriz tiene como objetivo analizar la

relevancia del sector minero en términos de consumo de agua pero a la vez incluir las condiciones hídricas (oferta) de la cuenca y la presión que ejercen los demás usuarios. En la Tabla 4 se presenta la matriz de análisis para determinar la sostenibilidad del sector minero por subzona hidrográfica.

Tabla 4. Matriz de análisis de sostenibilidad para el sector minero

Categorías IARC Multisectorial	Categorías % HHA sector minero				
	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy Alto
Muy Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Bajo	Muy Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Moderado	Bajo	Bajo	Moderado	Moderado	Moderado
Alto	Bajo	Moderado	Moderado	Alto	Alto
Muy alto	Moderado	Moderado	Alto	Muy alto	Crítico
Crítico	Moderado	Alto	Alto	Crítico	Crítico

A partir de los resultados de la Tabla 4, se identifican como puntos críticos asociados a la Huella Hídrica Azul las subzonas hidrográficas clasificadas en las categorías Alto, Muy Alto y Crítico, estas subzonas deben ser consideradas en la Fase 4

para que se formulen las estrategias, programas y proyectos necesarios que permitan minimizar los impactos ocasionados sobre el recurso hídrico en términos de oferta.

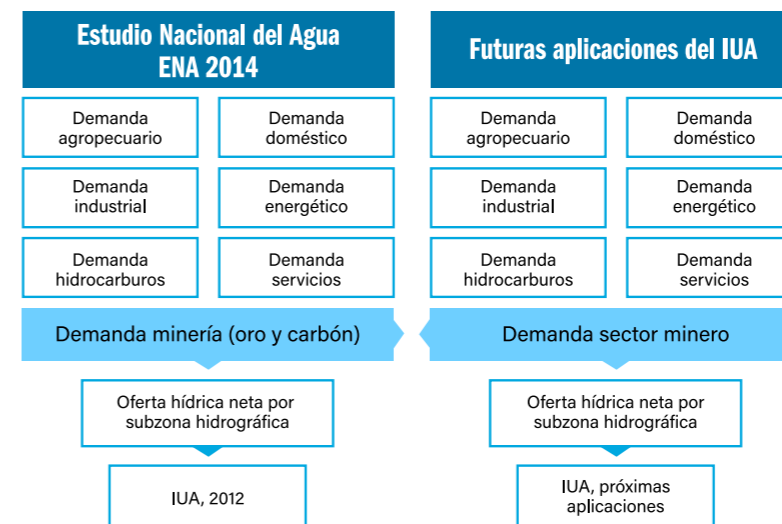
#### 4.3.1.2 ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD HÍDRICA MULTISECTORIAL A PARTIR DE LA HUELLA HÍDRICA AZUL

Uno de los objetivos de esta Guía es la articulación de los resultados de la Huella Hídrica con algunos de los indicadores establecidos por el IDEAM en el ENA 2014. Esto permitirá hacer un análisis integral por subzona hidrográfica ya que no solo se considera el sector minero sino también otros sectores económicos como el doméstico, agropecuario, industrial, entre otros. De esta forma, se identifican impactos o puntos críticos asociados a un territorio generados por diferentes sectores los cuales deben adoptar medidas en conjunto para la intervención de sus territorios.

#### 4.3.1.3 APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE USO DEL AGUA IUA

La precaria disponibilidad de información impidió la apropiada inclusión del sector minero en los cálculos de demanda del ENA 2014. Las estimaciones someras realizadas se hicieron a partir de juicio de expertos y de algunos datos resultantes de entrevistas con algunas empresas del sector, que sin embargo solo consideraron la minería de oro y carbón. Por tal motivo, para la próxima publicación del ENA, esta guía permitirá la recolección de información no solo de estos dos minerales sino de todo el sector y a su vez mejorará los cálculos de demanda y en consecuencia del Índice de Uso del Agua IUA. En la Figura 21, se presenta la inclusión del sector minero en los cálculos del indicador IUA y en la Ecuación 8 se observa el modelo de cálculo.

Figura 21. Articulación de los resultados de demanda con el Índice IUA



*Nota:*  
Los cálculos de la demanda hídrica de los sectores económicos a excepción del minero son suministrados por el IDEAM o en su defecto por las entidades encargadas de suministrar estos datos.

