

GUÍA METODOLÓGICA DE APLICACIÓN DE HUELLA HÍDRICA EN CUENCA



HUELLA HÍDRICA CUENCA PORCE



Junio 2013

HUELLA HÍDRICA CUENCA PORCE



La Evaluación de la Huella Hídrica en la Cuenca del Río Porce, fue liderado por el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA, y hace parte de la iniciativa SuizAgua Colombia de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación – Cosude –.

Este proceso se desarrolló de manera interinstitucional e interdisciplinaria, con la participación de instituciones públicas y privadas, como co-financiadores y apoyo profesional. Estas 16 instituciones son:

Secretaría de Medio Ambiente de la Alcaldía de Medellín, Corantioquia, Cornare, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Cosude, CTA, EPM, Universidad de Antioquia, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Universidad de Medellín, Universidad Pontificia Bolivariana, Tecnológico de Antioquia, Centro Nacional de Producción Más Limpia, Good Stuff International, WWF, Cátedra Unesco de Sostenibilidad Universidad Politécnica de Cataluña.

Dirección de proyecto (CTA)

Diego Arévalo Uribe y Claudia Campuzano Ochoa

Equipo técnico de proyecto de Huella hídrica (CTA)

Edwin Builes, Sergio Moreno, Carolina Rodríguez, Natalia Cardona, Andrea Guzmán, Connie López, Catalina Restrepo, Juan Esteban González, Elmer Herrera, Jorge García, Juan Camilo de los Ríos, María Fernanda Monsalve. Agradecimiento especial a todo el equipo del CTA por su apoyo permanente al trabajo realizado.

Equipo técnico de proyecto de Huella hídrica (Entidades participantes)

- Área Metropolitana del Valle de Aburrá: Diana Castro, Martha Montoya, Raúl Alexander Cardona, Juan Esteban Jiménez.
- Cátedra Unesco de Sostenibilidad Universidad Politécnica de Cataluña: Oscar Flecha, Jordi Morató.
- Centro Nacional de Producción Más Limpia y Tecnologías Ambientales - Cnplta: Carlos Toro, Gladis Sierra, Natalia Berrío, Carolina Álvarez.
- Cornare: Julia Cadavid, Gloria Offir.
- Corantioquia: Edgar Vélez, Oscar Mejía, Diana Montoya.
- Cosude: Diana Rojas, Sergio Perez, Walter Reithebuch.
- EPM: Elizabeth Calle, Natalia Posada, Winston Cuellar.
- Escuela de Ingeniería de Antioquia: María del Pilar Arroyave.
- Secretaría de Medio Ambiente Alcaldía de Medellín: Oscar Cárdenas.
- Tecnológico de Antioquia: Yaneth Daza, Jorge Montoya, Joe Sánchez.

- Universidad de Antioquia: Juan Camilo Villegas.
- Universidad de Medellín: Blanca Botero, Luis Javier Montoya, Verónica Valencia.
- Universidad Pontificia Bolivariana: José Adrián Ríos, Viviana Martínez, Gloria Velázquez, Ana María Bustamante, Paola Cuartas.
- WWF: Javier Sabogal.

Equipo de asesores internacionales (Good Stuff International)

Érika Zárate y Derk Kuiper

Diseño de logo

Creatividar SAS

Agradecimientos:

Asimismo, agradecemos por el tiempo de asesoría, suministro de información y apertura de espacios para socializar los avances parciales del proyecto a: Sergio Pérez y Diana Rojas (Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación-Cosude), Javier Sabogal, Félix Gnehm y Stuart Orr (WWF), Nicolás Franke (Water Footprint Network), Alberto Garrido y Bárbara Willaarts (Observatorio del Agua de la Fundación Botín), Omar Vargas, Martha García y Consuelo Onofre (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM), Olga Tobón (Ecoskandia).

Agradecimiento especial a los profesionales que cedieron parte de su tiempo para atender las reuniones de presentación de resultados parciales de este estudio y que brindaron valiosos comentarios y recomendaciones para su desarrollo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	12
PARTE 1 - METODOLOGÍA GENERAL DE APLICACIÓN PARA EVALUACIÓN DE <i>HUELLA HÍDRICA</i> EN CUENCA	13
P1 - 1. ANTECEDENTES	13
P1 - 2. OBJETIVO	13
2.1. OBJETIVO GENERAL	13
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
P1 - 3. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE <i>HUELLA HÍDRICA</i>	14
3.1. LA <i>HUELLA HÍDRICA</i> VERDE	15
3.2. LA <i>HUELLA HÍDRICA</i> AZUL	15
3.3. LA <i>HUELLA HÍDRICA</i> GRIS	16
3.4. FASES DE LA EVALUACIÓN DE <i>HUELLA HÍDRICA</i> EN LA CUENCA DEL RÍO PORCE	17
3.5. CONCEPTOS BÁSICOS: USO, EXTRACCIONES, CONSUMO Y <i>HUELLA HÍDRICA</i>	18
P1 - 4. FASE I: DEFINICIÓN DEL ALCANCE GENERAL DE EVALUACIÓN	20
4.1. IDENTIFICACIÓN Y PRIORIZACIÓN DE INFORMACIÓN REQUERIDA	20
4.2. INFORMACIÓN DE LÍNEA BASE	22
4.3. INFORMACIÓN HIDROCLIMÁTICA	22
4.4. INFORMACIÓN SOCIAL Y ECONÓMICA	22
4.5. INFORMACIÓN SECTORIAL	22
P1 - 5. FASE II - CUANTIFICACIÓN DE <i>HUELLA HÍDRICA</i> MULTISECTORIAL	23
5.1. METODOLOGÍA ESTÁNDAR DE CÁLCULO	23
5.1.1. <i>METODOLOGÍA ESTÁNDAR PARA EL SECTOR AGRÍCOLA Y PECUARIO</i>	24
5.1.1.1. <i>Estimación de Huella Hídrica de consumo agrícola (HH Verde y HH Azul)</i>	26
5.1.1.2. <i>Estimación de Huella Hídrica por contaminación agrícola (HH gris)</i>	27
5.1.1.3. <i>Estimación de Huella Hídrica de consumo pecuaria (HH Verde y HH Azul)</i>	28

5.1.1.4. <i>Estimación de Huella Hídrica por contaminación pecuaria (HH gris)</i>	29
5.1.2. <i>METODOLOGÍA DE CUANTIFICACIÓN DE HUELLA HÍDRICA PARA EL SECTOR DOMÉSTICO</i>	31
5.1.3. <i>METODOLOGÍA DE CUANTIFICACIÓN DE HUELLA HÍDRICA PARA SECTOR INDUSTRIAL</i>	36
5.1.4. <i>METODOLOGÍA DE CUANTIFICACIÓN DE HUELLA HÍDRICA PARA EL SECTOR DE GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA</i>	40
5.1.5. <i>METODOLOGÍA DE CUANTIFICACIÓN DE HUELLA HÍDRICA PARA EL SECTOR MINERO</i>	44
5.1.6. <i>METODOLOGÍA DE CUANTIFICACIÓN DE HUELLA HÍDRICA PARA APLICACIÓN A OTROS SECTORES</i>	47
5.2. CONCEPTUALIZACIÓN DE RESULTADOS DE CUANTIFICACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA	48
5.3. HUELLA HÍDRICA POR UNIDAD PRODUCTIVA	48
5.3.1. <i>HUELLA HÍDRICA DEL SECTOR AGROPECUARIO</i>	48
5.3.2. <i>HUELLA HÍDRICA DEL SECTOR DOMÉSTICO</i>	48
5.3.3. <i>HUELLA HÍDRICA DEL SECTOR INDUSTRIAL</i>	48
5.3.4. <i>HUELLA HÍDRICA DEL SECTOR HIDROELÉCTRICO</i>	48
5.3.5. <i>HUELLA HÍDRICA DEL SECTOR MINERO</i>	49
5.4. HUELLA HÍDRICA POR UNIDAD GEOGRÁFICA	49
5.5. LA HUELLA HÍDRICA A NIVEL DE CUENCA	49
5.5.1. <i>ANÁLISIS DE HUELLA HÍDRICA VERDE Y AZUL - ANÁLISIS DE CANTIDAD</i>	49
5.5.2. <i>ANÁLISIS DE HUELLA HÍDRICA GRIS - ANÁLISIS DE CALIDAD</i>	49
P1 - 6. FASE III - ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD DE LA HUELLA HÍDRICA	50
<hr/>	
6.1. ANÁLISIS HIDROLÓGICO EN CUENCA	51
6.1.1. <i>MODELO HIDROLÓGICO PARA ESTIMACIÓN DE OFERTA NATURAL</i>	51
6.1.2. <i>METODOLOGÍA APLICADA PARA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO</i>	51
6.2. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD	51
6.2.1. <i>ANÁLISIS AMBIENTAL</i>	52
6.2.1.1. <i>Marco teórico del análisis ambiental aplicado a la Huella Hídrica</i>	52
6.2.1.2. <i>Análisis ambiental aplicado a la Huella Hídrica Azul</i>	52
6.2.1.3. <i>Análisis ambiental aplicado a la Huella Hídrica Verde</i>	53
6.2.1.4. <i>Análisis ambiental aplicado a la Huella Hídrica Gris</i>	54
6.2.2. <i>ANÁLISIS ECONÓMICO</i>	55
6.2.2.1. <i>Marco teórico análisis económico aplicado a la Huella Hídrica</i>	55
6.2.3. <i>ANÁLISIS SOCIAL</i>	56
6.2.3.1. <i>Marco teórico análisis social aplicado a la Huella Hídrica</i>	56
P1 - 7. FASE IV - FORMULACIÓN DE ESTRATEGIAS DE RESPUESTA	58
<hr/>	
7.1. CONCEPTUALIZACIÓN DE LÍNEAS DE RESPUESTA	58
7.1.1. <i>ESTRATEGIA DE LINEAMIENTOS DE POLÍTICA PÚBLICA</i>	58

7.1.2.	<i>ESTRATEGIA DE ALIANZA PÚBLICO – PRIVADA</i>	58
7.1.2.1.	<i>Cómo operan las asociaciones público-privadas APP</i>	59

PARTE 2 - EJEMPLO DE APLICACIÓN DE METODOLOGÍA EN EVALUACIÓN DE HUELLA HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO PORCE **62**

P2 - 1. ETAPA 1: GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN Y GENERACIÓN DE LÍNEA BASE **62**

1.1.	ETAPA 2.1: IDENTIFICACIÓN, PRIORIZACIÓN Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA	62
1.1.1.	<i>SECTOR AGROPECUARIO</i>	62
1.1.2.	<i>SECTOR DOMÉSTICO</i>	65
1.1.3.	<i>SECTOR INDUSTRIAL</i>	66
1.1.4.	<i>SECTOR HIDROELÉCTRICO</i>	67
1.1.5.	<i>SECTOR MINERO</i>	68
1.2.	ETAPA 1.2: IDENTIFICACIÓN, PRIORIZACIÓN Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN PRIMARIA	68
1.3.	ETAPA 1.3: GENERACIÓN DE INFORMACIÓN SIG CON BASE EN INFORMACIÓN SECUNDARIA Y PRIMARIA	69
1.3.1.	<i>LOS SIG EN LA CUANTIFICACIÓN DE SECTOR AGRÍCOLA Y PECUARIO</i>	73
1.3.2.	<i>SECTOR INDUSTRIAL Y DOMÉSTICO</i>	75
1.3.3.	<i>SECTOR ENERGÍA</i>	75
1.3.4.	<i>SECTOR MINERÍA</i>	76
1.3.5.	<i>LOS SIG EN LA CUANTIFICACIÓN DE LA OFERTA DE AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO PORCE</i>	76

P2 - 2. ETAPA 2: CUANTIFICACIÓN MULTISECTORIAL DE HUELLA HÍDRICA **79**

2.1.	CUANTIFICACIÓN DEL SECTOR AGRÍCOLA	79
2.1.1.	<i>REQUERIMIENTO DE AGUA AZUL Y VERDE DE LOS CULTIVOS (CWUVERDE Y CWUAZUL)</i>	79
2.1.2.	<i>HUELLA HÍDRICA AZUL Y VERDE AGRÍCOLA</i>	82
2.1.3.	<i>HUELLA HÍDRICA GRIS AGRÍCOLA</i>	83
2.1.4.	<i>HUELLA HÍDRICA PECUARIA</i>	84
2.2.	CUANTIFICACIÓN SECTOR INDUSTRIAL	88
2.3.	CUANTIFICACIÓN SECTOR DOMÉSTICO	89
2.4.	CUANTIFICACIÓN SECTOR ENERGÍA	93
2.5.	CUANTIFICACIÓN SECTOR MINERO	94
2.5.1.	<i>METALES PRECIOSOS</i>	94
2.5.2.	<i>MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN ARENAS–GRAVAS</i>	97

P2 - 3. ETAPA 3: EVALUACIÓN DE SOSTENIBILIDAD **99**

3.1. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD	99
3.1.1. ANÁLISIS AMBIENTAL	99
3.1.2. ANÁLISIS ECONÓMICO	99
3.1.2.1. MARCO TEÓRICO ANÁLISIS ECONÓMICO APLICADO A LA HUELLA HÍDRICA	99
3.1.2.2. CRITERIO 1: INGRESO EN RELACIÓN CON EL USO DEL AGUA	100
3.1.2.3. CRITERIO 2: COSTOS DE DESCONTAMINACIÓN DEL AGUA.	104
3.1.3. ANÁLISIS SOCIAL	105
3.1.3.1. MARCO TEÓRICO ANÁLISIS SOCIAL APLICADO A LA HUELLA HÍDRICA	105
3.2. IDENTIFICACIÓN DE HOTSPOTS EN LA CUENCA PORCE	108
<u>P2 - 4. ETAPA 4: FORMULACIÓN DE ESTRATEGIA DE RESPUESTA Y APROXIMACIÓN A LA POLÍTICA PÚBLICA</u>	<u>108</u>
<u>P2 - 5. ETAPA 5: PRIORIZACIÓN DE ACCIONES</u>	<u>113</u>
<hr/>	
5.1. REDEFINICIÓN DE ACCIONES	113
5.2. VARIABLES DE ESTUDIO Y SU VALORACIÓN RESPECTIVA	113
5.3. ESCENARIOS DE PRIORIZACIÓN	114
5.3.1. ESCENARIO 1	114
5.3.2. ESCENARIO 2	115
5.3.3. ESCENARIO 3	115
<u>GLOSARIO DE SIGLAS</u>	<u>121</u>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Mapa conceptual de aplicaciones de la Huella Hídrica.</i>	14
<i>Figura 2. Componentes de Huella Hídrica en cuenca.</i>	17
<i>Figura 3. Fases para evaluación de Huella Hídrica.</i>	18
<i>Figura 4. Esquema metodológico para cálculo de Huella Hídrica agrícola.</i>	25
<i>Figura 5. Esquema metodológico para el cálculo de Huella Hídrica pecuaria</i>	30
<i>Figura 6. Esquema metodológico para cálculo de Huella Hídrica doméstica.</i>	33
<i>Figura 7. Esquema metodológico para el cálculo de la Huella Hídrica industrial.</i>	37
<i>Figura 8. Esquema metodológico para el cálculo de la Huella Hídrica de la generación de energía hidroeléctrica.</i>	43
<i>Figura 9. Esquema metodológico para el cálculo de la Huella Hídrica de la minería.</i>	45
<i>Figura 10. Esquema de evaluación de sostenibilidad de Huella Hídrica en la cuenca del río Porce.</i>	50
<i>Figura 11. Localización de los sectores en la cuenca del río Aburrá.</i>	70
<i>Figura 12. Localización de los sectores en la cuenca del río Grande.</i>	70
<i>Figura 13. Localización de los sectores en la cuenca del río Guadalupe.</i>	71
<i>Figura 14. Localización de los sectores en el tramo Porce medio.</i>	71
<i>Figura 15. Localización de los sectores en el tramo Porce medio bajo.</i>	72
<i>Figura 16. Localización de los sectores en la cuenca del río Mata.</i>	72
<i>Figura 17. Localización de los sectores en el tramo Porce bajo</i>	73
<i>Figura 18. Zonas climáticas en la cuenca del río Porce.</i>	74
<i>Figura 19. Títulos mineros en la cuenca del río Porce.</i>	76
<i>Figura 20. Modelo de elevación digital y mapas asociados al DEM para la cuenca del río Porce.</i>	78
<i>Figura 21. Parámetros para la modelación hidrológica.</i>	78
<i>Figura 22. Esquema de aplicación de la APW azul en la cuenca del río Porce.</i>	101
<i>Figura 23. Esquema de aplicación de la APW verde en la cuenca del río Porce.</i>	104
<i>Figura 24. Esquema para el desarrollo de los lineamientos de política en la cuenca del río Porce.</i>	110
<i>Figura 25. Temática Ssectorial para lineamientos de política en la cuenca del río Porce.</i>	110
<i>Figura 26. Detalle temática sectorial para lineamientos de política en la cuenca del río Porce.</i>	111
<i>Figura 27. Temática territorial para lineamientos de política en la cuenca del río Porce.</i>	111
<i>Figura 28. Detalle temática territorial para lineamientos de política en la cuenca del río Porce.</i>	112
<i>Figura 29. Peso relativo de variables en Escenario 1.</i>	114
<i>Figura 30. Peso relativo de variables en Escenario 2.</i>	115
<i>Figura 31. Peso relativo de variables en Escenario 3.</i>	116

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Nomenclatura utilizada en el cálculo de la Huella Hídrica del sector doméstico.</i>	32
<i>Tabla 2. Huella Hídrica operacional del sector industrial.</i>	36
<i>Tabla 3. Cultivos presentes en la cuenca del río Porce.</i>	80
<i>Tabla 4. Algoritmo de cálculo de Huella Hídrica del sector doméstico.</i>	91
<i>Tabla 5. Criterios sociales para el análisis social de la Huella Hídrica.</i>	105
<i>Tabla 6. Identificación problemática sectorial en la cuenca del río Porce.</i>	109
<i>Tabla 7. Variables de calificación de acciones.</i>	114

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1. Huella Hídrica para un área geográfica delimitada.</i>	14
<i>Ecuación 2. Huella Hídrica Verde por unidad de producto de sector agrícola.</i>	26
<i>Ecuación 3. Huella Hídrica Azul por unidad de producto de sector agrícola.</i>	26
<i>Ecuación 4. Huella Hídrica Gris del sector agrícola</i>	27
<i>Ecuación 5. Huella Hídrica Verde por unidad de producto del sector agrícola.</i>	28
<i>Ecuación 6. Huella Hídrica del sector pecuario.</i>	28
<i>Ecuación 7. Huella Hídrica Azul del sector doméstico.</i>	34
<i>Ecuación 8. Huella Hídrica Gris sector doméstico.</i>	35
<i>Ecuación 9. La Huella Hídrica Azul del sector industrial por unidad de tiempo.</i>	38
<i>Ecuación 10. Indicador de Huella Hídrica Azul del sector industrial.</i>	38
<i>Ecuación 11. La Huella Hídrica Gris del sector industrial por unidad de tiempo.</i>	39
<i>Ecuación 12. Indicador de Huella Hídrica Gris del sector industrial.</i>	39
<i>Ecuación 13. Huella Hídrica Gris del sector de generación hidroeléctrica.</i>	40
<i>Ecuación 14. Volumen total de agua evaporada.</i>	40
<i>Ecuación 15. Evaporación – Turc.</i>	40
<i>Ecuación 16. Evaporación - Thornthwaite.</i>	41
<i>Ecuación 17. Variables para ecuación de Evaporación – Thornthwaite.</i>	41
<i>Ecuación 18. Evaporación – Penmann.</i>	41
<i>Ecuación 19. Huella Hídrica Azul para minería.</i>	46
<i>Ecuación 20. Huella Hídrica Gris para minería.</i>	46
<i>Ecuación 21. Balance hídrico.</i>	52
<i>Ecuación 22. Índice de estrés hídrico azul.</i>	52
<i>Ecuación 23. Disponibilidad de agua verde.</i>	53
<i>Ecuación 24. Índice de escasez de agua verde.</i>	53
<i>Ecuación 25. Nivel de contaminación del agua.</i>	54
<i>Ecuación 26. Huella Hídrica pecuaria.</i>	84
<i>Ecuación 27. Requerimiento de masa seca por animal.</i>	85
<i>Ecuación 28. Requerimiento de forraje verde por animal.</i>	85
<i>Ecuación 29. Indicador de Huella Hídrica Gris.</i>	95
<i>Ecuación 30. Consumo estimado de cianuro por minería de oro.</i>	96
<i>Ecuación 31. Consumo estimado de cianuro por minería de oro en Segovia</i>	96
<i>Ecuación 32. Indicador de Huella Hídrica Azul en minería.</i>	98
<i>Ecuación 33. Indicador de Huella Hídrica Gris en minería.</i>	98
<i>Ecuación 34. Productividad aparente del agua azul (APW azul).</i>	100
<i>Ecuación 35. APW azul agrícola.</i>	101
<i>Ecuación 36. APW azul pecuario – bovino.</i>	101
<i>Ecuación 37. APW azul pecuario – porcino.</i>	102
<i>Ecuación 38. APW azul pecuario - avícola</i>	102
<i>Ecuación 39. APW azul energía hidroeléctrica.</i>	102
<i>Ecuación 40. APW azul sector industria.</i>	102

<i>Ecuación 41. APW azul minería de oro.</i>	103
<i>Ecuación 42. APW azul minería de gravas y arenas.</i>	103
<i>Ecuación 43. Productividad aparente del agua verde (APW azul).</i>	103
<i>Ecuación 44. Productividad Aparente de la Tierra (APL).</i>	104

Introducción

El presente documento ha sido elaborado por parte del equipo técnico que participó en el desarrollo del proyecto “Evaluación de la *Huella Hídrica* de la cuenca del río Porce”¹ y está basado en la sistematización detallada de la aplicación pionera en el ámbito nacional y regional de la metodología general de “Evaluación de *Huella Hídrica*”², que fue publicada internacionalmente en 2011, la cual ha sido aplicada para cinco sectores económicos en una de las cuencas prioritarias para el desarrollo económico, social y ambiental de Colombia.

Como resultado de este trabajo se han generado dos productos principales, los cuales han sido diseñados y elaborados de forma que sean útiles de manera independiente, no obstante, es ampliamente recomendable su revisión conjunta. Los dos documentos son:

- Evaluación de la *Huella Hídrica* Multisectorial en la Cuenca del Río Porce.
- Guía Metodológica de Aplicación de *Huella Hídrica* en cuencas hidrográficas.

La Guía Metodológica que se desarrolla en las siguientes páginas consta de dos partes principales, la primera de ellas hace una descripción general de la metodología aplicada, contando para ello con las lecciones aprendidas generales que se obtienen de la aplicación metodológica en la cuenca del río Porce. La segunda parte se centra en el ejemplo metodológico aplicado en la cuenca del río Porce, sin centrarse en sus resultados sino en la aplicación de la metodología.

Esta Guía Metodológica ha sido formulada utilizando un lenguaje genérico en la primera parte, intentando hacer la menor cantidad de referencias al ejercicio específico de la cuenca del río Porce, buscando promover la réplica y generando una herramienta de amplia aplicabilidad geográfica y sectorial. En la segunda parte se cita el ejemplo específico de la cuenca del río Porce mostrando el paso a paso que llevó al satisfactorio resultado de este ejercicio, informando también de manera clara, concreta y transparente, las limitaciones que tuvo la aplicación metodológica en este ejercicio dejando abierta la posibilidad de mejorar, profundizar y ampliar el campo de aplicación en próximos ejercicios.

¹ El proyecto contó con la participación de 16 instituciones de diversa naturaleza y tuvo más de 20 profesionales trabajando en este proyecto durante 12 meses. Ver créditos en contraportada.

² Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. and Mekonnen, M.M. (2011) The water footprint assessment manual: Setting the global standard, Earthscan, London, UK.

PARTE 1 - METODOLOGÍA GENERAL DE APLICACIÓN PARA EVALUACIÓN DE *HUELLA HÍDRICA* EN CUENCA

P1 - 1. Antecedentes

El indicador de *Huella Hídrica* fue desarrollado por los investigadores A. Hoekstra y A. Chapagain en 2003 y se basa en un desarrollo más amplio de dos conceptos formulados previamente, el primero de ellos es el concepto de agua virtual propuesto por J.A. Allan en 1993 y el segundo es el concepto de agua verde por M. Falkenmark en 1995. Estos dos conceptos proveen la mayor parte de la base conceptual y metodológica de la *Huella Hídrica*.

En el ámbito internacional, la organización que ha liderado la estandarización del concepto, su metodología de cuantificación y la guía de aplicación de evaluación, es la Water Footprint Network (WFN), que ha publicado las principales guías conceptuales y metodológicas generales que sirven como base y sustento a la mayor parte de la aplicación metodológica desarrollada en este documento^{3 4}.

En el ámbito nacional o regional no hay conocimiento por parte del equipo investigador de ninguna otra experiencia de aplicación del concepto de *Huella Hídrica* que aborde temas metodológicos ni que tenga como producto o resultado un documento de sistematización metodológica de una experiencia de evaluación de *Huella Hídrica* aplicada a una zona geográfica determinada.

P1 - 2. Objetivo

2.1. Objetivo General

Formular una guía metodológica detallada de aplicación de Evaluación de *Huella Hídrica* en cuencas hidrográficas, basada en la sistematización de la experiencia de la cuenca del río Porce.

2.2. Objetivos específicos

- Sistematizar experiencia de Evaluación de *Huella Hídrica* en la cuenca del río Porce.
- Generar réplicas de la aplicación metodológica realizada en la cuenca del río Porce, en el ámbito nacional e internacional.
- Promover la ampliación y profundización del campo de aplicación de la Evaluación de la *Huella Hídrica* en diferentes sectores productivos aplicables a otras zonas geográficas.

³ Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. and Mekonnen, M.M. (2009) Water footprint manual: State of the art 2009, Water Footprint Network, Enschede, the Netherlands.

⁴ Ibid.

P1 - 3. Metodología de evaluación de *Huella Hídrica*

El concepto de *Huella Hídrica* permite considerar el uso del agua oculta a lo largo de la cadena de producción de bienes o servicios de consumo, dando información acerca de los efectos sobre el agua asociados a los hábitos de vida de las personas o poblaciones, o de producción de gremios o empresas. Este indicador multidimensional muestra los consumos de agua, según su origen, y los volúmenes de agua requeridos para la asimilación de la contaminación generada. Los componentes de la *Huella Hídrica* son explícitos geográfica y temporalmente.

La *Huella Hídrica* tiene diversas aplicaciones que incluyen la visión desde el consumo o la producción, para una persona o un grupo de personas, un productor o un grupo de productores, un producto o un grupo de productos, un área geográficamente delimitada.

Para el caso de estudio descrito en este documento se hace referencia a un estudio de *Huella Hídrica* aplicada a un área geográfica delimitada (cuenca), analizando la producción de cinco sectores clave presentes en el territorio. Para este tipo de aplicación se analiza la *Huella Hídrica* de los procesos que se llevan a cabo en el territorio, buscando identificar los efectos sobre el territorio y no sobre productos, productores o personas.

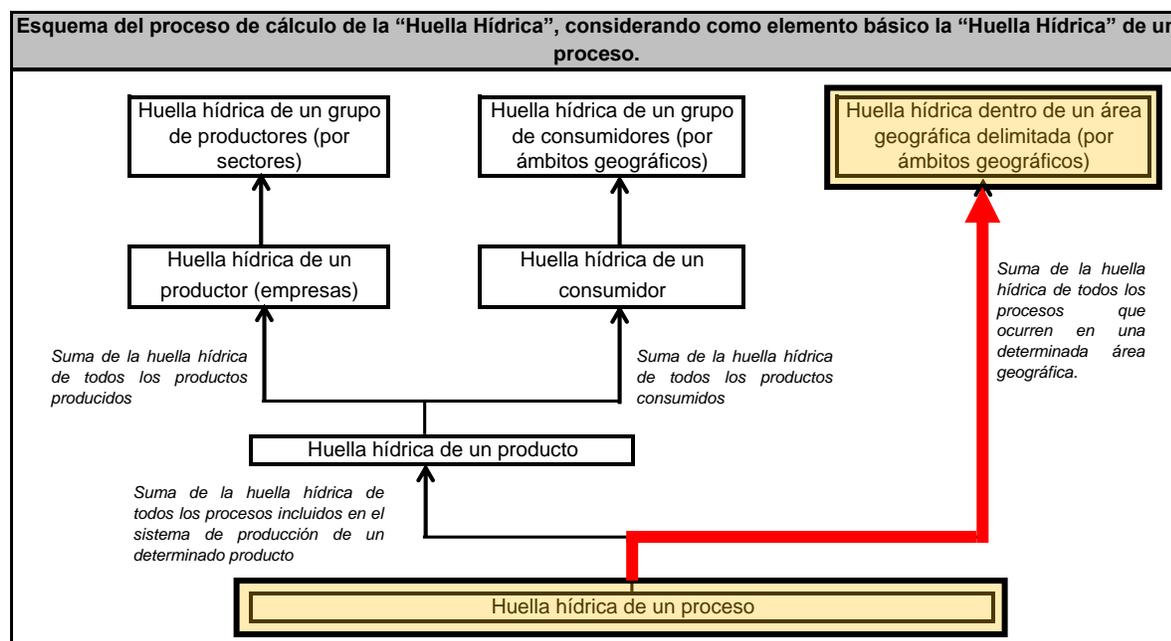


Figura 1. Mapa conceptual de aplicaciones de la *Huella Hídrica*.

De esta forma la *Huella Hídrica* de una zona geográfica delimitada (una cuenca por ejemplo) se calcula aplicando la siguiente fórmula:

Ecuación 1. *Huella Hídrica* para un área geográfica delimitada.

$$WF_{AREA} = \sum_q WF_{PROCESO}[q]$$

Lo anterior implica que para el área de estudio se parte de un inventario de procesos humanos que se llevan a cabo en el territorio, los cuales están relacionados de manera directa con sectores genéricos (agropecuario, doméstico, industrial, minero, otros).

La *Huella Hídrica* consta de tres componentes, cada uno de ellos denominado huella y referenciado por un color, el cual determina a qué hace referencia el resultado que refleja y cuál es la metodología que aplica.

Para cada uno de los procesos identificados en el área geográfica de estudio, dependiendo de su naturaleza, pueden ser calculadas uno, dos o los tres componentes de la *Huella Hídrica*, las cuales se explican a continuación.

3.1. La Huella Hídrica Verde

Se refiere a la apropiación humana de agua verde, por lo tanto es la señal o marca que queda en el agua verde a causa de un proceso antrópico. Es cuantificada mediante la estimación o medición del consumo de agua almacenada en el suelo proveniente de la precipitación, que no se convierte en escorrentía. Satisface una demanda sin requerir para ello de intervención humana.

La *Huella Hídrica Verde* solo está presente en el sector agrícola y pecuario. Hace referencia a una reducción en la disponibilidad de agua verde por disminución en la cantidad a causa de la apropiación humana.

La *Huella Hídrica Verde* se estima utilizando un modelo de simulación agronómico (por ejemplo *Cropwat*).

3.2. La Huella Hídrica Azul

Se refiere a la apropiación humana de agua azul, por lo tanto es la señal o marca que queda en el agua azul (ríos, lagos o acuíferos) a causa de un proceso antrópico. Es cuantificada mediante la estimación o medición de consumo de agua, asociado a una extracción de fuente superficial y/o subterránea para satisfacer la demanda originada en un proceso. Requiere de intervención humana directa.

La *Huella Hídrica Azul* está presente en el sector agrícola por el agua consumida que es suministrada mediante riego y en todos los sectores que tienen procesos no asociados directamente con un proceso agrícola. Hace referencia a una reducción en la disponibilidad de agua azul por disminución en la cantidad a causa de la apropiación humana.

Para el sector agrícola, la *Huella Hídrica Azul* se estima utilizando el modelo de simulación agronómico *Cropwat*. Para los otros sectores, la estimación se hace mediante la caracterización de los procesos y la estimación del agua evaporada, incorporada o transferida entre cuencas.

3.3. La Huella Hídrica Gris

Se define como el volumen de agua dulce necesario para asimilar la carga de contaminantes por parte de un cuerpo receptor, tomando como referencia las normas de calidad ambiental, asociando los límites establecidos a una calidad buena para el ambiente y para las personas.

Hace referencia a una reducción en la disponibilidad de agua por problemas de calidad asociados a un proceso antrópico.

Para el caso particular del estudio en la cuenca del río Porce, se calculó la *Huella Hídrica Gris* para nitrógeno y fósforo (sectores agrícola y pecuario), Sólidos Suspendidos Totales y DBO₅ (sectores doméstico, industrial y minero), mercurio y cianuro (sector minero), tomando el mayor valor como determinante de la capacidad de asimilación del cuerpo de agua.

Para el cálculo se tomaron los límites de calidad permisibles o metas de calidad propuestos por las autoridades ambientales, lo cual fue complementado con el cálculo de la *Huella Hídrica Gris* basado en parámetros de normas internacionales. Finalmente se tomaron para el estudio los resultados pésimos que están asociados a una calidad del agua “Buena” para el ambiente y las personas, dado que algunos de los parámetros locales estoán vinculados a la meta de descontaminación probable, no a una calidad óptima.

El cálculo de la *Huella Hídrica Gris* depende de la calidad natural del cuerpo de agua y de los límites de calidad permisibles.

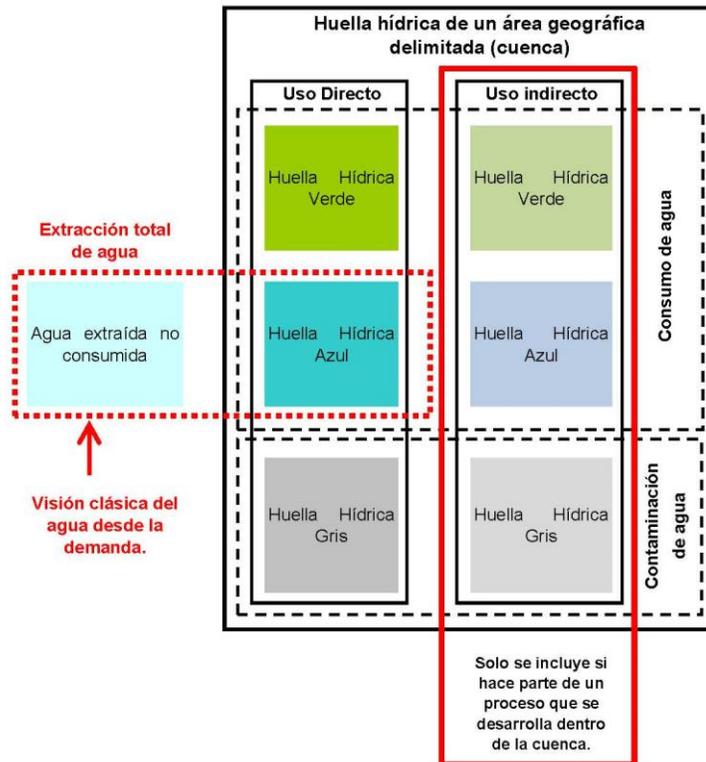


Figura 2. Componentes de la Huella Hídrica en cuenca⁵.

Según la metodología estándar y partiendo del concepto, se incluyen en el cálculo de la *Huella Hídrica* los usos directos e indirectos de los procesos identificados, no obstante, se debe hacer la claridad de la peculiaridad que tiene la aplicación del indicador en una zona geográficamente delimitada, dado que en lo referente al consumo indirecto, solo se contabilizan los consumos que tienen relación directa con el territorio delimitado en el estudio (Figura 8).

3.4. Fases de la Evaluación de Huella Hídrica en la Cuenca del Río Porce

La metodología general en la cual se basa este trabajo incluye las fases descritas en la publicación *The water footprint assessment manual*. (Hoekstra et al., 2011).

Toda la metodología fue validada y en los casos en los que se encontró necesario fue particularizada, complementada y revalidada para permitir su aplicación en el contexto local y para diferentes sectores y nivel de detalle.

Según la metodología aplicada, la evaluación de la *Huella Hídrica* se compone de cuatro fases:

⁵ Hoekstra et al. 2011. Modificado por equipo *Huella Hídrica* cuenca Porce. 2013

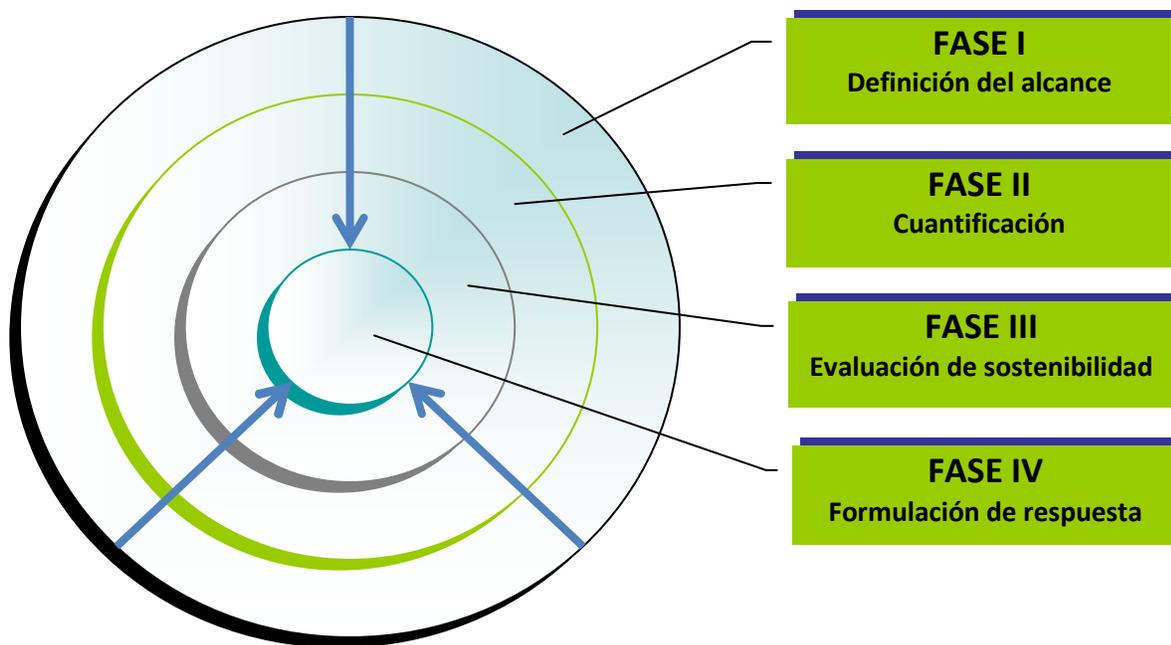


Figura 3. Fases para evaluación de *Huella Hídrica*.

Como primera medida, se contempla la definición clara de objetivos buscados, alcance de la aplicación (ubicación geográfica, etapas y procesos, tipos de productos, cadenas de suministro incluidas y excluidas para el tipo de aplicación de *Huella Hídrica* de interés) y definición de los límites del estudio; lo anterior permite cuantificar de manera clara y concreta los diferentes componentes de la *Huella Hídrica* para los sectores y los procesos incluidos en el estudio. Con esto se abarcan las fases I y II de la evaluación.

El paso siguiente hace referencia al análisis de sostenibilidad de la *Huella Hídrica* en cada uno de sus componentes, bajo un contexto específico ambiental, económico y social, cuyo resultado está asociado a las características geográficas y temporales del área de estudio y a los resultados de la cuantificación de la *Huella Hídrica*. Finalmente, se llega a la formulación de estrategias de respuesta que, pueden estar orientadas a propuestas de lineamientos de política pública, esperando convertirse en una herramienta de gestión y decisión en política ambiental y/o al fomento y promoción de alianzas público-privadas (PPP), como base de inclusión multisectorial dentro de las acciones de la política de GIRH en cuencas.

3.5. Conceptos básicos: uso, extracciones, consumo y *Huella Hídrica*

Para el desarrollo del trabajo de *Huella Hídrica* se considera fundamental establecer una clara diferenciación entre los conceptos de uso, extracción y consumo, en cuya diferencia se encuentra la base teórica que argumenta la complementariedad de los resultados de la *Huella Hídrica*, frente a otros indicadores utilizados en la gestión convencional de recursos hídricos.

La *Huella Hídrica* solo incluye en su cuantificación de *Huella Verde y Azul* (huellas que hacen referencia a la cantidad de agua), los volúmenes correspondientes a la pérdida de agua, medida o estimada, mediante la sumatoria del volumen evaporado por efecto del proceso antrópico, incorporado en el producto resultado del proceso antrópico o transferido entre cuencas para satisfacer un requerimiento de un proceso antrópico. En este orden de ideas, se hace claridad que en los tres casos anteriormente citados existe una pérdida real de volumen de agua disponible en la unidad geográfica analizada, todas ellas generadas por una acción humana, esto bajo un modelo simplificado que no incluye la variabilidad climática ni la probabilidad de que el agua evaporada en un área vuelva a caer en forma de precipitación en la misma zona.

La mirada tradicional que se hace de los recursos hídricos para su gestión, se basa en la gestión de la demanda con el fin de optimizar y racionalizar el uso del agua, para esto se han considerado tradicionalmente los conceptos de extracción y uso, como los conceptos básicos, y es ahí donde la *Huella Hídrica* incorpora de manera complementaria el consumo real, discriminando el agua usada según su origen, que puede ser agua verde, proveniente del suelo y la precipitación o agua azul que proviene de una fuente superficial o subterránea e implica una intervención humana de extracción.

La *Huella Hídrica Gris* incorpora el concepto de uso del agua y su impacto asociado a la variación en la calidad, por la cual se ve afectado solamente el efluente generado del proceso antrópico, que es el volumen usado menos el volumen consumido.

P1 - 4. Fase I: Definición del alcance general de evaluación

A continuación se hace la descripción de la metodología desarrollada en el proyecto y se resumen los resultados claves para cada una de las cuatro fases de la evaluación.

Se citan a continuación los pasos básicos a seguir en el proceso de definición del alcance del proyecto que marcó el desarrollo del mismo en cuanto a la metodología aplicada y los resultados esperados y obtenidos, de forma que se consiga definir de manera clara y concreta los siguientes alcances:

- Alcance Geográfico
- Alcance de Información Base
- Alcance Temporal
- Alcance Metodológico

4.1. Identificación y priorización de información requerida

Para la aplicación de la *Huella Hídrica* y el análisis de sostenibilidad a nivel de un área geográficamente delimitada como lo es la cuenca hidrográfica, es necesario contar con una base de datos, en la que se recopile la información obtenida y generada durante el proyecto. Identificar la información clave y sus posibles fuentes, es uno de los pasos necesarios para el comienzo del proyecto. En este sentido se propone seguir seis pasos básicos, con el fin de dar claridad al tipo de información necesaria y de las fuentes de búsqueda.

- a) Definir el área de estudio. Es el punto de partida para la aplicación de la *Huella Hídrica*, incluye la identificación y delimitación de un área de interés. Al tratarse de una cuenca hidrográfica, es necesario contar con una zonificación hidrológica para identificar el área de estudio, contar con un Modelo de Elevación Digital (DEM) o con la topografía y la red de drenajes, de donde se pueda delimitar el área con ayuda de algún Sistema de Información Geográfica (SIG) y un punto de cierre de interés conocido.
- b) Definir el alcance del proyecto. Una vez delimitada el área de estudio, se procede a determinar el alcance del proyecto, el fin de este paso es identificar los sectores, actividades y subsectores que se tendrán en cuenta para la aplicación del indicador de la *Huella Hídrica*. En un área geográficamente delimitada, tal como la cuenca, se localizan múltiples actividades, sectores, actores y otros elementos que generan impactos sobre el recurso hídrico a causa de los hábitos de consumo, por lo cual es importante orientar la aplicación de este concepto a las actividades de interés en el área específica.

- c) Definir la escala de trabajo. En este sentido, se debe definir la escala espacial y temporal a trabajar, esto depende principalmente de los intereses de los ejecutores del proyecto. Cuando el área de estudio corresponde a cuencas de gran tamaño, se presenta heterogeneidad en aspectos relevantes para el cálculo de la *Huella Hídrica*, tal como el clima, precipitación, hidrología y localización de usos del agua, por lo tanto la oferta y demanda del recurso hídrico puede ser muy variable de un sitio a otro, en este caso se recomienda disminuir la escala de trabajo, hasta que la disponibilidad de información lo permita.
- d) Identificación de fuentes de información secundaria. Con el área de estudio, los alcances del proyecto y la escala de trabajo definidos, es necesario identificar cada uno de los actores que tienen influencia en la cuenca y que pueden ser fuentes de información relevante. Los posibles actores que se identifican en un área geográficamente delimitada pueden ser las autoridades ambientales, alcaldías municipales, gremios, instituciones públicas y privadas, universidades y demás entidades con interés en la zona de estudio.
- e) Definir estrategias para la recolección de información primaria. A partir del paso anterior se pueden visualizar faltantes o vacíos en información necesaria para el desarrollo del proyecto. Es por esto que se debe identificar qué tipo de información debe ser levantada en campo. Para esto, se deben diseñar diferentes estrategias que permitan obtener la información necesaria para cada uno de los sectores de análisis, en estas estrategias se mencionan entre otras: trabajo de campo (lecturas de territorio, caracterizaciones), talleres y encuestas. En este paso, es necesario contar con los diferentes actores presentes en el área de estudio y que pueden brindar información valiosa para el proyecto.
- f) Análisis de confiabilidad de la información. toda la información recopilada debe ser analizada con el fin de verificar su confiabilidad y así garantizar que los resultados obtenidos en el indicador de *Huella Hídrica* sean lo más acertado posible.

Luego de realizar los pasos básicos mencionados anteriormente se puede agrupar la información en diferentes grupos, que contengan cada uno: la información de base para el proyecto, la hidroclimatológica, los aspectos sociales y económicos y, la información sectorial, ésta última se refiere a la que está directamente relacionada con las actividades, sectores y subsectores de análisis.

Para asegurar la permanencia y flujo de la información, y debido a que se está trabajando sobre un área geográficamente delimitada y a que la información recopilada y generada es el soporte de todo el estudio, toda la información debe estar compilada en una base de datos geográfica, de tal manera que los interesados en obtener dicha información puedan interactuar con ella, y que sirva como herramienta para estudios posteriores. Así mismo, la información recolectada servirá de soporte a diferentes procesos dentro del proyecto y a las salidas gráficas necesarias para la publicación. A

continuación se describen algunos de los grupos de información que pueden identificarse en la aplicación de la *Huella Hídrica* y de su sostenibilidad en una cuenca hidrográfica.

4.2. Información de línea base

Corresponde a la cartografía base e información temática de línea base para la descripción del área de estudio y a los aspectos generales de la cuenca. En ésta se puede considerar información relacionada con la delimitación de la cuenca, red de drenajes, cuencas y subcuencas, infraestructura vial, de servicios, centros poblados, cabeceras municipales, e información sobre geología, suelos, coberturas terrestres y localización de sectores, entre otros.

4.3. Información hidroclimática

Este grupo de información está relacionada con la que es útil para la descripción de la cuenca en cuanto al clima e hidrología. Es crucial para el análisis de sostenibilidad ambiental en la cuenca, ya que con su recopilación, es posible estimar la oferta hídrica de la cuenca, la cual podrá ser comparada con los consumos de agua por sectores.

4.4. Información social y económica

Corresponde a la información que tiene que ver con los aspectos sociales y económicos en la cuenca, se incluye toda la información necesaria para describir la población que se localiza en el área de estudio, la cual guarda una estrecha relación con los usos del suelo y por ende con los usos del agua en la cuenca.

4.5. Información sectorial

Corresponde a la información que depende exclusivamente de las actividades, sectores y subsectores que se deseen incluir en el análisis. Para esto es importante que en cada sector de análisis se tenga claridad en los objetivos, alcances y metodologías a aplicar, con el fin que la información recopilada sea suficiente para caracterizar cada sector y para lograr una representatividad de los consumos de agua en la cuenca.

P1 - 5. FASE II - Cuantificación de *Huella Hídrica* multisectorial

A continuación se describen los cinco sectores productivos incluidos en la cuantificación de la *Huella Hídrica* de la cuenca, partiendo por la caracterización del territorio desde el punto de vista hidrológico y de la conceptualización de cada uno de ellos, que se constituye en la base para la definición del proceso metodológico que permite afrontar la cuantificación singular, y posteriormente la agregación de resultados en los ámbitos sectorial y geográfico.

5.1. Metodología estándar de cálculo

La *Huella Hídrica* permite estimar el impacto de una actividad humana en términos de apropiación del recurso hídrico de un territorio, generando una influencia clara y directa en la valoración local del agua y por tanto en la competencia y potencial conflicto por uso, siendo geográficamente explícito en sus resultados.

Esta apropiación humana implica necesariamente una pérdida de disponibilidad, por ausencia de volumen de agua o por carencia de calidad mínima aceptable para ser utilizada. En estas dos variables se encuentra concentrada la cuantificación de la *Huella Hídrica* por medio de sus tres componentes, la primera por medio de las *Huellas Hídricas Verde y Azul* y la segunda mediante la *Huella Hídrica Gris*.

De esta forma, la metodología estándar determina qué características tienen los fenómenos físicos asociados a un proceso humano para que se consideren como causa de pérdida de disponibilidad, de forma que para cualquier actividad humana, pueda ser estimada una *Huella Hídrica*, mayor o menor según la naturaleza del fenómeno a estudiar.

En términos de pérdida de cantidad de agua a causa de la acción humana se identifican tres fenómenos que deben ser identificados en cada proceso y que constituyen la totalidad del agua que no retorna a la cuenca después del proceso humano.

- Agua evaporada
- Agua incorporada
- Agua transferida entre cuencas

En términos de pérdidas de calidad en fuentes de agua, se parte del concepto de uso, el cual presenta claras diferencias con el significado de extracción y consumo, y se requiere conocer las características de calidad del agua antes y después del proceso y las características admisibles para los contaminantes, de forma que se puedan establecer parámetros de calidad que sean buenos para las personas y para el ambiente.

En términos de contaminación se identifican dos tipos de fuentes de contaminación.

- Fuente de contaminación difusa
- Fuente de contaminación puntual

A continuación se presenta de manera general la metodología aplicada para los cinco sectores incluidos en el proyecto de evaluación de la *Huella Hídrica* en la cuenca del río Porce, dejando abierta la posibilidad de que esta metodología general, sea adaptada y aplicada a cualquier otro proceso humano, partiendo de los conceptos anteriormente expuestos.

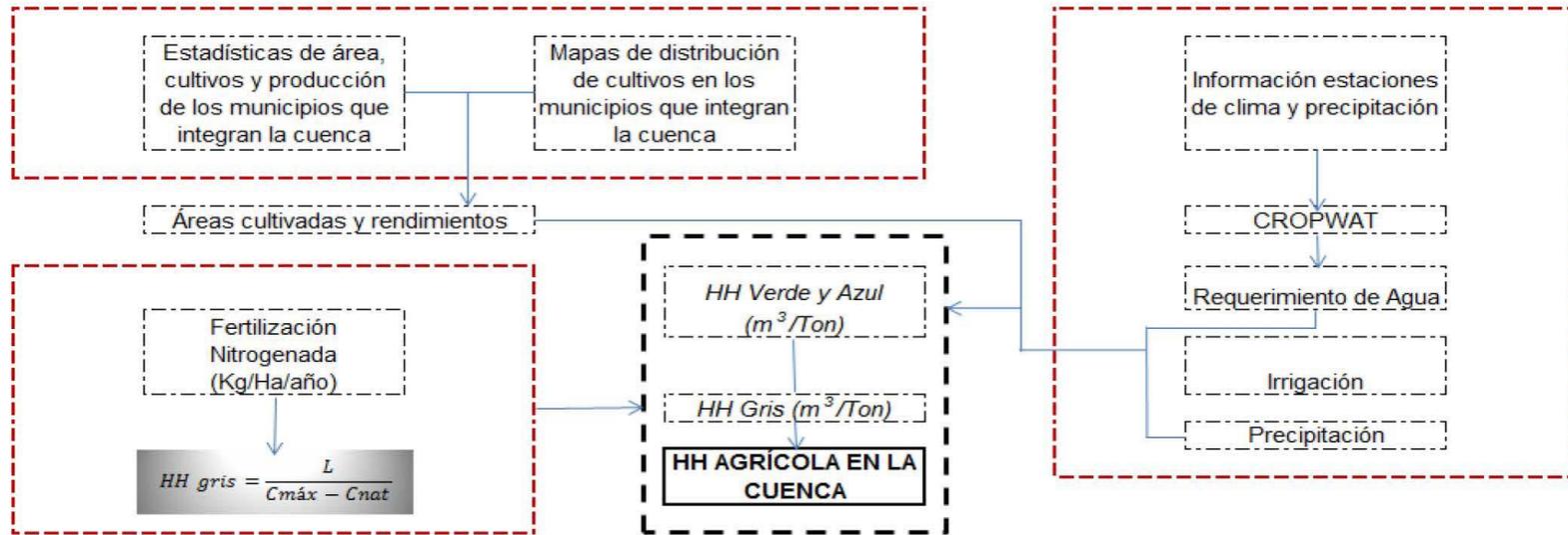
5.1.1. Metodología estándar para el sector agrícola y pecuario

La metodología es aplicable a cultivos transitorios, anuales y perennes, donde se consideran las plantaciones forestales como un cultivo permanente. La *Huella Hídrica* del proceso de los cultivos o plantaciones forestales (*Huella Hídrica* agrícola) está compuesto por la *Huella Hídrica* azul, verde y gris, y será expresada en m³/t, para este sector.



HUELLA HÍDRICA CUENCA PORCE

METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA HÍDRICA AGRÍCOLA



Consideraciones

Requerimiento de agua azul y verde de los cultivos (CWUverde y CWUazul): Se empleó el modelo CROPWAT 8.0 (FAO, 2010), el cual ha sido ampliamente utilizado en diversos estudios de HH a nivel mundial. El modelo requiere de 3 tipos de variables diferentes (clima, cultivos, suelos). La principal fuente de información acerca de los cultivos presentes en la cuenca proviene del Anuario Estadístico de Antioquia (AEA), del cual se utilizó la información de cultivos, área plantada, área en producción y rendimiento por ha de los años 2005 al 2010. Se reportan aproximadamente 56 cultivos en todos los municipios de la cuenca del río Porce; sin embargo, algunos cultivos no fueron tenidos en cuenta porque su área cultivada era menor de 10 ha y por falta de información. De esta manera, la HH agrícola de los cultivos será trabajada con 48 cultivos. Para estos se determinó un factor ponderador en función del área del municipio dentro de la cuenca para así pasar los datos estadísticos del nivel municipal a nivel de cuenca.

Agua virtual y huella hídrica azul y verde agrícola: Para cultivos permanentes y mayores de un año se comió el modelo en modo seco, ya que a través del levantamiento de información primaria, se identificó que estos no se riegan dentro de la cuenca. Así pues, el CROPWAT entrega como resultado lo siguiente: El modelo presenta la HH verde o agua virtual verde como Precipitación efectiva y corresponde al agua proveniente de la precipitación que realmente fue utilizada por el cultivo durante el período de análisis, desde la época de siembra hasta la época de cosecha. El resultado se da en mm, razón por la cual es necesario multiplicar por 10 para que quede expresada en m³/ha, a lo cual se le denomina consumo de agua del cultivo (CWU) y este a su vez debe ser expresado en unidades de (m³/ton) por lo cual se divide por el rendimiento del cultivo (ton/ha) que se obtuvo de los Anuarios Estadísticos de Antioquia.

Figura 4. Esquema metodológico para cálculo de la *Huella Hídrica* agrícola.

5.1.1.1. Estimación de la Huella Hídrica de consumo agrícola (HH Verde y HH Azul)

La *Huella Hídrica* será expresada en unidades de volumen de agua por unidad de masa, por lo general m^3/t , para este sector.

El componente verde de la *Huella Hídrica* de un cultivo o plantación forestal ($HH_{\text{cultivo, verde}}$, m^3/t) se calcula como el agua verde utilizada por el cultivo (CWU_{verde} , m^3/ha) dividido por el rendimiento de los cultivos (Y , t/ha). El componente azul ($HH_{\text{cultivo, azul}}$, m^3/t) se calcula de una manera similar:

Ecuación 2. Huella Hídrica Verde por unidad de producto de sector agrícola.

$$HH_{\text{cultivo, verde}} = \frac{CWU_{\text{verde}}}{Y}$$

Ecuación 3. Huella Hídrica Azul por unidad de producto de sector agrícola.

$$HH_{\text{cultivo, azul}} = \frac{CWU_{\text{azul}}}{Y}$$

Para el cálculo de los requerimientos de agua verde y azul del sector agrícola (CWU_{verde} y CWU_{azul}), se parte del entendimiento de los fenómenos físicos involucrados en el comportamiento vital de una especie vegetal: nacimiento, crecimiento, desarrollo, producción y muerte, asociadas a una planta como representación de la vida en nuestro planeta.

Para el proceso de cálculo y estimación, es necesario también conocer las variables que determinan el comportamiento del entorno: clima, precipitación, suelo.

Mediante la modelación de la interrelación entre las variables de entorno, que incluyen el agua disponible, y el comportamiento esperado por la especie vegetal, se consigue como resultado la valoración de las variables matemáticas que determinan el requerimiento hídrico, que según el origen del agua disponible se encuentra representado por cada uno de los componentes de la *Huella Hídrica*.

El modelo más comúnmente utilizado es el CROPWAT 8.0 (FAO), el cual se ha utilizado en diversos estudios a nivel mundial para el cálculo de la $HH_{\text{agrícola}}$. La principal utilidad de este software es que permite cuantificar el requerimiento de agua de los cultivos que puede ser suplido por la precipitación o por algún sistema de riego, a través del análisis de variables climáticas, edáficas, del propio cultivo y de un balance hídrico a nivel del suelo.

Mediante la simulación de la relación efectiva entre los grupos de variables citados anteriormente, la variable Precipitación Efectiva del módulo programación del CROPWAT representa el agua requerida por el cultivo y que puede ser suplida por la precipitación (ET verde) y la variable

Requerimiento Actual de Riego, representa el agua que debe ser suplida a través del riego (ET azul). Estos valores se transforman de unidades mediante la multiplicación por 10 para calcular el requerimiento de agua del cultivo en m³/ha. Finalmente, se divide el requerimiento de agua (m³/ha) por el rendimiento del cultivo (t/ha), para hallar la *Huella Hídrica Verde y Azul* del cultivo que se esté analizando.

5.1.1.2. Estimación de la Huella Hídrica por contaminación agrícola (HH gris)

. Para cultivos, los principales contaminantes que se presentan son los fertilizantes y pesticidas; sin embargo, para Colombia la información de pesticidas es muy escasa por lo cual suele calcularse solo para fertilizantes, entre ellos el fosforo (P) y nitrógeno (N) son los más importantes.

La *Huella Hídrica Gris* para los cultivos y plantaciones forestales en una cuenca hidrográfica está dada por:

Ecuación 4. Huella Hídrica Gris del sector agrícola

$$HH_{proc.gris} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}}$$

Dónde:

- $HH_{proc.gris}$: *Huella Hídrica Gris* de un producto agrícola específico (m³/ha)
- L : cantidad de fertilizante aplicado (Kg/ha)
- C_{max} : concentración máxima permisible del N y/o P en el agua (Kg/m³)
- C_{nat} : Concentración natural del N y/o P en el agua (Kg/m³).

Para la concentración máxima permisible se recomienda preferentemente utilizar las normas locales según lo regulado en la legislación de cada país o autoridad ambiental. Si no existen normas de calidad ambiental de agua disponibles y esta es usada para el consumo, se pueden aplicar las concentraciones definidas como mínimas internacionalmente para el agua potable.

En ríos poco alterados se puede asumir la concentración natural como la concentración actual del contaminante a evaluar. Para ríos alterados se deben utilizar datos de estudios locales o usar modelos. Cuando no se dispone de información, se supone la concentración natural igual a cero (Hoekstra et al., 2011).

El valor obtenido en el cálculo anterior corresponde a la *Huella Hídrica Gris* de un producto agrícola en una hectárea cultivada; sin embargo, es necesario dividir este valor por el rendimiento del cultivo (t/ha) para hacer comparable la *Huella Hídrica Gris* con la *Huella Hídrica azul y la verde*, de la siguiente manera:

Ecuación 5. Huella Hídrica Verde por unidad de producto del sector agrícola.

$$HH_{proc,gris} = \frac{HH_{producto}(m^3/ha)}{rendimiento_{cultivo}(ton/ha)}$$

5.1.1.3. Estimación de Huella Hídrica de consumo pecuario (HH Verde y HH Azul)

La *Huella Hídrica* del sector pecuario está dada por la ecuación:

Ecuación 6. Huella Hídrica del sector pecuario.

$$HH_{pecuaria} = HH_{alimento} + HH_{consumo} + HH_{servidumbre}$$

- **Huella Hídrica del alimento (HH_{alimento})**

La *Huella Hídrica* del alimento es aquella asociada a los pastos que se utilicen como alimento, principalmente para bovinos, equinos, caprinos y ovinos. La *Huella Hídrica* del sector pecuario para este caso corresponde a la *Huella Hídrica Verde* de los pastos presentes en la cuenca, que son utilizados para la alimentación de equinos y bovinos. Se calcula por medio de CROPWAT, siguiendo el mismo procedimiento que para los cultivos. Es importante señalar que para el sector pecuario, también se usan concentrados para la alimentación; sin embargo, éstos no se tendrán en cuenta dentro del cálculo de HH_{alimento}, ya que corresponden a otros sectores (industria de alimentos) o se pueden generar fuera de la cuenca de estudio.

- **Huella Hídrica del consumo (HH_{consumo})**

La *Huella Hídrica* del consumo se tomará como el volumen de agua que consumen los animales para su funcionamiento fisiológico. Para este cálculo se deben contar con datos de consumo de agua por animal para los subsectores analizados, para esto es necesario consultar investigaciones locales, datos consignados en municipios, entre otros. Los valores de *Huella Hídrica* calculados en este aparte se cargan a la *Huella Hídrica Azul* del sector.

- **Huella Hídrica de la servidumbre (HH_{servidumbre})**

La *Huella Hídrica* de servidumbre se refiere al agua utilizada en el aseo de establos, porquerizas, galpones, entre otros. Estos datos se obtienen de estudios locales o regionales preferiblemente. En caso de no estar disponibles, éstos pueden obtenerse de bases de datos internacionales que aportan valores medios mundiales.

5.1.1.4. Estimación de Huella Hídrica por contaminación pecuaria (HH gris)

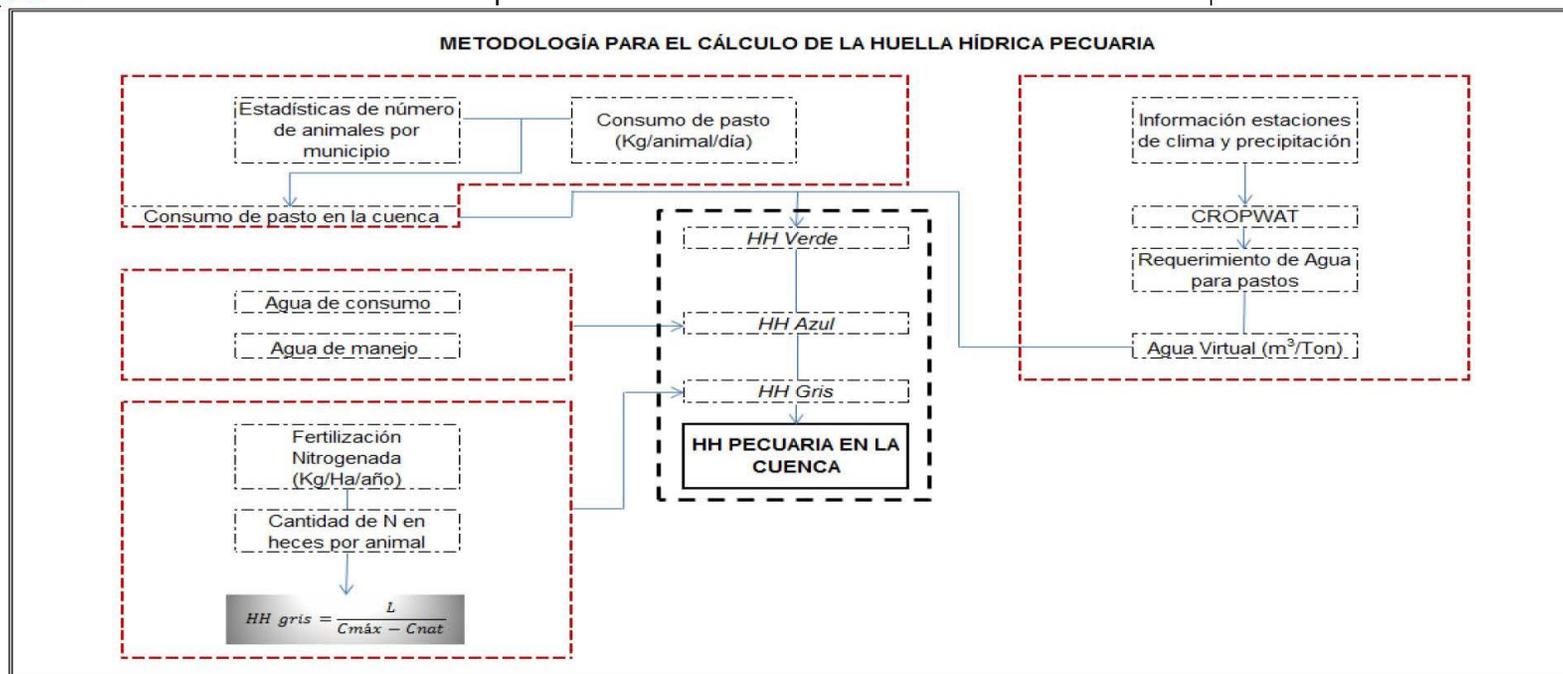
La información para calcular la contaminación del agua por las actividades pecuarias también suele ser bastante limitada a nivel de cuenca; por esa razón, es necesario recurrir a información secundaria de la región así como a métodos indirectos de estimación de contaminación por animales.

Para el cálculo de la *Huella Hídrica Gris*, se utiliza el mismo procedimiento aplicado a la $HH_{\text{agrícola, gris}}$, usando datos de contenidos de contaminantes en orina y heces obtenidos de investigaciones locales o realizadas en lugares con características similares a la del área de estudio.

Otro método para obtener datos de contaminación en cuencas, es la estimación indirecta, ampliamente utilizado en ingeniería sanitaria, que permite obtener el habitante equivalente para una fuente de contaminación diferente a la doméstica.



HUELLA HÍDRICA CUENCA PORCE



Consideraciones

Huella hídrica pecuaria: para el cálculo de la huella hídrica pecuaria se tuvo en cuenta los subsectores Bovino, Equino, Porcino, y Aves, con información principalmente de los Anuarios Estadísticos de Antioquia (AEA) para los años 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 y 2010.

Huella hídrica del alimento: La huella hídrica del alimento para el sector pecuario (expresada en m³), corresponde a la huella hídrica verde de los pastos presentes en la cuenca, que son utilizados para la alimentación de equinos y bovinos. Esta HH se calculó por medio de CROPWAT, siguiendo el mismo procedimiento que para los cultivos.

Huella hídrica del consumo: El Estudio Nacional del Agua - ENA (IDEAM, 2010) presenta valores promedio de consumo diario de agua para los subsectores Bovino, Equino, Porcino y Aves. Estos valores se utilizaron en el presente estudio para el cálculo de la HH Azul (expresada en m³)

Huella hídrica de la servidumbre: La información que se utilizó para el cálculo del consumo de agua (expresada en m³) para el manejo de los animales en las diferentes actividades pecuarias, están reportados en (IDEAM, 2010). en el sector bovino solo se aplico en los municipios de clima frío ya que mas del 90% de los animales se encuentran en lechería y su manejo se realiza en establo.

Figura 5. Esquema metodológico para el cálculo de la *Huella Hídrica* pecuaria

5.1.2. Metodología de cuantificación de Huella Hídrica para el sector doméstico

La metodología definida para el cálculo de la *Huella Hídrica* del sector doméstico en la cuenca del río Porce se desarrolló con base en la metodología estándar de *Water Footprint Network* (WFN).

Dado que la metodología WFN no es específica en el procedimiento para realizar los cálculos de la *Huella* en este sector, se propusieron tres volúmenes de control, a través de los cuales se identifican los procesos a tener en cuenta para realizar los cálculos y la interacción entre las variables de entrada y salida de cada uno de ellos. Es clara de esta forma la contribución por etapas a la *Huella Hídrica*, correspondientes a la captación y potabilización del agua, la distribución y el consumo doméstico y vertimiento del agua residual.

El primer volumen de control corresponde a las actividades de captación y potabilización del agua, el cual tiene a las empresas prestadoras del servicio público de acueducto como principal actor. La *Huella Hídrica Azul* y la *Gris*, dependen directamente de las actividades de operación y mantenimiento que se generen dentro de la instalación. Es importante tener en cuenta la procedencia del agua captada para determinar el volumen de agua trasvasada o traída de otras cuencas.