Ecuación 8. IUA multisectorial

$$IUA_{\text{multisectorial-szh}} = \frac{\sum DH_{\text{multisectorial-szh}}}{\text{Oferta hídrica neta}_{\text{szh}}} \times 100$$

$IUA_{\text{multisectorial-szh}}$

= Índice de Uso del Agua para todos los sectores económicos evaluados en el ENA por subzona hidrográfica, adimensional

$\sum DH_{\text{multisectorial-szh}}$

= Corresponde a la sumatoria de la demanda hídrica generada por los sectores económicos por subzona hidrográfica, m<sup>3</sup>/año

$\text{Oferta hídrica neta}_{\text{szh}}$

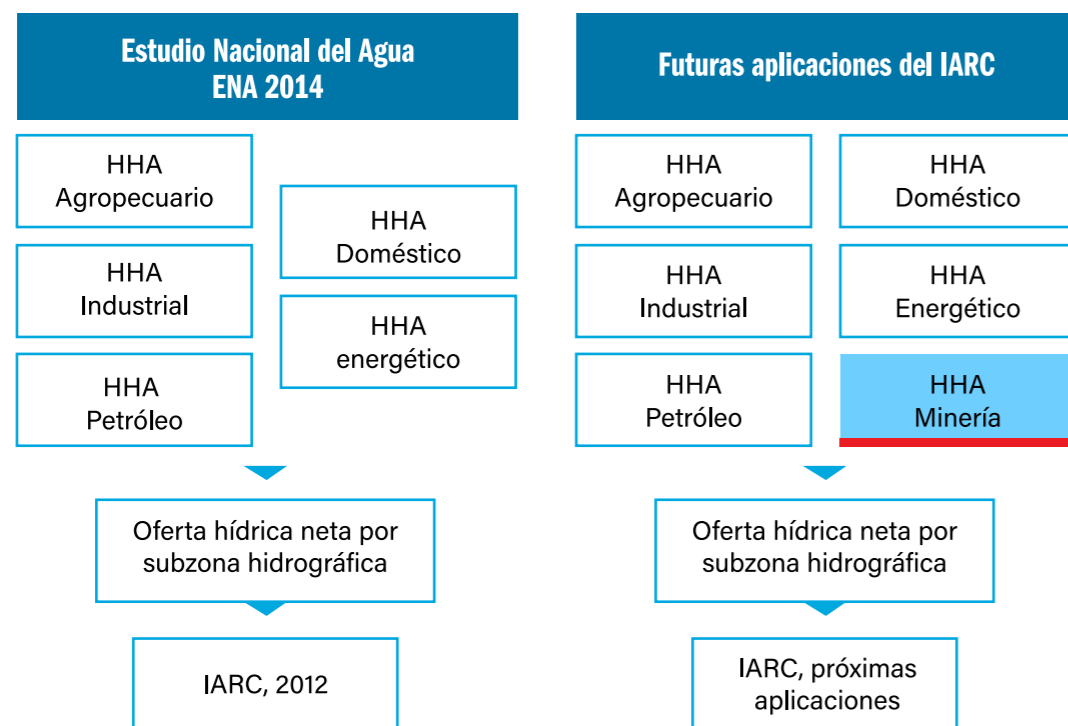
= Oferta de agua por subzona hidrográfica una vez descontando el caudal ambiental, m<sup>3</sup>/año

#### 4.3.1.4 APLICACIÓN DEL ÍNDICE IARC

De acuerdo al ENA 2014 (IDEAM, 2015), el Índice IARC consideró 5 sectores económicos en los cuales no estuvo incluido el sector minero. A partir de la implementación de esta Guía que incluye la recolección de información a través

del Formato Básico Minero y otras fuentes, las próximas publicaciones del Estudio Nacional del Agua podrá incluir a la minería de una manera más apropiada. El esquema de articulación se puede observar en la Figura 22. Para el cálculo del IARC multisectorial se utiliza la Ecuación 9.

Figura 22. Articulación de los resultados de la HHA en el Índice IARC



Nota: Los cálculos de la Huella Hídrica Azul de los sectores económicos a excepción del minero son suministrados por el IDEAM.

Ecuación 9. IARC multisectorial

$$IARC_{\text{multisectorial-szh}} = \frac{\sum HHA_{\text{multisectorial-szh}}}{\text{Oferta hídrica neta}_{\text{szh}}}$$

$IARC_{\text{multisectorial-szh}}$	= Índice de Agua no Retornada a la Cuenca generada por todos los sectores económicos evaluados en el ENA por subzona hidrográfica, adimensional
$\sum HHA_{\text{multisectorial-szh}}$	= Corresponde a la sumatoria de la Huella Hídrica Azul generada por los sectores económicos por subzona hidrográfica, m <sup>3</sup> /año
$\text{Oferta hídrica neta}_{\text{szh}}$	= Oferta de agua por subzona hidrográfica una vez descontando el caudal ambiental, m <sup>3</sup> /año

La identificación de los puntos críticos a partir de los indicadores IUA y IARC multisectoriales por subzona hidrográfica, son definidos a partir de los criterios definidos en el ENA 2014. Como cada indicador tiene significado diferente, se deben

formular estrategias de intervención de acuerdo a sus resultados. En la Tabla 5 se presentan las categorías de calificación y los rangos asociados para cada uno de los índices.