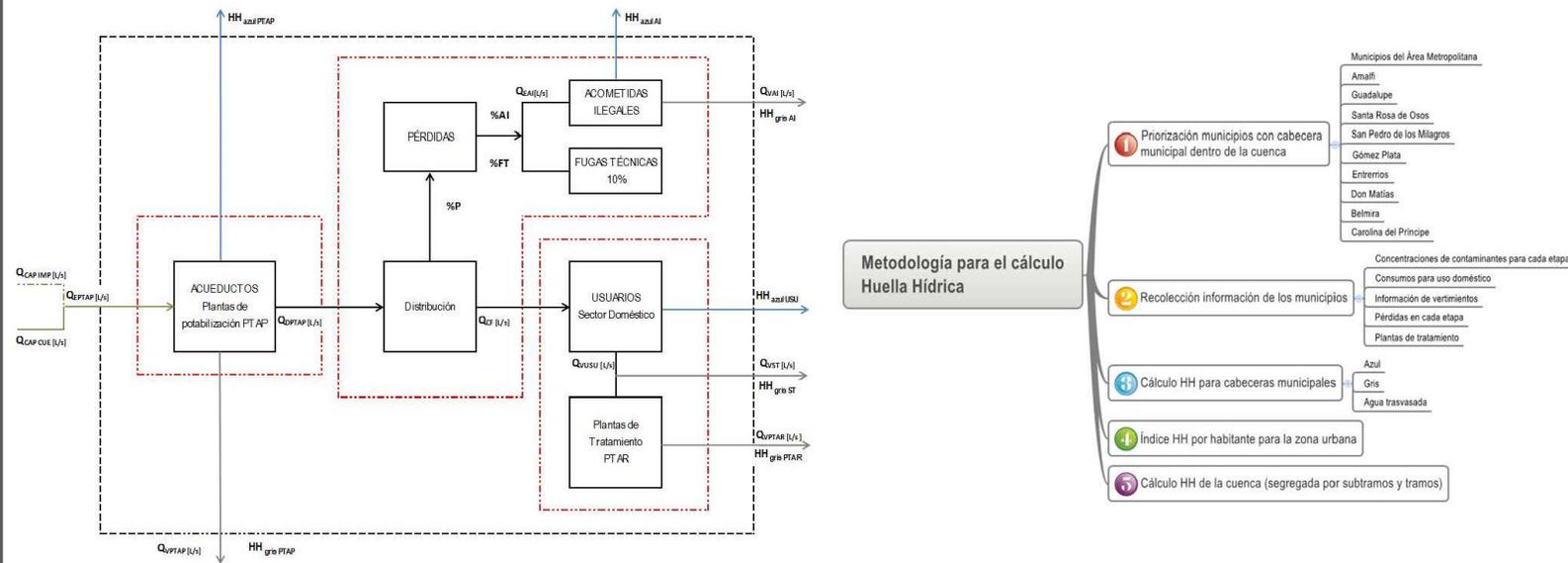
El segundo volumen de control es el proceso de distribución del agua, desde los tanques de almacenamiento hasta la entrada a las instalaciones de los usuarios del servicio de acueducto. Se evidencia la existencia de aguas no contabilizadas o pérdidas, las cuales para efectos de la metodología propuesta se dividen en dos grupos: fugas técnicas y acometidas ilegales. La contribución en este volumen de control a la *Huella Hídrica Azul* y la *Gris*, proviene únicamente del uso del agua en las acometidas ilegales, ya que el agua perdida por fugas técnicas retorna a la cuenca sin sufrir ningún cambio.

Finalmente, la tercera etapa abarca los usuarios del servicio público de acueducto y alcantarillado y los procesos de tratamiento y vertimiento del agua residual. La *Huella Hídrica Azul* y la *Gris* en este caso, dependen directamente del ahorro y uso eficiente del agua que hagan los usuarios y de las instalaciones con que cuente el municipio para el tratamiento de los vertimientos de aguas residuales.

En la siguiente tabla se explica la nomenclatura utilizada para la conceptualización.

Tabla 1. Nomenclatura utilizada en el cálculo de la *Huella Hídrica* del sector doméstico.

Nomenclatura utilizada en el cálculo de la <i>Huella Hídrica</i>	
QCAP IMP [L/s]	Caudal importado a la cuenca
QCAP CUE [L/s]	Caudal captado de la cuenca
QEPTAP [L/s]	Caudal de entrada a la PTAP
Qempacado PTAP [L/s]	Caudal empacado en la PTAP
QVPTAP [L/s]	Caudal vertido por la PTAP
QDPTAP [L/s]	Caudal de salida para la distribución de la PTAP
QCF [L/s]	Caudal de consumo facturado
%P	Porcentaje de pérdidas
%FT	Porcentaje de fugas técnicas
%AI	Porcentaje de acometidas ilegales
QEAI[L/s]	Caudal de entrada de acometidas ilegales
QVAI [L/s]	Caudal vertido por las acometidas ilegales
C [mg/L]	Concentración de DBO ₅ , SST y NTK en cada una de las etapas
QVUSU [L/s]	Caudal vertido por los usuarios
Q Tra PTAR	Porcentaje del caudal que es llevado a una PTAR
QVPTAR [L/s]	Caudal vertido por los usuarios tratado por una PTAR
QVST [L/s]	Caudal vertido por los usuarios sin tratar
% R	Porcentaje de remoción de DBO ₅ , SST y NTK de la PTAR
HH	<i>Huella Hídrica</i> expresada en unidades de volumen/tiempo



Metodología para el cálculo Huella Hídrica

1. Priorización municipios con cabecera municipal dentro de la cuenca
 - Municipios del Área Metropolitana: Amalfi, Guadalupe, Santa Rosa de Osos, San Pedro de los Milagros, Gómez Plata, Entrerrios, Don Matías, Belmira, Carolina del Príncipe.
2. Recolección información de los municipios
 - Concentraciones de contaminantes para cada etapa
 - Consumos para uso doméstico
 - Información de vertimientos
 - Pérdidas en cada etapa
 - Plantas de tratamiento
3. Cálculo HH para cabeceras municipales
 - Azul
 - Gris
 - Agua trasvasada
4. Índice HH por habitante para la zona urbana
5. Cálculo HH de la cuenca (segregada por subtramos y tramos)

Consideraciones	Parámetros necesarios para el cálculo de la Huella Hídrica			
<p>Para el sector doméstico se calculó la Huella Hídrica azul y gris, con información disponible de consumos y vertimientos entre los años 2005 y 2011, para 19 cabeceras municipales (municipios priorizados) que se encuentran dentro de la cuenca del río Porce (Barbosa, Bello, Caldas, Copacabana, Girardota, Envigado, La Estrella, Medellín, Itagüí y Sabaneta, Amalfi, Guadalupe, Santa Rosa de Osos, San Pedro de los Milagros, Gómez Plata, Entrerrios, Don Matías, Belmira y Carolina del Príncipe). Es de aclarar que para los diez 10 municipios que conforman el área metropolitana del Valle de Aburrá, la información se encuentra de manera consolidada, por lo que se toman como una unidad para efecto de realizar los cálculos.</p> <p>Para evaluar la contribución total a la Huella Hídrica del sector doméstico en la cuenca del río Porce del área rural, tanto de los municipios priorizados, como de los demás que no fueron priorizados pero que tienen una parte de su territorio dentro de esta, se determinó un indicador para cada cabecera municipal (m²/habitante), que multiplicado por el número de habitantes de las áreas rurales incluidas, permitió hallar la Huella Hídrica en treinta y un (31) subtramos definidos. Finalmente, se realizó la sumatoria de los resultados por subtramos, con el fin de efectuar un análisis a un nivel más global para (7) grandes tramos y para el total de la cuenca.</p>	$Q_{CAP IMP}$ [L/a]	Porcentaje de agua importado a la cuenca	Q_{EA} [L/a]	Caudal de entrada de acometidas ilegales
	$Q_{CAP CUE}$ [L/a]	Caudal importado a la cuenca	Q_{VAI} [L/a]	Caudal vertido por las acometidas ilegales
	Q_{EPTAP} [L/a]	Caudal captado de la cuenca	$C_{VAI DBO5}$ [mg/L]	Concentración de DBO ₅ en el vertimiento de las acometidas ilegales
	Q_{EPTAP} [L/a]	Caudal de entrada a la PTAP	$C_{VAI SST}$ [mg/L]	Concentración de SST en el vertimiento de las acometidas ilegales
	$Q_{Empacado PTAP}$ [L/a]	Caudal empaquetado en la PTAP	$C_{VAI NTK}$ [mg/L]	Concentración de NTK en el vertimiento de las acometidas ilegales
	Q_{VPTAP} [L/a]	Caudal vertido por la PTAP	Q_{VUSU} [L/a]	Caudal vertido por los usuarios
	Q_{OFTAP} [L/a]	Caudal de salida para la distribución de la PTAP	$\% Q_{TUA PTAR}$	Porcentaje del caudal que es llevado a una PTAR
	$C_{EPTAP DBO5}$ [mg/L]	Concentración de DBO ₅ a la entrada de la PTAP	Q_{VPTAR} [L/a]	Caudal vertido por los usuarios tratado por una PTAR
	$C_{EPTAP DBO5}$ [mg/L]	Concentración de DBO ₅ en el vertimiento de la PTAP	Q_{VST} [L/a]	Caudal vertido por los usuarios sin tratar
	$C_{EPTAP SST}$ [mg/L]	Concentración de SST a la entrada de la PTAP	$\% R_{DBO5 PTAR}$	Porcentaje de remoción de DBO ₅ en la PTAR
	$C_{VPTAP SST}$ [mg/L]	Concentración de SST en el vertimiento de la PTAP	$\% R_{SST PTAR}$	Porcentaje de remoción de SST en la PTAR
	$C_{EPTAP NTK}$ [mg/L]	Concentración de NTK a la entrada de la PTAP	$\% R_{NTK PTAR}$	Porcentaje de remoción de NTK en la PTAR
	$C_{EPTAP NTK}$ [mg/L]	Concentración de NTK en el vertimiento de la PTAP	$C_{VPTAR DBO5}$ [mg/L]	Concentración de DBO ₅ en el vertimiento de la PTAR
	Q_{CF} [L/a]	Caudal de consumo facturado	$C_{VPTAR SST}$ [mg/L]	Concentración de SST en el vertimiento de la PTAR
$\%P$	Porcentaje de pérdidas	$C_{VPTAR NTK}$ [mg/L]	Concentración de NTK en el vertimiento de la PTAR	
$\%FT$	Porcentaje de fugas técnicas	$C_{VST DBO5}$ [mg/L]	Concentración de DBO ₅ en el vertimiento por los usuarios. Sin tratar	
$\%AI$	Porcentaje de acometidas ilegales	$C_{VST SST}$ [mg/L]	Concentración de SST en el vertimiento por los usuarios. Sin tratar	

Figura 6. Esquema metodológico para cálculo de la Huella Hídrica doméstica.

El cálculo de la *Huella Hídrica Azul*, está dado por la sumatoria de la *Huella Hídrica Azul* de la etapa de potabilización, distribución y consumo por los usuarios. Durante la potabilización, el consumo por parte de los empleados con respecto al agua de entrada y de salida es muy bajo y los tanques de almacenamiento generalmente son cerrados por lo que no habría una evaporación significativa. En algunos casos, no se cuenta con información disponible en la potabilización y es necesario inferir estos valores a partir de los consumos facturados. Se recomienda considerar un 3% de pérdidas para atender las necesidades de la PTAP.

En el proceso de distribución, la *Huella Hídrica Azul* está dada por el agua no contabilizada sobre la cual existe incertidumbre en cuanto a qué porcentaje corresponde a acometidas ilegales, cuánto a fugas técnicas y el uso dado a esta última. Para la mayoría de los municipios se asumió que un 10% del caudal que sale de la planta, se pierde por fugas técnicas, retornando nuevamente a la cuenca. En cuanto a las acometidas ilegales, se determina por la diferencia entre las pérdidas del sistema y las fugas técnicas y se asume un patrón de uso similar al del consumo de los usuarios.

El porcentaje de agua que no retorna a la cuenca (evaporada, consumida, etc.) se asume como el 10% del agua total facturada, llegando entonces a una expresión de *Huella Hídrica Azul* en términos de la información disponible para el sector:

Ecuación 7. Huella Hídrica Azul del sector doméstico.

$$HH_{azul} = HH_{azulAI} + HH_{azulUSU} + HH_{azulPTAP}$$

$$HH_{azul} = (Q_{EAI} - Q_{VAI}) + (Q_{CF} - Q_{VUSU}) + Q_{empacadoPTAP}$$

$$HH_{azul} = Q_{EAI} * 10\% + Q_{CF} * 10\% + Q_{empacadoPTAP}$$

La determinación del volumen de agua transvasada, se realizó con base en un análisis de las importaciones de agua a la cuenca. Para ello, se estableció si las bocatomas de los acueductos urbanos de los municipios priorizados se encontraban dentro o fuera de la misma.

En cuanto a la *Huella Hídrica Gris*, se realizó evaluando las contribuciones de cada una de las concentraciones (C) de los contaminantes DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno), SST (Sólidos Suspendidos Totales) y NTK (Nitrógeno total Kjeldahl), por un criterio de información disponible, dado que los dos primeros hacen parte de los parámetros objeto de cobro en la tasa retributiva (instrumento económico de obligatorio cumplimiento por la utilización directa del recurso como receptor de vertimientos).

A esta *Huella* contribuyen los vertimientos realizados en la planta de potabilización, los de las acometidas ilegales que se asumen con características de domésticos, el vertimiento de los usuarios, tanto el que no ha recibido ningún tratamiento como el de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Ecuación 8. Huella Hídrica Gris sector doméstico.

$$HH_{gris} = HH_{grisPTAP} + HH_{grisAI} + HH_{grisST} + HH_{grisPTAR}$$

$$HH_{gris} = \frac{\sum (Q_{vertido} * C_{vertimiento}) - Q_{captado} * C_{captación}}{C_{max} - C_{nat}}$$

$$HH_{gris} = \frac{Q_{VPTAP} C_{VPTAP} + Q_{VAI} C_{VAI} + Q_{VST} C_{VST} + Q_{VPTAR} C_{VPTAR} - Q_{CAPCUE} C_{CAPCUE}}{C_{max} - C_{nat}}$$

Por último, después de obtener las *Huellas Hídricas* para los municipios priorizados se procedió a calcular un índice que expresa el volumen de agua consumido durante un año típico por cada habitante de la cuenca (m³/año_habitante) a través del cual se pudieran proyectar los cálculos para las áreas rurales y finalmente realizar un análisis de la contribución a la *Huella* desde las unidades o tramos propuestos para el estudio de la cuenca.

5.1.3. Metodología de cuantificación de la Huella Hídrica para el sector industrial

La metodología del cálculo de la *Huella Hídrica* en el sector industrial está basada en la metodología estándar de la *Water Footprint Network* (WFN), la cual define la *Huella Hídrica* de un proceso como el volumen total de agua dulce que se utiliza directa o indirectamente para la consecución de los fines de la empresa. Sin embargo, es necesario establecer el detalle con el cual se va a calcular la *Huella Hídrica* en este sector, si se va considerar tanto el componente directo u operacional, es decir, el volumen de agua dulce consumido y contaminado para realizar sus propias operaciones, y la *Huella Hídrica* generada por la cadena de suministros, o si solo se va a evaluar una de estas.

La *Huella Hídrica* directa tiene en cuenta tanto el consumo de agua necesario para el funcionamiento continuo de la empresa, como el relacionado con la producción; en la siguiente tabla se muestra un ejemplo de la distribución del consumo de agua directa en el sector industrial.

Tabla 2. Huella Hídrica operacional del sector industrial.

Huella hídrica operacional	
<i>Huella Hídrica</i> directamente asociada con la producción de los productos de la empresa	<i>Huella Hídrica</i> relacionada con el funcionamiento de la empresa
<ul style="list-style-type: none">• Agua incorporada al producto• Agua consumida o contaminada en el proceso de lavado• Agua contaminada por temperatura en el uso de refrigeración	<ul style="list-style-type: none">• Agua evaporada por el uso del agua en cocinas, aseos, limpieza, jardinería o lavar la ropa de trabajo

El volumen de control para el cálculo de la *Huella Hídrica* del sector industrial determina la unidad en la cual se tienen en cuenta las diferentes fuentes de captación (río, quebrada, pozo, acueducto, agua lluvia) y se realiza un balance entre el agua total que entra y el total de agua vertida; ese resultado corresponde al volumen de agua que queda en los productos o que se evapora.

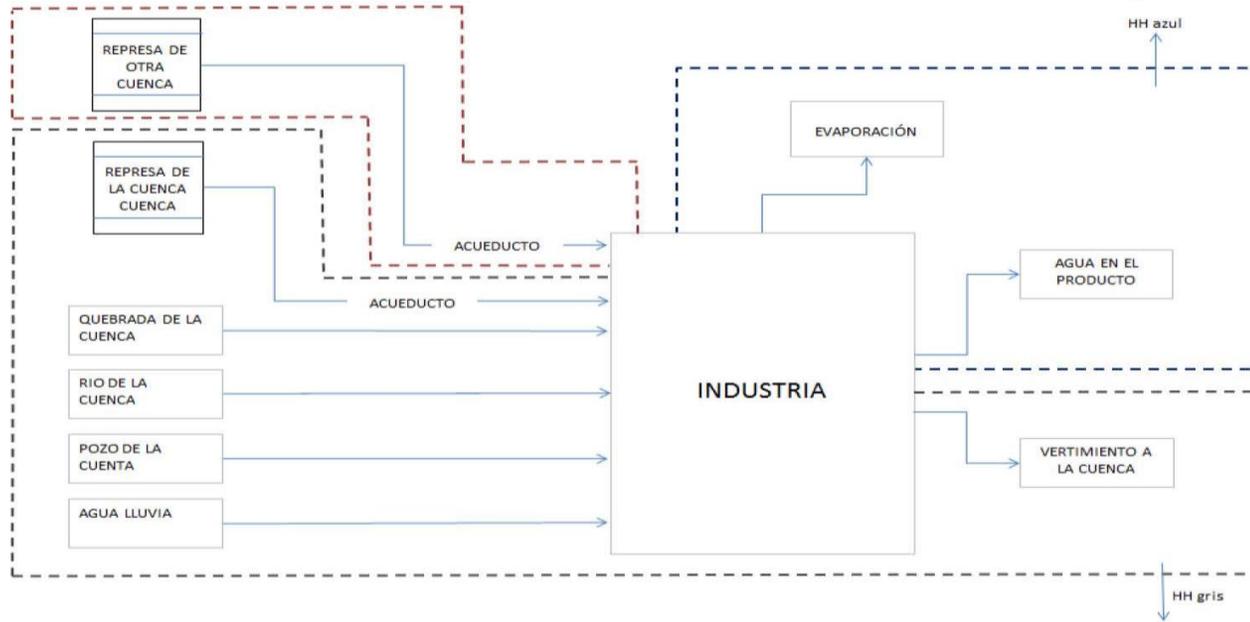


HUELLA HÍDRICA CUENCA PORCE



Cálculo y el análisis de la Huella Hídrica en la cuenca del Río Porce en Colombia -Sector Industrial- ANEXO 1

El objetivo del formato es ayudar a realizar el cálculo y análisis de la huella hídrica para el sector industrial en las cuencas del río Porce en Colombia.



Consideraciones

La huella hídrica del sector industrial se determinó teniendo en cuenta las diferentes fuentes de captación (río, quebrada, pozo, acueducto, agua lluvia) y se realiza un balance entre el agua total que entra y el total de agua vertida; ese resultado corresponde al volumen de agua que queda en los productos o que se evapora. Debido a que en esta cuenca no se presentan estaciones climáticas bien definidas, no se tienen en cuenta las diferencias entre los meses de invierno y verano, además los vertimientos son continuos y no se asumen almacenamientos de aguas, lo que sí se tiene en cuenta en el balance es que el agua que se toma y la que se vierte pertenezcan a la misma cuenca. Para el análisis de algunos sectores manufactureros como el sector de confecciones, que no tienen consumo de agua para uso industrial, pero debido a su gran número de empleados se consideró el consumo de agua doméstico y su respectivo vertimiento. La información fue extraída principalmente de Registro Único Ambiental (RUA) de los años 2008 al 2010, sin embargo fue necesario complementar la información con información de algunos sectores mediante la revisión de reportes técnico o caracterizaciones de agua.

Debido a que son la gran variedad de subsectores industriales que se pueden encontrar en el Área Metropolitana, fue necesario realizar una priorización basada en dos criterios, uno con respecto a la producción bruta y otro con respecto al impacto ambiental. Con el primer criterio se definió como excluidos aquellos sectores con una producción bruta menor al 5% y con el criterio ambiental se incluyen aquellos subsectores que quedaron excluidos pero que tienen relevancia ambiental por la criticidad de sus vertimientos. El criterio ambiental se construyó con dos factores; el primero fue tomado del estudio que desarrolló el Departamento Administrativo del Medio Ambiente-DAMA de Bogotá, el cual es definido mediante el cálculo de Unidades Hídricas de Contaminación (UHC) y el segundo factor tenido en cuenta fue el consumo de agua evaporada o incluida en el producto. En total se trabajaron en 56 subsectores.

Para cada subsector priorizado (cuarto nivel de división CIIU) se realizó la sumatoria de los promedios de la HH azul por empresa y de otro lado se realizó la sumatoria de los promedios de las producciones por unidad, luego se halló el indicador como la relación entre los m3 de agua/producción y luego este indicador se multiplicó por la producción total del subsector.

La huella hídrica gris se calculó por subsector, y para cada contaminante se obtuvo la sumatoria del promedio de carga del contaminante de interés (mg/año) de los años incluidos para las empresas de las cuales se obtuvo información de cada sector y se divide por la producción promedio de ellas. Este indicador se multiplica por la producción total del subsector para calcular el dato total por subsector para cada contaminante. Para determinar la huella hídrica gris del sector manufacturero se realiza la sumatoria para cada contaminante de la huella hídrica gris de todos los sectores y luego se seleccionó el valor máximo.

Figura 7. Esquema metodológico para el cálculo de la *Huella Hídrica* industrial.

La *Huella Hídrica Azul* directa del sector industrial se calcula como la diferencia entre el volumen total de agua extraída (agua superficial, agua subterránea, agua lluvia) consumida y el volumen de agua total vertida; esta diferencia corresponde al volumen de agua evaporado y/o incorporado en los productos elaborados.

Para cada empresa se calcula el promedio tanto de la producción como de la *Huella Hídrica* directa de los años reportados. Es recomendable para una mejor manipulación y comprensión de los datos llevar las producciones obtenidas a una misma unidad temporal.

Para cada subsector (cuarto nivel de división CIIU - CIIU 15-37 relación evidente con el agua) se realiza la sumatoria de los promedios de la HH_{azul} y de otro lado se realiza la sumatoria de los promedios de las producciones por unidad, luego se halla el indicador como la relación entre los m^3 de agua/producción y luego este indicador se multiplica por la producción total del subsector, como se muestra a través de la siguiente ecuación:

Ecuación 9. La *Huella Hídrica Azul* del sector industrial por unidad de tiempo.

$$HH_{azul}(m^3/periodo) = \sum_{Z=CIIU\ 15}^{CIIU\ 37} (IND\ HH_{azul} \left(\frac{m^3}{Und\ PXN} \right)_Z * producción\ total\ sector\ Z) * F$$

Ecuación 10. Indicador de *Huella Hídrica Azul* del sector industrial.

$$IND\ HH_{azul} \left(\frac{m^3}{Und\ PXN} \right)_Z = \frac{\sum_{y=1}^n prom. (m^3\ agua\ extr. - m^3\ agua\ vert.) (y\ empresas)}{\sum_{y=1}^n promedio (producción\ de\ y\ empresas)}$$

Dónde:

Z= CIIU rev3. Sector 15 a 37, 4 dígitos.

y= año 1.

n= año (años con información disponible).

(y empresas) = empresas del mismo sector que aportan información para el indicador.

Producción total sector Z = cantidad anual producida por el sector en las unidades equivalentes al indicador.

F= porcentaje de agua extraída de cada fuente (acueducto, agua lluvia, subterránea y superficial) del área de estudio.

Puede encontrarse empresas que reporten igual volumen de entrada y de salida, pero no poseen contador de consumo, para este caso se recomienda asumir un porcentaje de pérdidas por

evaporación o fugas en el sistema y así tener un estimativo de HH_{azul} para éstas. La *Huella Hídrica Azul* total es la sumatoria de las *Huellas Hídricas Azules* de cada subsector y fuente de agua.

Es importante distinguir aquellas empresas que capten agua de otros lugares que no correspondan a al área de estudio, debido a que ésta se considera como $HH_{azul\ virtual}$, generando una *Huella Hídrica Azul* en otra cuenca.

En el sector industrial la *Huella Hídrica Gris* se calcula así: por subsector. Para cada contaminante se calcula la sumatoria del promedio de carga (mg/año) de los años incluidos y para empresas (y empresas) de cada sector y se divide por la producción promedio (Und PXN) correspondiente a cada carga contabilizada y este indicador se multiplica por la producción total del subsector. Para determinar la *Huella Hídrica Gris* del sector manufacturero, se realiza la sumatoria para cada contaminante la *Huella Hídrica Gris* de todos los sectores y luego se selecciona la máxima, que se considera como la condicionante para la capacidad de asimilación.

Ecuación 11. La *Huella Hídrica Gris* del sector industrial por unidad de tiempo.

$$HH\ Gris(m^3) = Max(\sum (\frac{IND\ HH\ GRIS\ subsector\ Z * producción\ total\ sector\ Z}{C_{ref} - C_{nat}})_{Contaminantes})$$

Ecuación 12. Indicador de *Huella Hídrica Gris* del sector industrial.

$$IND\ HH\ GRIS\ subsector\ Z = \frac{\sum [Q_{out} * C_{out} - Q_{in} * C_{in}](empresa\ y)\ contaminante\ X}{\sum_{y=1}^n producción\ de\ y\ empresas}$$

Dónde:

Q_{out} : caudal vertido ($m^3/año$).

C_{out} : concentración del contaminante (mg/L).

Q_{in} : caudal de entrada ($m^3/año$).

C_{in} : concentración de entrada (mg/L).

$(Q_{OUT} * C_{OUT} - Q_{IN} * C_{IN})$: estos datos pueden ser obtenidos por los entes territoriales de control de la cuenca o directamente de la empresa por medio de encuestas. CREF: concentración de referencia (mg/L); se tomó del estudio de Ann Marie Boulay. Se seleccionaron los estándares de la categoría: mejor para ecosistemas.

C_{nat} : concentración natural de la fuente receptora (sin intervención antropogénica) (mg/L), de no contar con esta información se pueden tomar las condiciones del nacimiento de la fuente.

5.1.4. Metodología de cuantificación de Huella Hídrica para el sector de generación de energía hidroeléctrica

La metodología de cálculo de la *Huella Hídrica* energética (HH), es la propuesta por Mekonnen & Hoekstra (2011), en la cual la *Huella Hídrica* de la energía (m^3/GJ) generada en centrales hidroeléctricas, se calcula dividiendo la cantidad de agua evaporada desde el embalse (m^3) por la cantidad de energía generada (GJ):

Ecuación 13. Huella Hídrica Gris del sector de generación hidroeléctrica.

$$HH_{embalses} = \frac{AE(m^3)}{EG(GJ)}$$

El volumen total de agua evaporada AE desde el embalse es:

Ecuación 14. Volumen total de agua evaporada.

$$AE(m^3) = [ExA]$$

Donde E es la evaporación mensual (m) del embalse y A corresponde al área (m^2) del reservorio de agua a alguna escala temporal de interés. El área del reservorio o embalse cambia mes a mes, en función de la actividad de generación del embalse, oferta y demanda.

Existen varios métodos de cálculo y estimación de evaporación comúnmente utilizados. Estos métodos se pueden agrupar en varias categorías, (Singh y Xu, 1997): (i) empíricos, (ii) balance de energía, (iii) transferencia de masa y (iv) una combinación de los métodos anteriores.

Los métodos empíricos relacionan la evaporación, con factores meteorológicos utilizando análisis de regresión. La debilidad de estos métodos empíricos es que tienen un rango limitado de aplicabilidad (Lenters et al., 2005; Mekonnen & Hoekstra, 2011). Dos de los métodos más conocidos de este tipo son los propuestos por Turc (1961) y Thornthwaite (1948).

El primero propone calcular la evapotranspiración potencial (mm/mes) en función de la radiación media diaria de cada mes ($cal/cm^2día$) sobre una superficie horizontal, la temperatura media mensual ($^{\circ}C$) y una corrección basada en la humedad relativa mensual (%). El método ha dado buenos resultados en diferentes partes del mundo en su aplicación y está dado por la ecuación:

Ecuación 15. Evaporación – Turc.

$$E = K \left(\frac{T}{T + 15} \right) (R_g + 50)$$

Donde K representa una constante igual a 0,4 para meses de 30 a 31 días y 0,37 para el mes de febrero, T es la temperatura media mensual en °C y Rg es la radiación solar media en el suelo (cal/cm²día).

Thornthwaite (1948) por otro lado, propone estimar la evapotranspiración en función de la temperatura media, con una corrección en función de la duración del día y el número de días del mes. El método es muy empleado para el cálculo de balances hídricos, para climatología e hidrología de cuencas y está dado por la ecuación:

Ecuación 16. Evaporación - Thornthwaite.

$$E = 1.6 \left(10 \frac{T}{I} \right)^\alpha$$

I denota el índice de calor anual, α es un parámetro ajustado que se calcula en función de I y está dado por la expresión:

Ecuación 17. Variables para ecuación de Evaporación – Thornthwaite.

$$I = 12 \left(\left(\frac{T_{anual}}{5} \right)^{1.514} \right)$$

$$a = (675 \cdot 10^{-9})I^3 - (771 \cdot 10^{-7})I^2 + (179 \cdot 10^{-4})I + 0.492$$

Los métodos combinados armonizan la transferencia de masa y principios del balance de energía en una sola ecuación. El método más conocido de este tipo es el desarrollado por Penman (1948). Debido a su limitada base empírica, la ecuación de Penman es fácilmente aplicable a una gran variedad de cuerpos de agua (Mekonnen & Hoekstra, 2011). Además, el modelo tiene en cuenta el almacenamiento de calor dentro de los cuerpos de agua. Por lo tanto, para propósitos de estimación de *Huella Hídrica* la ecuación de Penman se considera adecuada para la estimación de la evaporación de los embalses de generación de energía analizados.

La evaporación de la superficie del agua (mm/día) se calcula usando la ecuación de Penman:

Ecuación 18. Evaporación – Penmann.

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{h_o - G}{HV} + \left[\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(v)(e(a) - e(d)) \right]$$

Donde E es la evaporación diaria (mm/día), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación, Kpa/°C, γ es la constante psicrométrica, (kPa/°C), h_o es la radiación solar neta, (MJ/m²), G es el cambio en el calor de almacenamiento en el cuerpo de agua (MJ/m²), HV es el calor latente de vaporización de agua, (MJ/kg), $f(v)$ es la función de la velocidad del viento, (mm/día Kpa), $e(a)$ es la presión de vapor de saturación a la temperatura media del aire, (Kpa) y $e(d)$ es la presión de vapor a la temperatura media del aire, (Kpa).

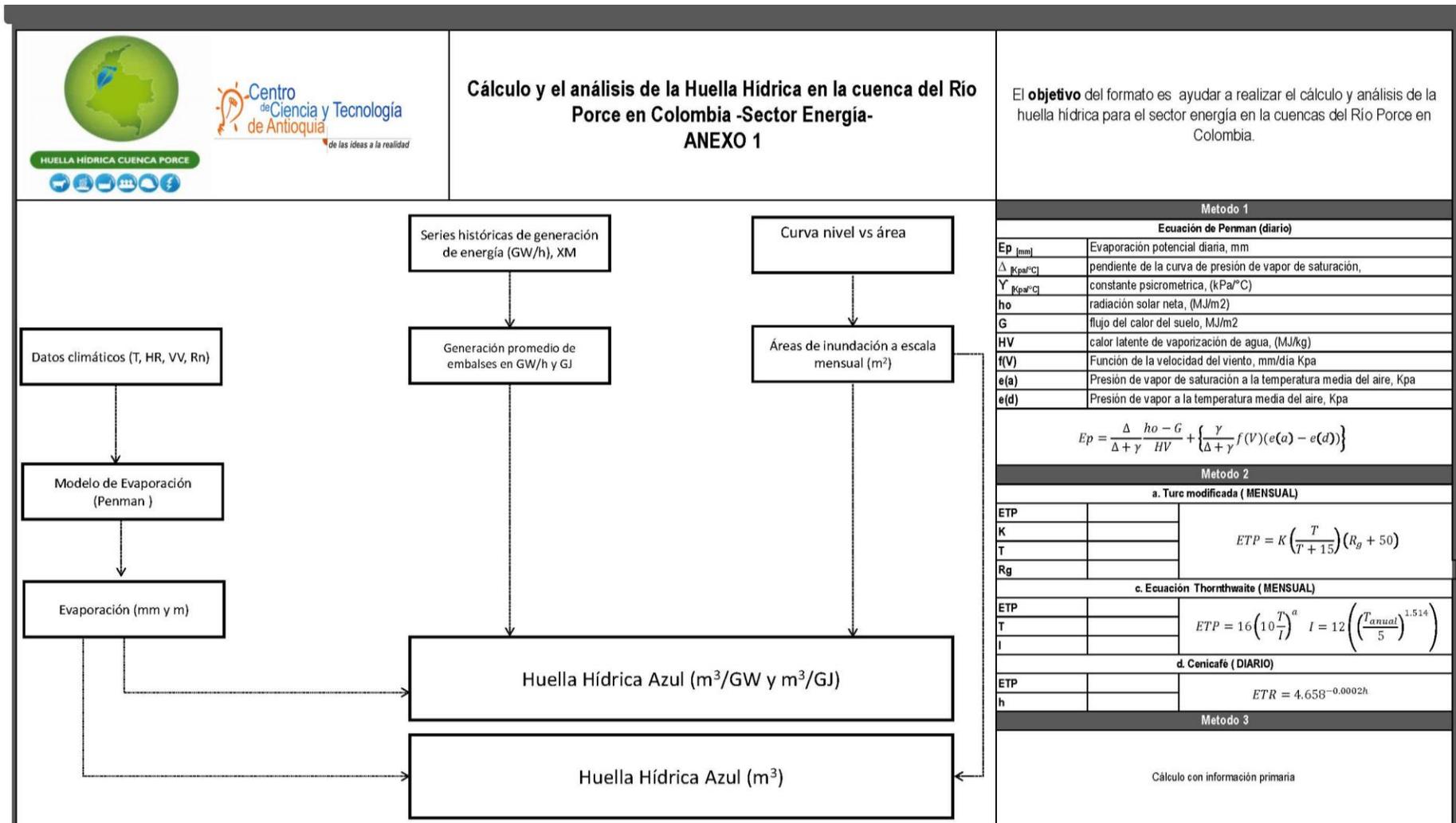


Figura 8. Esquema metodológico para el cálculo de la *Huella Hídrica* de la generación de energía hidroeléctrica.

5.1.5. Metodología de cuantificación de la Huella Hídrica para el sector minero

La metodología para calcular la *Huella Hídrica* del sector minero, tiene como principal referencia la metodología estándar propuesta por la WFN, en la cual se plantean los conceptos y criterios técnicos para estimar las diferentes *Huellas (Azul, Verde y Gris)*. Es importante aclarar que en algunos casos dependiendo de la información disponible, es necesario estimar los indicadores utilizando ecuaciones diferentes a las propuestas por Hoekstra (2011), pero siempre bajo el marco conceptual propuesto para cada indicador.

En el caso del sector minero, lo primero que se debe analizar es cuál de los indicadores de *Huella Hídrica (azul, verde y gris)*, es necesario calcular para cada uno de los minerales objeto de estudio. Por ejemplo, si se analizan metales preciosos, es necesario estimar la *Huella Hídrica Azul* (consumo de agua) y la *Huella Hídrica Gris* (vertimiento de contaminantes como el mercurio y el cianuro). En el caso de materiales de construcción como la arcilla, se debe calcular la *Huella Hídrica Azul* (evaporación en el proceso de cocción de los ladrillos).

Una vez se define qué indicadores de *Huella Hídrica* se van a calcular, se procede a recolectar la información ya sea primaria y/o secundaria para desarrollar los respectivos cálculos. En el caso de la *Huella Hídrica Gris*, también se debe definir qué contaminantes serán analizados.