Tabla 5. Categorías de calificación del IUA y el IARC multisectorial

Categoría	Rango IUA	Rango IARC
<b>Crítico</b>	> 100	> 1
<b>Muy alto</b>	50.01 - 100	0.501 - 1
<b>Alto</b>	50 - 20.01	0.5 - 0.201
<b>Moderado</b>	20-10.01	0.2 - 0.101
<b>Bajo</b>	10 - 1.01	0.10 - 0.01
<b>Muy bajo</b>	< 1	< 0.01



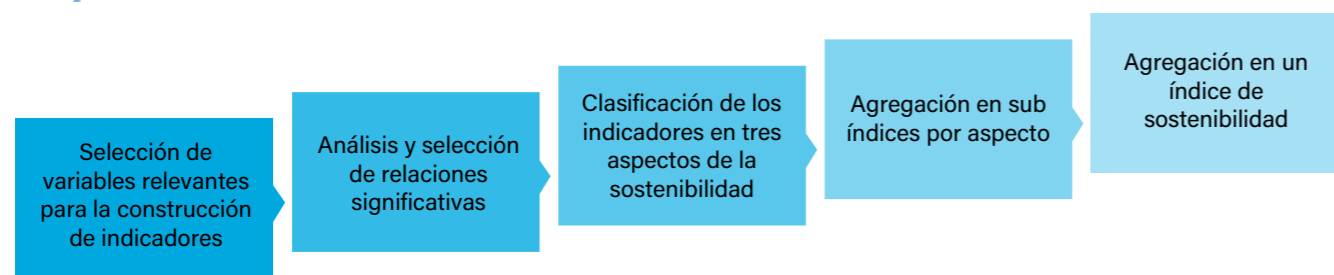
definir un plan de corto, mediano y largo plazo que permita mejorar las condiciones de la subzona hidrográfica en términos de oferta hídrica.

### 4.3.2 ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD SOCIO ECONÓMICA

La metodología utilizada para el cálculo de indicadores e índices a utilizar se definió en cinco pasos (ver Figura 23).

Las subzonas hidrográficas que presenten tanto en el IUA y el IARC categorías de Crítico, Muy Alto y Alto son las que se consideran como puntos críticos, en las cuales se deben enfocar los esfuerzos públicos, institucionales y privados para

Figura 23. Paso a paso para la construcción de los indicadores para el análisis de sostenibilidad del sector minero: carbón y oro a partir de la relación con la Huella Hídrica.



Fuente: Equipo CTA

En el marco de esta propuesta, se presenta el índice socioeconómico agregado, el cual incluye la ponderación y normalización de una serie de indicadores socio-económicas, con el fin de darle una escala de valor a cada indicador (ver Figura 24). La definición del índice socioeconómico agregado se observa a continuación (ver Ecuación 10):

Ecuación 10. Indicador integrado

$$\text{Indicador agregado} = \sum_i^n a_i \text{Indicador}_{i,k}$$

$$a_i = \frac{\text{MaxInd}_{i,k}}{\sum_i^n \text{MaxInd}_{i,k}}$$

Donde:

$a_i$	Es el ponderador de cada uno de los indicadores.
$\text{MaxInd}_{i,k}$	Es el valor máximo que puede tener el indicador $i$ de la clase $k$ .
$k$	Es la clase (Económico o Social).

La importancia de normalizar los datos radica en que al realizar este proceso se logra no solo obtener un número sin unidades, sino también se logra obtener una magnitud que no solo indica la dirección del efecto de dicho indicador, sino también

permite obtener un valor de referencia frente al cual compararlo. En este sentido, se utilizó el método de cambios relativos el cual permite centrar el cambio en la media de los datos de la siguiente manera:

Ecuación 11.

$$\text{Indicador}_{i,k} = \frac{X_{i,k} - \bar{X}_{i,k}}{\bar{X}_{i,k}}$$

$$\bar{X}_{i,k} = \sum_j^j \frac{X_{i,j,k}}{N}$$

La anterior metodología implica entonces que cada indicador normalizado se interprete como el porcentaje de desviación del indicador  $i$  del municipio  $k$  frente a la media de los demás municipios

estudiados. De lo anterior, y como se mencionó anteriormente, surge la clasificación de los indicadores cuya escala se muestra a continuación:



1. Para los indicadores de exportaciones sobre Huella Hídrica, producción minera sobre empleados del sector minero, inversiones en descontaminación sobre valor de la producción, PIB sobre población, regalías del sector minero sobre población, regalías sobre Huella Hídrica Azul y empleados sobre población se realizó la siguiente escala.

Escala de Clasificación	
Rango	Clasificación
Menor o igual a - 1	Malo
Entre - 1 y 1	Medio
Mayor a 1	Bueno

2. Para los indicadores Huella Hídrica Azul, valor de la producción sobre PIB, GINI y NBI:

Escala de Clasificación	
Rango	Clasificación
Menor o igual a - 1	Bueno
Entre - 1 y 1	Medio
Mayor a 1	Malo

La propuesta del índice incluye 13 indicadores relacionados con la actividad minera y las condiciones socioeconómicas de los municipios donde se desarrolla la actividad. La información insumo para el cálculo de estos, es oficial y pertenece a

entidades como el DANE, DNP y SIMCO. Los indicadores se dividen en dos grupos: a nivel sectorial, es decir del sector minero y a nivel territorial (Ver Figura 25).

Figura 24. Propuesta del índice socioeconómico agregado

$$IG = a_1 APW_k - a_2 \frac{HHA_k}{POB_k} + a_3 \frac{EXP_k}{HHA_k} - a_4 \frac{ValProd_k}{PIB_k} + a_5 \frac{Prod_k}{Empleo_k} + a_6 \frac{Inversiones_k}{ValProd_k} - a_7 GINI_k - a_8 NBI_k + a_9 \frac{PIB_k}{POB_k} + a_{10} \frac{REG_k}{POB_k} + a_{11} \frac{REG_k}{HHA_k} + a_{12} \frac{Empleo_k}{POB_k} + a_{13} \frac{Accidentes_k}{POB_k}$$

Figura 25. Indicadores socioeconómicos propuestos

Sigla	Indicador	Signo	Sigla	Indicador	Signo
APW	Productividad aparente del agua (S/m³)	+	GINI	%	-
HHA / POB	Huella hídrica azul / población (m³ per cápita)	-	NBI	%	-
EXP / HHA	Exportaciones / Huella hídrica azul (exportaciones per cápita)	+	PIB/POB	PIB / población (PIB per cápita)	+
ValProd / PIB	Valor de la producción / PIB (%)	-	REG/POB	Regalías / Población (PIB per cápita)	+
Prod / Empleo	Producción / Empleo (Productividad laboral)	+	REG/HHA	Regalías / Huella hídrica azul (S/m³)	+
Inversiones / ValProd	Inversiones descontaminación / Valor de la producción (%)	+	Empleo/POB	Empleo / Población (%)	+
			Accidentes/POB	Accidentes / Población (%)	-

Tabla 6. Indicadores socioeconómicos propuestos para la evaluación de la Huella Hídrica

Indicador	Interpretación	Fuente
Valor de inversiones en descontaminación municipal (\$) / Valor de la producción minera municipal (\$)	Esta razón permite observar el porcentaje de los ingresos invertidos en descontaminación en el sector minero.	Valor de inversiones en descontaminación municipal= Encuesta referenciada para cada mina. Valor de la producción minera municipal (\$) = Precio del mineral (\$/gr) * Producción (gr) Precio del mineral (\$/gr) = Simco Producción (gr) = Simco
Valor de las regalías municipales (\$) / HHA municipal (m³)	Análisis de eficiencia, la razón entre estas variables mostraría las regalías generadas por m³ de agua.	Valor de las regalías municipales (\$) = Simco
Producción minera municipal (gr, Ton) / Número de empleos del sector minero municipal	Análisis de eficiencia, la razón entre estas dos variables mostraría la productividad laboral por cada mina.	Producción minera municipal= Simco Número de empleados municipal = Encuesta referenciada para cada mina.
Valor de la producción minera municipal (\$) / Huella hídrica azul del municipio (m³)	Análisis de eficiencia, la razón entre estas variables permite observar los ingresos que recibe el sector minero en la unidad de análisis por m³ de agua utilizado.	Valor de la producción minera municipal (\$) = Precio del mineral (\$/gr) * Producción (gr) Precio del mineral (\$/gr) = Simco Producción (gr) = Simco
Valor de la producción minera municipal (\$) / PIB total municipal (\$)	Esta razón muestra el peso relativo de la actividad minera sobre el PIB de la unidad de análisis.	Valor de la producción minera municipal (\$) = Precio del mineral (\$/gr) * Producción (gr) PIB total municipal: Estimaciones a partir del DANE (indicador de importancia municipal, PIB municipal).
Valor de las exportaciones (\$) / Huella hídrica Azul (m³)	Análisis de eficiencia, la razón entre estas dos variables permite observar el retorno del agua debido al ingreso generado por el agua utilizada	Valor de las exportaciones municipales en general (\$) = valor estimado a partir de indicador de importancia municipal-DANE