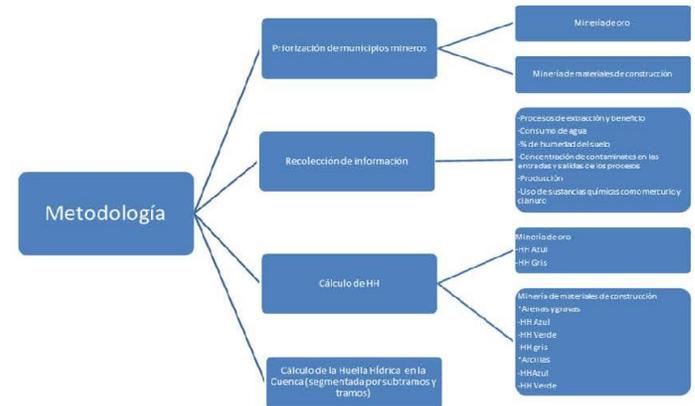
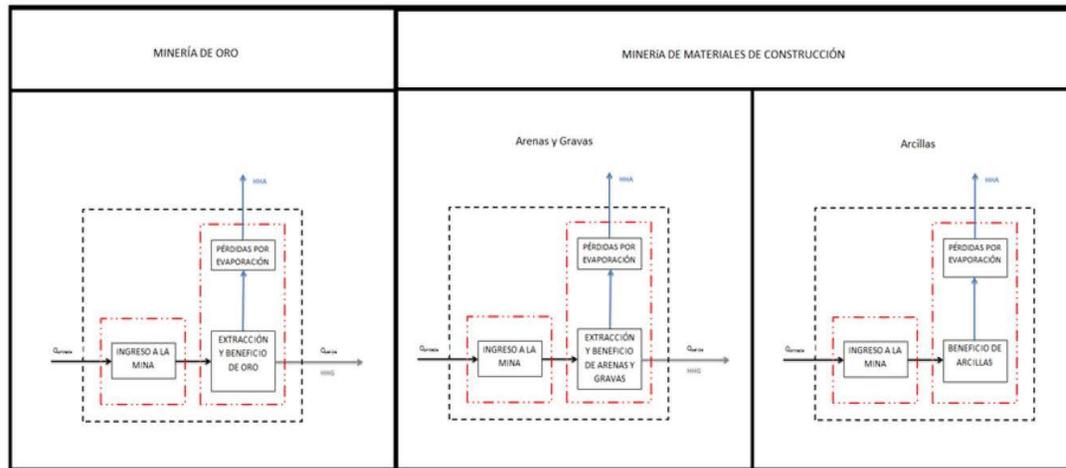


HUELLA HÍDRICA CUENCA PORCE



Cálculo y el análisis de la Huella Hídrica en la cuenca del Rio Porce en Colombia -Sector Minero- ANEXO 1

El objetivo del formato es ayudar a realizar el cálculo y análisis de la huella hídrica para el sector minero en la cuencas del río Porce en Colombia.



Consideraciones

La priorización de Municipios para este sector se dividió en minería de oro y materiales de la construcción, para el primero los cálculos se hicieron con base en los reportado del SIMCO, verificando que municipios de la cuenca reportaban producción de oro y la cantidad que producían el año por el periodo de estudio (2005-2011). En el caso de los materiales de construcción se revisaron los expedientes de las Autoridades Ambientales y algunos estudios realizados por entes públicos (Secretaría de Medio Ambiente de Medellín y la Secretaría de Minas de la Gobernación de Antioquia), la información recolectada fue principalmente de los procesos productivos y datos puntuales sobre la producción.

1. Para el cálculo de los indicadores se evaluaron las extracciones mineras que tuvieran toda la información requerida según lo definido en la metodología de Huella Hídrica.
2. En el caso de la huella hídrica gris del cianuro no se reportaban datos estimativos de consumo en minas por unidad de oro producido, por lo tanto se realizó un balance químico para estimar cuanto cianuro se consume en teoría para extraer cierta cantidad de oro.
3. Para el caso de la minería de oro, no se conoce con exactitud las practicas mineras de extracción en cada uno de los títulos mineros encontrados al interior de la cuenca, por tal motivo es adecuado calcular la HH para cada Municipio

Parámetros Fijos	C máx. SST [mg/L]	25,00	C máx. Hg [mg/L]	0,01	C máx. Ca [mg/L]	0,07	Los valores de concentración máxima de contaminante para mantener la calidad aceptable del efluente receptor fue obtenido del estudio de Boulay, Bulle, Deschenes, & Margni, 2011 y la concentración natural del mercurio y el cianuro en las fuentes hídricas se asumió igual a 0 mg/L. Para el caso de los sólidos suspendidos la concentración natural se obtuvo de la red de monitoreo de río Medellín en su nacimiento y la carga máxima son estándares internacionales.
	C nat SST [mg/L]	1,24	C nat Hg [mg/L]	0,00	C nat Ca [mg/L]	0,00	

Figura 9. Esquema metodológico para el cálculo de la *Huella Hídrica* de la minería.

Bajo los criterios básicos de cuantificación de *Huella Hídrica*, se debe analizar para los minerales en cuáles etapas de la extracción y beneficio se puede presentar uno o varios de los criterios mencionados anteriormente. Por ejemplo en el caso del oro de veta, básicamente se presenta evaporación en la etapa de cianuración (proceso realizado en tanques al aire libre que toma aproximadamente 20 días), en el caso de las arcillas hay incorporación de agua y posterior evaporación durante el proceso de fabricación de ladrillos y en los materiales de construcción se incorpora agua al material en la etapa de lavado, parte de esta agua se evapora y la otra queda contenida en el material. A continuación se propone la ecuación general para calcular este indicador:

Ecuación 19. Huella Hídrica Azul para minería.

$$HH_{azul} = \frac{Caudal_{entrada} - Caudal_{salida}}{Producción_{mensual}}$$

Para la *Huella Hídrica Gris* es importante aclarar que en el caso que cierta actividad genere varios tipos de contaminantes; por ejemplo, en el beneficio del oro se generan principalmente mercurio, cianuro y sólidos suspendidos totales, se debe estimar el indicador para todos los contaminantes y solo se tendrá en cuenta en el análisis de sostenibilidad el contaminante con mayor HHG. La ecuación propuesta para determinar la *Huella Hídrica Gris* de un contaminante es la siguiente:

Ecuación 20. Huella Hídrica Gris para minería.

$$HH_{gris} = \frac{Carga\ contaminante}{(C_{max} - C_{nat})} = \frac{(Q_{sal} \times []_{sal} - Q_{ent} \times []_{ent})}{(C_{max} - C_{nat})}$$

Dónde:

Q_{ent}= caudal de entrada.

[]_{ent}= concentración del contaminante de análisis a la entrada del proceso.

Q_{sal}= caudal de salida.

[]_{sal}= concentración del contaminante de análisis a la salida del proceso.

C_{max}= concentración máxima del contaminante para mantener la calidad aceptable del efluente receptor. Este dato se puede obtener del estudio de Boulay et al (2011).

C_{nat}= concentración del contaminante en el afluente en condiciones naturales.

Para la extracción y beneficio de oro, se pueden analizar principalmente tres contaminantes mercurio, cianuro y sólidos suspendidos totales. Aunque en esta actividad se generan otros contaminantes, tanto el mercurio y el cianuro son los más críticos por su alto nivel de toxicidad

(considerados contaminantes de interés sanitario) tanto en los ecosistemas como en las mismas comunidades.

En relación a los materiales de construcción (arenas y gravas), el principal contaminante son los sólidos suspendidos totales, provenientes de los procesos de extracción y erosión comunes en esta actividad, mientras que para las arcillas este indicador no se tiene en cuenta ya que el agua que ingresa al proceso queda incorporada en el producto y posteriormente se evapora en el proceso de cocción de los ladrillos (principal producto que se obtiene de las arcillas).

En el caso que exista información para otros contaminantes, se debe estimar el indicador de *Huella Hídrica Gris* para contabilizar el de mayor valor.

5.1.6. Metodología de cuantificación de Huella Hídrica para aplicación a otros sectores

Bajo los conceptos básicos, la *Huella Hídrica* puede ser aplicable a cualquier proceso antrópico partiendo de la caracterización del mismo, que permita identificar el modelo que cuantifique el agua con el cumplimiento de cualquiera de las siguientes características:

- I. Agua que se incorpora en el producto.
- II. Agua que se evapora durante el proceso.
- III. Agua que es vertida en una cuenca diferente de donde fue extraída.

5.2. Conceptualización de resultados de cuantificación de la *Huella Hídrica*

Para cada uno de los sectores se calcularon las *Huellas Hídricas Verde, Azul y Gris*, siguiendo la metodología estándar, construida y particularizada para cada uno de los sectores y de los procesos contemplados en la cuenca, generando resultados básicos de dos tipos: *Huella Hídrica* por unidad de producto y *Huella Hídrica* total por unidad de tiempo.

5.3. *Huella Hídrica* por unidad productiva

Se presentan los resultados por cada uno de los sectores productivos analizados, excluyendo al sector industrial dado que por la variedad de unidades de producción correspondientes al análisis de los subsectores seleccionados, no es posible unificar salvo en términos económicos, por lo que este resultado se presenta en el punto correspondiente al análisis económico de la evaluación de sostenibilidad.

5.3.1. *Huella Hídrica del sector agropecuario*

Es también conocida como el contenido de agua virtual de un cultivo (Zeng et al., 2012; Liu et al., 2009). La *Huella Hídrica* promedio por tonelada de cultivo difiere significativamente entre cultivos y regiones de producción. Los cultivos con un alto rendimiento o biomasa cosechada generalmente tienen una *Huella Hídrica* más pequeña por tonelada que los cultivos con un rendimiento bajo (Mekonnen y Hoekstra, 2010). Estos valores también pueden considerarse como un indicador de eficiencia del cultivo, valores más bajos significan un menor consumo de agua por tonelada producida, mientras que valores altos significan lo opuesto.

Del subsector pecuario.

5.3.2. *Huella Hídrica del sector doméstico*

Los resultados de la *Huella Hídrica* en todos los niveles, están basados en los cálculos arrojados a nivel de las cabeceras municipales que se encuentran dentro de la cuenca.

5.3.3. *Huella Hídrica del sector Industrial*

Se calculó la *Huella Hídrica Azul y Gris* para los sectores priorizados.

5.3.4. *Huella Hídrica del sector hidroeléctrico*

Los resultados de *Huella Hídrica* aquí expresados siguieron el método de cálculo usado por Gerbens-Leenes et al. (2009); Mekonnen & Hoekstra (2011) y Herath et al (2011), dividiendo la evaporación promedio anual por la energía generada promedio del periodo 2000-2010, para cada embalse.

5.3.5. Huella Hídrica del sector minero

Se presentan en este apartado los resultados de la cuantificación de la *Huella Hídrica* para los subsectores de la minería considerados en el estudio: minería de minerales preciosos (oro) y minería de materiales de construcción (Gravas, Arenas y Arcillas).

5.4. Huella Hídrica por unidad geográfica

Se presentan a continuación los resultados multisectoriales de la *Huella Hídrica* estimada para la cuenca del río Porce.

Estos resultados son la base para la evaluación territorial de sostenibilidad de la cuenca y serán presentados a continuación para las 31 cuencas en las que se dividió la cuenca del río Porce.

5.5. La Huella Hídrica a nivel de cuenca

5.5.1. Análisis de Huella Hídrica Verde y Azul - análisis de cantidad

Se presentan a continuación los resultados gráficos de la cuantificación sectorial de los componentes de consumo de la *Huella Hídrica* (HH Verde y HH Azul).

La *Huella Hídrica Azul* representa consumos asociados a una extracción de una fuente superficial o subterránea, por lo que modifica la oferta total de aguas abajo del punto de consumo, de esta forma para analizar el resultado en términos de oferta restante en cada punto de la cuenca, la *Huella Hídrica Azul* se evalúa adicionalmente como una acumulación de consumos en sentido hidrológico en la cuenca.

5.5.2. Análisis de Huella Hídrica Gris - análisis de calidad

En términos de contaminación generada por procesos que se llevan a cabo en la cuenca, se hace mucho más evidente la pertinencia en cuanto a la evaluación del efecto acumulado, dado que la capacidad de asimilación se reduce de manera progresiva contando siempre con una condición de calidad de entrada al proceso que no necesariamente corresponde a la condición de calidad natural.

P1 - 6. FASE III - Análisis de sostenibilidad de la Huella Hídrica

A partir de los resultados de cuantificación (Fase II) se procedió a hacer el análisis de sostenibilidad, para lo cual fue incluido un análisis ambiental, social y económico, evaluando varios criterios en cada uno de ellos, para finalmente establecer el análisis de sostenibilidad compuesto en cada una de las zonas de estudio del proyecto.

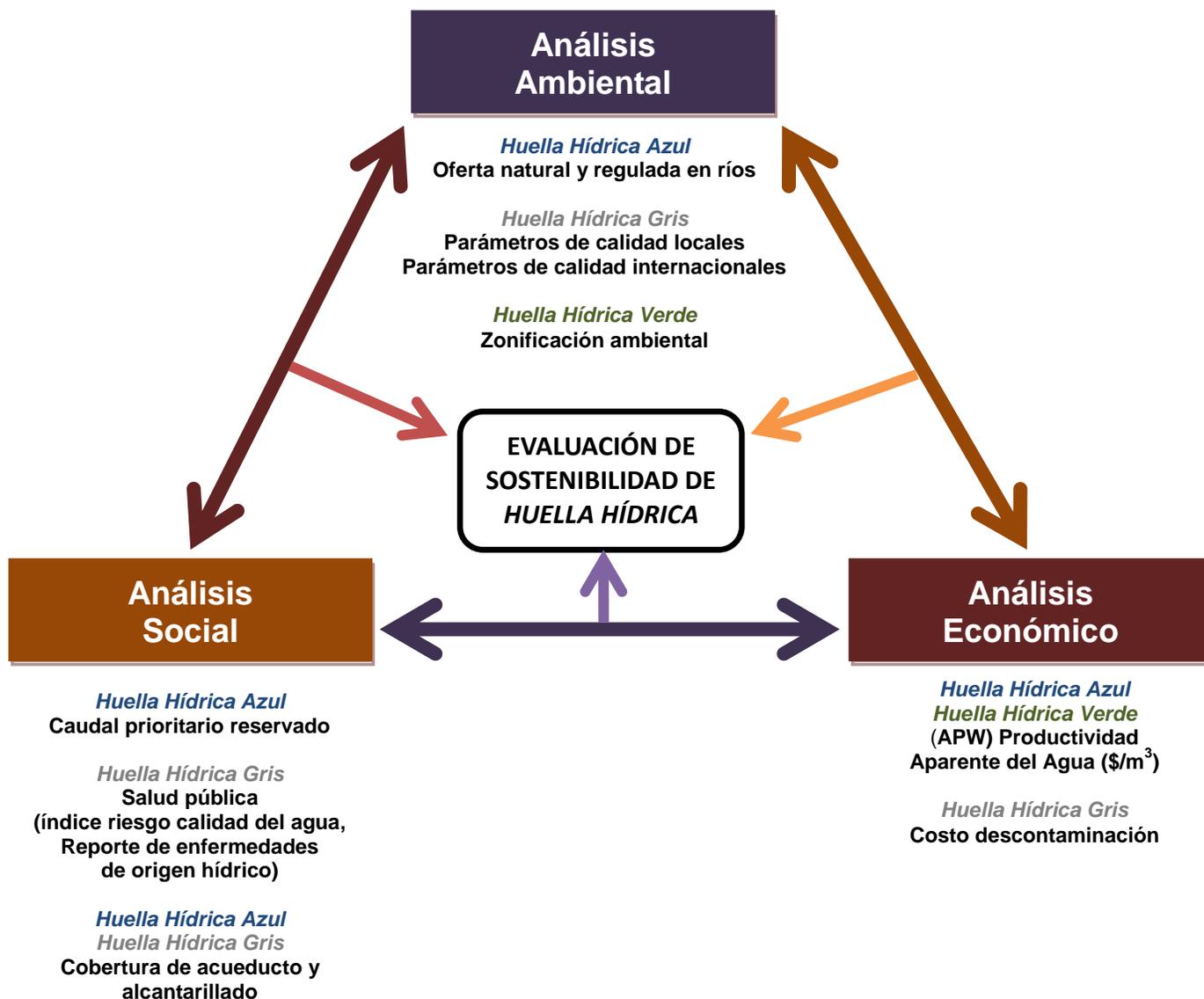


Figura 10. Esquema de evaluación de sostenibilidad de la *Huella Hídrica* en la cuenca del río Porce.

6.1. Análisis hidrológico en cuenca

6.1.1. Modelo hidrológico para estimación de oferta natural

Para estimar la oferta de agua de la cuenca se utiliza un modelo de simulación hidrológica que pueda representar los diferentes procesos que se dan al interior de la cuenca y que pueda modelar la variación de oferta temporal del caudal en diferentes puntos clave de la misma.

Este modelo exige que existan puntos de medición de caudal en la cuenca que permitan calibrar y validar el modelo, puesto que de lo contrario se puede representar una situación físicamente posible pero muy alejada de la realidad de la cuenca.

El modelo debe permitir estimar el caudal natural de la cuenca y debe permitir la corrección de esta serie de caudales para también obtener la información asociada al caudal regulado de la cuenca en los casos donde ésta se presente (embalses, trasvases).

6.1.2. Metodología aplicada para la estimación del caudal ecológico

Siguiendo los lineamientos de la metodología de evaluación propuesta por la WFN, se estimó el caudal ambiental, considerándolo bajo la siguiente definición: *“El caudal que mantiene el funcionamiento, composición y estructura del ecosistema fluvial que el cauce contiene en condiciones naturales, preservando los valores ecológicos, el hábitat natural y funciones ambientales”*⁶.

Existen varios métodos validados para el cálculo del caudal mínimo ecológico. Se recomienda utilizar el método que sea utilizado localmente.

6.2. Análisis de sostenibilidad

Se comparan las tres *Huellas Hídricas* obtenidas en la cuantificación (incluyendo un análisis sectorial y multisectorial) con las características en el territorio asociadas al significado de cada una de las *Huellas*. Este trabajo estuvo enmarcado en los diferentes escenarios actuales, posibles y deseados, según los Planes de Ordenación y Manejo de Cuenca y las metas de conservación y protección ambiental establecido para los ríos y quebradas por parte de las autoridades ambientales que tienen atribución en la cuenca.

Con los tres análisis (ambiental, social y económico) de las tres *Huellas (Verde, Azul y Gris)*, en las 31 cuencas y todos de forma mensual (12 meses por año), se consiguieron analizar un gran número de variaciones y situaciones especiales en toda la cuenca, con lo que se obtuvo finalmente la identificación de puntos clave, temporal y geográficamente explícitos, de forma que puedan ser utilizados para la toma de decisión efectiva, concreta y localizada en el espacio y en el tiempo.

⁶ IDEAM, ENA 2010

6.2.1. Análisis ambiental

6.2.1.1. Marco teórico del análisis ambiental aplicado a la Huella Hídrica

En una cuenca hidrográfica, la *Huella Hídrica* se considera ambientalmente insostenible y crea lo que se llama un “*hotspot ambiental*” cuando las necesidades ambientales por el recurso agua están en franca competencia con las actividades productivas y en algunos casos son excedidas, o cuando la contaminación excede la capacidad de asimilación de residuos que tiene el cuerpo de agua analizado en la cuenca.

Para determinar el grado de afectación por competencia entre las actividades humanas y el ambiente se puede calcular la escasez de agua verde, la escasez de agua azul y el nivel de contaminación del agua como se define a continuación.

6.2.1.2. Análisis ambiental aplicado a la Huella Hídrica Azul

Para calcular la sostenibilidad de la *Huella Hídrica Azul*, se comparó la *Huella Hídrica Azul* multisectorial mensual, con la oferta natural disponible (inalterada sin contar con trasvases, regulación o extracción/consumo y restado el caudal mínimo ecológico) y oferta regulada disponible de la cuenca (situación realista actual que incluye trasvase y regulación y restado el caudal mínimo ecológico).

La oferta natural de agua y el caudal ecológico se estimaron según se explicó anteriormente.

Ecuación 21. Balance hídrico.

$$OA_{azul\text{mensual}} = \text{Oferta natural}_{\text{mensual}} - \text{Caudal ambiental}_{\text{mensual}}$$

Para finalizar, a la oferta de agua azul se le debe restar la *Huella Hídrica Azul* (corresponde a la sumatoria de la *Huella Hídrica Azul* multisectorial), de esta forma se analiza si la cuenca tiene la capacidad de abastecer las necesidades de la población o si por el contrario están demandando mayor cantidad de agua de la que se dispone.

La escasez (E) de agua azul mensual en la cuenca se calculó con la información obtenida anteriormente y aplicando la siguiente ecuación:

Ecuación 22. Índice de estrés hídrico azul.

$$E_{azul\text{mensual}} = \frac{\sum HH_{azul\text{mensual}}}{OA_{azul\text{mensual}}}$$

Si en algún mes la *Huella Hídrica Azul* multisectorial (sumados los 5 sectores para el mismo periodo de tiempo y unidad geográfica), supera la oferta natural o regulada, significa que se identifica un punto clave en la cuenca de insostenibilidad ambiental en términos de *Huella Hídrica Azul*.

6.2.1.3. Análisis ambiental aplicado a la Huella Hídrica Verde

A partir de los datos de las estaciones climáticas en la cuenca del río Porce se estimó la evapotranspiración real (Etr) a escala mensual de la cuenca usando el modelo de Thornthwaite, multiplicado por un factor Kc dependiendo de la cobertura vegetal presente, los valores de Etr hallados fueron interpolados usando el método Krigging y posteriormente se obtuvo un valor promedio por cuenca para cada mes del año.

Asimismo, se calculó el porcentaje y área de las zonas no productivas (territorios artificializados, aguas continentales, áreas húmedas y áreas abiertas sin o con poca vegetación) a partir del mapa de coberturas terrestres para así estimar la Etr mensual correspondiente a las mismas.

La disponibilidad de agua verde mensual (DAV) está dada por la ETr total por cuenca menos la Etr de la vegetación natural, y menos la ETr de las zonas no productivas como lo muestra la siguiente ecuación.

Ecuación 23. Disponibilidad de agua verde.

$$DA_{verde,mensual} = ET_{x,t(verde,mensual)} - ET_{x,t(natural,mensual)} - ET_{x,t(prod,mensual)}$$

Para la evaluación se comparó la *Huella Hídrica Verde* multisectorial mensual (solo los sectores agrícola y pecuario tienen *Huella Hídrica Verde*) con la disponibilidad de agua verde mensual (DAV)⁷. Para este análisis fue estimada la DAV para el escenario de uso del suelo actual realista y para el escenario de uso del suelo deseable según la zonificación ambiental incluida en los planes de ordenamiento vigentes y que estima un área de conservación requerida para la provisión de servicios ecosistémicos de manera adecuada.

Para hallar el índice de escasez de agua verde, se divide entre la sumatoria de la *Huella Hídrica Verde* mensual multisectorial entre la DAV mensual. Valores menores a 1 denotan los meses en los cuales hay sostenibilidad de la *Huella Hídrica Verde*, un valor igual a 0 quiere decir que se está utilizando toda el agua verde disponible, mientras que valores mayores a 1 denotan los meses en los cuales se presentan puntos clave ambientales.

El cálculo del índice de escasez de agua verde se realiza a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 24. Índice de escasez de agua verde.

$$E_{verde,mensual} = \frac{\sum HH_{verde,mensual}}{DA_{verde,mensual}}$$

⁷ Diferencia entre la evapotranspiración real (ETr) de toda el área geográfica de estudio (cuenca) y la Etr de la vegetación natural y de las zonas no productivas. (Hoekstra et al., 2011).

En los casos en los que se identifica una *Huella Hídrica Verde* multisectorial mensual mayor a la DAV en los dos escenarios contemplados, significa que los sectores agrícola y pecuario establecen una competencia por el agua verde con el medio ambiente, poniendo en riesgo la sostenibilidad de los ecosistemas y la provisión de servicios ambientales para ese territorio.

6.2.1.4. Análisis ambiental aplicado a la Huella Hídrica Gris

La sostenibilidad de la *Huella Hídrica Gris* se evalúa de manera similar a la *Huella Hídrica Azul*. La *Huella Hídrica Gris* multisectorial del mayor contaminante, se compara con la oferta real total mensual y no con la oferta natural, de esta manera, se comparó la *Huella Hídrica Gris* multisectorial⁸ mensual con la oferta total actual de la cuenca (se le resta la *Huella Hídrica Azul* mutisectorial porque es agua que ya no está disponible), como caudal disponible para asimilar la contaminación generada por los sectores.

El índice que se calcula en la sostenibilidad de la *Huella Hídrica Gris* se denomina "Nivel de Contaminación del Agua" (NCA) y se calcula mediante la siguiente expresión.

Ecuación 25. Nivel de contaminación del agua.

$$NCA_{mensual} = \frac{\sum HH_{gris,mensual}}{R_{total,mensual}}$$

Un nivel de contaminación del agua de cien por ciento o superior significa que la capacidad de asimilación del contaminante con mayor *Huella Hídrica Gris* ha sido alcanzada o excedida, valores inferiores al cien por ciento indican que aún el afluente tiene capacidad para asimilar determinados contaminantes. Cuando la *Huella Hídrica Gris* multisectorial supera en uno o varios meses al volumen total de oferta actual del río, se identifica que el cuerpo de agua tiene copada y superada su capacidad de asimilación y se identifica un punto clave de no sostenibilidad en términos de calidad.

⁸ La *Huella Hídrica Gris* multisectorial se obtiene como la suma de las *Huellas Hídricas Grises* de los sectores solo cuando se haga referencia a un mismo contaminante.

6.2.2. Análisis económico

6.2.2.1. Marco teórico análisis económico aplicado a la Huella Hídrica

La definición inicial y más general de desarrollo sostenible es la que figura en el denominado informe Brundtland: "es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras."⁹ En el análisis económico, la sostenibilidad ha sido incluida dentro del concepto de economía verde, la cual se define como una economía que busca mejorar el bienestar humano y la equidad social, reduciendo significativamente los riesgos ambientales y la escasez ecológica, es decir, una economía que alcanza bajas emisiones de carbono, eficiencia de los recursos y al mismo tiempo que sea socialmente inclusiva¹⁰.

El Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente –Pnuma- considera que en una economía verde el aumento de los ingresos y la creación de empleos deben derivarse de inversiones públicas y privadas destinadas a reducir las emisiones de carbono y la contaminación, a promover la eficiencia energética y a evitar la pérdida de diversidad biológica y de servicios de los ecosistemas. Dichas inversiones han de catalizarse y respaldarse con gasto público selectivo, reformas políticas y cambios en la regulación. El camino hacia el desarrollo debe mantener, mejorar y donde sea necesario, reconstruir el capital natural como activo económico fundamental y fuente de beneficios públicos, especialmente para las personas desfavorecidas cuyo sustento y seguridad dependen de la naturaleza¹¹.

Como los recursos hídricos conforman un activo económico, éstos deben ser gestionados eficientemente y de una manera sostenible (Gómez Gómez, 2009). Sin embargo, el concepto de "economía verde" no sustituye al de "desarrollo sostenible", pero hay un creciente reconocimiento que el logro de la sostenibilidad requiere contar con una economía adecuada y correcta. Para realizar la transición a una economía verde se requieren una serie de circunstancias favorables específicas, las cuales consisten en normativas, políticas, subsidios e incentivos nacionales, así como el mercado internacional, la infraestructura jurídica y los protocolos comerciales y de ayuda.

Para determinar qué tan sostenible es el uso del agua desde el punto de vista económico es necesario explorar como la *Huella Hídrica* puede informar sobre la sostenibilidad y qué recomendaciones son necesarias para alcanzar una economía verde en la cuenca. En estos términos, para la definición de la sostenibilidad económica a partir del análisis de la *Huella Hídrica*, la metodología aplicada plantea que es necesario definir unos criterios que lleven a la identificación de los *hotspots* económicos. Según esta aplicación metodológica, la *Huella Hídrica* total de una cuenca es económicamente insostenible y por lo tanto crea un *hotspot* económico cuando el agua no se asigna o no es utilizada de una forma económicamente eficiente.

⁹ Brundtland Report (World Commission, 1987)

¹⁰ <http://www.unep.org/spanish/wed/greeneconomy/>

¹¹ http://www.pnuma.org/eficienciarecursos/documentos/GER_synthesis_sp.pdf

Los beneficios económicos asociados a una *Huella Hídrica* (*Verde, Azul o Gris*) que resultan de usar el agua para un fin determinado deben sobrepasar el costo total asociado a esta *Huella Hídrica*, incluidas externalidades, costos de oportunidad y otras primas de escasez de agua. El agua en una cuenca debe ser asignada de forma económicamente eficiente a los diferentes usuarios (eficiencia de asignación) y cada usuario debe utilizar su agua asignada de manera eficiente (eficiencia productiva). Cuando el precio del agua que paga el usuario está por debajo de su coste económico real, a menudo esto se traduce en un uso ineficiente de agua, por lo que puede ser importante considerar el porcentaje que se cobra a los usuarios del costo total del agua (Hoekstra et al. 2010).

En este marco, se han realizado algunas aproximaciones en las que se analiza la *Huella Hídrica* extendida de la cuenca Guadalquivir (Samoral et al. 2011) y realizan un análisis cuantitativo y económico de los recursos hídricos, partiendo de un análisis del valor económico del agua y la tierra. En el caso de la agricultura toman en cuenta el concepto de productividad aparente del agua (AWP) para estimar el valor de producción a precios corrientes por unidad de agua consumida. Este valor lo estiman dividiendo el precio de mercado del producto por su *Huella Hídrica Azul*. Para el sector doméstico, tomaron en cuenta la tarifa del agua (uso urbano y uso industrial), el valor añadido generado por la actividad turística y el valor de la producción eléctrica generada para el sector energético.

También calculan la productividad aparente de la tierra (APL), la cual representa el valor económico a precios corrientes por hectárea de tierra cultivada y se calcula multiplicando el precio de mercado del producto por su rendimiento; tanto en cultivos en secano como en regadío. Otro indicador es el incremento de productividad del agua de riego, definido como la diferencia de productividad bruta o aparente de la tierra en regadío y secano dividida por el volumen de agua de riego aplicado. Este indicador muestra la variación de productividad por cada metro cúbico de agua de riego aplicado, comparándose un cultivo de riego con secano.

Lo anterior es una muestra de los pocos ejemplos que han sido tomados como referencia previa a este estudio, por lo que queda claro que la sostenibilidad económica a partir de la *Huella Hídrica* ha sido poco estudiada y requiere de estudios más profundos.

Para conocer cómo la *Huella Hídrica* puede informar sobre la sostenibilidad económica debe hacerse una búsqueda de información sobre aspectos económicos de la cuenca como qué actividades productivas se llevan a cabo en la cuenca, en qué zonas, cuáles son los principales bienes que se producen y qué actividades hacen un uso intensivo del recurso.

6.2.3. Análisis social

6.2.3.1. Marco teórico análisis social aplicado a la Huella Hídrica

El análisis social se elabora bajo un marco conceptual según el cual la sostenibilidad social se constituye como el elemento central de la sostenibilidad integral, debido a que busca

principalmente crear y mantener la calidad de vida de las personas. La sostenibilidad económica y ambiental son de gran importancia, pero ambas pueden ser concebidas como medios más que fines en sí mismos, ya que al trabajar hacia la sostenibilidad económica y ambiental estamos trabajando implícitamente hacia una sostenibilidad de la sociedad.

El análisis social incluye criterios propios, tales como: la protección de la salud física y mental y el trato justo de todos los grupos de interés en un territorio, el empoderamiento comunitario, y la provisión de servicios esenciales (McKenzie, 2004), por tanto, la evaluación de un territorio en búsqueda de una sostenibilidad social debe cumplir con los siguientes epígrafes:

- Proteger el bienestar mental y la salud física de todos los actores
- Fomentar la participación
- Promover el trato justo
- Proveer de servicios esenciales a toda la población

Al vincular el análisis social a escala de cuenca, se tiene que existen tres niveles de priorización para la asignación del recurso hídrico: un primer nivel corresponde al agua para las funciones de los ecosistemas y necesidades humanas, un segundo nivel asigna el agua a la población en estado de pobreza y finalmente un nivel para las actividades productivas (IWMI, 2007). Este enfoque aplicado al análisis de *Huella Hídrica* debe por tanto brindar elementos para la toma de decisiones sobre la asignación del recurso hídrico en la cuenca e identificación de *hotspots* o áreas críticas en niveles de calidad de vida directamente relacionada con el recurso hídrico. Igualmente reconoce las limitaciones para dar cuenta de una sostenibilidad social, pero sí la capacidad para informar sobre ésta en la cuenca.

P1 - 7. FASE IV - Formulación de estrategias de respuesta

Esta última fase describe el proceso de construcción gradual y colectiva de las acciones necesarias para aportar a la solución de las problemáticas identificadas en la cuenca del río Porce, y que fueron el resultado de la evaluación de la *Huella Hídrica* en el territorio. Este proceso contó con la participación de diferentes instituciones públicas, académicas, económicas, comunitaria y organizaciones no gubernamentales que aportaron su conocimiento y su experiencia durante todo el proceso.

7.1. Conceptualización de líneas de respuesta

7.1.1. Estrategia de lineamientos de política pública

La propuesta de lineamientos se formula desde dos enfoques integrales y territoriales: un primer enfoque dirigido a reconocer y actuar sobre las categorías de uso del agua para la gestión integral del recurso hídrico, donde se deben trabajar áreas estratégicas e interdependientes sociales, económicas, ambientales, institucionales, tecnológicas y de conocimiento; el segundo enfoque, propone estrategias por cuenca que apuntan a reconocer las particularidades y formular acciones concretas para puntos críticos del territorio.

7.1.2. Estrategia de alianza público – privada

Los retos actuales de la humanidad son muy complejos e interdependientes, para que un solo actor pueda resolverlos individualmente, por lo cual requieren ser gestionados con la participación de varios actores. Si bien el sector público es el responsable de garantizar el acceso a servicios y bienes públicos, la participación del sector privado y de las organizaciones de la sociedad civil son indispensables para lograr los objetivos de desarrollo propuestos y garantizar una vida digna para todos.

Sin lugar a dudas un elemento esencial para erradicar la pobreza es el desarrollo y el crecimiento económico ya que su impacto no solo tiene la capacidad de generar más empleo, aumentar el ingreso per cápita e incrementar el gasto unifamiliar en salud y educación, sino que puede mejorar el acceso a bienes y servicios básicos de las comunidades pobres, por lo tanto el futuro global de la humanidad está íntimamente ligado al futuro del mundo empresarial y las empresas no pueden aislarse de los retos que afectan a la humanidad, ya que es parte intrínseca de ellos, y su futuro dependerá igualmente de cómo se resuelvan.

Es por ello que es indispensable la creación de un nuevo concepto de desarrollo que integre a los actores principales en el proceso de toma de decisiones y en la formulación de las soluciones necesarias para superar los límites de la gestión y la gobernanza, que limitan el progreso humano y condicionan el acceso de las comunidades pobres a los bienes y servicios públicos. El nuevo concepto de desarrollo implica el establecimiento de alianzas fuertes y efectivas entre instituciones públicas y privadas que canalicen eficientemente los recursos y promuevan soluciones conjuntas.

7.1.2.1. *Cómo operan las asociaciones público-privadas APP*

Las asociaciones público-privadas APP se establecen como estructuras de cooperación voluntaria entre actores del sector público y del sector privado, en las cuales se comparten responsabilidades, conocimiento técnico, experiencia y recursos; teniendo en consideración las capacidades de cada parte.