Indicador	Interpretación	Fuente
Valor de las regalías por minería (\$) / Población total municipal	Regalía per cápita	Valor de las regalías por minería (\$) = SIMCO Población total municipal= DANE
PIB municipios mineros (\$) / Población total municipal	Esta razón mostraría el PIB per cápita (a nivel municipal).	PIB municipios mineros (\$) = Estimaciones Población total municipal= DANE
HHA municipal minera (m³) / Población total municipal	Al compararse entre comunidades se puede establecer una posible distribución de agua. (Índice de equidad del agua)	HHA municipal minera (m³) Población total municipal: DANE
Número de accidentes reportados por minería / Número de empleos del sector minero municipal	Muestra la cantidad de accidentes por número de empleados en la unidad de análisis.	Número de accidentes reportados por minería = Encuesta referenciada Número de empleos del sector minero municipal = Encuesta referenciada
Número de empleos del sector minero municipal / Población total municipal	Análisis de sostenibilidad, esta relación mostraría la proporción de los empleos generados por la actividad en la unidad de análisis.	Número de empleos del sector minero: Encuesta referenciada para cada mina. Población total municipal: DANE
GINI	Muestra la disparidad de los ingresos de los habitantes de los municipios mineros	IGAC

### 4.3.3 ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD INTEGRAL

Una vez analizados, cuantificados y categorizados los indicadores hídricos y socio económicos, se procede a construir una matriz o tabla que permita la integración cualitativa de los mismos. Es importante aclarar que no se puede obtener un resultado global ya que las escalas espaciales de aplicación de los indicadores hídricos y socio económicos

son diferentes, en el caso de los indicadores hídricos la escala es subzona hidrográfica (cuenca), mientras que los indicadores socio económicos están definidos a escala municipal. En la Tabla 7 y Tabla 8, se presenta la integración de resultados identificando a escala de subzona hidrográfica y municipal los puntos críticos para los diferentes indicadores, los cuales serán considerados en la formulación de respuestas. En el Anexo 2 se presenta la matriz de integración completa.

Tabla 7. Matriz de integración del análisis de sostenibilidad componente hídrico

Código SZH	Nombre SHZ	Indicadores Hídricos - Escala SZH			Municipios que conforman la SZH
		Sostenibilidad sector minero	IUA Multisectorial	IARC Multisectorial	

Tabla 8. Matriz de integración de resultados – indicadores socio económicos a nivel sectorial

Municipios que conforman la subzona hidrográfica	Tipo de mineral	APW (\$/m³)	Huella hídrica azul / Población	Clasificación	Exportaciones/ Huella hídrica azul	Clasificación	Valor producción minera/ PIB minero	Clasificación

Municipios que conforman la subzona hidrográfica	Producción minera / # empleos sector minero	Clasificación	Inversiones descontaminación / Valor de la producción municipal	Clasificación

Tabla 9. Matriz de integración de resultados – indicadores socio económicos a nivel territorial

Municipios que conforman la subzona hidrográfica	Gini	Clasificación	Nbi (2005)	Clasificación	PIB/ Población	Clasificación	Regalías minería / Población	Clasificación

Municipios que conforman la subzona hidrográfica	Regalías / HHA	Clasificación	#empleados / Población	Clasificación	Número de accidentes / #empleados	Suma	Normalización	Clasificación de sostenibilidad

### 4.4 FORMULACIÓN DE RESPUESTA

El proceso de evaluación de la Huella Hídrica finaliza con la formulación de respuesta, esto consiste en identificar las subzonas hidrográficas con problemas (puntos críticos) relacionados a los indicadores evaluados y proponer las estrategias de intervención, las cuales se pueden enmarcar en las diferentes herramientas de planeación como los Planes de Desarrollo (nacional, departamental y local), los Planes de Acción de las autoridades ambientales, en plataformas de intervención como los fondos de agua, los departamentos ambientales

de las empresas, o simplemente la formulación de proyectos por parte de entes no gubernamentales y/o comunitarios. En la Figura 26, se presenta el esquema general para la formulación de respuestas a los puntos críticos identificados por subzona hidrográfica.

Adicionalmente, en la Figura 27 se puede observar un esquema o mecanismo de articulación entre actores para determinar las intervenciones necesarias, los tiempos de ejecución, los recursos necesarios para implementar las estrategias y los actores más relevantes.