Las APP cuentan con un marco legal a través de la Ley 1508 de 2012; en el artículo 3 se establecen los dos modelos de alianzas público-privadas que se pueden presentar en el marco de esta Ley así, los contratos que se realizan para proyectos de iniciativa pública y con recursos públicos, y aquellos que sean estructurados a partir de una iniciativa privada en la que el objetivo es que la entidad pública sea un socio que con sus aportes facilite la realización del proyecto, y sea el particular quien haga la inversión de capital a cambio del derecho a la explotación económica de esa infraestructura o servicio, en las condiciones que se pacte, por el tiempo que se acuerde.

Es necesario tener en cuenta que la Ley solo se aplica a las APP cuyo monto de inversión sea superior a seis mil salarios mínimos mensuales legales vigentes, y no se aplicará a las sociedades de economía mixta con participación del Estado inferior al 50%, las empresas de servicios públicos domiciliarios y las empresas industriales y comerciales del Estado, cuando desarrollen actividades comerciales en competencia con los sectores privado o público en un mercado regulado.

La entidad contratante debe justificar la utilización del mecanismo APP según los parámetros y concepto favorable del Departamento Nacional de Planeación (DNP). En el caso en que la entidad sea de nivel departamental o municipal la aprobación estará a cargo de la entidad de planeación respectiva.

De otro lado, los contratos con entidades privadas tienen soporte en el Artículo 355 de la Constitución, el cual estipula que el Gobierno podrá, con recursos de los respectivos presupuestos, celebrar contratos con entidades privadas sin ánimo de lucro de reconocida idoneidad, con el fin de impulsar programas y actividades de interés público acordes con el Plan Nacional de Desarrollo (PND), planes de desarrollo territoriales y municipales, o planes sectoriales.

Para asegurar que las alianzas generen un valor adicional a las políticas de cooperación ya establecidas, es necesario identificar los objetivos de desarrollo que las políticas públicas van a priorizar para crear una coherencia de actuaciones y obtener los resultados esperados; una vez definidos los objetivos y qué es lo que se quiere hacer, es posible identificar las organizaciones y los grupos que puedan estar interesados en colaborar en la alianza, para empezar a crear el marco conceptual de la misma.

Cuando ya se han elegido los actores de la alianza es importante evaluar las experiencias relevantes existentes y los mecanismos o herramientas disponibles en la gestión de alianzas parecidas para

crear sinergias con las iniciativas existentes y reducir los costos de implementación y maximizar la eficiencia de los programas y actividades desarrolladas.

Con la colaboración de los actores de la alianza y la información obtenida se puede diseñar el plan de acción para implementar la alianza estratégica, la cual debería incluir los elementos que se enuncian a continuación.

Los objetivos principales:

- Las áreas de acción que se desarrollarán
- El papel que ejercerá cada miembro
- El tipo de relación contractual que se deseará
- Todos los aspectos relacionados con la puesta en marcha de la alianza
- La búsqueda de financiación para su desarrollo
- Crear un sistema de medición y evaluación que permita valorar el impacto y efectividad de la alianza

En el siguiente cuadro se presentan las contribuciones que cada uno de los actores de la alianza puede aportar.

Sector Privado	<ul style="list-style-type: none"> - Escalabilidad, por medio de su cadena de valor, red de distribuciones, etc. - Recursos financieros (cofinanciamiento), tecnológicos, logísticos - Transferencia de tecnología y conocimiento - Especialización en gestión, mercadeo e innovación - Experiencia en la creación de riqueza y empleo - Capacitación de personas
Sector Público	<ul style="list-style-type: none"> - Amplia gama de activos, empresas e instituciones - Profundo conocimiento de la realidad social; provee acceso a los sectores más marginales - Visión de desarrollo sostenible - Capacidad de intervención en contextos complejos - Productor de datos e información primaria - Extensa red de contactos - Ofrece una estructura legal y brinda legitimidad - Genera el espacio necesario para que se integre a todos los agentes que pueden contribuir a una iniciativa - Identifica y brinda incentivos - Institucionaliza iniciativas (crea marcos legales)
Sociedad Civil Organizada	<ul style="list-style-type: none"> - Experiencia en creación de oportunidades - Es integradora e imaginativa - Guardiana del bien común - Proporciona apoyo y servicios - Sirve de intermediario entre el gobierno y empresas - Presenta propuestas que pueden servir de experiencias piloto - Identifica necesidades y se hace escuchar - Conocimiento sobre los problemas sociales y expectativas en las comunidades

Fuente: CARDONA BRENES, Randholp y otros. Guía metodológica para la formación y gestión de alianzas público-privadas para el desarrollo. Fundación para la sostenibilidad y la equidad. 1a edición. 2010. San José C.R.

En general las APP mejoran el acceso al conocimiento y las tecnologías y permiten el intercambio de habilidades y experiencias específicas en temas como la biodiversidad y la preservación.

PARTE 2 - EJEMPLO DE APLICACIÓN DE METODOLOGÍA EN EVALUACIÓN DE *HUELLA HÍDRICA* EN LA CUENCA DEL RÍO PORCE

P2 - 1. Etapa 1: gestión de la información y generación de línea base

1.1. Etapa 2.1: identificación, priorización y recolección de información secundaria

Los sectores analizados en la evaluación de la *Huella Hídrica* son los que se han considerado prioritarios en la cuenca, desde el punto de vista de la producción asociada y del impacto generado sobre el recurso hídrico, de esta manera fueron considerados los sectores agropecuario, industrial, doméstico, hidroeléctrico y minero.

La información secundaria recopilada se centró en la información sectorial y de reconocimiento del entorno físico de evaluación.

1.1.1. Sector agropecuario

La agricultura es en el ámbito global el principal consumidor de agua y una de las principales fuentes de contaminación difusa que afecta a los cuerpos de agua en el planeta.

La *Huella Hídrica* es un concepto que está íntimamente ligado con el sector agropecuario, siendo éste el sector natural de aplicación del concepto. En este sentido, la información base para caracterizar este sector se basa en el conocimiento de tres grupos de variables, las dos primeras (clima y suelo) hacen referencia al conocimiento del entorno, la tercera hace referencia al elemento que por acción humana genera interacción con el entorno y por tanto causa una *Huella*.

- **VARIABLES CLIMÁTICAS Y DE PRECIPITACIÓN**

Es un conjunto de variables que permite calcular la radiación solar ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$) y la Evapotranspiración de Referencia (ET_o) ($\text{mm}/\text{día}$), ésta última por el método de Penman-Monteith. Esta información es obtenida mediante estaciones climáticas presentes en la zona de estudio, las cuales deben medir las siguientes variables:

- Temperatura mínima (°C)
- Temperatura máxima (°C)
- Humedad (%)
- Viento ($\text{km}/\text{día}$)

- Horas de sol (horas/día)
- Precipitación (mm)

La base de datos CLIMWAT 2,0 (FAO) proporciona los datos climáticos necesarios en el formato que requiere el modelo CROPWAT 8,0. No obstante, no proporciona datos para años específicos, sino que presenta datos promedio de 30 años. Otra fuente de información disponible es LocClim 1,1 (FAO), que proporciona estimaciones de las condiciones climáticas medias en lugares para los cuales no se dispone de observaciones.

También se puede utilizar redes de datos climáticos de imágenes satelitales con una resolución espacial adecuada al estudio que se esté realizando, y que están disponibles gratuitamente.

- **Suelos**

Incluye las características del suelo donde se desarrolla el cultivo, de manera que se pueda hacer un balance hídrico completo y calcular posteriormente las necesidades de riego de los cultivos.

Las variables requeridas por el CROPWAT 8.0 para la caracterización del suelo son agua disponible total (ADT), tasa máxima de infiltración, profundidad radicular máxima, agotamiento inicial de la humedad del suelo y humedad del suelo disponible inicialmente.

- Agua disponible total (ADT): representa la cantidad total de agua disponible para el cultivo, se expresa en mm por metro y se define como la diferencia en el contenido de humedad del suelo entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP).
- Tasa máxima de infiltración: representa la lámina de agua que puede infiltrarse en el suelo en un periodo de 24 horas, en función del tipo de suelo, pendiente y la intensidad de la precipitación o del riego, corresponde asimismo a la conductividad hidráulica del suelo a saturación (FAO, 2006).
- Profundidad radicular máxima: profundidad máxima a la cual las raíces tienen fisiológica, y son capaces de extraer agua.
- Agotamiento inicial de la humedad del suelo: indica la humedad o sequedad del suelo al inicio de la época del cultivo. El valor por defecto de 0% representa un perfil de suelo a CC y 100% es un suelo en PMP.

- **Cultivos**

Estas variables permiten caracterizar el requerimiento de agua de cada cultivo, dependiendo de sus características morfológicas (altura, profundidad de raíces) y de su etapa de crecimiento.

Se debe procurar tener datos locales. La variedad de cultivos y el período de cultivo depende en gran medida del clima y de muchos otros factores como las costumbres locales, las tradiciones, la estructura social, las normas y políticas existentes. Por lo tanto, los datos de los cultivos más fiables son los datos obtenidos de reportes e investigaciones locales. Se recomienda consultar fuentes primarias en los municipios y gremios de productores.

Las variables de cultivos que se requieren son las siguientes:

- Fecha de siembra y cosecha: se refiere a la fecha exacta de siembra y cosecha de cada uno de los cultivos a analizar.
- Coeficiente del cultivo (k_c) y fases de crecimiento: el coeficiente de cultivo describe las variaciones de la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo a medida que se van desarrollando, desde la siembra hasta la cosecha, por ser dependiente de las características anatómicas, morfológicas y fisiológicas de la planta (Cely, 2010). El k_c varía con el periodo de crecimiento de la planta y con el clima; igualmente, depende de la capacidad de la planta para extraer agua del suelo, según su estado de desarrollo vegetativo (FAO, 2006).
- Profundidad radicular: define la capacidad de los cultivos para aprovechar la reserva de agua del suelo. En el CROPWAT 8.0 dos valores son necesarios para su estimación:
 - Profundidad radicular en la etapa inicial: normalmente se encuentra entre 0,25 – 0,30 m y representa la profundidad efectiva del suelo a partir de la cual las pequeñas plántulas extraen el agua.
 - Profundidad radicular en el desarrollo pleno al inicio de la etapa de mediados de desarrollo.
- Fracción de agotamiento crítico (p): el factor de agotamiento crítico (p) representa el nivel crítico de humedad en el suelo a partir del cual ocurre estrés por falta de agua. Esto afecta a la evapotranspiración del cultivo y su producción. Los valores se expresan como una fracción del agua disponible total (ADT) y, en general, varían entre 0,4 y 0,6, presentando valores más bajos para cultivos sensibles con sistemas radiculares superficiales bajo condiciones de alta evaporación, y valores

más altos para cultivos densos, con raíces profundas y bajos índices de evaporación (FAO, 2006).

- Factor de respuesta de la productividad del cultivo (Ky): el factor Ky describe la reducción relativa de la productividad en función a la reducción de la ETc (evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar) generada por la falta de agua.
- Altura del cultivo: este parámetro se ha introducido en CROPWAT 8.0 con el fin de permitir el ajuste de los valores del coeficiente de cultivo bajo condiciones no estándar.

1.1.2. Sector doméstico

Un volumen importante de agua en el ámbito mundial es consumida y contaminada por el sector doméstico (WWAP, 2009), produciendo una afectación en el ciclo hidrológico del agua, bajo una deficiente gestión de las aguas residuales.

Esta define la *Huella Hídrica* de un grupo de consumidores como el volumen total de agua que es consumida o contaminada en la producción de bienes y servicios usados por el consumidor. Lo anterior implica que la *Huella Hídrica* en el sector doméstico debe abarcar no solo el consumo de agua de los usuarios, sino también los consumos o la contaminación generada en las etapas de potabilización y distribución de la red de acueducto. Esto permitirá realizar un análisis a nivel de cuenca y sobre las interacciones entre los diferentes tramos de ella, en aspectos que pueden generar efectos ambientales importantes para determinadas áreas ubicadas al interior de la misma, como es el trasvase de agua.

Para el caso de la cuenca del río Porce, los datos de consumos y vertimientos de los usuarios fueron obtenidos para los años 2005 a 2011 y están representados por un consumo de agua dentro de la red de acueducto y una descarga generalmente mediante la red de alcantarillado dependiendo de la cobertura de este servicio en cada municipio. En cuanto a la gestión de la información relacionada con las etapas de potabilización y distribución, la información primaria fue suministrada directamente por las empresas prestadoras del servicio, quienes son actores clave para el proceso, al igual que las autoridades ambientales con jurisdicción en la cuenca; se debe realizar pruebas pilotos, eventos de socialización y visitas a acueductos, con el fin de obtener la información necesaria

Se debe priorizar los lugares donde su cabecera municipal esté en un 100% comprendida en ésta, realizando para cada uno el cálculo de *Huella Hídrica Azul y Gris*.

1.1.3. Sector Industrial

Debido a la diversidad del sector industrial, para el cálculo de la *Huella Hídrica* se caracteriza de la siguiente forma:

- Caracterizar el sector industrial manufacturero atendiendo a la clasificación del Código Industrial Internacional Uniforme-CIIU, el cual comprende varias subdivisiones dentro de un mismo subsector. Atendiendo a la disponibilidad de información y al alcance del estudio, se debe elegir hasta qué subdivisión se evaluará la *Huella Hídrica*.
- Consultar bases de datos con respecto a la cantidad de establecimientos de cada subsector, la producción por unidad, la producción bruta y las ventas. Con esta información se puede determinar qué subsectores no tienen actividad económica dentro de la cuenca y priorizar los demás sectores.

Las bases de datos se pueden consultar en las cámaras de comercio, las asociaciones de empresarios, los departamentos administrativos de estadísticas, etc.

- Se debe priorizar los subsectores contando con dos criterios básicos, uno con respecto a la producción bruta y otro con respecto al impacto ambiental.
 - Con el primer criterio se definió como excluidos aquellos sectores con una producción bruta menor al 5% del total de la zona de estudio.
 - Con el criterio ambiental se incluyen aquellos subsectores que quedaron excluidos pero que tienen relevancia ambiental. Los factores a tener en cuenta para determinar lo referente a lo ambiental son definidos según la información con la que se cuente en la zona de estudio, teniendo en cuenta que el consumo de agua evaporada o incluida en el producto es un factor importante.
- Análisis de los sectores especiales, como sectores manufactureros que no tienen consumo de agua para uso industrial, pero debido a su gran número de empleados debe considerarse el consumo de agua doméstico y su respectivo vertimiento. Un ejemplo de estos sectores especiales es el de la Confección cuya actividad corresponde solo a la confección de la prenda y el consumo de agua es debido al personal ocupado, por lo cual la *Huella Hídrica Azul* y la *Huella Hídrica Gris* se asignan al sector doméstico.
- Determinación de indicador para cada subsector, debido al gran número de empresas que componen los sectores priorizados, se hace necesario calcular un indicador tanto para la *Huella Hídrica Azul*, como la *Huella Hídrica Gris* en cada subsector manufacturero.

Para determinar el indicador se debe elegir un tamaño de muestra representativo considerando la disponibilidad de los datos y que sea significativo para el estudio.

- Gestión de la información necesaria para el cálculo de la *Huella Hídrica*, la principal fuente de información se puede obtener a través de los registros de las autoridades ambientales y de encuestas directas a las empresas seleccionadas.

La información requerida es: el volumen de agua extraída, las fuentes de agua, el volumen de agua vertido, la fuente receptora, la caracterización del agua de entrada y del vertimiento y la producción por unidad. Se debe registrar también la unidad de tiempo de esta información ya sea año o mes y el lugar en el cual está ubicada cada empresa.

Para el cálculo de la *Huella Hídrica Gris* es necesario obtener los datos de la caracterización natural sin intervención antropogénica de la fuente receptora y el estándar de calidad de agua del contaminante (la concentración máxima aceptable). Para obtener valores representativos se deben registrar los datos de los últimos cinco años.

1.1.4. Sector hidroeléctrico

La evaporación de los embalses se considera como pérdidas del ecosistema (consumo de agua) en términos de la *Huella Hídrica* (Herath et al., 2011; Mekonnen & Hoekstra, 2011). Para la caracterización del sector hidroeléctrico es requerida la siguiente información:

- **Clima**

La evaporación de los embalses varía con la temperatura, la velocidad del viento y la humedad del aire por encima del reservorio (Gleick, 1994). Para capturar dicha variabilidad y obtener cálculos más cercanos a la realidad es necesario tener datos climatológicos lo más cercano posible a los embalses de interés. Para esto se debe recurrir a estaciones climatológicas locales cercanas a los embalses de interés, o a imágenes de satélite disponibles, la base de datos Climwat 2.0 de la FAO tiene disponible 35 estaciones dentro del territorio colombiano.

- **Área inundada**

Para determinar la cantidad de agua evaporada de un embalse o cuerpo de agua es necesario determinar el área del espejo de agua que tienen los mismos. En las centrales hidroeléctricas se presentan fluctuaciones de caudal, dependiendo del régimen climático que haya en la zona donde estén ubicados, esto hace que la potencia disponible varíe en función de esos cambios en la descarga. Asimismo, la demanda fluctúa a escala diaria y su efecto es significativo en las diferentes horas del día; sin embargo, su fluctuación en los diversos periodos del año es débil, por otro lado los cambios del caudal tienen un efecto contrario, su variación diaria es insignificante comparada con su variación en diferentes periodos del año (Taylor, 2004).

Para hallar el área inundada de un embalse determinado a una escala temporal que permita observar las fluctuaciones en el área inundada, se debe contar con su curva de calibración volumen-nivel-área, mediante la cual es posible determinar las áreas que serán inundadas para cualquier altura de la presa.

- **Generación de energía**

Asimismo la generación de energía de cada embalse es variable durante los diferentes meses del año, por lo tanto es necesario conocer el promedio mensual de generación de energía de cada embalse por separado. Para acceder a esta información se debe recurrir a las empresas operadoras de cada uno de los embalses, a bases de datos de gestión operativa y comercial nacional, a los entes reguladores de energía, a los ministerios de energía, entre otros.

1.1.5. Sector minero

A continuación se hace un listado de la información base que puede ser útil tanto para estimar la *Huella Hídrica* como para su respectiva espacialización.

- Producción de minerales por unidad de análisis
- Consumos de agua
- Caudales de entrada y salida
- Contabilización de pérdidas de agua
- Caracterización de aguas (a la entrada y salida de los procesos)
- Títulos mineros (tipo de material a explotar, área, coordenadas)
- Concesión de caudales
- Permisos de vertimientos
- Aporte de cargas para los contaminantes a evaluar en la *Huella Hídrica Gris*

1.2. Etapa 1.2: identificación, priorización y recolección de información primaria

Con el fin de complementar y mejorar la información secundaria recopilada, fueron diseñados y distribuidos en la población meta, unas encuestas sectoriales que fueron utilizadas como herramientas de campo para la recolección de información primaria.

1.3. Etapa 1.3: generación de información SIG con base en información secundaria y primaria

El cálculo de la *Huella Hídrica* y de su sostenibilidad en la cuenca del río Porce, estuvo apoyado en los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se conformó el SIG del proyecto mediante la recopilación de información geográfica, especialmente fuentes secundarias de tipo vector o raster, la cual se extrajo de diferentes instituciones participantes en el proyecto, también se generaron algunas capas correspondientes a información relevante. Esta información fue organizada en cuatro grandes grupos, el primero de ellos corresponde a la información de base, el segundo a la información hidroclimática, el tercero a la información de orden social y económica y el último a la información sectorial. Cada uno de estos grupos está en un directorio, en el que se pueden encontrar todos los archivos utilizados y necesarios para el cálculo de la *Huella Hídrica* y de su sostenibilidad en la cuenca del río Porce. Además se conformó una Geodatabase, soportada en el software ArcGis 9.3.1, con el fin de organizar la información vectorial de tal forma que fuera de fácil acceso para los usuarios. Todos los objetos geográficos se encuentran en el sistema de coordenadas proyectado, adoptado para Colombia (Magna_Colombia_Bogota).

Uno de los principales aportes del SIG al proyecto consistió en la localización de los diferentes sectores en la cuenca. Para esto se utilizó el mapa de coberturas terrestres según la metodología *Corine Land Cover*, tomado del Levantamiento Semidetallado de las Coberturas del Departamento de Antioquia (IGAC, 2007).

Figura 11. Localización de los sectores en la cuenca del río Aburrá.

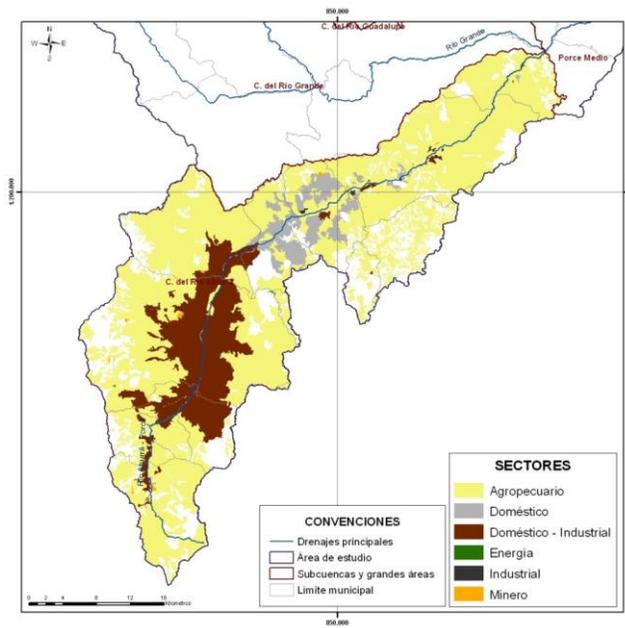


Figura 12. Localización de los sectores en la cuenca del río Grande.

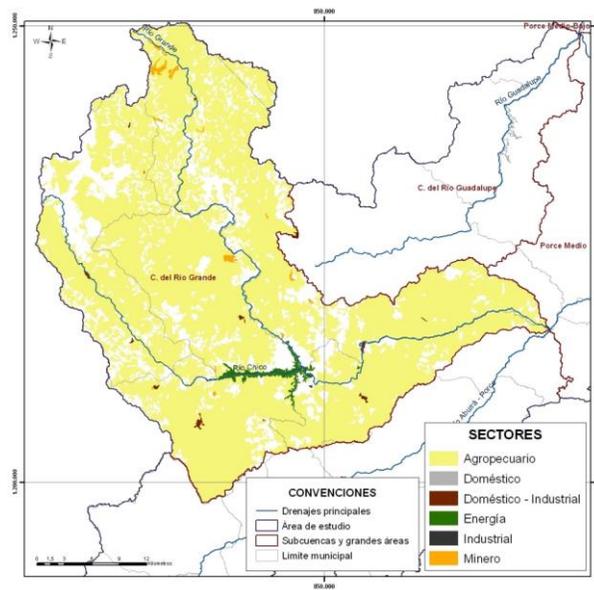


Figura 13. Localización de los sectores en la cuenca del río Guadalupe.

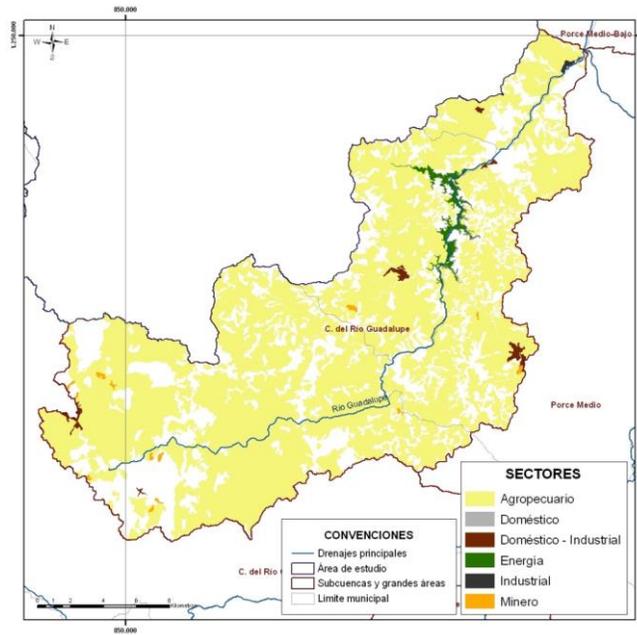


Figura 14. Localización de los sectores en el tramo Porce medio.

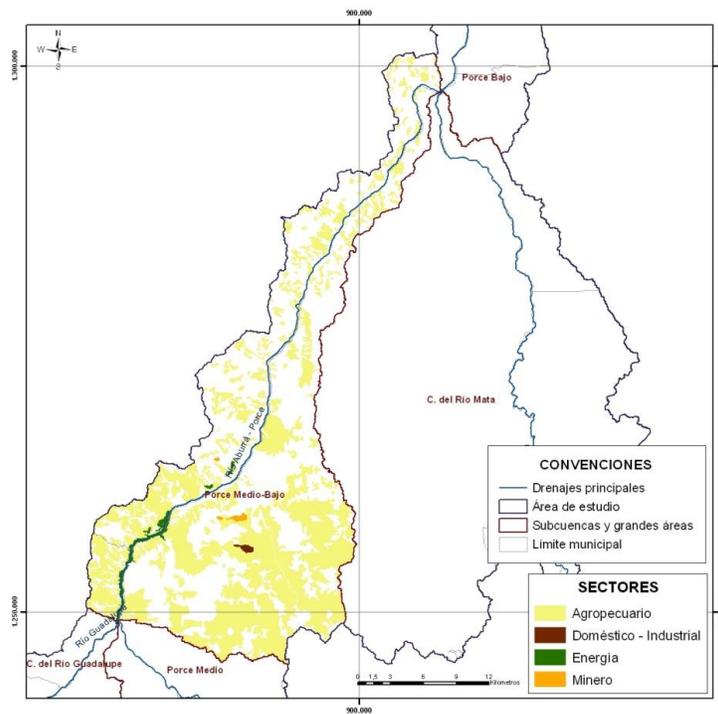


Figura 15. Localización de los sectores en el tramo Porce medio bajo.

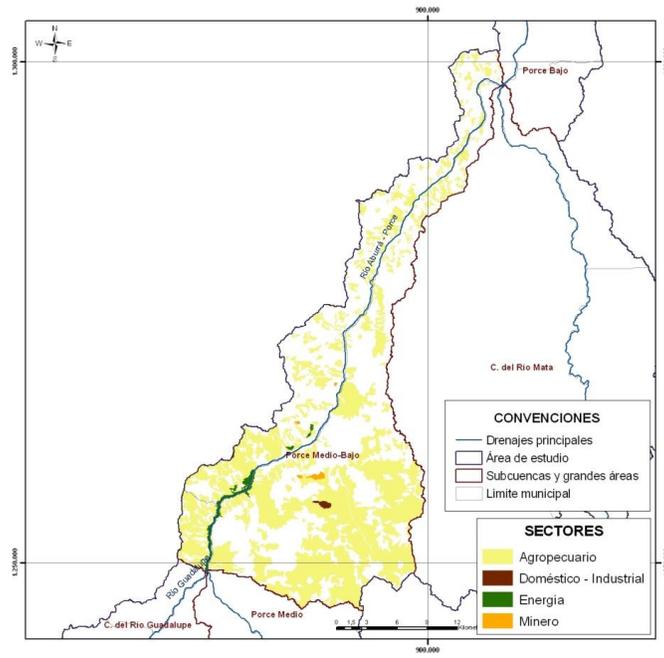


Figura 16. Localización de los sectores en la cuenca del río Mata.

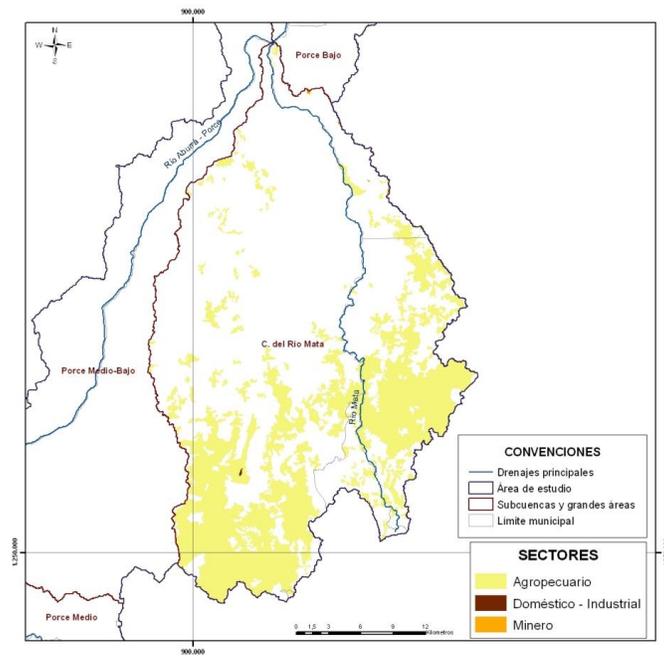
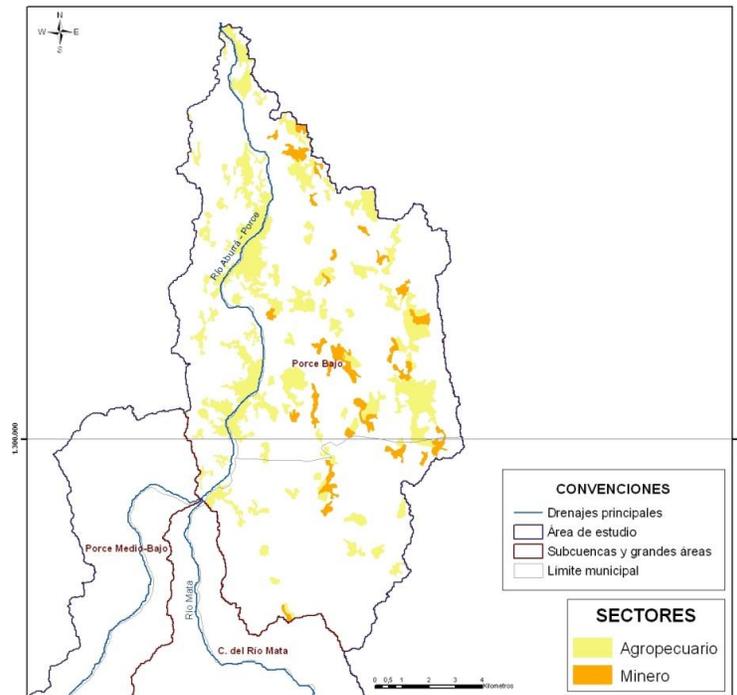


Figura 17. Localización de los sectores en el tramo Porce bajo



La información geográfica recopilada fue utilizada para diferentes procesos durante el desarrollo del proyecto. Mediante el SIG, fue posible la obtención de diferentes variables y parámetros esenciales para el cálculo de este indicador. A continuación se mencionan algunos de los procesos más relevantes para el análisis sectorial.

1.3.1. Los SIG en la cuantificación de sector agrícola y pecuario

En el sector agropecuario los SIG cumplieron un papel fundamental, desde el momento en que se recolectó la información, así como en las metodologías empleadas y en la cuantificación del indicador para este sector. Para la cuantificación de la *Huella Hídrica* en el sector agrícola y pecuario, se empleó el modelo CROPWAT 8.0 (FAO, 2010), para el cual se requieren diferentes tipos de variables de orden climático, de cultivos y en cuanto a los suelos.

Con el fin de hallar las variables del clima necesarias para la operación del CROPWAT 8.0, se identificaron tres zonas climáticas en toda la cuenca (clima frío, clima medio y clima cálido), éstas se hallaron con ayuda del mapa de zonas de vida para Antioquia, diferenciando cada zona especialmente por el piso altitudinal. Por medio de una unión entre la capa de las zonas climáticas para toda la cuenca y la capa de límites municipales, se logró la diferenciación de los municipios por diferentes climas. Con los municipios diferenciados por zonas climáticas, se procedió por

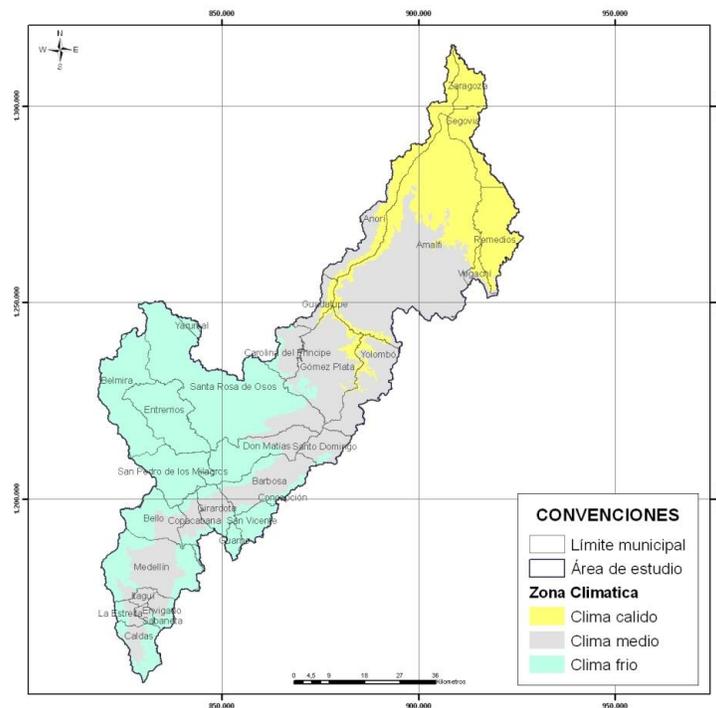
medio de ArcGis 9.3.1 a hallar valores promedios para cada variable climática, este procedimiento se llevó a cabo por medio de interpolación Kriging.

En cuanto a la distribución de los cultivos en la cuenca, se combinó la información de los cultivos presentes en los municipios proveniente del Anuario Estadístico de Antioquia (AEA), con el mapa de coberturas terrestres para el departamento de Antioquia (IGAC, 2007) y con las zonas climáticas, se identificaron los posibles cultivos para cada municipio según la zona climática más apta para su desarrollo; con este procedimiento se identificaron diferentes mosaicos, cada uno con posibles cultivos en cada municipio.

Las variables que son requeridas por el CROPWAT para la caracterización del suelo fueron extraídas del Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Antioquia publicado por el (IGAC, 2007), del cual se obtuvo el mapa de suelos de la cuenca. Éste fue cruzado con el mapa de límites municipales, de este cruce se obtienen polígonos correspondientes a las diferentes asociaciones de suelos presentes en cada municipio, para cada uno de ellos se hallaron valores promedio de las variables necesarias para la operación del CROPWAT.

Para la *Huella Hídrica* pecuaria se utilizó la misma metodología empleada para la *Huella Hídrica* de los cultivos, en este caso la información de cultivos necesaria para el CROPWAT corresponde a las áreas que se encuentran en pastos en el mapa de coberturas terrestres (IGAC, 2007).

Figura 18. Zonas climáticas en la cuenca del río Porce.



1.3.2. Sector industrial y doméstico

Para el sector industrial y doméstico se realizaron las mismas consideraciones. La *Huella Hídrica* asociada a estos dos sectores se encuentra localizada en donde se encuentran las cabeceras municipales, centros poblados o donde el mapa de coberturas terrestres para la cuenca así lo indique.

Para el sector industrial, se realizaron cálculos de *Huella Hídrica* para cada subsector según la información que fue posible recopilar en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (cuenca del río Aburrá) y en la cuenca del río Grande; para esta última, con ayuda del SIG fue posible localizar las industrias que se encontraban o no dentro de la cuenca. Este procedimiento ayudó a esclarecer qué datos se tenían en cuenta para el cálculo de la *Huella Hídrica*.

Para el sector doméstico, se consideraron los 31 subtramos y subcuencas de análisis, obteniendo valores de *Huella Hídrica* para cada uno de ellos. Inicialmente se identificaron las cabeceras que se encontraban al interior de cada subcuenca, esto se realizó por medio del ArcGis 9.3.1 y los mapas de límites veredal, límite municipal, cabeceras y centros poblados, y con el mapa de subcuencas definido para este proyecto. Para la zona rural, se halló el porcentaje de área de cada vereda que se encuentra al interior de la subcuenca, para luego asumir que la población en la zona rural presenta una distribución uniforme, así el número de habitantes para cada subcuenca se asume proporcional al área que cada vereda presenta en la subcuenca. Para este cálculo fue necesario realizar un cruce entre el mapa de límite veredal y el mapa de subcuencas y subtramos.

1.3.3. Sector energía

En este sector, el SIG fue utilizado solo para la espacialización de los cinco embalses presentes en la cuenca. Sin embargo, la cuenca del río Porce se encuentra altamente regulada por la presencia de estos embalses, por lo cual para las subcuencas en que hay presencia de ellos fue necesario realizar un análisis especial.

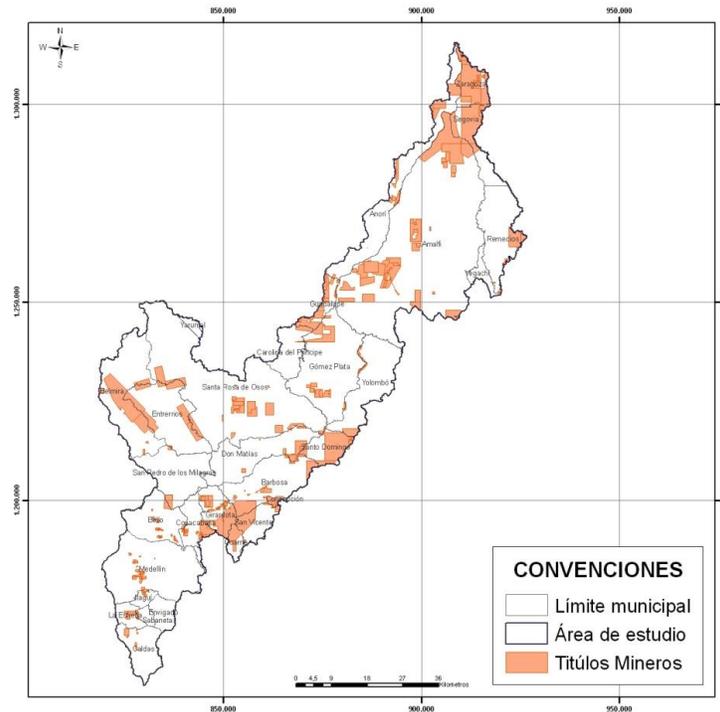
Se asumió que el agua que se genera aguas arriba de cada uno de los embalses es retenida en éste y que desde el punto de salida del embalse hasta el cierre de cuenca solo se percibe el volumen de agua aportada por los afluentes presentes en ese tramo. Para ello fue necesario dividir las subcuencas río Grande, Guadalupe y los tramos Porce medio y Porce medio bajo, en dos áreas: antes de embalse (AE), área aferente a la presa del embalse y después de embalse (DE), área de la cuenca que drena después de la presa. La división de estas áreas se realizó por medio de ArcGis 9.3.1.

1.3.4. Sector minería

Para el sector minero se utilizó como insumo base la cartografía asociada a los títulos de minería de oro del departamento de Antioquia (INGEOMINAS, 2011). El procedimiento que se realizó con esta información fue cruzar el mapa de títulos mineros de oro con los límites municipales y con el mapa de subcuencas, para medir el área que cada uno de estos títulos presentaba en cada una de ellas. Posteriormente se realizó una ponderación de la producción de oro con los porcentajes de áreas halladas para cada subcuenca. Finalmente esta producción se multiplica por el indicador estimado (m^3 agua/kg oro producido) y se obtiene la *Huella Hídrica Azul y Gris* para cada subcuenca.

Pese a que estos cálculos se realizaron para cada subcuenca, no se tuvieron en cuenta en los análisis definitivos de la *Huella Hídrica* de oro, debido a que existía un nivel alto de incertidumbre sobre las diferentes prácticas de extracción y beneficio de este mineral. Por esta razón, los cálculos de *Huella Hídrica* se presentan a escala municipal.

Figura 19. Títulos mineros en la cuenca del río Porce.



1.3.5. Los SIG en la cuantificación de la oferta de agua en la cuenca del río Porce

Para el cálculo de la oferta de agua (caudal) en cada subcuenca se utilizó un modelo hidrológico de base física (TETIS) en el que se busca representar los diferentes procesos que se dan tanto en

superficie como al interior de la cuenca, mediante uso de diferentes tanques de almacenamiento, enmarcando diferentes procesos dentro de cada tanque.

La modelación hidrológica por medio de este modelo, requiere de diferentes mapas, los cuales se obtienen a partir del DEM (modelo de elevación digital), del mapa de suelos, del mapa de coberturas terrestres y de las formaciones geológicas de la cuenca. Todos los mapas se generaron en formato raster con extensión *.asc, con referencia al DEM en cuanto a la resolución, número de filas y número de columnas.

El DEM es el insumo principal para realizar las simulaciones, a partir de su resolución se define la unidad de análisis de la zona de estudio. Un DEM se compone como una matriz, por lo que entre sus atributos se encuentran la cantidad de columnas y de filas, la longitud del lado de las celdas en cada dirección (dx y dy), el valor correspondiente a las celdas que no tienen un valor de nido, y si se va a emplear dentro de un sistema de información geográfica (SIG) debe contener las coordenadas X y Y de alguna de las cuatro esquinas, o algún sistema de referencia global (Velázquez, 2011).

En el caso de la cuenca del río Porce, se cuenta con un DEM de resolución 90x90 metros, el cual se llevó a resolución de tamaño de pixel de 500x500 metros, con el fin de hacer más operativo el proceso de simulación. Una vez se procesó el DEM por medio del Spatial Analyst disponible con el software ArcGis 9.3.1, se obtuvo el mapa de direcciones de flujo, en el cual se indica mediante números a cuál de las celdas vecinas se drena el flujo, con lo cual se obtiene una malla que simula de manera aproximada el transporte del flujo hasta la salida de la cuenca. Asimismo, se obtienen otros mapas necesarios para realizar la simulación hidrológica: mapa de pendientes y mapa de acumulación de flujo.

Los parámetros utilizados para la simulación hidrológica: Hu, ks y Kp fueron extraídos de los mapas de coberturas terrestres, suelos y geología de la cuenca.

Hu representa la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo y se obtiene mediante el cruce del mapa de suelos con las coberturas, Ks representa la conductividad hidráulica y se espacializa según la distribución de suelos en la cuenca, y Kp representa la conductividad hidráulica de la roca, la cual se espacializa según las unidades geológicas.

Figura 20. Modelo de elevación digital y mapas asociados al DEM para la cuenca del río Porce.

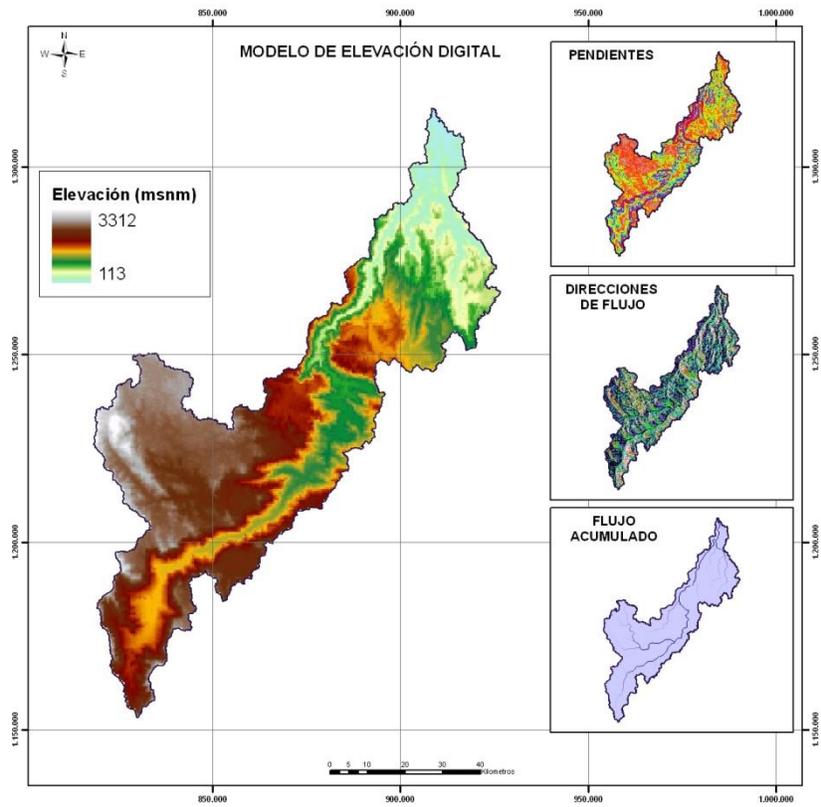
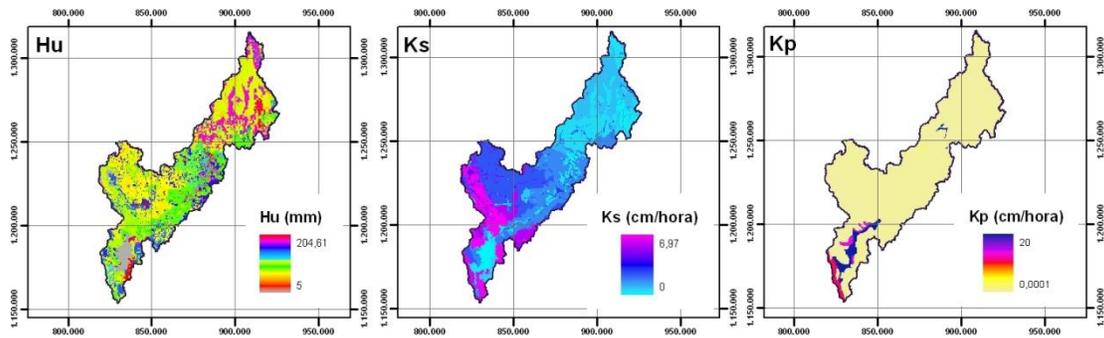


Figura 21. Parámetros para la modelación hidrológica.



P2 - 2. Etapa 2: cuantificación multisectorial de *Huella Hídrica*

2.1. Cuantificación del sector agrícola

2.1.1. Requerimiento de agua azul y verde de los cultivos (CWUverde y CWUazul)

Se empleó el modelo CROPWAT 8.0 (FAO, 2010), el cual ha sido ampliamente utilizado en diversos estudios de *Huella Hídrica* en el ámbito mundial. El modelo requiere de tres tipos de variables diferentes (clima, cultivos, suelos) y se obtuvieron como se menciona a continuación.

- **Clima.**

Las variables climáticas requeridas por este modelo (precipitación, temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento) fueron obtenidas de 27 estaciones de la red climatológica de Ideam y las Empresas Públicas de Medellín (EPM), estas últimas con una resolución diaria de un periodo de 11 años 2000-2010. Con el fin de lograr una mejor representación de cada una de las variables mencionadas (excepto la velocidad del viento), se realizó una interpolación tipo Krigging para así tener datos climatológicos pixel a pixel dentro de la cuenca del río Porce. Debido a que la información está a nivel de municipio, se realizó un promedio por municipio de cada una de las variables climáticas requeridas y ésta se asumió como la condición que mejor representa al clima de los cultivos presentes en un municipio dado. Estos valores fueron convertidos al formato requerido por el modelo CROPWAT 8.0, y añadidos al módulo Climate/Eto y Rain del mismo.

- **Cultivos.**

Dado que muchos datos no están disponibles a nivel de cuenca, se combinaron los datos estadísticos de los límites administrativos (municipios) con conjuntos de datos espacialmente explícitos para obtener la información a nivel de cuenca. En la cuenca del río Porce se encuentran total o parcialmente 29 municipios; para éstos se determinó un factor ponderador en función del área del municipio dentro de la cuenca para así pasar los datos estadísticos del nivel municipal a nivel de cuenca. La principal fuente de información acerca de los cultivos presentes en la cuenca proviene del Anuario Estadístico de Antioquia (AEA), del cual se utilizó la información de cultivos, área plantada, área en producción y rendimiento por hectárea de los años 2005 al 2010.

El AEA reporta para los años 2005-2010 aproximadamente 56 cultivos en todos los municipios de la cuenca del río Porce; sin embargo, algunos cultivos no fueron tenidos en cuenta porque su área cultivada era menor de 10 hectáreas y por falta de información. De esta manera, la *Huella Hídrica* agrícola de los cultivos será trabajada con 48 cultivos.

Tabla 3. Cultivos presentes en la cuenca del río Porce.

CULTIVO			
Aguacate	Cilantro	Guayaba manzana	Pepino
Ajo	Cítricos	Habichuela	Pimentón
Apio	Col	Lechuga	Piña
Arroz tradicional	Coliflor	Maíz	Plátano
Arveja	Espinaca	Mandarina	Remolacha
Cacao	Fique	Mango	Repollo
Café	Fresa	Mora	Tomate chonto
Caña	Frijol arbustivo	Naranja	Tomate de árbol
Caucho	Frijol voluble	Pastos	Tomate invernadero
Cebolla de huevo	Guanábana	Papa	Yuca
Cebolla junca	Guayaba	Papa criolla	Zanahoria

Fecha de siembra y cosecha. Es la fecha en que inicia el ciclo productivo de los cultivos y depende de las características fisiológicas de cada cultivo, del clima y la dinámica económica local. Igualmente se debe tener en cuenta que para los cultivos transitorios es necesario calcular la demanda hídrica cada vez que se siembre el cultivo en el año, lo que implica la necesidad de “correr” el CROPWAT cada vez que se establezca el cultivo para el año de análisis. Las fechas de siembra de los cultivos fueron tomadas de diferentes fuentes de información secundaria como FAO (2006), Ideam (2010), entre otros.

En algunos casos se consultaron fuentes primarias, mediante salidas de campo a los municipios o se partió del conocimiento y experiencia profesional del equipo del sector agropecuario.

Coefficiente del cultivo (kc) y fases de crecimiento. En los cultivos normalmente se diferencian cuatro etapas o fases de cultivo para establecer el kc: inicial, desde la siembra hasta un 10% de la cobertura del suelo aproximadamente; desarrollo, desde el 10% de cobertura y durante el crecimiento activo de la planta; media, entre floración y fructificación, correspondiente en la mayoría de los casos al 70-80% de cobertura máxima de cada cultivo y maduración, desde madurez hasta recolección (FAO, 2006). La duración de cada una de esas etapas depende de las características fisiológicas de cada cultivo. Los valores de kc fueron obtenidos de las bases de Ideam (2010) el cual tiene valores para los cultivos de Colombia y FAO (2006) a escala global.

Profundidad radicular. Define la capacidad de los cultivos para aprovechar la reserva de agua del suelo. En CROPWAT dos valores son necesarios para su estimación, profundidad

radicular en la etapa inicial y profundidad radicular en el desarrollo pleno al inicio de la etapa de mediados de desarrollo. Estos valores están reportados en la literatura para la mayoría de cultivos encontrados en la cuenca del río Porce y fueron usados los reportados en FAO (2006).

Fracción de agotamiento crítico (p). Los valores se expresan como una fracción del Agua Disponible Total (ADT) y, en general, varían entre 0,4 y 0,6. La fracción de agotamiento crítico aparece referenciada para algunos cultivos en el estudio FAO (2006); para aquellos cultivos que no se tenía dicho valor, se asumió un valor de 0,5 de acuerdo a la recomendación contenida en el mismo documento.

Factor de respuesta de la productividad del cultivo (ky). La FAO (2006) presenta valores de Ky que son específicos para cada cultivo y pueden variar durante la etapa de crecimiento del cultivo; para los cultivos que no tenían valores de ky se asumieron valores de cultivos similares, por ejemplo al plátano se le asignó el valor reportado para el banano. Para aquellos cultivos que no había posibilidad de establecer un símil con otro cultivo, se asumió un ky de 1.

Altura del cultivo. Se toma de la literatura para cada cultivo. Este dato es opcional y en caso que no se ingrese, no se hará ningún ajuste (FAO, 2006).

- **Suelos.** Las variables requeridas por el CROPWAT para la caracterización del suelo son Agua Disponible Total (ADT), tasa máxima de infiltración, profundidad radicular máxima, agotamiento inicial de la humedad del suelo y humedad del suelo disponible inicialmente. Toda la información de suelos fue tomada del Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Antioquia publicado por el IGAC (2007). En total se identificaron en la cuenca del río Porce 22 Asociaciones, 4 complejos y 1 consociación de suelos. Estas unidades edáficas fueron tomadas como el nivel mínimo de análisis de la variable suelos y para cada unidad se estimaron las variables que solicita el CROPWAT.

Agua Disponible Total (ADT). Representa la cantidad total de agua disponible para el cultivo, se expresa en milímetros por metro y se define como la diferencia en el contenido de humedad del suelo entre la Capacidad de Campo (CC) y el Punto de Marchitez Permanente (PMP). Para calcular el ADT se utilizó el Módulo *Soil Water Characteristics* del software libre *SPAW Hidrology* que solicita información de la granulometría del suelo y con eso calcula la disponibilidad de agua de cada horizonte en cm/cm. Posteriormente, con el valor de la profundidad de cada horizonte se calcula el ADT para cada horizonte y posteriormente, la sumatoria de los ADT de cada horizonte da el ADT total del perfil del suelo analizado.

Como cada una de las asociaciones, consociaciones y complejos de la cuenca del río Porce reportado en el estudio del IGAC (2007), está conformada por diferentes tipos de suelo, se calculó el ADT de cada una de esas unidades, como el valor promedio ponderado del ADT de los tipos de suelo presentes en cada asociación, consociación y complejo.

Tasa máxima de infiltración. Representa la lámina de agua que puede infiltrarse en el suelo en un periodo de 24 horas y tiene el mismo valor que la conductividad hidráulica del suelo a saturación (FAO, 2006). Este último dato de conductividad hidráulica es el que se utilizó en el análisis, y fue obtenido para cada asociación a través del software *SPAW Hidrology*.

Profundidad radicular máxima. En la mayoría de los casos las características genéticas de los cultivos determinarán la profundidad radicular; sin embargo, a veces el suelo y ciertos horizontes alterados pueden restringir la profundidad radicular máxima. Para la cuenca del río Porce, la profundidad máxima radicular se asumió como la profundidad máxima de los perfiles del suelo reportadas en cada una de esas unidades en el estudio del IGAC (2007).

Agotamiento inicial de la humedad del suelo. Indica la humedad o sequedad del suelo al inicio de la época del cultivo. Se expresa como un porcentaje (%) del agua disponible total. El valor por defecto de 0% representa un perfil de suelo húmedo a CC y 100% es un suelo en PMP. Para el cálculo de la *Huella Hídrica Agrícola* en la cuenca del río Porce se asignó por defecto un valor de 0% para cultivos establecidos en meses húmedos y un valor de 50% para meses secos.

2.1.2. Huella Hídrica Azul y Verde agrícola

El módulo utilizado para el cálculo de agua virtual es el módulo que permite hacer programaciones de riego para mejorar la gestión del agua. Incluye el balance de agua del suelo (ks), ya que en caso de un déficit de agua por baja precipitación efectiva el modelo toma el agua del suelo, lo que significa que las necesidades de riego solamente serán calculadas cuando se presente déficit hídrico en el suelo. Es un cálculo más real siempre y cuando se cuente con las variables del suelo. Sin embargo, para cultivos permanentes y mayores de un año se corrió el modelo en modo secano, ya que a través del levantamiento de información primaria, se identificó que éstos no se riegan dentro de la cuenca. Así pues, el CROPWAT entrega como resultado lo siguiente:

El modelo presenta la *Huella Hídrica Verde* o agua virtual verde como la precipitación efectiva y corresponde al agua proveniente de la precipitación que realmente fue utilizada por el cultivo durante el período de análisis, desde la época de siembra hasta la época de cosecha. El resultado se da en milímetros, razón por la cual es necesario multiplicar por 10 para que quede expresada en m³/ha, a lo cual se le denomina consumo de agua del cultivo (CWU) y éste a su vez debe ser

expresado en unidades de (m³/t) por lo cual se divide por el rendimiento del cultivo (t/ha) que se obtuvo de los Anuarios Estadísticos de Antioquia.

La *Huella Hídrica Azul* o contenido de agua virtual azul, se obtiene mediante la diferencia entre el requerimiento de agua del cultivo y la precipitación efectiva; si esta diferencia es menor o igual a 0 se tiene que no hay *Huella Hídrica* azul. Estas variables son dadas por el CROPWAT en milímetros, por lo cual se sigue el mismo procedimiento descrito para la *Huella Hídrica Verde* para llegar a m³/t.

Estos indicadores se dan por municipio y no son sumables, por lo cual para obtener un indicador a escala de cuenca, es necesario obtener un rendimiento promedio ponderado, por producción y área.

La *Huella Hídrica* total en m³ por año se obtiene multiplicando el contenido de agua virtual en m³/t por la producción total en toneladas del cultivo analizado en un año, mes o periodo de análisis deseado.

2.1.3. *Huella Hídrica Gris agrícola*

Para el cálculo de la *Huella Hídrica Gris* se utilizó como referente la contaminación del agua por causa de aplicación de fertilizantes (no se tuvo en cuenta pesticidas y otros agroquímicos debido a que en Colombia todavía hay muy poca información al respecto), específicamente la aplicación de nitrógeno (N) y fósforo (P). Para ello se consultaron varias fuentes de información como Guerrero (1995) para los cultivos de clima medio; Guerrero (1998) para cultivos de clima frío; Manual de Corpoica acerca de 500 preguntas frecuentes sobre diferentes cultivos, entre otros. Igualmente se consultó personalmente a funcionarios de las diferentes asociaciones de cultivadores presentes en la cuenca para conocer sobre la fertilización de sus cultivos; asimismo se corroboró esta información con varias visitas y salidas de campo.

El cálculo de la *Huella Hídrica Gris* se realizó solo para la contaminación por nitrógeno, ya que para el fósforo aplicado como fertilizante que no es absorbido por la planta, generalmente se acumula en el suelo y solo una fracción muy pequeña va hacia las fuentes de agua subsuperficiales y subterráneas (Ercin et al.; 2011).

Además de lo anterior, para el cálculo de la *Huella Hídrica Gris* agrícola por fertilización con nitrógeno, debe tenerse en cuenta la siguiente información:

- Tasa de lixiviación del nitrógeno: 10% del nitrógeno total aplicado (Hoekstra & Chapagain, 2008)
- Concentración máxima permitida de nitrógeno: 30 mgN/L (Boulay et al., 2011.)
- Concentración natural del nitrógeno: 0,01 mgN/L (REDRIO, 2011)

Para el cálculo de la *Huella Hídrica Gris* se divide la cantidad de fertilizante aplicado (kg/ha), con la diferencia entre la concentración máxima permitida (kg/m³) y la concentración natural (kg/m³). El valor obtenido en el cálculo anterior corresponde a la *Huella Hídrica Gris* de un producto agrícola en una hectárea cultivada; sin embargo, es necesario dividir este valor por el rendimiento del cultivo (t/ha). De esa manera se obtiene la cantidad de m³ de agua que se requiere por tonelada de producto agrícola para diluir la carga contaminante del nitrógeno hasta un valor máximo permisible de 30 mgN/L.

2.1.4. Huella Hídrica pecuaria

Para el cálculo de la *Huella Hídrica* pecuaria se tuvo en cuenta los subsectores bovino, equino, porcino, y aves, con información fundamentalmente de los Anuarios Estadísticos de Antioquia (AEA) para los años 2005, 2007, 2008, 2009 y 2010. La *Huella Hídrica* del sector pecuario está dada por la ecuación:

Ecuación 26. *Huella Hídrica* pecuaria.

$$HH_{pecuaria} = HH_{alimento} + HH_{consumo} + HH_{servidumbre}$$

La *Huella Hídrica* del alimento corresponde a la *Huella Hídrica* de los pastos que se utilicen como alimento, principalmente para bovinos y equinos. La *Huella Hídrica* del consumo se tomó como el volumen de agua que consumen los animales para su funcionamiento fisiológico. La *Huella Hídrica* de servidumbre se refiere al agua utilizada en el aseo de establos, porquerizas, galpones, entre otros.

- ***Huella Hídrica del alimento***

La *Huella Hídrica* del alimento para el sector pecuario, corresponde a la *Huella Hídrica* verde de los pastos presentes en la cuenca, que son utilizados para la alimentación de equinos y bovinos. Esta *Huella Hídrica* se calculó por medio de CROPWAT, siguiendo el mismo procedimiento utilizado para los cultivos. Los pastos ubicados en las zonas de ganadería de leche se trabajaron con rendimientos de 15 t/ha, mientras que para las demás se asumió un rendimiento de 5 t/ha (Palacio, 2005), de esta manera se halla la *Huella Hídrica Verde* o contenido de agua virtual verde (m³/t) de los pastos en la cuenca del río Porce.

El consumo de pastos por animal depende, entre otros factores, del peso promedio. Para conocer el peso promedio de los bovinos en la cuenca del río Porce se consultó el estudio de Gómez y Rueda (2011). Por otro lado, se estima que un bovino consume diariamente en materia seca un promedio de 2,7% de su peso vivo (SENA, 1985), y que el forraje verde tiene porcentajes de humedad que oscilan entre 65% a 85%. Para el presente estudio se asumió un porcentaje de humedad del pasto de 80%.

Asumiendo estos valores de consumo de materia seca por animal y humedad del forraje verde, es posible calcular los kilogramos de pasto que consume un bovino por día dependiendo de su peso y edad de la siguiente manera.

Ecuación 27. Requerimiento de masa seca por animal.

$$Req. MS \left(\frac{kg}{Animal * día} \right) = \frac{Peso vivo animal (kg) * 2,7\%}{100\%}$$

Dónde;

Req. MS = requerimiento de materia seca por animal.

Peso vivo animal = peso del animal dependiendo de su edad.

2,7% = valor asumido de requerimiento de materia seca con relación al peso total del bovino.

Posteriormente, asumiendo que el valor de materia seca corresponde al 20% del total del forraje verde y que el 80% restante es agua, se calcula el requerimiento total del forraje verde así:

Ecuación 28. Requerimiento de forraje verde por animal.

$$Req. Total FV \left(\frac{kg}{Animal * día} \right) = Req MS + Req MS * \frac{80\%}{20\%}$$

Dónde;

Req. Total FV = requerimiento total de forraje verde por animal por día.

Req MS = requerimiento de materia seca por animal por día.

80% = porcentaje de humedad asumido para el forraje verde.

20% = porcentaje de materia seca en el forraje verde.

De esta manera, se calculó el requerimiento de materia seca y forraje verde por animal por día para los bovinos establecidos en la cuenca del río Porce.

En el caso de los equinos se siguió la metodología ya descrita para el cálculo del consumo de forraje en bovinos, pero utilizando como datos de referencia los siguientes:

Peso promedio del equino = 350 kg

Requerimiento de materia seca por día = 1,5% del peso vivo del animal.

Humedad del forraje verde = 80%.

Los requerimientos de materia seca (toneladas) de bovinos y equinos por municipio se multiplican por el valor de la *Huella Hídrica Verde* en m^3/t de los pastos, para obtener un valor de consumo de agua verde en m^3 . El contenido de agua virtual verde de los bovinos y equinos se obtiene dividiendo el valor del consumo de agua verde en m^3 por el peso promedio en toneladas de los bovinos o equinos.

Es importante señalar que para los subsectores bovino, equino, porcino, y aves, también se usan concentrados para la alimentación; sin embargo, estos no se tuvieron en cuenta dentro del cálculo de *Huella Hídrica* del alimento, ya que éstos corresponden al sector industrial. Este es el único componente con *Huella Hídrica Verde* dentro de la *Huella Hídrica* total pecuaria.

- ***Huella Hídrica del consumo***

El Estudio Nacional del Agua - ENA (Ideam, 2010) presenta valores promedio de consumo diario de agua para los subsectores bovino, equino, porcino y aves. Estos valores se utilizaron en el presente estudio para el cálculo de la *Huella Hídrica Azul* (expresada en m^3) asociada al consumo de agua. Para el subsector bovino se identificó el consumo diario de agua promedio para animales en cuatro categorías de análisis: hembras y machos mayores de 36 meses, hembras y machos entre 24 y 36 meses, hembras y machos entre 12 y 24 meses, y hembras y machos menores de 12 meses.

Para el caso de los equinos, se presenta un valor promedio de 35 l/día/animal. Este es un valor promedio tanto para caballos como para mulares y asnales y será utilizado en los cálculos de la *Huella Hídrica*.

En el subsector aves, se reporta un valor promedio de consumo de agua de 0,24 l/animal/día; este valor se tomó como referencia para calcular la *Huella Hídrica Azul* del subsector aves asociada al consumo de agua.

Para el subsector porcino también se tuvo en cuenta los valores de consumo de agua diarios promedio 12 l/animal/día reportados en el ENA (Ideam, 2010).

Los valores de *Huella Hídrica* calculados en este aparte se cargan a la *Huella Hídrica Azul* del sector.

- ***Huella Hídrica de la servidumbre***

La información que se utilizó para el cálculo del consumo de agua (expresada en m^3) para el manejo de los animales en las diferentes actividades pecuarias, están reportados en (Ideam, 2010). Sin embargo, se debe tener en cuenta que esta información es muy general y no diferencia entre ganadería de carne y ganadería de leche, ni entre aves de engorde o

de postura; sin embargo, son valores que permiten tener un dato aproximado de estos consumos de agua.

La *Huella Hídrica* pecuaria se da en m^3/t de peso vivo, y se halla dividiendo el consumo total de agua en m^3 por el número de animales dentro de la cuenca del río Porce multiplicado por su peso vivo promedio (toneladas), valor que se extrae de los AEA.

El número de bovinos y equinos en un área determinada está relacionado proporcionalmente con el área de pastos en esa área y con el tipo de manejo de los animales. En este estudio se asumió que en aquellos municipios que no están totalmente incluidos dentro de la cuenca, el número de animales dentro de la cuenca será proporcional al área en pastos dentro de ésta; posteriormente ese porcentaje se multiplicó por el número total de bovinos y equinos reportados para cada municipio y así se obtuvo el número de animales que estarían dentro de la cuenca.

Se asumió que el número de porcinos y aves dentro de la cuenca será proporcional al área de cada municipio que está dentro de la cuenca; por ejemplo, si un municipio X tiene el 20% de su área dentro de la cuenca, se asumió que el 20% de los animales de estos subsectores reportados en el AEA estará dentro de la cuenca.

La información para calcular la contaminación del agua por las actividades pecuarias también es bastante limitada en la cuenca del río Porce; por esa razón, es necesario recurrir a información secundaria de otras regiones del país así como a métodos indirectos de estimación de contaminación por animales.

Para el cálculo de la *Huella Hídrica Gris* de los subsectores bovino y equino, se utilizará el mismo procedimiento aplicado a la *Huella Hídrica Gris* agrícola (contabilizando solo N a una tasa de lixiviación del 10%), usando datos de contenidos de nitrógeno en orina y heces obtenidos de León et al. (2008): excreción fecal de N (g/día) = 210,9 y excreción urinaria de N (g/día) = 240,6.

En el caso de los equinos, Buchanan (2003) estima que el aporte promedio de N/día de los equinos es de 1750 g/día.

En el caso de las aves y los porcinos, se utilizará el método de estimación indirecta de contaminación conocido como el equivalente-habitante desarrollado en Francia y aplicado en el Plan de Manejo de la Cuenca del Río Cauca-Magdalena (Cormagdalena, 2007). Este estudio estima que un habitante (persona) contamina en promedio 0,012 kg N/día y presenta equivalencias entre la contaminación generada por una persona y los animales, de esta manera un cerdo contamina lo que tres habitantes, mientras que una gallina entre 0,15 y 0,25 habitantes. Con este valor es que se calcula la *Huella Hídrica Gris* tanto de los porcinos como de las aves. Con estos valores se procedió a aplicar la ecuación de *Huella Hídrica Gris* propuesta por Hoekstra et al (2011).

2.2. Cuantificación sector industrial

Dentro del límite hidrológico de la cuenca del río Porce, se encuentra la zona metropolitana del Valle de Aburrá que contiene 10 municipios (Caldas, La Estrella, Sabaneta, Itagüí, Envigado, Medellín, Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa), zona reconocida por su alta producción industrial, que en el año 2010 vendió \$23.615.574.058 (miles de pesos), 15% del total nacional.

Para este estudio piloto, de cuantificación de la *Huella Hídrica* del sector industrial, se tendrán en cuenta los subsectores del sector manufacturero correspondientes a la clasificación CIIU (Código Industrial Internacional Uniforme Rev 3), los cuales comprenden la división desde el 15 hasta el 37 y se tendrá en cuenta la subdivisión hasta el cuarto nivel.

El subsector reciclaje correspondiente a la división 37 no se tendrá en cuenta debido a que no se encuentra información formal disponible sobre este subsector.

Ahora bien, existen aproximadamente 10.000 establecimientos industriales en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, donde aproximadamente 8.000 establecimientos son microempresas que no entregan suficiente información a las fuentes oficiales. Por lo tanto seleccionamos una población de estudio y de ella consideramos que la muestra representativa para los cálculos sería del 20% de población estudio.

De los demás municipios incluidos en la cuenca, los municipios de la subcuenca de río Grande, son los que le siguen a los del Valle de Aburrá en tamaño, en relación con la industria de la confección, derivados lácteos y cárnicos.

Se utilizaron tres fuentes de información importantes para el cálculo de la *Huella Hídrica* del sector industrial:

La información primaria se obtuvo de los Registros Únicos Ambientales (RUA) proporcionados por las autoridades ambientales; Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Corantioquia. También se obtuvo información primaria por medio de encuestas realizadas directamente a las empresas. Otras fuentes de información en cuanto al número de establecimientos, personal ocupado, producción y ventas fueron obtenidas por medio de las cámaras de comercio, la ANDI y el DANE.

Con toda la información obtenida se priorizaron los subsectores industriales teniendo en cuenta la producción bruta y la relevancia ambiental se calculó la *Huella Hídrica Azul y Gris* de los sectores priorizados, para los municipios de Barbosa, Bello, Caldas, Copacabana, Girardota, Envigado, La Estrella, Medellín, Itagüí y Sabaneta (subcuenca del río Aburrá) y para los municipios de Santa Rosa de Osos, San Pedro, Don Matías y Entrerriós (subcuenca de río Grande).

Se estableció un cálculo consolidado con la información suministrada por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Corantioquia del Registro Único Ambiental, además de esto se realizaron

encuestas a 31 empresas para un total de 360 . Se validó la información de varias empresas, tanto mediante encuestas, como con información de otros proyectos realizados por el Cnplmta y UPB.

Para la aplicación de la metodología fue necesaria la aplicación de las siguientes estimaciones y suposiciones.