Figura 26. Esquema general para la formulación de respuestas

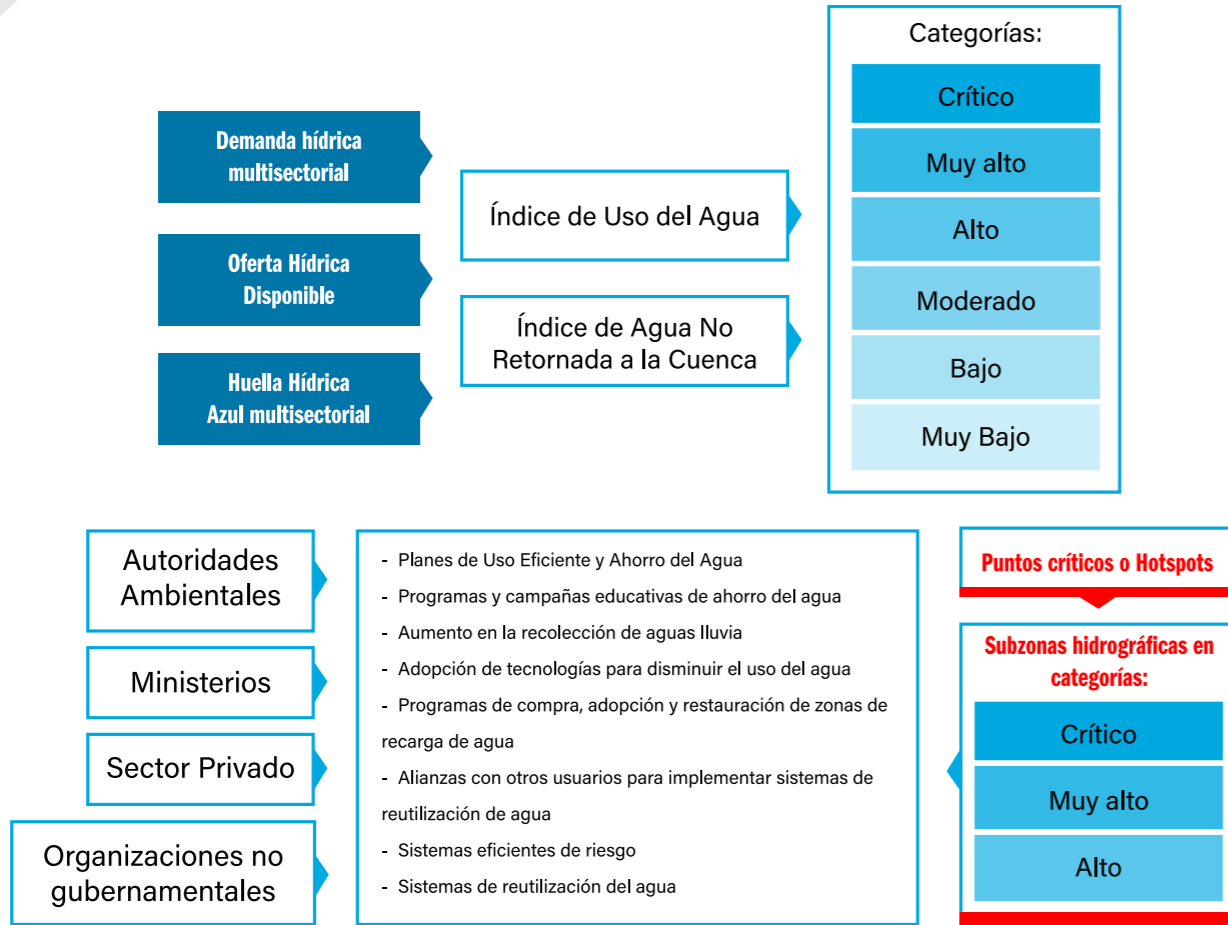
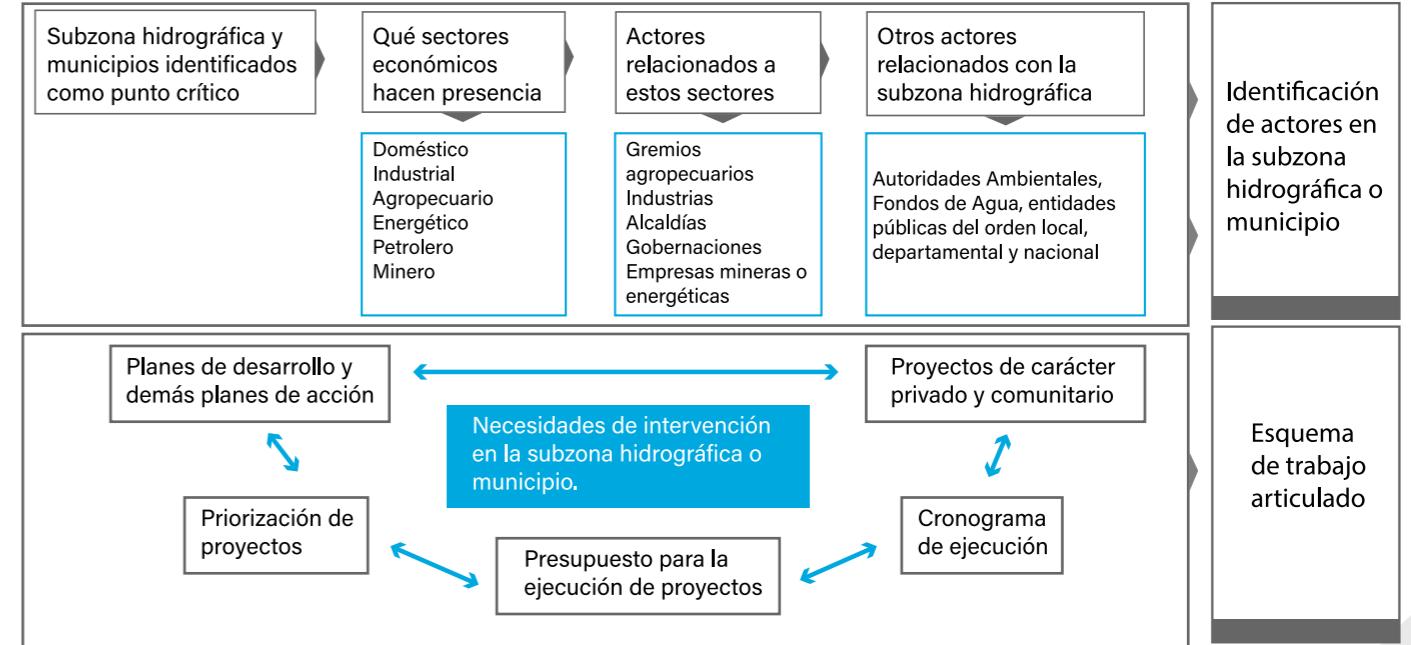