- Para aquellas empresas que registran el mismo valor de extracción y vertimiento de agua, se estimó una evaporación del 10%.
- Los registros de calidad de agua de entrada de fuente acueducto, fueron eliminadas, se asume que es un error de digitación, al verificar concentraciones muy elevadas para ser agua potable.
- No se tiene en cuenta la *Huella Gris* de las grasas y aceite, ya que la dilución de estas no se hace en la totalidad sobre la fuente en la cual se vierte y por efecto de la densidad la mayor cantidad de dicho contaminante se ubica en la parte superficial de la corriente. Lo anterior implica que no es factible aplicar el concepto de carga contaminante asimilada por la corriente de agua.
- Se asume que el consumo de agua en cada uno de los subsectores evaluados es independiente del tamaño de la empresa, por lo tanto para la extrapolación de los resultados, se aplica el promedio de cada uno de los indicadores encontrados en las empresas de la muestra y la producción total del subsector.
- Para las empresas ubicadas en Sabaneta, La Estrella, Itagüí y Envigado, que reportaron vertimientos de agua al sistema de alcantarillado, se asumió que la carga vertida de DBO que realmente afecta el recurso hídrico era el 20% de la registrada, por acción de la Planta de Tratamiento de San Fernando.
- Para el registro de agua extraída de la empresa del sector Producción de Malta, Elaboración de Cervezas y Otras Bebidas Malteadas, se asumió que el 92% de ésta se destina para generación de energía hidroeléctrica y solo el 8% se usa para la producción y servicios domésticos, tomando como base datos de otros proyectos del Cnplmta.

2.3. Cuantificación sector doméstico

Según la metodología diseñada por el Grupo de Investigaciones Ambientales -GIA- de la Universidad Pontificia Bolivariana en compañía del Tecnológico de Antioquia y la Universidad Politécnica de Cataluña - Cátedra Unesco de Sostenibilidad para el cálculo de la *Huella Hídrica* en el sector doméstico en el caso específico de la cuenca del río Porce, se identificaron tres volúmenes de control o etapas importantes por medio de las cuales se aporta a la *Huella* de la cuenca en el sector, estas corresponden a:

- La captación y potabilización del agua
- La distribución, incluyendo las aguas no contabilizadas (pérdidas por fugas técnicas y el uso por acometidas ilegales)
- El consumo por parte de los usuarios finales, contempla los vertimientos del agua a la cuenca, con y sin tratamiento previo. Lo anterior permitirá realizar un análisis a nivel de cuenca y las interacciones entre los diferentes tramos geográficos de ella, en aspectos que pueden generar efectos ambientales importantes para determinadas áreas ubicadas al interior de la misma, como es el trasvase de agua.

Para el cálculo se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Identificar los actores que poseen la información de cada uno de los volúmenes de control del sector doméstico para el cálculo de la *Huella Hídrica* en una cuenca específica. Generalmente, las empresas municipales y veredales que prestan el servicio de acueducto y alcantarillado al total de habitantes de la cuenca, cuentan con la información más confiable o las autoridades ambientales de la región. Posteriormente, se debe realizar un estudio que determine las empresas prestadoras del servicio que abastezcan a más del 80% de la población ubicada dentro de la cuenca (principio de Pareto). Dicha población puede estar concentrada en las cabeceras municipales de los centros urbanos dentro de la cuenca seleccionada.
- Seleccionar una escala de tiempo para la recolección de información y en caso de no contar con información para todos los años de interés, sería importante para futuros análisis de sostenibilidad, tener la información mes a mes de un año típico.
- Identificar con los actores la información primaria con la que se cuenta, con el fin de saber cuál información secundaria se necesita o qué supuestos deberán hacerse para completar la información requerida para el cálculo.

El procedimiento de cálculo, dependerá de la disponibilidad de los datos, pues en algunos casos es difícil encontrar la información de caudales desde las plantas de potabilización que surten los acueductos y por lo tanto, será necesario invertir el orden de cálculo, es decir utilizar balances de masa de acuerdo a la información que se encuentre disponible. En general se puede partir de los valores facturados a los usuarios o los vertimientos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, para llegar a definir los caudales distribuidos y tratados por las plantas de potabilización, ya que esta información es indispensable para el cobro del servicio. Igualmente, se parte de este dato para definir los caudales vertidos por los usuarios a través de los sistemas de alcantarillado.

Tabla 4. Algoritmo de cálculo de *Huella Hídrica* del sector doméstico.

Ecuación	Parámetros	Consideraciones
$HH_{azul} = HH_{azulAI} + HH_{azulUSU} + HH_{azulPTAP}$ $HH_{azul} = (Q_{EAI} - Q_{VAI}) + (Q_{CF} - Q_{VUSU}) + Q_{empacadoPTAP}$	Q_{EAI} [L/s]	Se pueden asumir como un % de las pérdidas, éstas se pueden proyectar con base en estudios que se hayan hecho en el alcantarillado sobre el Q distribuido. Las demás pérdidas que se dan por fugas técnicas se asume que regresan a la cuenca sin influir en HH azul o gris.
	Q_{VAI} [L/s]	En la mayoría de los casos se desconoce el uso que se le da a esta agua, por lo que se asume un uso similar al doméstico, asumiendo que un 10% no retorna a la cuenca (evaporada, consumida, etc.)
	Q_{CF} [L/s]	Estos datos generalmente los poseen las empresas prestadoras del servicio de acueducto y será un dato fundamental para calcular los demás caudales en el volumen de control.
	Q_{VUSU} [L/s]	Este dato puede obtenerse a partir de: i) los caudales que entran a las PTAR, ii) asumiendo como se explica en el caso anterior que un porcentaje del agua facturada no retorna a la cuenca (consumida o evaporada).
	$Q_{empacado PTAP}$ [L/s]	En el caso que se reporte en las PTAP que envasan agua.
$HH_{gris} = HH_{grisPTAP} + HH_{grisAI} + HH_{grisST} + HH_{grisPTAR}$ $HH_{gris} = \frac{\sum(Q_{vertido} * C_{vertimiento}) - Q_{captado} * C_{captación}}{C_{max} - C_{nat}}$	Q_{VPTAP} [L/s]	Se puede obtener por la diferencia entre el Q captado por la PTAP y el distribuido, restado el empacado y evaporación en el caso que hayan tanque abiertos u otros usos similares al doméstico en la instalación de la PTAP, en el caso que aplique.
	C [mg/L]	En el sector doméstico es común encontrar las C de DBO, SST y en algunos casos NTK. Al no tenerlas se deberán buscar referencias bibliográficas o caracterizaciones que se hayan hecho en aguas con características similares. La C natural y máxima normalmente busca para cuenca específica,

$HH_{gris} = \frac{Q_{VPTAP} C_{VPTAP} + Q_{VAI} C_{VAI} + Q_{VST} C_{VST} + Q_{VPTAR} C_{VPTAR} - Q_{CAP CUE} C_{CAP CUE}}{C_{max} - C_{nat}}$		teniendo en cuenta que la máxima está dada por el uso sostenible de la cuenca.
	Q_{VAI} [L/s]	IBIDEM
	Q_{VST} [L/s]	En los casos en los que no se cuenta con PTAR o se trata parcialmente el caudal vertido.
	Q_{VPTAR} [L/s]	Se toma de los datos de operación de la planta o con base en los Q de entrada a la misma.
	$Q_{CAP CUE}$ [L/s]	Se puede asumir que es igual al caudal de entrada a la planta o calcular con las pérdidas, si éstas se tienen.

2.4. Cuantificación sector energía

La cuenca del río Porce es la de mayor producción hidroenergética del país, cerca de un 16% de la energía generada en Colombia proviene de esta cuenca. Se identificó a las Empresas Públicas de Medellín (EPM) como el principal actor, ya que es el responsable de más del 99% de la producción de energía en la cuenca del río Porce, a través de los embalses Riogrande I y II, Porce I y II, y Troneras.

Las estimaciones de *Huella Hídrica Azul* asociada a embalses siguieron el método de cálculo usado por Gerbens-Leenes et al. (2009); Mekonnen & Hoekstra (2011) y Herath et al (2011), en el cual la *Huella Hídrica* de un embalse o cuerpo de agua se obtiene dividiendo la evaporación promedio por la energía generada promedio, en este caso del periodo 2000-2010, para cada embalse.

Para cada uno de los embalses se multiplicó el valor mensual de evaporación hallado por el método de Penman (m), por el área inundada para cada mes (m^2) con el fin de encontrar el volumen de agua (m^3) evaporada mes a mes para cada embalse. Posteriormente se dividió este valor por la generación de energía mensual (Tabla 9) teniendo en cuenta que ésta se encuentra en GW, estos se pasan a GJ con el fin de hacer comparable el estudio con otras investigaciones alrededor del mundo.

El embalse de Riogrande II tiene un trato especial en términos del cálculo de *Huella Hídrica*, debido a que éste tiene la connotación de embalse multipropósito, usado para generación de energía y para agua de uso doméstico. En promedio este embalse destina el 88% de su descarga para turbinar agua en la central La Tasajera y el 12% restante se usa para el sistema de acueducto Manantiales, el cual provee de agua a gran parte de la ciudad de Medellín. Así pues, solo se tuvo en cuenta el 88% de la evaporación del embalse Riogrande II en los cálculos, ya que solo este porcentaje es atribuido como consumo de agua por parte de la generación de energía, el resto es atribuido al sector doméstico.

Por otro lado, el embalse Troneras también tiene particularidades, éste es abastecido por aguas trasvasadas desde la cuenca del río Nechí, por medio de las desviaciones Nechí-Pajarito-Dolores-Concepción-Tenche; sin embargo, la pérdida o consumo de agua se da dentro de la cuenca del río Porce y es atribuida a la misma. El agua trasvasada a la cuenca del río Porce a través de la cadena mencionada es en promedio de $7,2 m^3/s$, ésta se reporta pero no se incluye en el cálculo de *Huella Hídrica* debido a que pertenece a otra cuenca.

2.5. Cuantificación sector minero

Anteriormente se explicó de manera general la forma de obtención de información base y cómo se puede calcular el indicador de *Huella Hídrica* para el sector minero (metales preciosos y materiales de construcción) bajo la metodología propuesta por la WFN (Hoekstra, Chapagain, & Aldaya, 2011). Sin embargo, la información disponible en la cuenca del río Porce, no se adaptaba precisamente a las ecuaciones propuestas en la metodología, por lo que fue necesario hacer algunas modificaciones en especial para los metales preciosos.

A continuación se hace una descripción del proceso llevado a cabo para estimar la *Huella Hídrica* tanto de los metales preciosos como de los materiales de construcción en la cuenca del río Porce.

2.5.1. Metales preciosos

Como se mencionó anteriormente, para el caso de los metales preciosos (oro), se tuvo en cuenta los indicadores de *Huella Hídrica Azul y Gris*, en ambos casos fue necesario hacer algunas modificaciones a la metodología de Hoekstra para su estimación en la cuenca del río Porce.

- ***Huella Hídrica Azul (HHA)***

El primer paso consistió en identificar empresas mineras que reportaran la información base para la estimación de la *Huella Hídrica Azul*, tales como caudales de entrada, de salida y la producción. Solamente se registró la información completa para dos empresas en uno de los municipios que hacen parte de la cuenca (Gobernación de Antioquia, 2006), con estos datos y la ecuación propuesta en la metodología se estimó el indicador de la *Huella Hídrica Azul* (m^3/kg de oro).

Como el resultado fue poco representativo (solamente dos empresas mineras) se decidió para estas empresas estimar la *Huella Hídrica Azul* a partir de la evaporación que se puede generar en determinadas etapas del proceso de beneficio del oro, con el objetivo de comparar los resultados de *Huella Hídrica Azul* obtenidos en ambos casos. Para esta segunda metodología fue necesario, calcular la evaporación (con el programa HidroSIG) en la zona donde se ubicaban las minas, la altura de los tanques donde se realiza la cianuración (tanques en los que se genera la *Huella Hídrica Azul* por evaporación) y el área superficial de agua expuesta a evaporación. Esta área se obtuvo de dividir el volumen de agua utilizado en la mina (dato reportado en estudios) sobre la altura promedio de los tanques, luego el área se multiplica por la evaporación, dando como resultado las pérdidas de agua. Finalmente este valor se divide por la producción de la mina para obtener el indicador de *Huella Hídrica Azul*.

Comparando los resultados entre ambas metodologías, aunque se presenta una diferencia cercana al 100% están en un mismo orden de magnitud, además los resultados son coherentes ya que en el primer cálculo de *Huella Hídrica Azul* se consideran todas las

pérdidas de agua en el proceso, por lo que éste es mayor al segundo cálculo donde solamente se tuvo en cuenta las pérdidas por evaporación.

Para el caso de la cuenca del río Porce, se tuvo en cuenta el indicador de *Huella Hídrica Azul* obtenido en el primer cálculo, con éste y la producción de oro (Kg/año) en cada uno de los municipios se estimó la *Huella Hídrica Azul* total (m³/año) para todos los municipios que hacen parte de la cuenca del río Porce.

- ***Huella Hídrica Gris (HHG) del mercurio***

Para estimar el indicador de la *Huella Hídrica Gris*, era necesario consultar más información para las empresas mineras; por ejemplo, concentraciones de los contaminantes a la entrada y salida del proceso de extracción y beneficio. En algunos casos se reportaba información de los vertimientos pero en ningún caso se obtuvo datos de los contaminantes a la entrada de los procesos, por lo tanto no era posible estimar la carga de contaminantes aportada por la empresa minera.

Esta situación obligó a buscar otra alternativa para estimar la *Huella Hídrica Gris* ya no considerando información a nivel empresarial sino municipal. De esta forma se obtuvo la cantidad de mercurio que utilizaron municipios como Segovia para un determinado año y la producción total de oro para ese mismo año. Además se encontraron balances que determinaron qué cantidad del mercurio utilizado era vertido en las fuentes hídricas. Por lo tanto la carga contaminante de mercurio aportada por la minería de oro en Segovia se calculó, multiplicando la cantidad total de mercurio utilizado por el porcentaje de éste que fue vertido en las fuentes hídricas. Los valores de concentración máxima del contaminante para mantener la calidad aceptable del efluente receptor fue obtenido del estudio de (Boulay, Bulle, Deschenes, & Margni, 2011) y la concentración natural del mercurio (también para el cianuro) en las fuentes hídricas se asumió igual a 0 mg/L.

Para estimar el indicador de *Huella Hídrica Gris*, también fue necesario considerar que toda la producción de oro no se obtiene a partir del mercurio, ya que en Segovia también se utiliza cianuro en el proceso de beneficio. En publicaciones del equipo de trabajo del *Global Mercury Project* (Cordy, y otros, 2011) estimaron aproximadamente que el 50% del oro se obtiene con mercurio y el restante con cianuro. En consecuencia el indicador de *Huella Hídrica Gris* se obtiene de la siguiente forma:

Ecuación 29. Indicador de *Huella Hídrica Gris*.

$$\text{Indicador HHG} = \frac{\text{Carga contaminante}}{\text{Producción} \times \text{Porcentaje de oro obtenido con mercurio} \times (C_{\text{max}} - C_{\text{nat}})}$$

Este procedimiento se realizó para Segovia, Remedios, Zaragoza, Amalfi y Anorí ya que estos reportaban consumo de mercurio en la actividad minera de oro (Cordy, y otros, 2011). Estos valores se promediaron para obtener un indicador para aquellos municipios que no reportaban información sobre su consumo de mercurio.

Finalmente, el indicador de *Huella Hídrica Gris* se multiplica por la producción¹² de cada uno de los municipios que reportaron producción de oro y de esta forma se calcula la *Huella Hídrica Gris* total (m³/año) para los municipios de la cuenca del río Porce.

- ***Huella Hídrica Gris* (HHG) del cianuro (CN)**

En el caso del indicador de *Huella Hídrica Gris* del cianuro, se presentó el mismo problema de información que para el mercurio, por lo que se decidió también aplicar el mismo procedimiento empleado con el indicador de la *Huella Hídrica Gris* del mercurio.

Para el consumo de cianuro se tiene establecido aproximadamente entre 1,72 – 1,90 kg de CN por tonelada de mineral¹³ según (Gobernación de Antioquia, 2006). Para conocer la cantidad de cianuro utilizado, fue necesario consultar la cantidad de mineral tratado, éste se obtuvo a partir de información secundaria (Cordy, y otros, 2011) donde se estimó que para cinco municipios (Segovia, Remedios, El Bagre, Zaragoza y Nechí) existían 2600 cocos aproximadamente, cada coco en promedio se utiliza 2 veces por día y cada uno de ellos tiene capacidad de procesar 60 kg de mineral.

Ecuación 30. Consumo estimado de cianuro por minería de oro.

$$\begin{aligned} \text{ConsumoCN} &= 2600 \text{cocos} \times 2 \frac{\text{veces}}{\text{día}} \times 1.72 \frac{\text{KgCN}}{\text{t mineral}} \times 60 \frac{\text{Kg mineral}}{1\text{coco}} \times 1 \frac{\text{t mineral}}{1000\text{Kg mineral}} \\ &\times 360 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 193.19 \frac{\text{t CN}}{\text{año}} \end{aligned}$$

Este consumo de CN corresponde a la producción de oro en los cinco municipios mencionados anteriormente, por lo tanto para hallar el consumo de CN en los municipios de la cuenca del río Porce, se utilizó la siguiente regla de tres simple adoptando la suposición de que el cianuro permite extraer el 50% del oro:

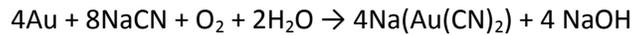
Ecuación 31. Consumo estimado de cianuro por minería de oro en Segovia

$$\text{ConsumoCN segovia} = \frac{\text{Prod oro Segovia} \times \text{Consumo CN}}{\text{Prod oro total}}$$

¹² Información obtenida del Sistema de Información Minero Colombiano SIMCO

¹³ Se considera mineral como el suelo que es extraído en el cual se encuentra mezclado el oro.

Como no se tiene estimado la cantidad de cianuro que es vertido en las fuentes hídricas, fue necesario identificar una relación estequiométrica que permita definir cuánto es el consumo teórico de cianuro en la extracción de oro. Este valor se le resta al consumo total de cianuro y se asume que la diferencia es lo que se descarga en los afluentes. Mediante la ecuación de Elsner, se tiene la siguiente relación estequiométrica:



Como ejemplo se tiene, si en Segovia se utilizan 59,41 toneladas CN/año y se produce mediante cianuración 1710,5 kg de oro, en teoría el proceso de cianuración solamente requiere 855,25 kg de NaCN al año, el resto de esta sustancia se desperdicia y a se vierte en las fuentes hídricas (carga contaminante). El indicador de *Huella Hídrica Gris* para el cianuro, se obtiene con la siguiente ecuación:

Ecuación 32. Indicador de Huella Hídrica Gris **Ecuación 29. Indicador de *Huella Hídrica Gris*.**

$$\text{Indicador HHG} = \frac{\frac{\text{Carga contaminante}}{(C_{\max} - C_{\text{nat}})}}{\text{Producción} \times \text{Porcentaje de oro obtenido con mercurio}}$$

$$\text{Indicador HHG} = \frac{\text{Carga contaminante}}{\text{Producción} \times \% \text{ oro obtenido con cianuro}}$$

Y para finalizar se multiplica el indicador por la producción de oro en cada municipio de la cuenca, de esta forma se estima la *Huella Hídrica Gris* del cianuro (m³/año).

2.5.2. Material de construcción arenas-gravas

Los materiales de construcción para este estudio se dividieron en dos grupos: arenas - gravas y arcillas.

Para las arenas y gravas se estimó los tres indicadores de *Huella Hídrica* (*Azul*, *Verde* y *Gris*), a continuación se describe la metodología empleada para su cálculo. La información base para el cálculo de estos indicadores fue (Gobernación de Antioquia, 2010) (Alcaldía de Medellín, 2010) (Ramírez, 2008), información recolectada en la autoridad ambiental (Corantioquia) e información obtenida en visitas a diferentes empresas mineras.

En los estudios mencionados anteriormente se reportaron datos de producción en unidades de m³; sin embargo, considerando que los resultados de *Huella Hídrica* del oro estaban en unidades de m³/kg, se decidió convertir las unidades de medida para las arenas, gravas y arcillas. Consultando información se adoptó una densidad promedio de 2.350 kg/m³ de arena y grava. Esta densidad al multiplicarla por la producción, da como resultado unidades de masa (kilogramos).

- ***Huella Hídrica Azul* (HHA)**

Para estimar la *Huella Hídrica Azul*, se encontró información para un total de cinco empresas que representan características diferentes en los procesos de extracción. En algunos casos para hallar el indicador de *Huella Hídrica Azul* se utilizó la ecuación propuesta por (Hoekstra A. Y., Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011), pero en otros casos la información disponible facilitaba el cálculo porque reportaban las pérdidas de agua en el sistema de beneficio. Estos valores divididos por la producción de cada empresa dio como resultado 5 valores diferentes de indicadores, en consecuencia se decidió promediar los valores obtenidos para utilizar un único indicador para toda la producción de arenas y gravas en la cuenca de estudio. El indicador de *Huella Hídrica Azul* se obtuvo con la siguiente ecuación:

Ecuación 33. Indicador de *Huella Hídrica Azul* en minería.

$$\text{Indicador HHA} = \frac{(\text{Caudal}_{\text{entrada}} - \text{Caudal}_{\text{salida}}) \text{m}^3 \text{ agua/año}}{\frac{\text{Producción m}^3 \text{ material/año}}{\text{Densidad promedio kg material/m}^3 \text{ material}}}$$

Una vez calculado el indicador de *Huella Hídrica Azul* se procedió a multiplicarla por la producción de cada uno de los municipios de los cuales se tenía reportes de producción.

- ***Huella Hídrica Gris (HHG)***

Para hallar el indicador de la *Huella Hídrica Gris* de las arenas y gravas, se encontró información para 13 empresas. Para cada una de ellas se tuvo el valor de la carga aportante (sólidos suspendidos totales). Esta carga se divide por la producción de la empresa y se obtiene un indicador por empresa. Los 13 indicadores obtenidos se promedian para hallar un único indicador de *Huella Hídrica Gris* de sólidos suspendidos totales para la cuenca. La ecuación para hallar el indicador de *Huella Hídrica Gris* es:

Ecuación 34. Indicador de *Huella Hídrica Gris* en minería.

$$\text{Indicador HHG} = \frac{\frac{\text{Carga contaminante kg SST / día}}{\text{Producción kg material / día}}}{(C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}) \text{ kg SST / m}^3 \text{ de agua}}$$

Por último el indicador se multiplica por la producción de cada municipio y se obtiene la *Huella Hídrica Gris* total de los SST para arenas y gravas.

P2 - 3. Etapa 3: evaluación de sostenibilidad

3.1. Análisis de sostenibilidad

Se compararon las tres *Huellas Hídricas* obtenidas en la cuantificación (incluyendo un análisis sectorial y multisectorial) con las características en el territorio asociadas al significado de cada una de las *Huellas*. Este trabajo estuvo enmarcado en los diferentes escenarios actuales, posibles y deseados, según los Planes de Ordenación y Manejo de Cuenca y las metas de conservación y protección ambiental establecido para los ríos y quebradas por parte de las autoridades ambientales que tienen atribución en la cuenca.

Con los tres análisis (ambiental, social y económico) de las tres *Huellas (Verde, Azul y Gris)*, en las 31 cuencas y todos de forma mensual (12 meses por año), se consiguieron analizar un gran número de variaciones y situaciones especiales en toda la cuenca, con lo que consiguió obtener finalmente la identificación de puntos clave, temporal y geográficamente explícitos, de forma que puedan ser utilizados para la toma de decisiones efectivas, concretas y localizadas en el espacio y en el tiempo.

3.1.1. Análisis ambiental

Del análisis ambiental se obtiene como principal conclusión la baja capacidad de asimilación que tiene la cuenca dada la gran carga contaminante que recibe, especialmente en la cuenca del Valle de Aburrá.

Como segunda conclusión, se evidencia la competencia que existe entre los sectores agropecuario y ambiental, evidenciada por la competencia existente por el agua verde en la mayor parte de las zonas analizadas en la cuenca.

Como última conclusión se corrobora que la cuenca no presenta problemas de disponibilidad de agua por cantidad, ya que cuenta con suficiente caudal para abastecer las necesidades multisectoriales identificadas. El problema de disponibilidad está dado por la calidad, mas no por la cantidad.

3.1.2. Análisis económico

3.1.2.1. Marco teórico análisis económico aplicado a la Huella Hídrica

Para el caso del estudio en la cuenca del río Porce se definieron dos criterios económicos que están relacionados con el recurso hídrico y las principales actividades económicas en la cuenca, el primero es el ingreso económico en relación con el uso del agua y el segundo hace referencia a los costos de la descontaminación del agua.

3.1.2.2. Criterio 1: ingreso en relación con el uso del agua

Los recursos naturales agotables son “activos financieros”, esto significa que la gestión adecuada (el agotamiento óptimo) desde el punto de vista del propietario-extractor de este tipo de activos, sería aquella que permitiese la obtención de una rentabilidad similar a la de otros activos financieros que soportasen el mismo tipo de riesgo¹⁴. En consecuencia si un propietario-extractor de agua considerase que la rentabilidad obtenida es insuficiente, una de las posibles reacciones podría consistir en deshacerse del recurso e invertir su dinero en otros activos más rentables. Otra opción consistiría en agotarlo, suponiendo que existen tecnologías de sustitución o de contención, y buscar nuevas inversiones financieras. Lo anterior puede resultar incomprensible si no se relaciona con aspectos como el papel del agua como bien intermedio (agua de riego), como bien privado (uso doméstico) y bien público (recreación, calidad, papel en las inundaciones, hábitat, belleza escénica, entre otros). Dentro de este criterio, se definen tres indicadores asociados con la “productividad aparente” del agua verde, agua azul y la tierra, los cuales son explicados a continuación.

a) Productividad aparente del agua azul

El primer concepto se toma a partir del estudio “Análisis de la *Huella Hídrica* extendida de la cuenca del Guadalquivir”. Se ha utilizado en el caso de la agricultura y estima el valor de producción a precios corrientes por unidad de agua consumida. Este indicador va a permitir que se ponga de manifiesto la capacidad de generación de ingresos para los sectores analizados en relación al consumo de agua.. Se estima dividiendo el precio de mercado del producto j (P_m , \$)¹⁵ por su *Huella Hídrica Azul* (HHa, m³).

Ecuación 35. Productividad aparente del agua azul (APW azul).

$$APW \text{ azul} = \frac{\text{Precio de mercado (\$)}}{\text{Huella hídrica azul (m3)}}$$

En el caso de una cuenca, este indicador se aplicó para analizar el sector agrícola, minero, industrial, pecuario y energético.

¹⁴ Robert Merton Solow, economista estadounidense, Premio Nobel de Economía en 1987 por sus contribuciones a la teoría del crecimiento económico. <http://www.eumed.net/cursecon/economistas/solow.htm>

¹⁵ Se contemplan los precios de mercado al productor y no al consumidor, de forma que se elimine el valor agregado asociado a uno o varios procesos industriales y de comercialización existentes entre la materia prima en bruto y el producto transable comercialmente dirigido a consumo masivo.

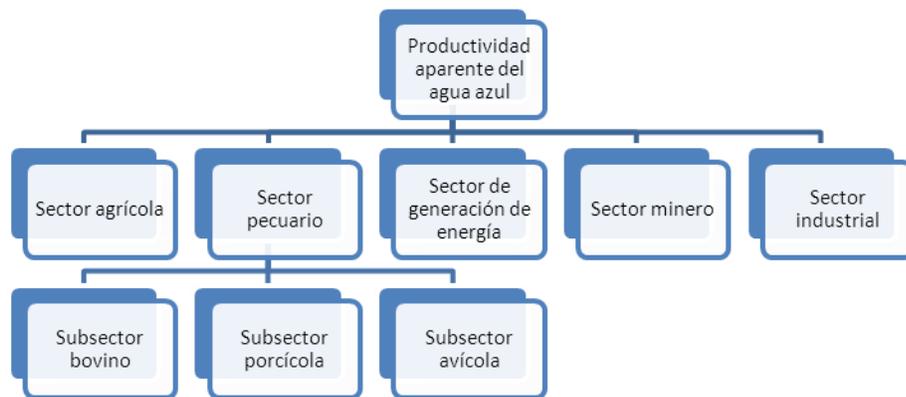


Figura 22. Esquema de aplicación de la APW azul en la cuenca del río Porce.

En el caso del sector agrícola se toman en cuenta los precios de mercado constantes de cada cultivo, los cuales deben ir expresados en pesos por tonelada (\$/t) y la *Huella hídrica* de cada cultivo expresada en metros cúbicos por tonelada (m³/t).

Ecuación 36. APW azul agrícola.

$$APW \text{ azul} = \frac{\text{Valor de la producción del cultivo } \$/\text{ton}}{\text{Huella hídrica azul del cultivo } \text{m}^3/\text{ton}} = \frac{\$}{\text{m}^3}$$

Para la actividad pecuaria, se tomaron en cuenta los precios del ganado en peso vivo, el número de animales para leche y carne que hay en la cuenca y la *Huella Hídrica Azul* asociada a los pastos. Para el ganado de carne, se debe tener el dato de peso, el cual preferiblemente debe estar en kilogramos por animal y el dato de precio promedio del kilo de carne en peso vivo, con el fin de calcular el valor de la producción de carne. Para el ganado de leche, se debe tener el dato de litros que se producen en la cuenca en un año y el precio promedio del litro de leche, con el fin de conocer el valor de producción de la leche. A partir de estos datos se calcula la APW azul del sector pecuario.

Ecuación 37. APW azul pecuario – bovino.

$$APW \text{ azul} = \frac{\text{Valor de la producción de carne bovina } \frac{\$}{\text{año}}}{\text{Huella hídrica azul del sector bovino } \frac{\text{m}^3}{\text{año}}} = \frac{\$}{\text{m}^3}$$

Para la actividad porcícola, se debe tener el dato del número de animales al año que tiene la cuenca, el peso promedio vivo (kg) de un animal y el precio promedio de la carne de cerdo (\$/kg). Con este dato, se calcula la APW azul del sector porcícola.

Ecuación 38. APW azul pecuario – porcino.

$$APW \text{ azul} = \frac{\text{Valor de la producción de carne porcícola} \frac{\$}{\text{año}}}{\text{Huella hídrica azul del sector porcícola} \frac{\text{m}^3}{\text{año}}} = \frac{\$}{\text{m}^3}$$

Para la actividad avícola, se debe tener el dato del número de aves al año que tiene la cuenca, el peso promedio vivo (kg) de un ave y el precio promedio de la carne de ave (\$/kg). También se consideró la producción del huevo, por lo cual se requiere el dato del número de huevos producidos en la cuenca en un año y el precio por unidad del huevo para calcular el valor de la producción de huevos al año. Con estos datos se calcula el valor de la producción del huevo en un año en la cuenca, de esta manera, se calcula la APW azul del sector avícola.

Ecuación 39. APW azul pecuario - avícola

$$APW \text{ azul} = \frac{\text{Valor de la producción avícola} \frac{\$}{\text{año}}}{\text{Huella hídrica azul del sector avícola} \frac{\text{m}^3}{\text{año}}} = \frac{\$}{\text{m}^3}$$

Para el sector de energía, se debe tomar el precio del GWh de energía en el mercado y el número de GWh que se genera en un año en la cuenca. Con estos datos se calcula el valor de la generación de energía en un año en la cuenca y con éste, se calcula la APW azul del sector de energía.

Ecuación 40. APW azul energía hidroeléctrica.

$$APW \text{ azul} = \frac{\text{Valor de la producción de energía} \frac{\$}{\text{año}}}{\text{Huella hídrica azul del sector de energía} \frac{\text{m}^3}{\text{año}}} = \frac{\$}{\text{m}^3}$$

Para el sector industrial se toma el valor de las ventas en un año y la *Huella Hídrica* de este sector la cual debe ir expresada en m³/año.

Ecuación 41. APW azul sector industria.

$$APW \text{ azul} = \frac{\text{Valor de las ventas del sector industrial} \frac{\$}{\text{año}}}{\text{Huella hídrica azul del sector avícola} \frac{\text{m}^3}{\text{año}}} = \frac{\$}{\text{m}^3}$$

En el sector de minería de oro se toma en cuenta el precio promedio anual del kilo de oro, la producción de oro en la cuenca durante un año expresada en kilos y la *Huella Hídrica Azul* del sector minero expresada en m³/año. Con estos datos se calcula el valor de la producción de oro en un año en la cuenca y posteriormente se estima la APW azul del sector de minería de oro.

Ecuación 42. APW azul minería de oro.

$$APW \text{ azul} = \frac{\text{Valor de la producción minera } \frac{\$}{\text{año}}}{\text{Huella hídrica azul del sector minero } \frac{\text{m}^3}{\text{año}}} = \frac{\$}{\text{m}^3}$$

Para el sector de minería de gravas y arenas se toma en cuenta el precio promedio anual del m³ de arenas y gravas en un año, la densidad de las arenas y gravas expresada en kg/m³, la producción durante un año (kg) y la *Huella Hídrica Azul* del sector minería de gravas y arenas expresada en m³/año. Con estos datos se calcula el precio promedio del m³ en un año expresada en kg y el valor de la producción en un año en la cuenca. Con el precio promedio expresado en \$/m³ y la *Huella Hídrica Azul* en m³/año se calcula la APW azul del sector de la minería de gravas y arenas.

Ecuación 43. APW azul minería de gravas y arenas.

$$APW \text{ azul} = \frac{\text{Precio promedio de arenas y gravas } \frac{\$}{\text{Kg}} \times \text{Producción de arenas y gravas en un año } \frac{\text{Kg}}{\text{Año}}}{\text{Huella hídrica azul del sector de la minería de arenas y gravas } \frac{\text{m}^3}{\text{año}}} = \frac{\$}{\text{m}^3}$$

b) Productividad aparente del agua verde

Este indicador es similar a la productividad aparente del agua azul, pero la diferencia radica en que es un recurso que está disponible de forma natural en el medio ambiente, es decir que no tiene un costo económico real, pero cuyo consumo sí genera competencia con otros usos y genera un beneficio económico por la apropiación humana del agua contenida en el suelo que proviene de la lluvia. Se estima dividiendo el precio de mercado del producto j (Pm, \$) por su *Huella Hídrica Verde* (HHV, m³).

Ecuación 44. Productividad aparente del agua verde (APW azul).

$$APW \text{ verde} = \frac{\text{Precio de mercado } (\$)}{\text{Huella hídrica verde } (\text{m}^3)}$$

Este indicador se puede tomar en cuenta para analizar el sector agrícola y pecuario, que son los únicos en los cuales es aplicable la *Huella Hídrica Verde*. Para este sector se realiza el mismo procedimiento de la APW azul, pero tomando en cuenta la *Huella Hídrica Verde* (m³/t) para el sector agrícola y la *Huella Hídrica Verde* asociada a los pastos (m³/año).

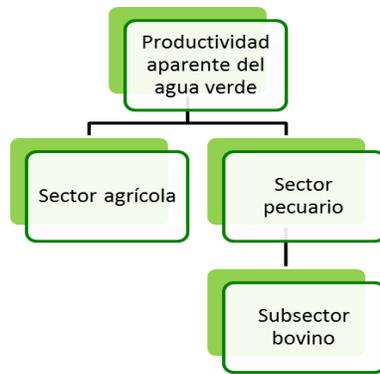


Figura 23. Esquema de aplicación de la APW verde en la cuenca del río Porce.

c) Productividad aparente de la tierra (APL)

Este indicador representa el valor económico a precios constantes por hectárea de tierra cultivada, por lo cual aplica solo para el sector agrícola. Este indicador es importante porque incluye dentro del análisis el factor de producción de la tierra. Se calcula multiplicando el precio de mercado del producto j (Pm, \$/t) por su rendimiento (t/ha). Se calcula tanto para los cultivos con riego y en secano.