Figura 27. Articulación de actores y estrategias de intervención





## 5.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de la formulación de la Guía metodológica para la evaluación de la Huella Hídrica del sector minero colombiano, se presentan las siguientes conclusiones y recomendaciones orientadas en su implementación:

- El esquema conceptual y metodológico para el cálculo de la Huella Hídrica Azul está listo para su implementación, todo depende del funcionamiento del Formato Básico Minero.
- Para el caso de la Huella Hídrica Gris, se requiere de una alianza interinstitucional que involucre actores públicos (IDEAM, UPME, COLCIENCIAS, Ministerios, autoridades ambientales), sector privado representados por las empresas mineras y el sector académico con el fin de emprender proyectos que permitan determinar el impacto en la calidad del agua a través de la estimación de la HHG en diferentes zonas del país.
- La relevancia de la Huella Hídrica del sector minero, se da cuando los resultados se articulan con los demás sectores o usuarios del territorio y se identifica el impacto conjunto que se puede generar en un territorio o específicamente a nivel de cuenca hidrográfica.
- La adición de indicadores socio económicos en el análisis de sostenibilidad, complementa los resultados hídricos permitiendo generar mejores intervenciones territoriales de acuerdo a las condiciones sociales y económicas de cada cuenca o municipio.
- La formulación de respuestas es la Fase de mayor dificultad implementar, ya que corresponde a las intervenciones territoriales que se deben ejecutar para minimizar los impactos que generan las actividades económicas ubicadas en un territorio.

## BIBLIOGRAFÍA

Agencia Nacional de Minería. (2014). Producción de minas y canteras. Obtenido de <https://www.anm.gov.co/?q=Produccion-minas-canteras-2014>

Biesheuvel, A., Bos, W., Cheng, I., & Liu, X. (2016). Modeling global water demand for coal based power generatio. Greenpeace International.

Chico, D., & Zhang, G. (2015). Water Footprint Assessment of FMO's Agribusiness Portfolio: Towards halving the footprint in the sugar supply chain. Netherlands.

COSUDE - CTA . (2013). Evaluación dela Huella Hídrica en la cuenca del río Porce. Medellín.

Díaz Arriaga, F. A. (2014). Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Revista Salud Pública*, 11.

Echeverri, X. V. (2014). Estimación de la Huella Hídrica en la extracción de caliza a cielo abierto y propuesta de una política de integración sostenible del recurso hídrico – caso planta Rioclaro, Argos. Medellín.

FEDESARROLLO - Banco Interamericano de Desarrollo. (2014). Minería informal aurífera en Colombia - Principales resultados del levantamiento de la línea de base. Bogotá.

Franke, N. A., Boyacioglu, H., & Hoekstra, A. Y. (2013). Grey Water Footprint accounting Tier 1 supporting guidelines. Netherlands.

González, J. E., Montoya, L. J., Botero, B. A., Arévalo, D., & Valencia, V. (2012). Aproximación a la estimación de la Huella Hídrica de la minería del oro en el Municipio de Segovia, Antioquia (Colombia). *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 14.

Hoekstra, A. Y. (2015). The water footprint: The relation between human consumption and water use. Switzerland.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *Water Footprint Assessment Manual - Setting the Global Standar*. London: Earthscan Publications.

IDEAM - COSUDE - CTA - GSI LAC . (2015). Evaluación multisectorial de la Huella Hídrica en Colombia. Medellín.

IDEAM. (2015). Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá.

Ministerio de Minas y Energía - Ministerio del Medio Ambiente. (2002). *Guía Minero Ambiental, Beneficio y Transformación*. Bogotá.

Ministerio de Minas y Energía - UPME - Universidad de Córdoba. (2014). Estudio de la cadena del mercurio en Colombia con énfasis en la actividad minerade oro, Tomo I, II y III. Bogotá.

Ministerio de Minas y Energía. (2012). *Censo Mineero Departamental 2010 - 2011*. Bogotá.

MINMINAS. (2003). Resolución 181108 del 2003. Colombia: Ministerio de Minas y Energía.

Northey, S. A., Haque, N., Lovel, R., & Cooksey, M. A. (2014). Evaluating the application of water footprint methods to primary metal. *Minerals Engineering*, 16.

Orjuela, L. C., & López, M. O. (2013). Hoja metodológica del indicador Índice de alteración potencial de la calidad del agua (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. Bogotá.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente - Ministerio de Ambiente y Desarrollo

Sostenible. (2012). Sinopsis Nacional de la minería aurífera artesanal y de pequeña escala. Bogotá.

Safaya, S., Zhang, G., & Mathews, R. (2016). Toward sustainable water use in the cotton supply chain. A comparative assessment of the water footprint of agricultural practices in India.

Santacruz De León, G., & Peña de Paz, F. J. (2014). Huella gris y minería: el impacto de la extracción de metales en el agua. En R. M. Constantino Toto, Agua, alimentación y bienestar. La Huella Hídrica como enfoque complementario de (pág. 325). México DF.

SIMCO. (2014). Estadísticas: Producción Oficial de Minerales en Colombia. Obtenido de <http://www.simco.gov.co/?TabId=121>

Unidad de Planeación MInero Energética - Universidad de Córdoba. (2015). • Guía de orientación para el minero sobre el correcto manejo de vertimientos para la minería de metales preciosos y de carbón. Bogotá.

Unidad de Planeación Minero Energética - Universidad de Córdoba. (2015). Incidencia real de la minería del carbón, del oro y del uso del mercurio en la calidad ambiental con énfasis especial en el recurso hídrico - diseño de herramientas para la planeación sectorial. Bogotá.

Unidad de Planeación Minero Energética - Universidad Industrial de Santander. (2014). Estimación de áreas intervenidas, consumo de agua, energía y costos de producción en la actividad minera. Bogotá.

Unidad de Planeación Minero Energética UPME. (23 de Junio de 2016). Sistema de Información Minero de Colombia. Recuperado el 23 de Junio de 2016, de <http://www.simco.gov.co/>

UPME. (2014). Evaluación de la situación actual y futura del mercado de los materiales de construcción y arcillas en las ciudades de Bogotá, Medellín, Bucaramanga, Barranquilla, Santa Marta y Eje Cafetero. Bogotá: UPME.

Water Footprint Network. (2016). Water Footprint Network. Recuperado el 22 de Agosto de 2016, de Water Footprint Network: <http://waterfootprint.org/en/resources/interactive-tools/water-footprint-assessment-tool/>

Wilson, W., Leipzig, T., & Griffiths-Sattenspiel, B. (2012). *Burning our rivers - The water Footprint of electricity*. Portland - Oregon.

WWF. (2012). Una mirada a la agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica. Bogotá.

Zhuo, L., Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Water footprint and virtual water trade of China: Past and future. Twente Netherlands.