Ecuación 45. Productividad Aparente de la Tierra (APL).

$$APL = P_m(j) * t/ha(j)$$

Este indicador ha de verse como un factor dinámico que evoluciona en el tiempo. Los cambios producidos en él vienen motivados por las respuestas que adoptan los productores en relación a una serie de variables sobre las que pueden incidir y que afectan directamente a la producción y a sus resultados económicos (cambios de cultivos, mejoras tecnológicas, agua utilizada) y también a distintos condicionantes externos sobre los que no pueden actuar, pero que también modifican sus resultados económicos y producciones (subvenciones recibidas y las restricciones que éstas acarrearán, evolución de los precios de los cultivos y las disponibilidades hídricas) (Gómez-Limón, Calatrava, Garrido, Sáez, & Xabadia, 2009).

3.1.2.3. Criterio 2: costos de descontaminación del agua.

La mayor parte de las actividades socioeconómicas requieren que los desechos de productos secundarios sean removidos del medio ambiente, como el agua. En términos de los factores de producción, el “influjo productivo” es la capacidad del agua para llevarse los desechos. Cuando este elemento está disponible sin cargo alguno, es invariablemente más económico que cualquier otra alternativa para la remoción de desechos. El sobreuso resultante conduce directamente al problema de la contaminación del agua.

El costo del agua ha sido bajo en la mayor parte del mundo a través de la historia. En muchos casos, estos precios bajos están relacionados con la abundancia del recurso (Aranda Contreras, 2007).

Dentro de este criterio se toma la *Huella Hídrica Gris*, como indicador de calidad del recurso hídrico y se compara con los costos de tratamiento asociados al principal efecto de la contaminación identificada sobre el medio ambiente (por ejemplo eutrofización de embalses como efecto principal de la contaminación difusa generada por la fertilización de campos de cultivo y el aumento natural en la concentración de nutrientes -nitrógeno y fosforo- en el agua) o los costos por descontaminación del principal contaminante (por ejemplo el costo de remoción de DBO₅ o SST como parte de un tratamiento de aguas servidas de origen urbano).

Este indicador evalúa la viabilidad económica de involucrar a los actores corresponsables de la contaminación, en el costo de la remediación y mitigación de los efectos secundarios de su actividad y toma esto como un factor de sostenibilidad económica de la actividad.

3.1.3. Análisis social

3.1.3.1. Marco teórico análisis social aplicado a la Huella Hídrica

A partir de este enfoque y con el propósito de explorar qué tanto el análisis de la *Huella Hídrica* puede informar acerca de la condición social de una cuenca, fueron seleccionados criterios sociales relacionados con el recurso hídrico y que además permitieran la articulación con los análisis económicos y ambientales. Igualmente el desarrollo de todos los criterios sociales propuestos por el marco conceptual dependen en gran medida de la disponibilidad de información, por lo cual el análisis no se llevó a cabo para todos los criterios y es parte de las limitaciones en el alcance del presente estudio.

Tabla 5. Criterios sociales para el análisis social de la *Huella Hídrica*.

Criterios sociales	Descriptor	Indicador	Sector económico involucrado
Proteger el bienestar mental	Empleo	Número de empleos	Industrial, agropecuario y minería
Protección de la salud	Salud: índice de Riesgo por Calidad de Agua IRCA y reporte de enfermedades de origen hídrico y transmitidas por vectores.	Reporte de enfermedades	Minería
		Calificación del IRCA	Doméstico Agropecuario

Trato equitativo	Indicadores socio-económicos de calidad de vida y pobreza	Consumo en m ³ diferenciado por estrato socioeconómico	Doméstico
Provisión de servicios esenciales	Caudal prioritario reservado Coberturas en acueducto y alcantarillado	Porcentajes en coberturas	Doméstico Energía

Los descriptores corresponden a análisis realizados para dar cuenta de los criterios sociales y comprender el contexto social de la cuenca y su interacción con los componentes económicos y ambientales.

Para el análisis social de la cuenca fueron tomados tres criterios:

- Caudal prioritario reservado

Se hizo un análisis equivalente al realizado con la *Huella Azul* en el análisis ambiental, pero en este caso la *Huella Hídrica Azul* se compara con la oferta natural disponible (oferta natural menos el caudal mínimo ecológico y menos el caudal de dotación para abastecimiento humano) y oferta regulada disponible de la cuenca (oferta regulada menos el caudal mínimo ecológico y menos el caudal de dotación para abastecimiento humano). Identificando para esta situación posibles puntos geográfica y temporalmente explícitos donde se presente estrés hídrico.

- Salud pública (IRCA, enfermedades)

Fueron identificados en la cuenca los puntos que reportan casos de enfermedades de origen hídrico y los puntos en donde éstas se han detectado y se informa que hay un riesgo por consumo de agua (índice de riesgo en la calidad del agua para consumo humano). Estos puntos fueron cruzados con los resultados geográficos de *Huella Hídrica Gris* buscando identificar potenciales corresponsables de la situación reportada por las autoridades, de forma que se encuentren puntos clave de insostenibilidad social.

- Cobertura (acueducto y alcantarillado)

Se evaluó la situación del territorio de la cuenca en términos de cobertura de servicios básicos domiciliarios de agua.

El primero de ellos es el abastecimiento de agua potable y se comparó con los resultados de *Huella Hídrica Azul*, de forma que se pudieron identificar zonas con baja cobertura y alta *Huella Hídrica Azul*. Esto implicaría competencia por el recurso entre el sector productivo y la población. También se identificaron zonas con baja cobertura, baja *Huella Hídrica Azul* y alta disponibilidad de agua.

Según este análisis social estos puntos se identifican como claves desde el punto de vista político, dado que se identifica un problema que no tiene ninguna razón natural para existir, por lo que el problema es de gestión.

Por último se evaluó la cobertura de saneamiento básico y se comparó con la *Huella Hídrica Gris*, identificando zonas con baja capacidad de asimilación especialmente asociada a falta de sistemas de saneamiento que dependen de la voluntad política y la gestión pública.

3.2. Identificación de *hotspots* en la cuenca Porce

Como resultado final de los análisis ambiental, económico y social, de forma mensual, para cada una de las 7 grandes áreas hidrográficas y 31 cuencas en la cuenca del río Porce, se obtuvo un panorama multicriterio, que permitió identificar más de 100 puntos clave en la cuenca siguiendo los siguientes criterios:

AMBIENTAL: puntos donde la *Huella Azul o Verde* supera la oferta de agua azul o verde. Puntos donde se identifica excedida la capacidad de asimilación de la cuenca.

ECONÓMICO: puntos con baja APW relativa a otros usos competitivos del recurso.

SOCIAL: zonas con bajos niveles de calidad de vida (indicadores socioeconómicos) y zonas donde se identifican problemas asociados a la voluntad política, pues existen suficientes recursos hídricos, pero se presentan problemas de acceso al agua y saneamiento, además de incidencia de enfermedades de origen hídrico y transmitidas por vectores.

P2 - 4. Etapa 4: formulación de estrategia de respuesta y aproximación a la política pública

La propuesta de lineamientos se formula desde dos enfoques integrales y territoriales: un primer enfoque dirigido a reconocer y actuar sobre las categorías del uso del agua para la gestión integral del recurso hídrico, donde se deben trabajar áreas estratégicas e interdependientes, sociales, económicas, ambientales, institucionales, tecnológicas y de conocimiento. El segundo enfoque propone estrategias por cuenca que apuntan a reconocer las particularidades y formular acciones concretas para puntos críticos del territorio.

Como insumos para la formulación de los lineamientos de política se consideraron los eventos de participación realizados durante la ejecución de las fases del proyecto, que permitieron conocer las condiciones para cada territorio desde las perspectivas de los actores que los habitan y complementar esa visión con la información proporcionada por la evaluación de la *Huella Hídrica*. Cada uno de estos eventos de participación articulado a la información obtenida permitió priorizar las problemáticas presentes desde cada sector y vincularlas a todo el territorio de la cuenca del río Porce.

Tabla 6. Identificación problemática sectorial en la cuenca del río Porce.

Sector	Problemáticas
Agrícola y pecuario	<ul style="list-style-type: none"> - Uso excesivo de abonos orgánicos y químicos que generan contaminación de las fuentes hídricas y efectos nocivos sobre la salud. - Reducción de las áreas protegidas y de retiro de fuentes hídricas debido a la expansión de la frontera agrícola y pecuaria. - Altos costos de producción y bajos rendimientos de los cultivos.
Doméstico	<ul style="list-style-type: none"> - Alta dependencia hídrica de otras cuencas para abastecimiento humano. - Falta de cobertura en agua potable y alcantarillado. - Vertimientos directos a fuentes de agua, con alta carga contaminante. - Falta de mantenimiento y mejoramiento de la infraestructura asociada a los acueductos y alcantarillados. Altos niveles de fugas y pérdidas de agua. - Conflictos asociados al orden público en zonas estratégicas de la cuenca.
Industrial	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de infraestructura de tratamiento de efluentes. - Falta gestión sobre el recurso hídrico subterráneo. - Contaminación potencial del agua subterránea. - Alta contaminación orgánica aportada en los afluentes. - Falta caracterización de parámetros de interés sanitario y de sustancias tóxicas. - Falta de acceso a tecnologías para el mejoramiento de procesos.
Minero	<ul style="list-style-type: none"> - Carencia de reportes oficiales del sector minero. - Dificultades para ejercer control sobre la actividad debido a condiciones difíciles de orden público. - Escasa formación de la población en prácticas mineras pertinentes. - Condiciones socioeconómicas precarias de la población asentada en las cuencas donde la actividad económica minera se localiza. - Competencia con otros sectores que afectan la productividad del sector.
Energía hidroeléctrica	<ul style="list-style-type: none"> - Modificación de los procesos naturales de la dinámica del río (sedimentos, regímenes de descarga). - Potencial conflicto en su relación multisectorial (población, pesca, minería).

La propuesta de lineamientos de política fue elaborada a partir de los resultados de la evaluación de la *Huella Hídrica*. Posteriormente, fue socializada, validada y consolidada en dos talleres, en los cuales se contó con la participación de las entidades públicas y privadas. A continuación, se presenta el esquema de la construcción de los lineamientos de política pública.

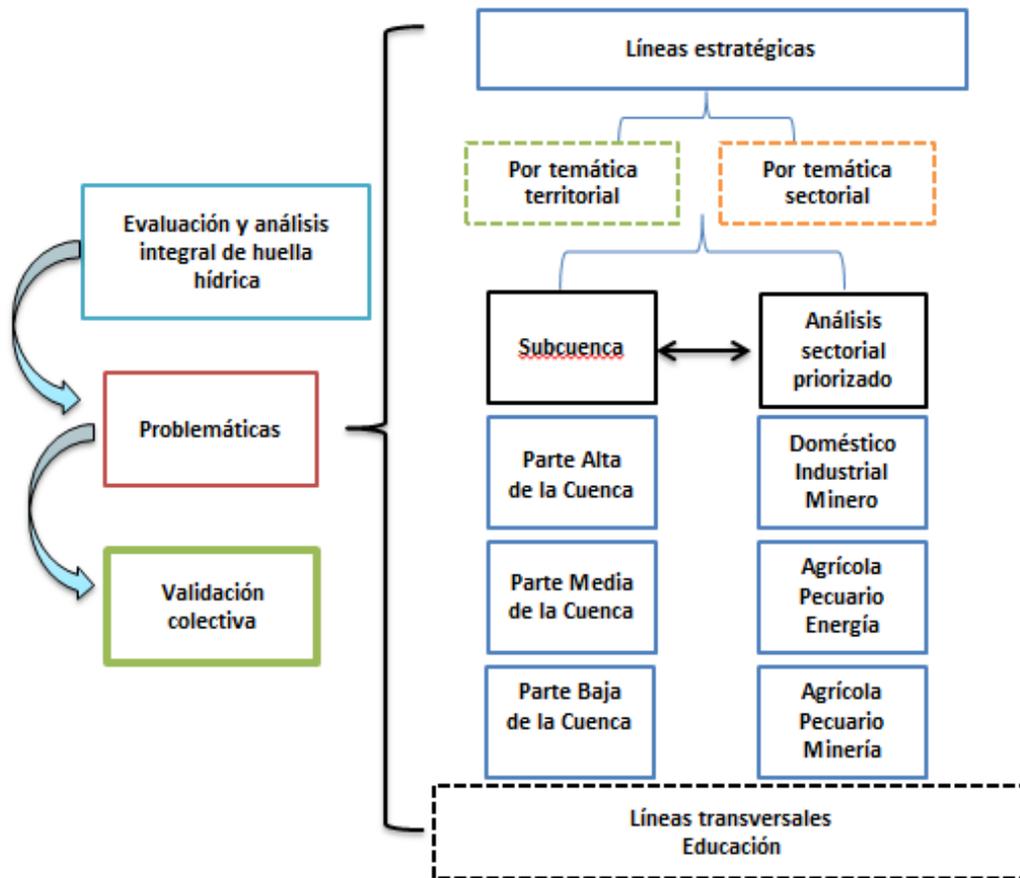


Figura 24. Esquema para el desarrollo de los lineamientos de política en la cuenca del río Porce.

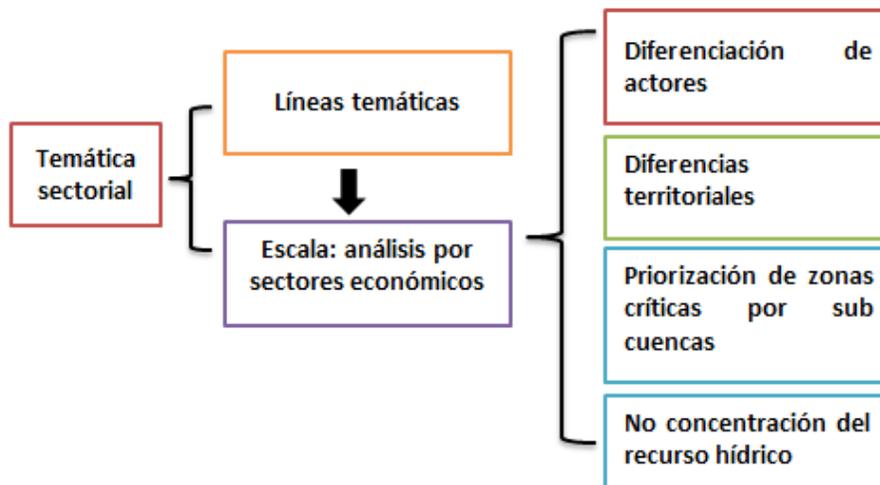


Figura 25. Temática sectorial para lineamientos de política en la cuenca del río Porce.

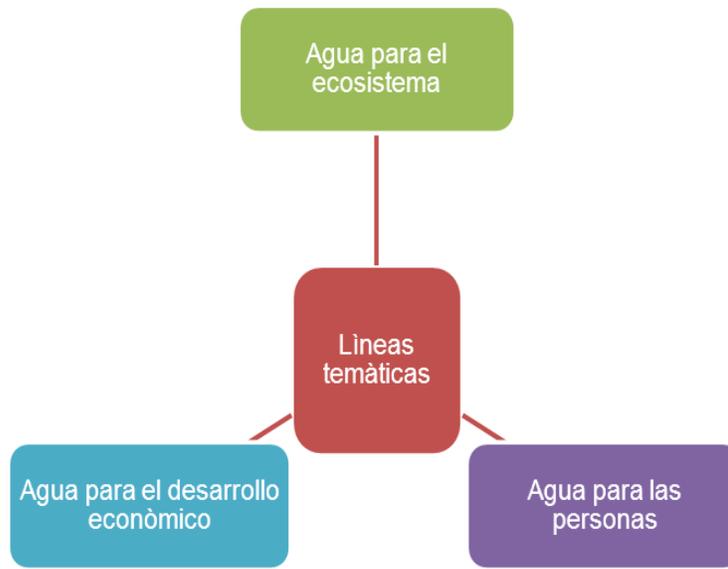


Figura 26. Detalle temática sectorial para lineamientos de política en la cuenca del río Porce.

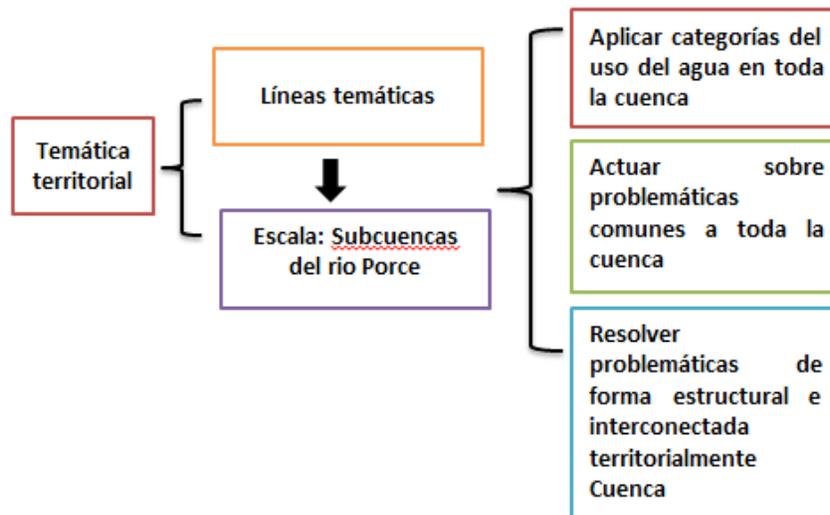


Figura 27. Temática territorial para lineamientos de política en la cuenca del río Porce.

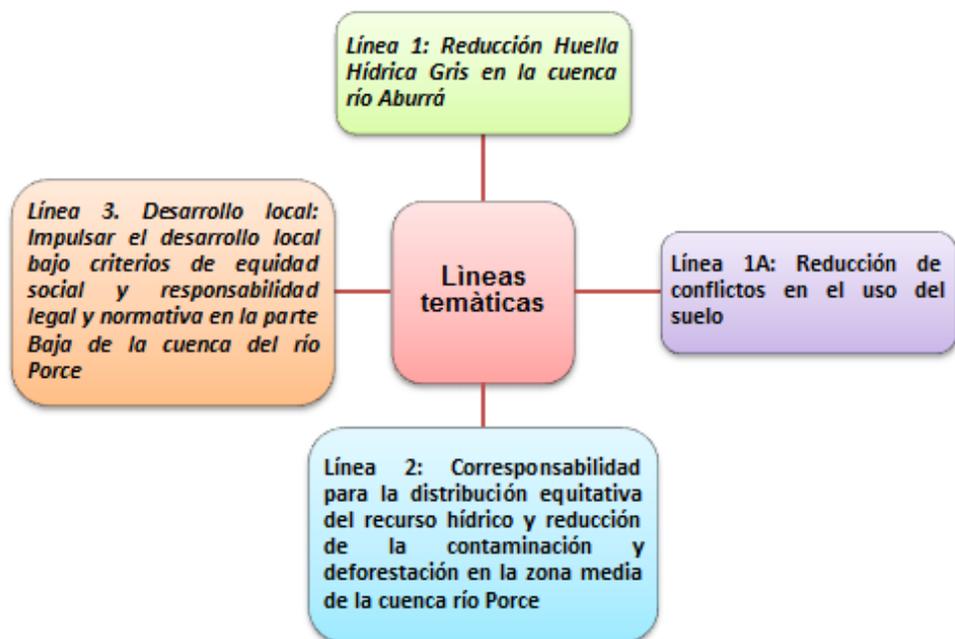


Figura 28. Detalle temática territorial para lineamientos de política en la cuenca del río Porce.

La siguiente propuesta de lineamientos se construyó para dar respuesta a las problemáticas identificadas a partir de los resultados de la evaluación de la *Huella Hídrica* para la cuenca del río Porce, con el propósito de viabilizar el conocimiento, control, monitoreo y la solución de éstas y mejorar las condiciones ecológicas, sociales y económicas en el territorio.

El eje de partida para la formulación de los lineamientos es reconocer la diferencia de escalas y de complejidad que posee el territorio en el cual se enmarca la cuenca. Por tal razón los lineamientos se elaboraron desde dos enfoques:

- Escala cuenca: referida a definir líneas temáticas para dar respuesta a problemáticas presentes en todo el territorio y que se dirigen a mejorar los usos actuales que se hacen del agua para los ecosistemas, las personas y el desarrollo económico.
- Escala cuenca-sector: este enfoque reconoce las particularidades presentes en cada una de las cuencas y formula líneas estratégicas sectoriales para establecer las medidas necesarias para ejecutar, con la vinculación de los sectores productivos que hacen uso del agua, y mejorar la sostenibilidad de la cuenca. A partir de este enfoque y teniendo en cuenta los resultados de la evaluación de la *Huella Hídrica*, se definieron tres territorios de acción:
 - a. Cuenca del río Aburrá – sectores doméstico, industrial y minero.

- b. Cuencas del río Grande, río Guadalupe y Porce medio – sectores agropecuario y energía.
- c. Cuencas del río Mata, Porce medio bajo y Porce bajo – sectores agropecuario y minero.

Por otro lado, se definió que todos los lineamientos deben poseer unas líneas de acción transversales que estarán presentes para ambos enfoques. Estas líneas están dirigidas a generar acciones que promuevan la participación, la educación y la investigación.

P2 - 5. Etapa 5: priorización de acciones

Con el fin de conseguir un análisis de viabilidad de las acciones propuestas, se procedió a la formulación y desarrollo de un modelo matemático del sistema de análisis multicriterio, para la priorización de acciones de alto impacto territorial para el manejo y protección de los recursos hídricos de la cuenca del río Porce.

5.1. Redefinición de acciones

Las acciones pertenecientes a las diferentes líneas temáticas o estratégicas fueron consolidadas de forma agregada y a un nivel de resolución muy alto. El trabajo inicial consistió en bajar a un nivel más desagregado las diferentes acciones y depurar aquellas que posiblemente tenían la misma orientación impacto. El primer ejercicio fue de interacción con el grupo de actores clave por medio de un taller y, a partir de esta experiencia, identificar las acciones con mayor potencial de ejecución, impacto y relación con los resultados de *Huella Hídrica*.

5.2. Variables de estudio y su valoración respectiva

Para cumplir con los objetivos finales y la construcción del modelo de priorización multicriterio se hizo necesario establecer un conjunto de variables las cuales pudieran tener una valoración adecuada que cuantificara el impacto sobre cada acción. Como instrumento se propuso que los actores clave definieran cuáles eran las variables más importantes a considerar desde el ámbito ambiental, económico y social. El listado final de las 13 variables es el siguiente:

Tabla 7. Variables de calificación de acciones.

VARIABLES		VALORACIÓN				
1	Inversión acción	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
2	Aceptación social	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
3	Aceptación sectorial	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
4	Grado de afectación directa a la calidad del río	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
5	Número de beneficiarios directo acción	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
6	Tiempo de incubación, implementación	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
		3 meses	6 meses	1 año	2 años	Más de 2 años
7	Voluntad político y/o sectorial requerida		Bajo	Medio	Alto	
8	Nivel de articulación interinstitucional y multisectorial requerida	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
9	Grado de afectación a la conservación de biodiversidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
10	Grado de afectación en salud pública	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
11	Grado de obligatoriedad de acción por estar enmarcada en legislación	Sí	No			
12	Grado de dificultad para hacer seguimiento y control	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
13	Generación y transferencia de conocimiento	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto

5.3. Escenarios de priorización

Luego de definir el consenso global del efecto que cada acción tiene sobre las distintas variables se definió el peso de las mismas para el modelamiento. Los pesos significan el grado de relevancia que tiene cada una de las variables para la ponderación global en el análisis.

5.3.1. Escenario 1

El primer escenario se denomina “Escenario Objetivo” y se basa en considerar de manera objetiva un mismo peso de relevancia para cada una de las variables, indicando que todas ellas tienen igual relevancia en la toma de decisiones de la priorización de las acciones.

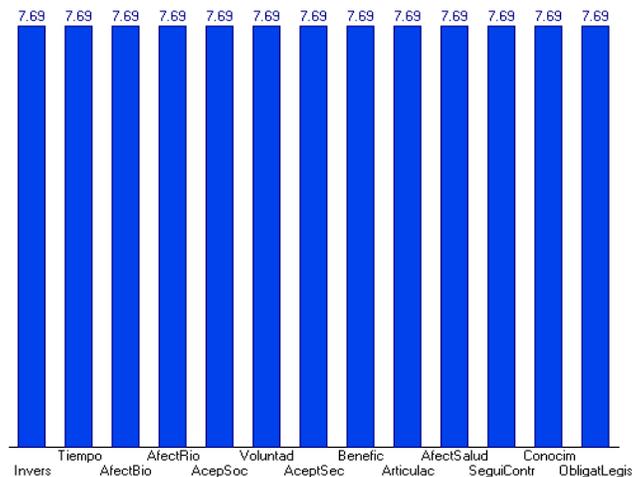


Figura 29. Peso relativo de variables en Escenario 1.

5.3.2. Escenario 2

Se definió un segundo escenario denominado “Escenario Teórico”, que se basa en la teoría de priorización multicriterio en cuanto al peso de las variables para el modelamiento. De acuerdo a la literatura, la ponderación ideal de los pesos debe distribuirse de la siguiente manera, la mitad del total de variables debe contener el 70% de la valoración y el resto de variables, el 30%.

Dentro del primer grupo de variables (70%) se consideró un mismo peso de relevancia para cada una de las variables relevantes del modelo, indicando que todas ellas tienen igual relevancia en la toma de decisiones de la priorización de las acciones. De igual forma se hizo para el resto de variables (30%).

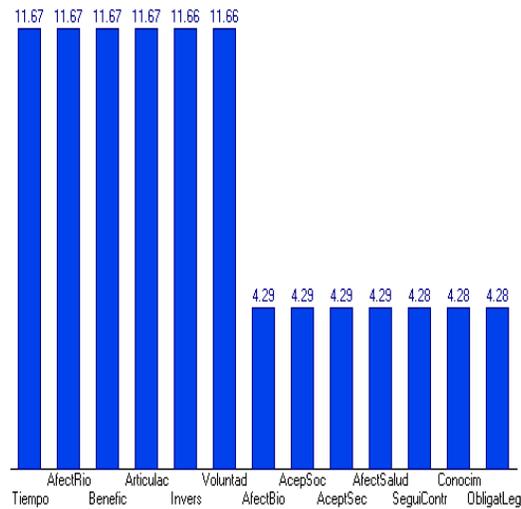


Figura 30. Peso relativo de variables en Escenario 2.

5.3.3. Escenario 3

Se definió un tercer escenario denominado “Escenario de Consenso” y se basó en asignar a cada variable el peso obtenido como el promedio de los pesos que asignaron para esa variable cada uno de los actores clave del proyecto, habiendo sido consultados de manera individual. Este escenario se basa en el conocimiento y experiencia de los expertos que participaron en este proyecto y permite establecer pesos de relevancia específicos para cada variable, de manera que se llegó a un consenso de cuál es la importancia de cada variable dentro de este estudio.

El resultado se presenta a continuación:

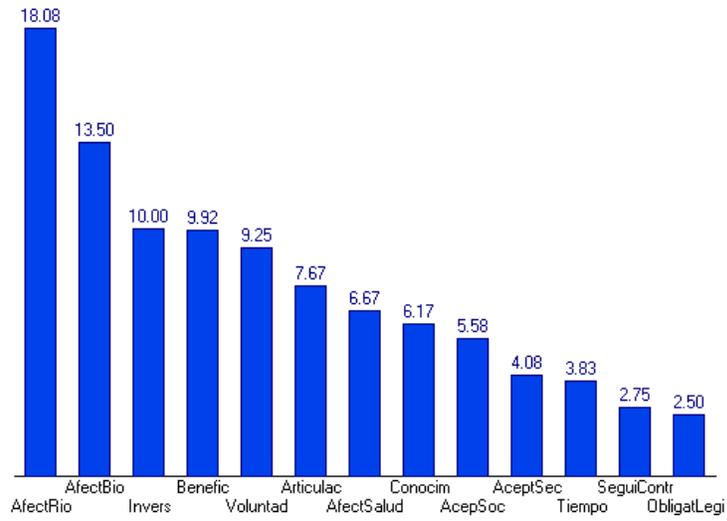


Figura 31. Peso relativo de variables en Escenario 3.

El resultado final se centra en nueve acciones que se transformaron en siete proyectos que actualmente se encuentran en fase de formulación.

Bibliografía

- Acueductos y Alcantarillados Sostenibles S.A. E.S.P. (2011). Informe de gestión área comercial Santa Rosa de Osos.
- Acueductos y Alcantarillados Sostenibles S.A. E.S.P. (2011). Informe de gestión área comercial San Pedro de los Milagros 2011.
- Aldaya, M.M., Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y, Mekonnen, M.M. (2009). Water Footprint Manual, State of the Art 2009.
- Aldaya, M.M., Llamas, M. (2010). Water Footprint Analysis (Hydrologic and Economic) of the Guadania River Basin.
- Alcaldía de Medellín. (2010). Plan de Parques Minero Industriales para el Municipio de Medellín. Medellín.
- Allan, John (1998) A. Virtual water: a strategic resource. Global solutions to regional deficits. En Ground Water, Vol. 36.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2011). Red de monitoreo ambiental en la cuenca hidrográfica del río Aburrá - Medellín en jurisdicción del Área Metropolitana - Fase III. Medellín.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Cornare, Corantioquia, & Universidad Nacional de Colombia. (2007). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del río Aburrá. Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- Boulay, A., Bulle, C., Deschenes, L., & Margni, M. (2011). LCA Characterization of freshwater use on human health and through compensation. Berlín: Springer.
- Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y. (2004). Water footprints of nations. Volumen 1 y 2.
- Corantioquia. (2003). Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca del río Guadalupe. Medellín.
- Corantioquia. (2005). Plan de ordenación y manejo de las cuencas de los ríos Grande y Chico, incluido todo su sistema de drenaje hasta su desembocadura en el río Porce. Medellín.
- Corantioquia. (2011). Territorio Corantioquia: Atlas Geográfico (p. 105). Medellín: Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia.
- Corantioquia, Tecnológico de Antioquia. (2011). Informe de monitoreo de la calidad y cantidad del recurso hídrico en las cuencas de influencia del sector eléctrico. Medellín.
- Cordy, P., Veiga, M., Salih, I., Al Saadi, S., Console, S., García, O., y otros. (2011). Mercury contamination from artisanal gold mine in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution. Science of the total Environment, 154-160.
- Chow, V. (1994). Hidrología Aplicada. Bogotá: McGraw-Hill.

- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2005). Estimaciones de población 1985-2005 y proyecciones de población 2005 -2020 total municipal por área.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2011). Banco de datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística.
- Departamento Nacional de Planeación-DNP-. (2011). Índice de Pobreza Multidimensional (IPM-Colombia) 1997-2008 y meta del PND.
- El colombiano. (s.f.). El colombiano. Recuperado el 15 de Diciembre de 2012, de El Colombiano: <http://www.elcolombiano.com>
- Empresas Públicas de Medellín. (2002). Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico Porce III. Medellín.
- FAO. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO.
- Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A. Y., and Van der Meer, T. H. 2009. The water footprint of bioenergy, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 106, 10219–10223.
- Gobernación de Antioquia. (2006). Diagnóstico para la implementación de sistemas de gestión ambiental en el distrito minero Segovia-Remedios. Medellín.
- Gobernación de Antioquia. (2009a). Perfil de la subregión del Bajo Cauca. Medellín.
- Gobernación de Antioquia. (2009b). Perfil Subregional Norte Antioqueño. (D. A. de Planeación, Ed.). Medellín: Gobernación de Antioquia.
- Gobernación de Antioquia. (2010). Anuario estadístico de Antioquia. (D. A. de Planeación, Ed.). Medellín: Gobernación de Antioquia.
- Gobernación de Antioquia. (2010). Formulación de los lineamientos de ordenación minero ambiental para los materiales de construcción en la cuenca del río Aburrá. Medellín.
- Gobernación de Antioquia. (s.f.). Aplicativo Plan Departamental de Agua - PDA. Recuperado el 2012, de <http://app-pda.aula.com.co/pda/>
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The water footprint network assessment manual: Setting de global standard. London: Earthscan.
- Herath, I., M. Deurer, D. Horne, R. Singh, and B. Clothier. 2011. The water footprint of hydroelectricity: a methodological comparison from a case study in New Zealand. Journal of Cleaner Production 19: 1582-1589.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2011). Estudio nacional del agua 2010. Bogotá.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2010). Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Bogotá.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2010). Mapa de Zonificación hidrográfica de Colombia. Escala 1:500.000.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC (2007). Base cartográfica del mapa físico-político.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2008-2010). Registro Único Ambiental – RUA. Plataforma Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Corantioquia.
- Mekonnen, M., & A.Y. Hoekstra. (2010). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. Volumen 1 y 2.
- Mekonnen, M. & A.Y. Hoekstra. (2010). The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products. Volumen 1 y 2.
- Mekonnen, M. & A.Y. Hoekstra. (2011). National Water Footprint accounts. The green, blue and grey water footprint of production and consumption. Volumen 1 y 2.
- Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. (2011) The water footprint of electricity from hydropower, Value of Water Research Report Series No. 51, Unesco-IHE, Delft, the Netherlands.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2004). Resolución 1433.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Título D. Bogotá.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). RAS 2000. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. Bogotá, Colombia.
- Municipio de Carolina del Príncipe. (2010). Estudios y diseños para el Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado.
- Municipio de Entreríos. (2012). Plan de Desarrollo Entreríos: "Mejorando de Verdad" 2012-2015. Antioquia.
- Municipio de Guadalupe. (2006). Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos.
- Ramírez, M. I. (2008). Sostenibilidad de la explotación de los materiales de construcción en el Valle de Aburrá. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Superintendencia de Servicios Públicos. (2005). Historia del SUI. Recuperado el 2012, de http://www.superservicios.gov.co/home/web/guest/historia_sui
- Veiga, M. (2010). Antioquia, Colombia: the world's most polluted place by mercury: impressions from two field trips. University of British of Columbia.

- WWAP . (2009). The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World. Paris, and Earthscan, London: WWAP, Unesco Publishing.
- WWF, (2009). UK Water Footprint: the impact of the UK's food and fibre consumption on global water resources.
- WWF, (2009). Understanding water risks. A primer on the consequences of water scarcity for government and business.
- WWF, (2010). Planeta Vivo. Informe 2010. Biodiversidad, biocapacidad y desarrollo.
- WWF. (2010). Water footprint in Portugal.
- WWF, (2011). Belgium and its water footprint.
- WWF, (2011). Shared risk and opportunity in water resources: seeking a sustainable future for Lake Naivasha.
- WWF - SDC, (2012). The Swiss Water Footprint Report. A global Picture of Swiss Water Dependence.

Glosario de siglas

- AMVA – Área Metropolitana del Valle de Aburrá
- CNPMLTA – Centro Nacional de Producción Más Limpia y Tecnologías Ambientales
- CORNARE – Corporación Autónoma Regional de los ríos Negro y Nare
- CORANTIOQUIA - Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia
- COSUDE - Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación
- CTA – Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia
- EPM – Empresas Públicas de Medellín
- WWF - Fondo Mundial para la Naturaleza (World Wide Fund for Nature)
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales