

# Manual de evaluación de la huella hídrica

## Establecimiento del estándar mundial

Arjen Y. Hoekstra, Ashok K. Chapagain, Maite M. Aldaya  
y Mesfin M. Mekonnen



**AENOR**  
Confía

 water  
footprint  
network



# Manual de evaluación de la huella hídrica



# Manual de evaluación de la huella hídrica

Establecimiento del estándar mundial

[Arjen Y. Hoekstra](#)

[Ashok K. Chapagain](#)

[Maite M. Aldaya](#)

[Mesfin M. Mekonnen](#)

**AENOR**

Título original: *The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard*

Autores: [Arjen Y. Hoekstra](#), [Ashok K. Chapagain](#), [Maite M. Aldaya](#) y [Mesfin M. Mekonnen](#)

© Water Footprint Network, 2011

ISBN: 978-1-84971-279-8

Título: *Manual de evaluación de la huella hídrica. Establecimiento del estándar mundial*

Traducción: Almudena Valdés de Anca

© AENOR Internacional, S.A.U., 2021

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción total o parcial en cualquier soporte, sin la previa autorización escrita de AENOR Internacional, S.A.U.

Edita: AENOR Internacional, S.A.U.

Maqueta y diseño de cubierta: AENOR Internacional, S.A.U.

**Nota:** AENOR Internacional, S.A.U. no se hace responsable de las opiniones expresadas por los autores en esta obra.

# AENOR

Génova, 6. 28004 Madrid

Tel.: 914 326 036 • [normas@aenor.com](mailto:normas@aenor.com) • [www.aenor.com](http://www.aenor.com)

# Índice

Índice de figuras, tablas y cuadros .....	11
Agradecimientos .....	15
Prólogo de Water Footprint Network .....	19
Prólogo de AENOR .....	21
Prefacio .....	23
Acrónimos .....	25
1. Introducción .....	27
1.1. Antecedentes .....	27
1.2. El concepto de huella hídrica .....	28
1.3. Evaluación de la huella hídrica .....	30
1.4. Guía del usuario .....	32
2. Objetivos y alcance de la evaluación de la huella hídrica .....	33
2.1. Objetivos de la evaluación de la huella hídrica .....	33
2.2. Alcance de la contabilidad de la huella hídrica .....	36
2.3. Alcance del análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica .....	42
2.4. Alcance de la formulación de respuestas de la huella hídrica .....	44
3. Contabilidad de la huella hídrica .....	45
3.1. Apropiación humana del agua dulce: ¿qué medimos y por qué? .....	45
3.2. Coherencia entre diferentes tipos de contabilidad de la huella hídrica .....	47
3.3. Huella hídrica de una etapa del proceso .....	51
3.3.1. Huella hídrica azul .....	51
3.3.2. Huella hídrica verde .....	56
3.3.3. Huella hídrica gris .....	57
3.3.4. Cálculo de la huella hídrica verde, azul y gris de cultivos agrícolas o forestales .....	67

3.4.	La huella hídrica de un producto	73
3.4.1.	Definición	73
3.4.2.	Esquematización del sistema de producción en etapas de un proceso	74
3.4.3.	Cálculo de la huella hídrica de un producto	75
3.5.	La huella hídrica de un consumidor o grupo de consumidores	80
3.5.1.	Definición	80
3.5.2.	Cálculo	80
3.6.	La huella hídrica dentro de un área geográficamente delimitada	81
3.6.1.	Definición	81
3.6.2.	Cálculo	81
3.7.	La contabilidad de la huella hídrica nacional	82
3.7.1.	Esquema de contabilidad de la huella hídrica nacional	82
3.7.2.	Cálculo de la huella hídrica dentro de una nación	84
3.7.3.	Cálculo de la huella hídrica del consumo nacional	85
3.7.4.	El ahorro de agua relacionado con el comercio internacional	89
3.7.5.	Dependencia nacional de agua frente a la autosuficiencia	90
3.8.	Contabilidad de la huella hídrica en cuencas hidrográficas	91
3.9.	La contabilidad de huella hídrica de municipios, provincias u otras unidades administrativas	92
3.10.	La huella hídrica de una empresa	93
4.	Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica	103
4.1.	Introducción	103
4.2.	Sostenibilidad geográfica: sostenibilidad de la huella hídrica dentro de una zona de captación o una cuenca hidrográfica	106
4.2.1.	Introducción	106
4.2.2.	Criterios de sostenibilidad para identificar puntos críticos ambientales	109
4.2.3.	Criterios de sostenibilidad para identificar puntos críticos sociales	118
4.2.4.	Criterios de sostenibilidad para identificar puntos críticos económicos	119
4.2.5.	Evaluación de los impactos primarios y secundarios en los puntos críticos identificados	119
4.3.	Sostenibilidad de la huella hídrica de un proceso	120
4.4.	Sostenibilidad de la huella hídrica de un producto	122
4.4.1.	Identificación de los componentes insostenibles en la huella hídrica de un producto	122
4.4.2.	Índices de impacto de la huella hídrica que reflejan los impactos ambientales locales	125

4.5.	Sostenibilidad de la huella hídrica de una empresa . . . . .	128
4.6.	Sostenibilidad de la huella hídrica de un consumidor . . . . .	129
5.	Opciones de medidas para la reducción de la huella hídrica . . . . .	131
5.1.	Responsabilidad compartida . . . . .	131
5.2.	Reducir la huella hídrica humana: ¿qué es posible? . . . . .	132
5.3.	Consumidores . . . . .	138
5.4.	Empresas . . . . .	139
5.5.	Agricultores . . . . .	142
5.6.	Inversores . . . . .	143
5.7.	Gobiernos . . . . .	144
6.	Limitaciones . . . . .	149
7.	Desafíos futuros . . . . .	153
7.1.	Metodología y datos de la evaluación de la huella hídrica . . . . .	153
7.2.	Aplicación de la huella hídrica en diferentes contextos . . . . .	156
7.3.	Incorporar la huella hídrica a las cuentas e informes existentes sobre agua y medioambiente . . . . .	158
7.4.	Relación de la huella hídrica con los métodos de huella ecológica, energética y de carbono . . . . .	159
7.5.	Relación de la huella hídrica con el análisis de los flujos materiales, la modelización <i>input-output</i> y el análisis del ciclo de vida . . . . .	160
8.	Conclusión . . . . .	163
Anexo I.	Cálculo de la evapotranspiración de agua verde y azul usando el modelo CROPWAT . . . . .	165
Anexo II.	El cálculo de la huella hídrica de proceso de un cultivo: el ejemplo de la producción de la remolacha azucarera en Valladolid (España) . . . . .	171
Anexo III.	El cálculo de la huella hídrica de un producto: ejemplo del azúcar refinado de Valladolid (España) . . . . .	181
Anexo IV.	Ejemplos de cálculos de la huella hídrica gris . . . . .	185
Anexo V.	Caudal mínimo ecológico. . . . .	189
Anexo VI.	Preguntas más frecuentes . . . . .	193
Bibliografía	. . . . .	207
Lista de símbolos	. . . . .	225
Glosario	. . . . .	231
Sobre los autores	. . . . .	241



# Índice de figuras, tablas y cuadros

## Figuras

Figura 1.1. Representación esquemática de los componentes de la huella hídrica. Muestra que la parte no consuntiva de las extracciones de agua (flujo de retorno) no es parte de ella. También muestra que, al contrario de la medida de la extracción de agua, la huella hídrica incluye el agua verde y gris y el componente de uso indirecto del agua . . . . .	29
Figura 1.2. Cuatro fases diferentes de la evaluación de la huella hídrica . . . . .	31
Figura 3.1. Huellas hídricas verde y azul en relación con el balance hídrico de una cuenca hidrográfica. . . . .	47
Figura 3.2. Huellas hídricas de procesos como unidad básica para el resto de huellas hídricas . . . . .	48
Figura 3.3. Huellas hídricas directa e indirecta para cada etapa de la cadena de suministro de un producto de origen animal . . . . .	49
Figura 3.4. Relación entre la huella hídrica del consumo nacional y la huella hídrica dentro de una nación en un ejemplo simplificado de dos naciones con relaciones comerciales . . . . .	50
Figura 3.5. La contabilidad de la huella hídrica azul en el caso del reciclaje y reutilización del agua . . . . .	55
Figura 3.6. Los procesos subsecuentes en el riego: almacenamiento de agua, transporte de agua, riego en el campo. Cada paso tiene su propia huella hídrica . . .	70
Figura 3.7. Esquematación del sistema de producción usado para la producción del producto $p$ en $k$ etapas del proceso. Algunas etapas ocurren en serie y otras en paralelo. La huella hídrica del producto final $p$ se calcula sumando las huellas hídricas de proceso de los procesos que constituyen el sistema de producción. Nota: este esquema simplificado presupone que $p$ es el único producto final resultante del sistema de producción . . . . .	76

Figura 3.8. Esquemización de la última etapa del proceso en el sistema de producción del que resulta el producto  $p$ . La huella hídrica de un producto final  $p$  se calcula basándonos en las huellas hídricas de los productos de entrada y la huella hídrica al transformar los productos de entrada en productos finales. . . . . 77

Figura 3.9. El esquema de contabilidad de la huella hídrica nacional. El esquema de contabilidad muestra varios balances de huella hídrica relacionados con el consumo nacional ( $HH_{cons, nac}$ ), la huella hídrica en el territorio nacional ( $HH_{área, nac}$ ), la exportación total del agua virtual ( $V_e$ ) y la importación total de agua virtual ( $V_i$ ). . . . . 84

Figura 3.10. Esquema de cálculo de la huella hídrica de una cuenca hidrográfica. El esquema de contabilidad muestra diversos balances relacionados con la huella hídrica de los consumidores que viven en el área donde encontramos la cuenca hidrográfica, la huella hídrica dentro de la cuenca, la exportación total de agua virtual de la cuenca y la importación total de agua virtual a la cuenca . . . . . 92

Figura 3.11. Composición de la huella hídrica de una empresa . . . . . 93

Figura 3.12. Empresa que contiene tres unidades de negocio que elaboran productos A-C respectivamente. La entrada de productos  $I_u[x, i]$  se refiere al volumen anual de productos de entrada  $i$  desde la fuente  $x$  hasta la unidad de negocio  $u$ . La salida de productos  $P_u[p]$  se refiere al volumen de salidas anuales del producto  $p$  desde la unidad de negocio  $u$ . El flujo de producto  $P^{*u}[p]$  se refiere a la parte de  $P_u[p]$  que está destinada a otra unidad de negocio dentro de la misma empresa . . . . . 98

Figura 4.1. Análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica dentro de una zona de captación o cuenca hidrográfica en cuatro pasos. . . . . 108

Figura 4.2. Huella hídrica azul a lo largo de un año comparada con la disponibilidad de agua azul, donde la última es igual a la escorrentía (en su estado original) menos el caudal mínimo ecológico . . . . . 114

Figura II.1. Estación meteorológica en Valladolid (España) (punto negro) y área de cultivo de la remolacha azucarera en España (unidad: proporción del área de la cuadrícula) . . . . . 172

Figura III.1 Diagrama de producción española de azúcar refinado (a partir de la remolacha azucarera), incluyendo las fracciones de producto . . . . . 182

### Tablas

Tabla 2.1. Resolución espaciotemporal en la contabilidad de la huella hídrica . . . . . 39

Tabla 3.1. Ejemplos de componentes de la huella hídrica de una empresa . . . . . 94

Tabla 4.1. Ejemplo de cómo evaluar hasta qué punto la huella hídrica de un producto es sostenible, basándose en dos criterios: la sostenibilidad geográfica de las huellas hídricas en las zonas de captación en las que están localizadas las etapas del proceso y la sostenibilidad de las etapas del propio proceso. Los componentes prioritarios en la huella hídrica de un producto pueden

identificarse basándose en los componentes que son insostenibles y la proporción de un componente en la huella hídrica total de un producto. Es preciso rellenar una tabla para cada huella hídrica (verde, azul y gris) del producto . . . . .	124
Tabla 5.1. Posibles objetivos de reducción de la huella hídrica por sector y componente de huella hídrica . . . . .	133
Tabla 5.2. Prioridades en la reducción de la huella hídrica . . . . .	135
Tabla 5.3. Opciones de respuesta a la huella hídrica de una empresa . . . . .	140
Tabla 5.4. Opciones disponibles a los agricultores para reducir su huella hídrica . .	142
Tabla 5.5. Opciones de los gobiernos para reducir la huella hídrica y mitigar sus impactos. . . . .	146
Tabla 7.1. Resumen de los estudios de huella hídrica . . . . .	156
Tabla 7.2. Cómo se pueden usar las evaluaciones de huella hídrica en el ACV . . . .	161
Tabla II.1. Fechas de siembra y recolección y productividad de la producción de la remolacha azucarera en Valladolid (España) . . . . .	172
Tabla II.2. Evapotranspiración total de agua verde y azul basada en la tabla de resultados NAC del modelo CROPWAT 8.0 . . . . .	173
Tabla II.3. Calendario de riego en una situación de secano: tabla de resultados del modelo CROPWAT 8.0 . . . . .	175
Tabla II.4. Calendario de riego en una situación de regadío: tabla de resultados del modelo CROPWAT 8.0 . . . . .	177
Tabla II.5. Cálculo de los componentes verde y azul de la huella hídrica de proceso ( $m^3/t$ ) del cultivo de la remolacha azucarera en Valladolid (España) usando las opciones NAC y el calendario de riego para suelo medio . . . . .	179
Tabla II.6. Cálculo del componente gris de la huella hídrica de proceso ( $m^3/t$ ) del cultivo de la remolacha azucarera en Valladolid (España). . . . .	180
Tabla III.1. Huella hídrica verde, azul y gris de la remolacha azucarera en Valladolid (España) ( $m^3/t$ ). . . . .	184

## Cuadros

Cuadro 2.1. Objetivos de la evaluación de la huella hídrica . . . . .	34
Cuadro 2.2. ¿Existen alcances en la contabilidad de la huella hídrica como en el caso de la contabilidad de la huella de carbono corporativa? . . . . .	40
Cuadro 3.1. La relación entre los diferentes tipos de huellas hídricas . . . . .	48
Cuadro 3.2. Unidad de una huella hídrica. . . . .	50
Cuadro 3.3. Fuentes de datos para el cálculo de la huella hídrica azul . . . . .	53
Cuadro 3.4. La historia del concepto de huella hídrica gris . . . . .	57
Cuadro 3.5. El concepto de carga crítica. . . . .	60

Cuadro 3.6. La huella hídrica gris en diferentes casos de contaminación puntual . . .	62
Cuadro 3.7. Enfoque a tres niveles para estimar las cargas de contaminación difusa . . . . .	64
Cuadro 3.8. Fuentes de datos para el cálculo de la huella hídrica del crecimiento de un cultivo . . . . .	70
Cuadro 3.9. Terminología: huella hídrica, contenido de agua virtual y agua incorporada . . . . .	73
Cuadro 3.10. ¿Qué hay de nuevo para las empresas a la hora de considerar la huella hídrica de su empresa? . . . . .	95
Cuadro 4.1. La historia del análisis de sostenibilidad de la huella hídrica . . . . .	103
Cuadro 4.2. Criterios de sostenibilidad para el uso y asignación del agua dentro de una zona de captación o cuenca hidrográfica . . . . .	106
Cuadro 4.3. Requisitos ambientales de agua verde . . . . .	110
Cuadro 4.4. Efecto de la huella hídrica verde en la disponibilidad de agua azul . . .	112
Cuadro 4.5. La sostenibilidad de la huella hídrica azul depende de cómo afecte a los flujos y las reservas de agua azul . . . . .	114
Cuadro 4.6. Cómo la escasez de agua azul definida en los estudios de huella hídrica difiere de los indicadores convencionales de escasez de agua . . . . .	116
Cuadro 5.1. Neutralidad en agua . . . . .	136
Cuadro 5.2. Compensación de la huella hídrica . . . . .	138

# Agradecimientos

Este manual ha sido escrito con la inestimable ayuda de numerosas organizaciones y personas. En primer lugar, nos gustaría agradecer a nuestros miembros de la Red de la Huella Hídrica (Water Footprint Network) que han contribuido de diferentes maneras a implantar el concepto de la *huella hídrica*. Agradecemos a las 130 organizaciones siguientes, todas socias de la red (a 16 de octubre de 2010): ADAS (Reino Unido), Adeagua (España), Allenare Consultores (México), Alliance for Water Stewardship (EE. UU./Australia), AmBev-Companhia de Bebidas das Americas (Brasil), APESA (Francia), Arup (Reino Unido), Association du Flocon à la Vague (Francia), ATA-Ativos Técnicos e Ambientais (Brasil), Austrian Institute of Technology (Austria), Barilla (Italia), Beijing Forestry University (China), Bianconi Consulting (Reino Unido), Bionova (Finlandia), Blonk Milieu Advies (Holanda), C&A (Alemania), CEIGRAM-Centro de Estudios e Investigación para la Gestión de Riesgos Agrarios y Medioambientales de la Universidad Politécnica de Madrid (España), CENTA-Fundación Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (España), CEPI-Confederation of European Paper Industries (Bélgica), CESTRAS-Centro de Estudos e Estratégias para a Sustentabilidade (Portugal), Climate Change Commission (Filipinas), Coca-Cola Hellenic (Grecia), Consejo Consultivo del Agua (México), Conservation International (EE. UU.), CREM (Holanda), CSE-Centre for Sustainability and Excellence (Grecia), CSQA Certificazioni (Italia), Cyprus University of Technology (Chipre), Decide Soluciones Estratégicas (México), Denkstatt (Austria), DHV (Holanda), Directorate-General for Water Affairs (Holanda), Dole Food Company (EE. UU.), Eawag-Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Suiza), Ecolife (Bélgica), Ecologic-Institute for International and European Environmental Policy (Alemania), Ecological Society for Eastern Africa (Kenia), Ecometrica (Reino Unido), Ecosistemas Sustainable Solutions (Brasil), EMWIS-Euro-Mediterranean Information System on Know-How in the Water Sector (Francia), Enzen Water (Reino Unido), EPAL-Empresa Portuguesa de Aguas Livres (Portugal), Fibria Celulose (Brasil), First Climate (Alemania), FloraHolland (Holanda), Food and Drink Federation (Reino Unido), Fundación Chile (Chile), Fundación IMDEA Agua (España), Fundación

Marcelino Botín-Observatorio del Agua (España), Geoklock-Consultoria e Engenharia Ambiental (Brasil), Global Footprint Network (EE. UU.), GRACE (EE. UU.), Green Solutions (Chile), Grontmij (Holanda), Heineken (Holanda), IFC-International Finance Corporation (EE. UU.), Institut für Nachhaltige Landbewirtschaftung (Alemania), IWMI-International Water Management Institute (Sri Lanka), Jain Irrigation Systems (India), Jutexpo (Reino Unido), Kingston University (Reino Unido), KWR-Watercycle Research Institute (Holanda), Lafarge (Francia), Leibniz Institute for Agricultural Engineering Potsdam-Bornim (Alemania), LimnoTech (EE. UU.), Live Earth (EE. UU.), Massey University-Soil and Earth Sciences Group (Nueva Zelanda), McCain Alimentaire (Francia), Michigan Technological University-Center for Water and Society (EE. UU.), National Ground Water Association (EE. UU.), Universidad Nacional de Córdoba (Argentina), Natura Cosméticos (Brasil), Nestlé (Suiza), Next Planet ASBL (Bélgica), NWP-Netherlands Water Partnership (Holanda), Oranjewoud (Holanda), Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security (EE. UU.), Partners for Innovation (Holanda), PE International (Alemania), People 4 Earth (Holanda), PepsiCo (EE. UU.), Plant and Food Research (Nueva Zelanda), PRé Consultants (Holanda), PricewaterhouseCoopers, Province of Overijssel (Holanda), PTS-Papiertechnische Stiftung (Alemania), Pyramid Sustainable Resource Developers (Australia), Quantis (Suiza), Química del Campo (Chile), Raisio (Finlandia), Redevco (Holanda), Renault (Francia), RodaxAgro (Grecia), Royal Haskoning (Holanda), SABMiller (Reino Unido), Safe Drinking Water Foundation (Canadá), SERI-Sustainable Europe Research Institute (Austria), Smart Approved WaterMark (Australia), Soil & More International (Holanda), Source 44 (EE. UU.), Stora Enso (Suecia), Summa Environmental Technologies (Ecuador), Swiss Development Agency (Suiza), The Coca-Cola Company (EE. UU.), The Nature Conservancy (EE. UU.), Tobco (Bélgica), UNEP-Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (Francia), UNESCO-IHE Institute for Water Education (Holanda), Unilever (Reino Unido), Universidad de Chile (Chile), University of Natural Resources and Applied Life Sciences (Austria), Universidad de São Paulo-Escuela de Ingeniería de São Carlos (Brasil), Universidad de São Paulo-GovÁgua (Brasil), Universidad de Siena (Italia), Universidad de Tokyo (Japón), University of Twente (Holanda), Universidad de Zaragoza (España), UPM-Kymmene Corporation (Finlandia), URS Corporation (Reino Unido), USAID-Agencia Estadounidense para el Desarrollo Internacional (EE. UU.), Vewin-the Dutch Association of Drinking Water Companies (Holanda), Viña Concha y Toro (Chile), Viña De Martino (Chile), Viña Errazuriz (Chile), Water Neutral Foundation (Sudáfrica), Water Strategies (Reino Unido) Wildlife Trust (EE. UU.), Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (Suiza), WWF-la organización global de conservación (Suiza) y Zero Emissions Technologies (España).

Agradecemos a los miembros del grupo de trabajo de la huella hídrica gris de la WFN por revisar minuciosamente el concepto de la huella hídrica gris y aportar

opiniones muy valiosas y directrices de mejora de su definición: Jose Albiac (CITA, España), Maite Aldaya (Universidad de Twente, Holanda), Brent Clothier (Plant and Food Research, Nueva Zelanda), James Dabrowski (CSIRO, Sudáfrica), Liese Dallbauman (Pepsi-Co, Reino Unido), Axel Dourojeanni (Fundación Chile, Chile), Piet Filet (WWF, Australia), Arjen Hoekstra (Universidad de Twente, Holanda), Mark Huijbregts (Universidad de Radboud, Holanda), Marianela Jiménez (Nestlé, Suiza), Greg Koch (The Coca Cola Company, EE. UU.), Marco Mensink (CEPI, Bélgica), Ángel de Miguel García (IMDEA Agua, España), Jason Morrison (Pacific Institute, EE. UU.), Juan Ramón Candia (Fundación Chile, Chile), Todd Redder (Limnotech, EE. UU.), Jens Rupp (Coke Hellenic, Grecia), Ranvir Singh (Massey University, Nueva Zelanda), Alistair Wyness (URS Corporation, Reino Unido), Erika Zarate (WFN, Holanda), Matthias Zessner (University of Vienna, Austria) y Guoping Zhang (WFN, Holanda).

Un segundo grupo de trabajo de la Red de la Huella Hídrica revisó en detalle el método de análisis de sostenibilidad de la huella hídrica y propuso mejoras. Agradecemos a todos sus miembros: Maite Aldaya (Universidad de Twente, Holanda), Upali Amarasinghe (IWMI, Sri Lanka), Fatima Bertran (Denkstatt, Austria), Sabrina Birner (IFC, EE. UU.), Anne-Leonore Boffi (WBCSD, Suiza), Emma Clarke (Pepsi, Reino Unido), Joe DePinto (Limnotech, EE. UU.), Roland Fehring (Denkstatt, Austria), Carlo Galli (Nestlé, Suiza), Alberto Garrido (Universidad Politécnica de Madrid, España), Arjen Hoekstra (University of Twente, Holanda), Denise Knight (The Coca-Cola Company, EE. UU.), Junguo Liu (Beijing Forestry University, China), Michael McClain (UNESCO-IHE, Holanda), Marco Mensink (CEPI, Bélgica), Jay O'Keeffe (UNESCO-IHE, Holanda), Stuart Orr (WWF, Suiza), Brian Richter (TNC, EE. UU.), Hong Yang (EAWAG, Suiza) y Erika Zarate (WFN, Holanda).

También queremos agradecer a los miembros del Comité Científico de Revisión por Pares, que revisó el borrador del presente manual: Huub Savenije (Delft University of Technology, Holanda), Alberto Garrido (Universidad Politécnica de Madrid, España), Junguo Liu (Beijing Forestry University, China), Johan Rockström (Stockholm University & Stockholm Environment Institute, Sweden), Pasquale Steduto (FAO, Italia) y Mathis Wackernagel (Global Footprint Network, EE. UU.). Además, queremos agradecer a Brian Richter (TNC, EE. UU.) por revisar el borrador del capítulo del análisis de la sostenibilidad.

Ha habido muchas otras aportaciones, pero no podemos mencionar a los cientos de individuos y organizaciones que han contribuido aportando comentarios sobre el concepto de huella hídrica y su aplicación mediante correo electrónico y contactos personales. Sin embargo, nos gustaría mencionar al menos a: la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, en especial a Giovanni Muñoz, por habernos dado valiosos consejos sobre el modelo CROPWAT; el Instituto del Banco Mundial, en particular a Mei Xie, por haber cooperado en el desarrollo de varios

materiales de formación sobre la huella hídrica; el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible por haber organizado un valioso taller sobre la huella hídrica en Montreux, Suiza en marzo de 2010; a la Mesa de Diálogo Ambiental del Sector de las Bebidas (BIER, por sus siglas en inglés) por estudiar las diversas implicaciones de la huella hídrica en el sector de la bebida; y a Soil & More International por aportar numerosas observaciones sobre el impacto de la gestión del suelo en la huella hídrica de la producción de cultivos.

Agradecemos a los empleadores de los autores por permitirles dedicar tiempo a preparar y escribir el manual: Universidad de Twente, empleador de Arjen Hoekstra y de Mesfin Mekonnen y antiguo empleador de Maite Aldaya; WWF-Reino Unido, empleador de Ashok Chapagain; al Centro de Estudios e Investigación para la Gestión de Riesgos Agrarios y Medioambientales (CEIGRAM) de la Universidad Politécnica de Madrid, antiguo empleador de Maite Aldaya; y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), actual empleador de Maite Aldaya.

Por último, agradecer al personal de la Red de la Huella Hídrica por su continua dedicación, sus contribuciones al fomento de una mentalidad sobre la huella hídrica, así como su aplicación y diseminación y por su amistad: Derk Kuiper, Erika Zarate y Guoping Zhang. Gracias a Joshua Waweru y a Joke Meijer-Lentelink por su apoyo de secretaría y a René Buijsrogge por su ayuda en el mantenimiento de la página web de la huella hídrica.

# Prólogo de Water Footprint Network

Este manual constituye la publicación de referencia de la Red de la Huella Hídrica (Water Footprint Network) sobre la evaluación de la huella hídrica. Las ideas y procedimientos presentados en esta norma global se basan en gran medida en la obra significativa del prof. dr. Arjen Hoekstra, quien introdujo el concepto de huella hídrica en 2002 y lo ayudó a madurar desde entonces. El 18 de noviembre de 2019, el profesor Hoekstra falleció repentina e inesperadamente, demasiado pronto. Arjen Hoekstra era un visionario que quería cambiar el mundo a través de su pensamiento científico. La aceptación generalizada y continua de este manual por parte de numerosas entidades y organizaciones en todo el mundo proporciona un testimonio claro de su éxito en esta búsqueda. Lamentamos mucho esta gran pérdida de un colega, inspirador y amigo. Confiamos en que tanto esta traducción del manual al español, como el resto de sus extensas contribuciones científicas, contribuyan a que su legado perdure y crezca en el tiempo.

Esta traducción al español se ha elaborado en respuesta al interés de la comunidad hispanohablante. Tras el acuerdo entre la Water Footprint Network y AENOR, se ha llevado a cabo una cuidadosa traducción y revisión por parte de varios expertos.

Nos gustaría expresar nuestro agradecimiento a todas las personas que han participado en la edición de este documento en español. Damos las gracias por su apoyo y seguimiento a Antonio Carretero (AENOR), José Luis Valdés (AENOR), José Magro (AENOR) y la editorial de AENOR. Por su apoyo técnico en la revisión de la traducción, a Daniel Chico (EVREN, Evaluación de Recursos Naturales, S.A.), Erika Zarate (Good Stuff International), y Maite M. Aldaya (Instituto de Innovación y Sostenibilidad en la Cadena Agroalimentaria de la Universidad Pública de Navarra, gracias a la ayuda para captar talento de la Fundación Bancaria “la Caixa”

dación Bancaria Caja Navarra). Agradecer también a EsAgua por su colaboración en la difusión y promoción del manual.

**Rick Hogeboom**

EXECUTIVE DIRECTOR AT THE WATER FOOTPRINT NETWORK

**Maitte M. Aldaya**

INSTITUTO DE INNOVACIÓN Y SOSTENIBILIDAD EN LA CADENA  
AGROALIMENTARIA (ISFOOD), UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA (UPNA)

# Prólogo de AENOR

Luchar contra el cambio climático es una preocupación global, y por ello la mayoría de los países encamina sus políticas a favor de la protección y prevención, reduciendo emisiones. Sin embargo, y a pesar de la dimensión que ha adquirido en las últimas décadas, este impacto ambiental no es la única amenaza de nuestro planeta. De hecho, para determinadas actividades o zonas geográficas existen otras afecciones que son tan relevantes, e incluso más, que el cambio climático. Es el caso del agua, un recurso natural esencial que en algunas zonas del planeta hay que poner especial atención en él.

Para poder realizar una correcta gestión del agua es fundamental conocer con minuciosidad cuánta agua es necesaria para la producción de un producto o la prestación de un servicio. El referencial de la Water Footprint Network, una comunidad internacional dedicada a la sostenibilidad, equidad y eficiencia en el uso del agua, es el esquema con mayor recorrido hasta el momento para este fin.

El cálculo de la huella hídrica es también una óptima herramienta para informar a quienes toman decisiones en el sector, las organizaciones gubernamentales y no gubernamentales de sus impactos ambientales potenciales relacionados con el agua (por ejemplo, para propósitos de planificación estratégica, establecimiento de prioridades, diseño o rediseño de productos y procesos; toma de decisiones sobre inversiones de recursos). En definitiva, proporciona información coherente y fiable con base en evidencia científica para dar el informe de los resultados de la huella de agua.

Esta información requiere que sea de suficiente consistencia. Debe generarse confianza en su reporte y gestión. De ahí la relevancia de la verificación de la huella hídrica, como la que realiza AENOR, cuyo objetivo es facilitar a las partes interesadas un juicio profesional e independiente acerca de la información y datos aportados respecto a ella y siempre bajo el esquema elegido.

La verificación ambiental puede ser definida como una valoración objetiva de la precisión e integridad de la información ambiental reportada, y de la conformidad de esta información con los principios de contabilidad y reporte previamente establecidos. Es un respaldo para sus accionistas, inversores e índices bursátiles o reportes externos que demandan este tipo de información. Para el público interno de la organización, la verificación es una forma de asegurar que la información es fiable lo que a su vez permite definir de forma eficiente las acciones de reducción de consumos.

En AENOR nos sentimos orgullosos de haber podido contribuir a la traducción al español de este documento para facilitar su aplicación en toda la comunidad iberoamericana. De esta manera, las organizaciones de todo tamaño y sector podrán sumarse a contabilizar el inventario de consumos de sus actividades, productos y servicios con el fin de un mejor conocimiento para su gestión y mejora.

**AENOR**

# Prefacio

Este libro contiene el estándar mundial para la “evaluación de la huella hídrica” tal como ha sido desarrollado y mantenido por la Red de la Huella Hídrica (Water Footprint Network-WFN). Incluye un amplio repertorio de definiciones y métodos para la contabilidad de la huella hídrica. Se muestra cómo se calcula para procesos individuales y productos, así como para consumidores, naciones y empresas. Además, incluye los métodos para el análisis de sostenibilidad de la huella hídrica y una serie de opciones de respuesta.

El estándar compartido de definiciones y métodos de cálculo es crucial debido al creciente interés de empresas y gobiernos en utilizar la contabilidad de la huella hídrica como una base para la formulación de estrategias y políticas hídricas sostenibles.

Este manual ha sido elaborado por los autores tal y como lo solicitó la WFN. El presente manual es una versión actualizada, revisada y extendida de la primera edición publicada en noviembre de 2009 por la WFN: *Manual de Huella Hídrica: Estado del Arte 2009* (*Water Footprint Manual: State of the Art 2009*, Hoekstra *et al.*, 2009a). Esta nueva edición ha sido desarrollada gracias a un amplio proceso de consulta a miembros e investigadores de todo el mundo. Los miembros de la WFN fueron invitados a aportar comentarios sobre el *Manual de Huella Hídrica* tras su publicación. Además, se crearon dos grupos formados por miembros individuales de la WFN y otros expertos invitados. Uno de los grupos planteaba cuestiones sobre la huella hídrica gris (Zarate, 2010a) mientras que el otro estudiaba cuestiones relativas al análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica (Zarate, 2010b). Paralelamente, una serie de miembros en colaboración con la WFN iniciaron proyectos piloto destinados a analizar las implicaciones prácticas del uso de la huella hídrica en la formulación de una estrategia corporativa sobre el agua o política del agua en un marco geográfico específico. En base a los comentarios recibidos (nuevas publicaciones científicas, experiencias prácticas adquiridas en proyectos piloto sobre la huella hídrica e informes

de los grupos de trabajo), la WFN preparó el borrador de la presente edición, que fue revisado por el Comité Científico de Revisión por Pares de la WFN que, a su vez, aportó recomendaciones específicas sobre la revisión del borrador. La versión final de este manual es el resultado de la incorporación de dichas recomendaciones.

Esta segunda edición también tendrá que revisarse a su debido tiempo. Las investigaciones en este campo están en auge en todo el mundo y, por consiguiente, se están iniciando cada vez más estudios piloto sobre la evaluación de la huella hídrica en todos los sectores de la economía de todos los continentes. Con el fin de aprender de los distintos proyectos piloto que se están desarrollando y de futuras publicaciones científicas, la WFN invita tanto a sus miembros como a aquellos que no lo son a aportar comentarios sobre la presente edición del manual. De este modo esperamos hacer un mejor uso de las diversas experiencias de individuos y organizaciones al evaluar la huella hídrica en diferentes contextos y para diferentes propósitos. Pretendemos mejorar la metodología de la huella hídrica para servir mejor a los distintos objetivos que plantean los diferentes sectores de la sociedad, al mismo tiempo que nos esforzamos por alcanzar la coherencia, la consistencia y el rigor científico.

**Joop de Schutter**

PRESIDENTE DEL CONSEJO DE SUPERVISIÓN  
DE LA RED DE LA HUELLA HÍDRICA

# Acrónimos

ACV	análisis del ciclo de vida.
AFM	análisis de flujos materiales.
AMA	adición máxima admisible.
CDB	Convención sobre Diversidad Biológica.
CMMAD	Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo.
CMP	concentración máxima permitida.
CMTD	carga máxima total diaria.
CNUCYD	Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo.
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
GEI	gas de efecto invernadero.
GIRH	gestión integrada de recursos hídricos.
GMIA	mapa mundial de superficies de riego.
IPCC	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático.
IRBM	gestión integrada de cuencas hidrográficas.
NAC	necesidades de agua del cultivo.
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

SIG	sistema de información geográfica.
SMIA	Sistema Mundial de Información y Alerta.
UNEP	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
WFN	Red de la Huella Hídrica.

# 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes

Las actividades humanas consumen y contaminan una gran cantidad de agua. A nivel global, la mayor parte del uso del agua está destinado a la producción agrícola, pero también hay una gran proporción de agua consumida y contaminada por los sectores industrial y doméstico (WWAP, 2009). El consumo y contaminación de agua puede estar asociado a unas actividades específicas como el riego, la higiene personal, la limpieza, la refrigeración y el procesamiento. El consumo total de agua y su contaminación están considerados generalmente como la suma de una multitud de actividades independientes y que requieren el uso de agua. Se ha prestado poca atención al hecho de que, al fin y al cabo, el total de agua consumida y contaminada está relacionado con qué y cuánto consumen las comunidades y con la estructura de la economía global que aporta los diferentes bienes y servicios. Hasta hace bien poco, no ha habido mucha consideración sobre la ciencia y práctica de la gestión del agua para su consumo y contaminación en las cadenas de producción y suministro. Por tanto, existe poca concienciación sobre el hecho de que la organización y características de una cadena de producción y suministro influyen de manera tan acusada los volúmenes (y la distribución espaciotemporal) del consumo hídrico y su contaminación que pueden estar asociados a un producto de consumo final. Hoekstra y Chapagain (2008) han mostrado cómo, mediante la visualización del uso no aparente del agua en productos, se puede ayudar a entender el carácter global del agua dulce y a cuantificar los efectos del consumo y el comercio en el uso de los recursos hídricos. El perfeccionamiento de este entendimiento puede crear una base para una mejor gestión de los recursos mundiales de agua dulce.

El agua dulce es, cada vez más, un recurso mundial impulsado por el comercio internacional de materias primas que necesitan grandes cantidades de agua. Además de

los mercados regionales, existen también mercados globales de bienes que requieren grandes cantidades de agua como los productos agrícolas y ganaderos, las fibras naturales y la bioenergía. Como consecuencia, el uso de los recursos hídricos se ha ido desconectando espacialmente de los consumidores. Este ejemplo se puede ilustrar con el caso del algodón: desde el campo hasta el producto terminado, el algodón pasa por una serie de etapas diferentes de producción con diversos impactos en los recursos hídricos. Estas etapas de producción se localizan, por lo general, en distintos lugares y el consumo final puede estar en otro lugar diferente. Por ejemplo, en Malasia no se cultiva algodón, pero se importa algodón crudo de China, India y Pakistán para ser procesado en la industria textil y se exporta ropa de algodón al mercado europeo (Chapagain *et al.*, 2006b). Por consiguiente, el impacto de consumo de un producto final de algodón en los recursos hídricos del planeta solo se puede medir observando la cadena de suministro y seguir la pista de los orígenes del producto. Revelar la relación oculta entre el consumo y el uso del agua puede sentar las bases para formular nuevas estrategias de gobernanza del recurso, puesto que se pueden identificar nuevos desencadenantes del cambio. Mientras que tradicionalmente los consumidores, los minoristas, las industrias alimentarias y los comerciantes de productos que necesitaban grandes cantidades de agua se han mantenido al margen de aquellos que investigaban o que eran responsables de la buena gobernanza del agua, en la actualidad entran en escena como posibles agentes de cambio. Ahora podemos referirnos a ellos no solo en su papel como usuarios *directos* del agua, sino también como usuarios *indirectos* de la misma.

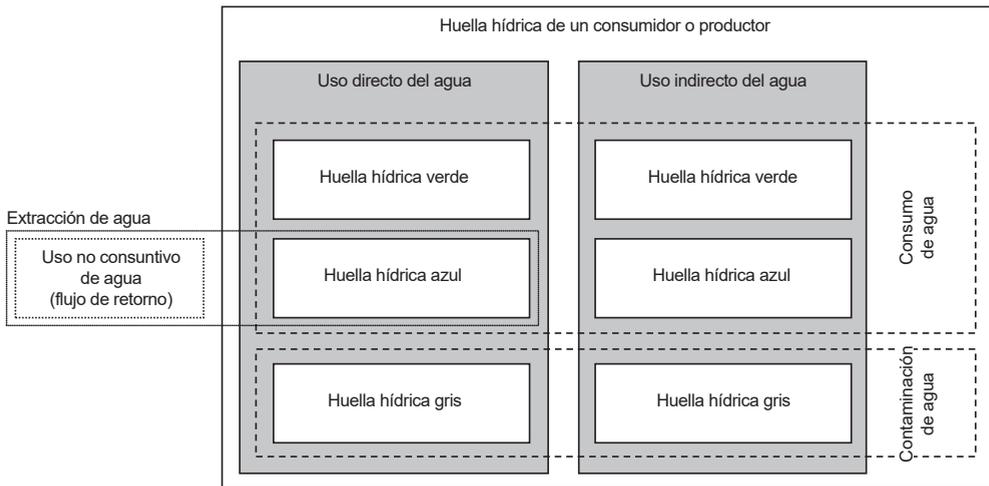
## 1.2. El concepto de huella hídrica

La idea de considerar el uso del agua en las cadenas de suministro ha ganado peso tras la introducción del concepto de huella hídrica por Hoekstra en 2002 (Hoekstra, 2003). La *huella hídrica* es un indicador del uso de agua dulce que no se centra únicamente en el uso directo del agua por parte de un consumidor o de un productor, sino que se centra también en su uso indirecto. La huella hídrica puede considerarse un indicador integral de la apropiación de los recursos hídricos frente a la medida tradicional y restrictiva de la extracción de agua. Es el volumen de agua dulce usado para elaborar el producto, medido a lo largo de la cadena de suministro completa. Se trata de un indicador multidimensional que muestra los volúmenes de consumo por origen y los volúmenes de contaminación por tipo de contaminación; todos los componentes del agua dulce total están geográfica y temporalmente especificados. La *huella hídrica azul* se refiere al consumo de los recursos de agua azul (aguas superficiales y subterráneas) a lo largo de la cadena de suministro de un producto. El consumo se refiere a una pérdida de agua de una masa de agua disponible en una zona de captación o cuenca hidrográfica. Las pérdidas ocurren cuando el agua se

evapora, regresa a otra cuenca hidrográfica o al mar, o se incorpora a un producto. Asimismo, la *huella hídrica verde* se refiere al consumo de los recursos de agua verde (el agua de lluvia en la medida en que no se convierte en escorrentía); por último, la *huella hídrica gris* se refiere a la contaminación y se define como el volumen de agua dulce requerida para asimilar la carga de contaminantes dadas las concentraciones naturales de fondo y las normas de la calidad ambiental.

Como indicador del uso del agua, la huella hídrica se diferencia de la clásica medida de extracción de agua en tres aspectos ([figura 1.1](#)):

1. No incluye el uso de agua azul en la medida en que esta agua regresa a su origen.
2. No está restringida al uso de agua azul, sino que también incluye la verde y la gris.
3. No está restringida al uso directo del agua, sino que también incluye su uso indirecto.



**Figura 1.1. Representación esquemática de los componentes de la huella hídrica. Muestra que la parte no consuntiva de las extracciones de agua (flujo de retorno) no es parte de ella. También muestra que, al contrario de la medida de la extracción de agua, la huella hídrica incluye el agua verde y gris y el componente de uso indirecto del agua**

Así, la huella hídrica ofrece una perspectiva mejor y más amplia sobre cómo un consumidor o un productor se relacionan con el uso de los sistemas de agua dulce. Se trata de una medida volumétrica del consumo y de la contaminación de agua. No se trata de una medida de la severidad del impacto medioambiental local del consumo

y de la contaminación de agua. El impacto medioambiental local de una cierta cantidad de agua consumida y contaminada depende de la vulnerabilidad del sistema hídrico local y del número de consumidores y actividades contaminantes presentes dependientes de ese sistema. La contabilidad de la huella hídrica aporta información espaciotemporal explícita sobre si la apropiación del agua se destina a diversos fines humanos. Se puede introducir el debate sobre el uso y la asignación sostenible y equitativa del agua y, a su vez, crear una buena base para la evaluación local sobre impactos medioambientales, sociales y económicos.

### 1.3. Evaluación de la huella hídrica

La *evaluación de la huella hídrica* se refiere a todo el conjunto de actividades necesarias para:

1. Cuantificar y localizar la huella hídrica de un proceso, producto, productor o consumidor, o cuantificar en el espacio y el tiempo la huella hídrica en un área geográfica específica.
2. Analizar la sostenibilidad medioambiental, social y económica de esta huella hídrica.
3. Formular una estrategia de respuesta.

En rasgos generales, el objetivo de la evaluación de la huella hídrica es analizar cómo las actividades humanas o los productores específicos se relacionan con los problemas de la escasez de agua y de su contaminación y estudiar cómo tanto las actividades como los productos pueden llegar a ser más sostenibles desde un punto de vista hídrico.

El aspecto de una evaluación de huella hídrica dependerá del foco de interés. Nos podría interesar la huella hídrica de un proceso específico en toda la cadena de producción, o la huella hídrica de un producto final. De forma alternativa, nos podría interesar la huella hídrica de un grupo de consumidores o la de un productor o un sector económico completo. Por último, podríamos adoptar una perspectiva geográfica, observando la huella hídrica total dentro de un área delimitada como un municipio, una provincia, una nación, una zona de captación o una cuenca hidrográfica. Dicha huella hídrica total es la suma de las huellas hídricas de muchos procesos individuales que tienen lugar en el área en cuestión.

La evaluación de la huella hídrica es una herramienta analítica que puede ayudar a comprender cómo las actividades y los productos se relacionan con la escasez y la contaminación del agua y con los impactos derivados de las mismas, así como qué se puede hacer para asegurarse de que las actividades y productos no contribuyan

a un uso insostenible del agua dulce. Como herramienta, la evaluación de la huella hídrica aporta comprensión: no dice lo que hay que hacer; más bien ayuda a entender lo que se puede hacer.

Una evaluación de la huella hídrica consiste en cuatro fases diferentes ([figura 1.2](#)):

1. Definición de objetivos y alcance.
2. Contabilidad de la huella hídrica.
3. Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica.
4. Formulación de respuestas a la huella hídrica.

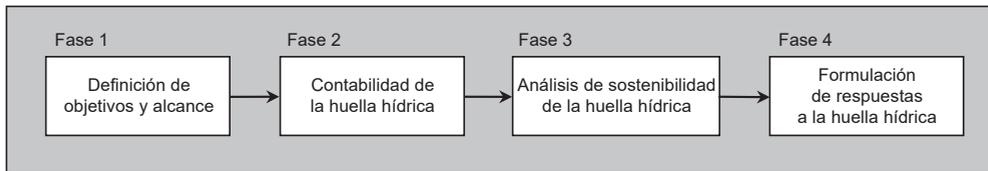


Figura 1.2. Cuatro fases diferentes de la evaluación de la huella hídrica

Para ser transparentes con las decisiones tomadas a la hora de realizar el estudio de evaluación de la huella hídrica, hay que empezar por definir claramente sus objetivos y el alcance. Un estudio de huella hídrica puede llevarse a cabo por diversas razones. Por ejemplo, un gobierno de un país puede estar interesado en conocer su dependencia de los recursos hídricos extranjeros o en comprender la sostenibilidad del uso del agua en las zonas de donde provienen los productos importados con un alto consumo de agua. La autoridad de una cuenca hidrográfica puede estar interesada en saber si la huella hídrica agregada de las actividades humanas dentro de la cuenca hidrográfica viola el caudal mínimo ecológico o las normas de la calidad del agua en algún momento. La autoridad de la cuenca hidrográfica también puede interesarse en conocer hasta qué punto los recursos hídricos escasos en la cuenca hidrográfica se destinan a cultivos de exportación de poco valor. Una empresa puede interesarse en conocer su dependencia en los recursos hídricos escasos en su cadena de suministro o en cómo podría contribuir a disminuir los impactos en los sistemas hídricos a lo largo de su cadena de suministro y en sus propias operaciones.

La *fase de la contabilidad* de la huella hídrica es aquella en la que se recolectan datos y se desarrollan las cuentas. El alcance y el nivel de detalle de la contabilidad depende de las decisiones tomadas en la fase anterior. Tras la fase de contabilidad viene la fase del *análisis de sostenibilidad*, en la que se evalúa la huella hídrica desde una perspectiva medioambiental, así como social y económica. En la fase final se formulan opciones de respuesta, estrategias o políticas. No es necesario incluir todas las etapas en un mismo estudio.

En la primera fase de *definición de los objetivos y alcance* se puede decidir centrarse solo en la evaluación o parar después de la fase del *análisis de sostenibilidad*, aplazando el debate sobre la respuesta. Además, en la práctica, este modelo de cuatro fases subsecuentes es más una guía que una directiva estricta. En ocasiones es necesario volver a etapas anteriores y la iteración de las mismas. En primer lugar, una empresa puede estar interesada en una exploración aproximada de todas las fases, con el fin de identificar componentes críticos en su huella hídrica y establecer prioridades de respuesta, mientras que más adelante puede querer centrarse más en detalle en ciertas áreas de contabilidad y en el análisis de la sostenibilidad.

## 1.4. Guía del usuario

En los próximos capítulos se especificarán las cuatro fases de la evaluación de la huella hídrica. El [capítulo 2](#) muestra los aspectos más importantes a tener en cuenta a la hora de establecer los objetivos y el alcance del trabajo; el [capítulo 3](#) contiene definiciones y métodos para la contabilidad de la huella hídrica; el [capítulo 4](#) aporta directrices para la etapa del análisis de sostenibilidad de la huella hídrica; el [capítulo 5](#) aporta una visión general de las opciones de respuesta para la huella hídrica a tener en cuenta en la etapa de la formulación de políticas; el [capítulo 6](#) sitúa el método de la evaluación de la huella hídrica en un contexto más amplio y habla de sus limitaciones; el [capítulo 7](#) identifica y habla de los retos más importantes que tendrán que tratarse en un futuro; y el [capítulo 8](#) es la conclusión. Dependiendo de sus intereses, el lector puede centrarse en algunas partes del manual. Especialmente en el [capítulo 3](#) sobre contabilidad de la huella hídrica el lector puede ser selectivo, dependiendo de si adopta la perspectiva del consumidor ([apartado 3.5](#)), la del gobierno del país ([apartado 3.7](#)), la autoridad de una cuenca hidrográfica ([apartado 3.8](#)) o la de una empresa ([apartado 3.10](#)). El lector observará que la base de la contabilidad de la huella hídrica [contabilidad de procesos y productos ([apartados 3.3](#) y [3.4](#))] es relevante para todas las aplicaciones de la huella hídrica.

Durante todo el texto se definirán varios conceptos. Para facilitar al lector la búsqueda de definiciones de los términos clave usados en el presente manual se ha incluido un [glosario](#) en la parte final del libro. Otra sección bastante útil del libro es el [apéndice VI](#), que incluye las preguntas más frecuentes sobre la evaluación de la huella hídrica.

# 2

## Objetivos y alcance de la evaluación de la huella hídrica

### 2.1. Objetivos de la evaluación de la huella hídrica

Los estudios de huella hídrica pueden tener varios *objetivos* y ser aplicados en contextos diferentes. Cada objetivo requiere la definición del alcance del estudio y, por tanto, permitirá diferentes opciones a la hora de realizar suposiciones. Se puede evaluar la huella hídrica de diferentes entidades, por lo que es importante empezar a especificar en cuál de ellas se está interesado. Nos podemos interesar, por ejemplo, en la huella hídrica:

- De una etapa de un proceso.
- De un producto.
- De un consumidor.
- De un grupo de consumidores:
  - De una nación.
  - De un municipio, provincia o unidad administrativa.
  - De una zona de captación o cuenca hidrográfica.
- Dentro de un área geográficamente delimitada:
  - Dentro de una nación.
  - Dentro de un municipio, provincia o unidad administrativa.
  - Dentro de un área de captación o de una cuenca hidrográfica.
- De una empresa.
- De un sector empresarial.
- De la humanidad en su conjunto.

En el [cuadro 2.1](#) se muestra una lista de actividades para definir el objetivo de la evaluación de la huella hídrica. La lista no es exhaustiva, aunque muestra una serie de elementos que han de ser especificados. Probablemente, la cuestión más importante se refiere al nivel de detalle que se busca. Si el objetivo es concienciar, probablemente bastará con hacer valoraciones nacionales o globales sobre las huellas hídricas de los productos. Cuando el objetivo es identificar puntos críticos, será necesario incluir mayor detalle en el alcance y en las consiguientes contabilidad y evaluación de sostenibilidad, para que sea posible identificar exactamente dónde y cuándo la huella hídrica tiene los mayores impactos locales medioambientales, sociales o económicos. Si el objetivo es formular políticas y establecer metas cuantitativas de reducción de la huella hídrica, se requerirá un grado todavía mayor de detalle espaciotemporal. Además, será necesario integrar la evaluación de la huella hídrica en un debate más amplio incorporando más factores aparte del agua (véase también el [capítulo 6](#)).

Cuadro 2.1. **Objetivos de la evaluación de la huella hídrica**

### **General**

- ¿Cuál es el objetivo final? ¿Concienciar, identificar los puntos críticos, formular políticas o definir objetivos cuantitativos?
- ¿Se centra en una fase en especial? ¿Se centra en la contabilidad, en el análisis de sostenibilidad o en la formulación de respuestas?
- ¿Cuál es el ámbito de interés? ¿La huella hídrica directa o indirecta? ¿La huella hídrica verde, azul o gris?
- ¿Cómo se maneja el tiempo? ¿Se centra en la evaluación de un año en particular, en la media de unos pocos años o en un análisis de tendencias?

### **Evaluación de la huella hídrica de proceso**

- ¿Qué proceso hay que tener en cuenta? ¿Un proceso específico o procesos alternativos y sustituibles (con el fin de comparar las huellas hídricas de técnicas alternativas)?
- ¿En qué escala? ¿Un proceso específico en un lugar específico o un mismo proceso en diferentes lugares?

### **Evaluación de la huella hídrica del producto**

- ¿Qué producto tenemos en cuenta? ¿Un lote particular de una marca específica, un tipo de producto específico o el total de una categoría de producto?
- ¿En qué escala? ¿Incluir producto(s) de un solo campo agrícola o fábrica, una o más empresas o una o más regiones de producción?

### **Evaluación de la huella hídrica de un consumidor o comunidad**

- ¿Qué comunidad? ¿Un consumidor individual o los consumidores de un municipio, provincia o estado?

### **Evaluación de la huella hídrica dentro de un área geográficamente delimitada**

- ¿Cuáles son los límites geográficos? ¿Una zona de captación, una cuenca hidrográfica, un municipio, una provincia, un estado o una nación?
- ¿Cuál es el sector de interés? ¿Examinar cómo la huella hídrica de dicha área se puede reducir mediante la importación de agua virtual y cómo la huella hídrica del área se incrementa por medio de la elaboración de productos para su exportación, analizar cómo se realiza la asignación de recursos hídricos del área a diferentes fines o examinar dónde la huella hídrica del área viola los caudales mínimos ecológicos locales y las normas ambientales de calidad del agua?

### **Evaluación de la huella hídrica nacional (huella hídrica dentro de una nación y la huella hídrica del consumo nacional)**

- ¿Cuál es el ámbito de interés? ¿Evaluar la huella hídrica dentro de una nación o la huella hídrica del consumo nacional? ¿Analizar la huella hídrica interna y/o externa del consumo nacional?
- ¿Cuál es el sector de interés? ¿Evaluar la escasez nacional de agua, la sostenibilidad de la producción nacional, la exportación de los escasos recursos hídricos en forma virtual, el ahorro nacional de agua mediante la importación de agua en forma virtual, los impactos de la huella hídrica del consumo nacional en otros países y/o la dependencia de los recursos hídricos extranjeros?

### **Evaluación de la huella hídrica de una empresa**

- ¿Cuál es la escala de estudio? ¿Una unidad de negocio, la empresa entera o un sector completo? (Cuando la escala de interés es a nivel de producto; véase el apartado anterior sobre la evaluación de la huella hídrica del producto).
- ¿Cuál es el ámbito de interés? ¿Evaluar la huella hídrica operacional o la de la cadena de suministro?
- ¿Cuál es el sector de interés? ¿Riesgos para negocio, transparencia de productos, informes medioambientales corporativos, etiquetado de productos, evaluación comparativa con niveles de referencia (*benchmarking*), certificación de la empresa, identificación de los componentes críticos de la huella hídrica o formulación de objetivos cuantitativos de reducción?

## 2.2. Alcance de la contabilidad de la huella hídrica

A la hora de plantearse la contabilidad de la huella hídrica es necesario ser claros y explícitos sobre los límites del inventario. Por límites del inventario nos referimos a lo que hay que incluir y a lo que hay que excluir de las cuentas y esto debe utilizarse como una función del objetivo de la contabilidad. La lista de control siguiente podrá ser utilizada en el planteamiento de la contabilidad de la huella hídrica:

- ¿Considerar la huella hídrica azul, verde o gris?
- ¿Dónde truncar el análisis de la cadena de suministro?
- ¿Qué nivel de resolución espaciotemporal?
- ¿En qué período de datos?
- Para consumidores y empresas: ¿considerar la huella hídrica directa o indirecta?
- Para naciones: ¿considerar la huella hídrica dentro de la nación o la huella hídrica del consumo nacional; considerar la huella hídrica interna o externa del consumo nacional?

### ¿Huella hídrica azul, verde o gris?

Los recursos de agua azul son, por lo general, más escasos y tienen mayores costes de oportunidad que el agua verde. Esta puede ser una razón para centrarse únicamente en la contabilidad de la huella hídrica azul. Sin embargo, los recursos de agua verde también son limitados y, por ende, escasos, lo que supone un motivo para calcular también la huella hídrica verde. Además, podemos sustituir el agua verde por agua azul (y viceversa, en el caso de la agricultura) de modo que solo contabilizando ambas puede obtenerse una visión completa. El argumento para incluir el uso del agua verde se basa en que históricamente el enfoque ingenieril se ha centrado en el agua azul, llevando a la infravaloración del agua verde como un factor de producción importante (Falkenmark, 2003; Rockström, 2001). La idea de la huella hídrica gris se introdujo para expresar la contaminación del agua en términos de un volumen contaminado, para que se pudiera comparar con el consumo de agua, que también se expresa como volumen (Chapagain *et al.*, 2006b; Hoekstra y Chapagain, 2008). Si existe el interés de analizar la contaminación del agua y de comparar el uso relativo de la contaminación y el consumo de agua con respecto a los recursos hídricos disponibles, es importante contabilizar la huella hídrica gris además de la azul.

## ¿Dónde truncar el análisis de la cadena de suministro?

El tema del *truncamiento* es una cuestión básica en la contabilidad de la huella hídrica. Cabe plantearse las mismas preguntas que en la contabilidad de la huella de carbono y ecológica, de los análisis energéticos y del análisis del ciclo de vida. Hasta el momento no se han desarrollado directrices generales en el sector de la contabilidad de la huella hídrica, pero la norma general es incluir la de todos los procesos dentro de un sistema de producción (árbol de producción) que contribuyan considerablemente a la huella hídrica total. La pregunta entonces es cómo definimos “considerablemente”; se podría decir, por ejemplo, que se refiere a una contribución “mayor al 1%” (o “mayor al 10%” cuando solo se tenga interés en los componentes más grandes). Si se buscan los orígenes de un producto específico, se verá que las cadenas de suministro no tienen fin y son muy dispares debido a la variedad de productos de entrada utilizados para cada etapa de proceso. Sin embargo, en la práctica solo existen unas pocas etapas de proceso que contribuyen de forma sustancial a la huella hídrica total del producto final. Por regla general, se puede esperar que cuando un producto incluya ingredientes de origen agrícola, dichos ingredientes aportan una contribución importante a la huella hídrica total del producto. Este es el caso, ya que se calcula que el 86% de la huella hídrica de los seres humanos está relacionada con el sector agrícola (Hoeskstra y Chapagain, 2008). Lo más probable es que los componentes industriales contribuyan de forma particular cuando puedan asociarse con la contaminación de agua (por lo que contribuirían a la huella hídrica gris).

Una pregunta específica que reside en el problema del truncamiento es si es necesario tomar en cuenta la huella hídrica del trabajo, que es un factor de entrada en casi todos los procesos. En la misma línea se podría decir que los empleados son un factor de entrada y que requieren alimento, ropa y agua potable, por lo que todas las necesidades hídricas de los trabajadores, directas e indirectas, deberían incluirse en la huella hídrica indirecta de un producto. Sin embargo, esto causa un problema grave de contabilidad de sobra conocido en el campo del análisis del ciclo de vida: la doble contabilidad. La idea subyacente de la contabilidad de los recursos naturales empleados en la producción de productos es la asignación del uso total de todos ellos a los productos destinados al consumidor final y, en última instancia, basándose en datos sobre el consumo, a los consumidores. Por tanto, todo uso de recursos naturales se atribuye finalmente a los consumidores que, por otro lado, también son trabajadores. Esto crearía un círculo vicioso infinito de cálculos dobles, triples, etc., si el uso del recurso natural atribuido a un consumidor fuese contabilizado como el uso del recurso natural subyacente al factor de entrada del trabajo en la producción; es decir, es habitual no contabilizar el trabajo como un factor que englobe el uso indirecto del producto.

Otra cuestión específica que se plantea habitualmente (especialmente por parte de analistas con experiencia en la contabilidad de la huella de carbono) es si debe incluirse la huella hídrica del transporte. Este consume mucha energía, lo que podría constituir

un componente significativo de la energía total utilizada para elaborar un producto y transportarlo hasta su destino final. En muchas ocasiones, el transporte no consume una cantidad significativa de agua dulce si se compara con la cantidad total consumida para la elaboración de un producto: depende del tipo de producto y del tipo de energía utilizada. De manera general, el hecho de incluir la huella hídrica del transporte en el análisis depende de la regla elegida sobre cómo truncar dicho análisis. Cuando se estima que el transporte tiene una contribución mínima a la huella hídrica total de un producto, el componente se puede excluir del análisis. De manera particular, recomendamos incluir la huella hídrica del transporte cuando se utilicen biocombustibles o hidroelectricidad como fuente de energía, ya que se sabe que estas fuentes de energía tienen una huella hídrica por unidad de energía bastante grande.

De forma más general, podemos preguntarnos si la huella hídrica de la energía utilizada en el sistema de producción debe incluirse en la evaluación de la huella hídrica del producto final. Nuevamente, en la mayoría de los casos, la contribución del factor energía supondrá un porcentaje pequeño en la huella hídrica total de un producto. Una excepción podría ser cuando la energía provenga de biocombustibles o de la electricidad derivada de la combustión de biomasa o hidroelectricidad, ya que dichas formas de energía tienen una huella hídrica relativamente grande por unidad de energía (Gerbens-Leenes *et al.*, 2009a, b; Yang *et al.*, 2009; Dominguez-Fauss *et al.*, 2009).

## ¿Qué nivel de resolución espaciotemporal?

Las huellas hídricas pueden evaluarse a diferentes niveles de detalle espaciotemporal ([tabla 2.1](#)). En el nivel A, el más bajo de detalle, la huella hídrica se evalúa según los datos de huella hídrica media global extraídos de una base de datos disponible. Los datos se refieren a las medias de varios años. Este nivel de detalle es suficiente e incluso decisivo para la concienciación. También puede ser adecuado cuando el objetivo es identificar productos e ingredientes que contribuyan de forma más significativa a la huella hídrica total. Los datos de la huella hídrica media global también pueden ser útiles para desarrollar proyecciones aproximadas sobre el futuro consumo global de agua, dados los grandes cambios producidos en los hábitos de consumo (tales como un mayor consumo de carne o bioenergía).

En el nivel B, la huella hídrica se evalúa basándose en medias nacionales o regionales, o en datos de la huella hídrica de zonas de captación específicas extraídos de bases de datos geográficamente explícitas. Aunque sea preferible especificarlas de manera mensual, este nivel de análisis seguirá utilizando una media mensual de varios años. Este nivel de contabilidad es apropiado para proporcionar una base para comprender dónde se puede esperar encontrar puntos críticos en vertientes locales y para la toma de decisiones relativas a la asignación del agua.

Por último, en el nivel C, la contabilidad de huella hídrica es geográfica y temporalmente explícita y está basada en datos precisos sobre los productos de entrada utilizados y las fuentes precisas de dichos productos. La resolución espacial mínima es el nivel de pequeñas zonas de captación ( $\sim 100\text{-}1.000\text{ km}^2$ ), pero si se quisiera y si los datos lo permitieran, sería posible calcular sobre el terreno. En este último caso, hablamos de la contabilidad que mapea la huella hídrica por finca, distrito o industria. La resolución temporal mínima es de un mes y estudiar variaciones interanuales es parte del análisis. La contabilidad se basa en las mejores estimaciones de consumo y contaminación local reales, preferiblemente verificadas sobre el terreno. Este alto nivel de detalle espaciotemporal es apropiado para formular estrategias de reducción de la huella hídrica en lugares concretos.

Tabla 2.1. Resolución espaciotemporal en la contabilidad de la huella hídrica

	<b>Resolución espacial</b>	<b>Resolución temporal</b>	<b>Fuente de los datos necesarios sobre el uso del agua</b>	<b>Uso típico de la contabilidad</b>
Nivel A	Media global	Anual	Literatura científica disponible sobre el consumo y la contaminación típicos del agua por producto o proceso	Concienciación; identificación aproximada de los componentes que más contribuyen a la huella hídrica total; desarrollo de proyecciones globales sobre el consumo de agua
Nivel B	Nacional, regional o de la zona de captación	Anual o mensual	Igual que la anterior, pero usando datos específicos a nivel nacional, regional o de la zona de captación	Identificación aproximada de la dispersión y la variabilidad espacial; la base de conocimiento para la identificación de puntos críticos y decisiones sobre la asignación del agua
Nivel C	Pequeña zona de captación o terreno específico	Mensual o diario	Datos empíricos o (si no se pudieran medir directamente) las mejores estimaciones sobre consumo y contaminación de agua especificados por lugar geográfico y durante el año	Base de conocimiento para llevar a cabo un análisis de sostenibilidad de la huella hídrica; formulación de una estrategia para reducir las huellas hídricas y sus impactos locales asociados.

Nota: los tres niveles se pueden diferenciar para todas las formas de contabilidad de la huella hídrica (por ejemplo, la contabilidad de producto, nacional, corporativa).

## ¿Qué período de datos?

La disponibilidad de agua cambia dentro de un mismo año y de año en año. Como consecuencia de la variabilidad en la disponibilidad de agua, la demanda de esta también cambia en el tiempo. Por tanto, se debería tener especial cuidado a la hora de hacer afirmaciones sobre una tendencia de huella hídrica a lo largo del tiempo. Independientemente del estudio que se esté realizando, es necesario ser explícitos con respecto al período de datos utilizado, puesto que el resultado dependerá del período elegido. En años secos, la huella hídrica azul de un producto agrícola será mucho mayor que en años húmedos, ya que se necesitará más agua para el riego. Se puede elegir calcular huellas hídricas para un año en particular o para un número específico de años, pero de manera alternativa se puede optar por calcular la huella hídrica de un año medio dado el clima existente (definido como la media de un período consecutivo de 30 años). En este último caso se combinarán diferentes períodos en un mismo análisis: por ejemplo, tomemos los datos de producción y rendimiento de un período reciente de cinco años, más los datos climáticos medios (temperatura y precipitaciones) de los últimos 30 años.

## Huella hídrica, ¿directa o indirecta?

La recomendación general es incluir tanto la huella hídrica directa como la indirecta; mientras que las directas conforman el enfoque tradicional de consumidores y empresas, las indirectas son generalmente mucho más grandes. Considerando únicamente su huella hídrica directa, los consumidores estarán ignorando el hecho de que la mayor parte de su huella hídrica está asociada con los productos que compran en el supermercado, por ejemplo y no con el agua consumida en el hogar. Para la mayor parte de las empresas, la huella hídrica en su cadena de suministro es mucho mayor que la huella hídrica de sus propias operaciones; ignorar el componente de la cadena de suministro puede conllevar a inversiones para mejoras en el uso operacional del agua, mientras que la inversión para mejorar la cadena de suministro podría haber sido más rentable. Sin embargo, dependiendo del objetivo de un estudio en particular se puede tomar la decisión de incluir solo la huella hídrica directa o la indirecta en el análisis. Existen similitudes con los alcances, como sucede en el caso de la contabilidad de la huella de carbono (véase el [cuadro 2.2](#)).

### Cuadro 2.2. ¿Existen alcances en la contabilidad de la huella hídrica como en el caso de la contabilidad de la huella de carbono corporativa?

Una *huella de carbono* es el conjunto de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) causadas de forma directa e indirecta por un individuo, organización, evento o producto. En el ámbito de la contabilidad de la huella de carbono de una empresa se han definido tres alcances (WRI y WBCSD, 2004). El primer alcance se refiere a la

contabilidad de las emisiones directas de GEI, que se originan en fuentes que pertenecen o son controladas por la empresa. Algunos ejemplos son: emisiones de combustión en calderas, hornos, vehículos, etc., pertenecientes a la empresa o controlados por esta; emisiones de producción química en equipos de proceso pertenecientes a la empresa o controlados por ella.

El segundo alcance se refiere a la contabilidad de las emisiones indirectas de GEI por la generación de electricidad comprada y consumida por la empresa.

El tercer alcance se refiere a otras emisiones indirectas de GEI que son consecuencia de actividades de la empresa, pero que tienen lugar en fuentes no pertenecientes a la empresa ni controladas por esta. Ejemplos de actividades de este tercer alcance son: la extracción y producción de materiales adquiridos; el transporte de combustibles adquiridos, y el uso de productos y servicios vendidos.

La diferencia entre “directa” e “indirecta” también se hace en el caso de la contabilidad de la huella hídrica. Por definición, la huella hídrica total de un consumidor o productor se refiere tanto al uso directo como indirecto del agua del consumidor o productor en cuestión. Esto significa que, si no se especifica, el término huella hídrica se refiere a la suma de la directa y la indirecta. La diferencia entre los alcances 2 y 3, como en el caso de la contabilidad de la huella de carbono, no es útil en el caso de la contabilidad de la huella hídrica. Por tanto, en la contabilidad de la última, solo existen dos alcances: huella hídrica directa y la indirecta.

## ¿Considerar la huella hídrica dentro de una nación o la huella hídrica del consumo nacional?

La huella hídrica dentro de una nación se refiere al volumen total de agua dulce consumido o contaminado en un territorio nacional. Esto incluye el uso del agua para elaborar productos consumidos nacionalmente, pero también el agua usada para elaborar productos de exportación. La huella hídrica dentro de una nación es diferente de la huella hídrica del consumo nacional, que se refiere a la cantidad total de agua usada para producir los bienes y servicios consumidos por los habitantes de una nación. Esto se refiere tanto al uso del agua dentro de la nación como al uso de agua fuera de su territorio, pero está restringido al uso del agua para productos consumidos dentro de dicha nación.

La huella hídrica del consumo nacional incluye un componente interno y otro externo. Incluir un análisis de la huella hídrica externa es clave para obtener una imagen global de cómo el consumo nacional se traduce en un uso de agua no solo en el país en sí, sino también fuera de este y para analizar la dependencia de agua y la sostenibilidad de las importaciones.

Cuando el interés se encuentra únicamente en el uso de los recursos de agua nacionales, basta con observar la huella hídrica dentro de una nación.

## 2.3. Alcance del análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica

Para la fase del análisis de la sostenibilidad, la cuestión principal es si se toma la perspectiva geográfica o la de un proceso, producto, consumidor o productor. En el primer caso, habría que examinar la sostenibilidad de la huella hídrica agregada de un área determinada, preferiblemente una zona de captación o una cuenca hidrográfica completa, ya que se trata de una unidad natural en la que se pueden comparar fácilmente la huella hídrica y la disponibilidad hídrica y donde tiene lugar la asignación de recursos hídricos y posibles conflictos. En la segunda perspectiva, la atención no se encuentra en la huella hídrica *agregada* en un enclave geográfico, sino en la *contribución* de la huella hídrica del proceso, producto, consumidor o productor individual en relación con el panorama general.

La cuestión de la contribución contiene dos elementos:

1. La contribución de la huella hídrica del proceso, producto, consumidor o productor específico a la huella hídrica global de la humanidad.
2. Su contribución a las huellas hídricas agregadas en áreas geográficas específicas.

La contribución al total mundial es interesante desde el punto de vista de la sostenibilidad porque los recursos de agua dulce del planeta son limitados, por lo que debería existir una preocupación por cualquier contribución mayor a la necesidad máxima razonable desde el punto de vista técnico o social. La contribución a las huellas hídricas agregadas en zonas de captación o cuencas hidrográficas específicas es una cuestión interesante, ya que debería existir preocupación por cualquier contribución que tenga lugar en una zona de captación o cuenca hidrográfica donde la huella hídrica resulte en una situación en la que no se cumplan las necesidades medioambientales básicas o donde la asignación de agua es social o económicamente insostenible.

Por tanto, el alcance del análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica depende principalmente de la perspectiva elegida. En todos los casos, dicho alcance necesita más especificación dependiendo de los objetivos de la evaluación. En el caso de la perspectiva geográfica, se puede usar la lista de control siguiente:

- ¿Considerar la sostenibilidad de la huella hídrica verde, azul o gris?

- ¿Considerar la dimensión ambiental, social o económica de la sostenibilidad?
- ¿Identificar los puntos críticos únicamente o analizar los impactos primarios o secundarios también en los puntos críticos?

La respuesta a este último punto tendrá influencia en el nivel de detalle necesario para la evaluación.

Identificar puntos críticos (en otras palabras, encontrar (sub)zonas de captación en las que la huella hídrica sea insostenible en momentos específicos del año) puede hacerse comparando las huellas hídricas verde y azul con la disponibilidad de agua verde y azul y comparando la huella hídrica gris con la capacidad de asimilación disponible, sin requerir un análisis detallado de los impactos primarios y secundarios que puedan surgir como consecuencia de la escasez o contaminación del agua. Cuanto más preciso sea el nivel de resolución espaciotemporal aplicado al comparar las huellas hídricas con la disponibilidad del agua, más fácil será localizar puntos críticos. El hecho de observar valores anuales a nivel de las cuencas hidrográficas en conjunto se traduce en una localización bruta de estos puntos críticos. Cuando el objetivo sea conseguir más precisión, será necesario analizar valores mensuales y a nivel de zonas de captación más pequeñas. Cuando el objetivo vaya más allá de la identificación de puntos críticos e incluya un mejor entendimiento de lo que realmente implica una huella hídrica en un área geográfica, será necesario describir con detalle cómo la huella hídrica dentro de una zona de captación afecta a los flujos de agua y a su calidad en la zona (impactos primarios) y, finalmente, cómo esto tiene un impacto en los indicadores últimos tales como el bienestar, la igualdad social, la salud humana y la biodiversidad.

Cuando el interés se centra en la sostenibilidad de la huella hídrica de un proceso, producto, consumidor o productor, habrá que poner el foco en explorar:

- Si la huella hídrica contribuye innecesariamente a la huella hídrica global de la humanidad.
- Si la huella hídrica contribuye a puntos críticos específicos.

Para el primer caso, bastaría con comparar cada huella hídrica de un proceso o producto de forma individual con un punto de referencia mundial para dicho proceso o producto, cuando esa referencia ya exista. Si las referencias en cuestión no existiesen, sería necesario extender el alcance de la evaluación para que también incluya el estudio de lo que podría ser un punto de referencia razonable. Para investigar si la huella hídrica de un proceso, un producto, un consumidor o un productor contribuye a puntos críticos específicos bastaría con comprobar para cada componente de huella hídrica si se encuentra o no en un punto crítico. Para esto se precisa de una base de datos mundial sobre puntos críticos a nivel de detalle espaciotemporal requerido. Cuando estos datos de base no estén disponibles, el alcance del estudio tendrá que extenderse

para poder incluir también estudios de zonas de captación desde una perspectiva geográfica, para todas las zonas de captación donde se encuentren los componentes (principales) de la huella hídrica de un proceso, producto, consumidor o productor.

## 2.4. Alcance de la formulación de respuestas de la huella hídrica

El alcance de la fase de formulación de respuestas también depende del tipo de huella hídrica a la que nos enfrentamos. En el caso de la huella hídrica dentro de un área geográficamente delimitada, la pregunta es la siguiente: ¿qué puede hacer quién para reducir la huella hídrica dentro de esa área, qué cantidad y en qué marco temporal? A la hora de establecer el alcance para la formulación de respuestas será necesario ser especialmente claros con la respuesta de quién. Se puede analizar lo que pueden hacer los gobiernos (que es en lo que seguramente primero pensaría la gente al hablar de la huella hídrica dentro de un marco geográfico) pero también se puede analizar, por ejemplo, lo que pueden hacer los consumidores, los agricultores, las empresas y los inversores y lo que se podría hacer a través de la cooperación intergubernamental.

En el caso del gobierno, podemos distinguir diferentes niveles de gobierno y diferentes organismos gubernamentales en cada nivel. A nivel nacional, por ejemplo, la respuesta necesaria podría traducirse en acciones de diferentes ministerios, desde los que se ocupan del agua, el medioambiente, la agricultura, la energía y la planificación espacial, hasta los que se ocupan de la economía, el comercio y las relaciones exteriores. A la hora de establecer el alcance para identificar las medidas de respuesta, es importante tener claro desde el principio el ángulo o los ángulos desde los que se van a identificar dichas medidas.

En el caso de la huella hídrica de un consumidor o de una comunidad de consumidores, podemos simplemente examinar lo que los consumidores pueden hacer, pero en el mismo caso podemos incluir un análisis de lo que otros pueden hacer (por ejemplo, las empresas o los gobiernos). A la hora de considerar una respuesta en el contexto de la evaluación de la huella hídrica de una empresa, lo más lógico sería analizar, por lo menos, qué tipo de respuesta puede proporcionar la misma empresa, pero también se puede incluir un alcance mayor.

# 3

## Contabilidad de la huella hídrica

### 3.1. Apropiación humana del agua dulce: ¿qué medimos y por qué?

El agua en la Tierra está en constante movimiento. Se evapora del suelo y de las superficies abiertas de agua como resultado de las energías del sol y del viento. Además, las plantas absorben agua del suelo y la liberan a la atmósfera gracias a los estomas de sus hojas en un proceso denominado transpiración. El conjunto de los procesos de evaporación y transpiración se llama “evapotranspiración” (aunque comúnmente la definición de “evaporación” incluye también la transpiración). La cantidad de agua de la atmósfera se incrementa por medio de la evapotranspiración, pero desciende con las precipitaciones. En la atmósfera, el vapor de agua se mueve alrededor del planeta siguiendo unos patrones complejos. Por tanto, que el agua se evapore en un lugar no quiere decir que vaya a caer en forma de precipitación en el mismo sitio.

La cantidad de agua terrestre aumenta debido a la precipitación, pero decrece debido a la evapotranspiración. La precipitación en la tierra excede a la evapotranspiración (no en el día a día, pero sí a largo plazo) y, por tanto, hay excedente de agua en la tierra, lo que tiende a provocar escorrentía superficial, que finalmente acaba en el océano. Mientras que la tierra tiene exceso de precipitación, el océano tiene exceso de evaporación.

Como regla general, existe un transporte neto de agua de los océanos hacia la tierra a través de la atmósfera y esta regresa de la tierra al océano a través de la escorrentía. Esta escorrentía tiene lugar, en parte, por medio del flujo superficial (ríos y arroyos) y, en parte, por medio del flujo subterráneo. El volumen de agua en la Tierra se mantiene más o menos estable.

El agua dulce presente en la Tierra es necesaria para prácticamente todas las actividades humanas. Por el contrario, el agua salada del océano no es apta para beber, limpiar,

cocinar, regar cultivos o para la mayor parte de las actividades industriales. El agua salada puede ser desalinizada, pero esto supone llevar a cabo un proceso costoso y requiere mucha energía, viable únicamente para un número determinado de actividades. Además, el agua salada está solo presente en las costas, mientras que la mayoría de las necesidades de agua necesitan ser cubiertas en zonas interiores, lo que supondría una dificultad añadida: el transporte de agua hacia las zonas altas. Es decir, los humanos dependemos principalmente del agua dulce que se encuentra en el terreno. A pesar de que el agua forme un ciclo que repone continuamente el agua dulce, su disponibilidad no es ilimitada. El volumen de agua anual que necesita la población para uso doméstico, agrícola e industrial no puede exceder la tasa anual de reposición. Por tanto, la cuestión principal es: ¿qué cantidad de agua dulce está disponible en un período determinado y cuál es la apropiación real que el hombre hace de ese flujo en ese período? La contabilidad de la huella hídrica aporta información para responder a la segunda mitad de la cuestión. La huella hídrica refleja básicamente la apropiación humana de agua dulce en términos de volumen. Comparar la huella hídrica humana con la disponibilidad de agua dulce real es parte del análisis de sostenibilidad de la huella hídrica, cuestión que se trata en el [capítulo 4](#).

Con el fin de entender la apropiación humana del agua dulce en relación con el ciclo hidrológico, podríamos considerar una cuenca hidrográfica, que es toda el área geográfica drenada por un río y sus afluentes. Toda la escorrentía de una cuenca hidrográfica converge en un mismo punto. Otros términos comúnmente utilizados para cuenca hidrográfica son “zona de captación”, “cuenca de drenaje” y “cuenca fluvial”. La disponibilidad total anual de agua en una zona de captación se obtiene mediante el volumen anual de precipitación. Cuando ignoramos las posibles variaciones (aunque sean generalmente pequeñas) en el almacenaje de aguas de una zona de captación, una parte del volumen de las precipitaciones anuales abandonará la cuenca mediante evapotranspiración y la otra parte, a través de la escorrentía. Tanto el flujo de evaporación como la escorrentía superficial pueden ser captados por los seres humanos. La huella hídrica verde se refiere al uso del flujo de evaporación desde la superficie terrestre por parte de los humanos, principalmente para los cultivos o la explotación forestal ([figura 3.1](#)). La huella hídrica azul se refiere al uso consuntivo del flujo de escorrentía, es decir, a la captación de la escorrentía de la cuenca en la medida en que dicho flujo no regresa a la cuenca en forma de flujo de retorno.

Históricamente, los seres humanos han usado los flujos de escorrentía como fuente de agua dulce y como desagüe para sus aguas residuales. Obviamente, existen límites en cuanto al uso de los flujos de escorrentía como fuente o sumidero. El flujo total de escorrentía tiene un límite de extracción y una capacidad limitada para asimilar los contaminantes. La huella hídrica azul muestra el volumen que se ha extraído del flujo total de escorrentía y, por consiguiente, muestra la apropiación de la capacidad de extracción. La huella hídrica gris muestra la apropiación de la capacidad de asimilación de los contaminantes. Se define como el volumen de agua necesario para asimilar contaminantes,

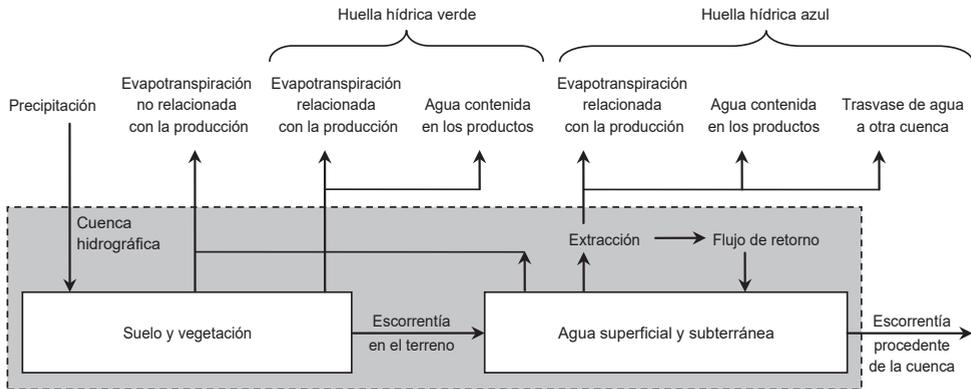


Figura 3.1. Huellas hídricas verde y azul en relación con el balance hídrico de una cuenca hidrográfica

cuantificado como el volumen de agua necesario para diluir los contaminantes hasta el punto en que la calidad del agua se mantenga por encima de la normativa de la calidad del agua. La ventaja de medir la contaminación del agua en términos de volumen de agua apropiada es que diversas formas de contaminación se colocan en un denominador común, es decir, el volumen de agua necesario para la asimilación de los contaminantes. Cuando, además, la contaminación del agua se expresa en los mismos términos que el consumo de agua, se puede comparar el uso de la escorrentía como fuente (huella hídrica azul) con el uso de escorrentía como sumidero (huella hídrica gris).

### 3.2. Coherencia entre diferentes tipos de contabilidad de la huella hídrica

La huella hídrica de una sola etapa del proceso es la base de todos los cálculos de la huella hídrica (véanse la [figura 3.2](#) y el [cuadro 3.1](#)). La huella hídrica de un producto intermedio o final (ya sea un bien o servicio) es la suma de las huellas hídricas de varias etapas del proceso relevantes en la elaboración de ese producto. La huella hídrica de un consumidor individual es la función que resulta de las huellas hídricas de los productos consumidos por este. La huella hídrica de una comunidad de consumidores (por ejemplo, los habitantes de un municipio, provincia, estado o nación) equivale a la suma de las huellas hídricas individuales de los miembros de dicha comunidad. La huella hídrica de un productor o de cualquier empresa de cualquier tipo equivale a la suma de las huellas hídricas de los productos ofrecidos por dicho productor o empresa. La huella hídrica dentro de un área geográficamente delimitada (ya sea una

provincia, una nación, una zona de captación o una cuenca hidrográfica) equivale a la suma de las huellas hídricas de todos los procesos que tienen lugar en dicho emplazamiento. La huella hídrica total de la humanidad equivale a la suma de las huellas hídricas de todos los consumidores del mundo lo que, a su vez, equivale a la suma de las huellas hídricas de todos los bienes y servicios de consumo final consumidos de forma anual y a la suma de todos los procesos de consumo y contaminación del agua a nivel mundial.

Se pueden sumar las huellas hídricas de los productos de consumo final sin que haya doble contabilidad. Esto se debe a que las huellas hídricas de los procesos se asignan siempre y exclusivamente a un producto final o, cuando un proceso contribuye a más de un producto final, el proceso de huella hídrica se divide entre los diferentes productos finales. No tendría sentido alguno sumar las huellas hídricas de productos intermedios porque podría surgir una doble contabilidad.

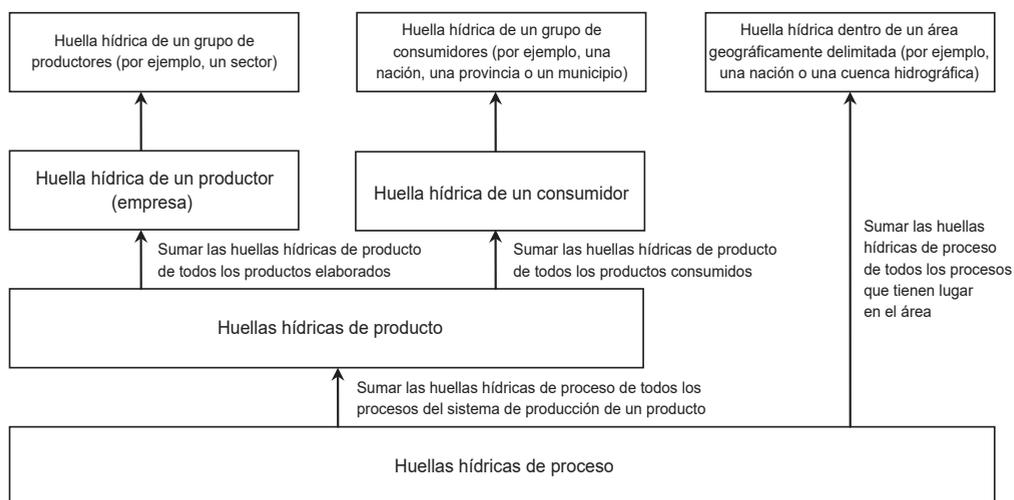


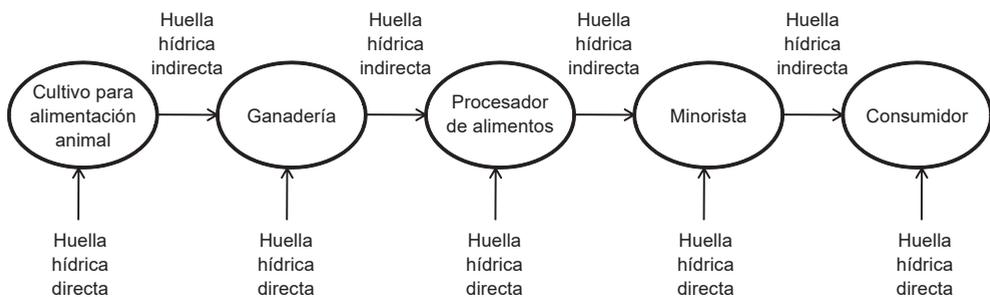
Figura 3.2. **Huellas hídricas de procesos como unidad básica para el resto de huellas hídricas**

Cuadro 3.1. **La relación entre los diferentes tipos de huellas hídricas**

- La huella hídrica de un producto = la suma de las huellas hídricas de las etapas del proceso necesarias para elaborar el producto (considerando toda la cadena de producción y de suministro)
- La huella hídrica de un consumidor = la suma de las huellas hídricas de todos los productos consumidos por este

- La huella hídrica de una comunidad = la suma de todas las huellas hídricas de sus miembros
- La huella hídrica del consumo nacional = la suma de las huellas hídricas de sus habitantes
- La huella hídrica de una empresa = la suma de las huellas hídricas de todos los productos finales que dicha empresa elabora
- La huella hídrica dentro de un área geográficamente delimitada (por ejemplo, un municipio, una provincia, un estado, una nación, una cuenca hidrográfica) = la suma de las huellas hídricas de todos los procesos que tienen lugar en dicha área.

La huella hídrica de los consumidores está ligada a las huellas hídricas de los productores en la cadena de suministro. La [figura 3.3](#) muestra un ejemplo simplificado de una cadena de suministro de un producto de origen animal. La huella hídrica total de un consumidor es la suma de sus huellas hídricas directas e indirectas. Cuando nos centramos en el consumo cárnico, la huella hídrica directa del consumidor se refiere al volumen de agua consumida o contaminada para preparar y cocinar esa carne, mientras que la huella hídrica indirecta de ese mismo consumidor depende de las huellas hídricas directas del minorista que vende la carne, del procesador de la comida que se prepara con la carne para su venta, de la granja que cría al animal y de los campos de cultivo que producen el alimento para el animal. La huella hídrica indirecta del minorista depende de la huella hídrica directa del procesador de comida, de la granja y de los campos de cultivo; y así, sucesivamente.



**Figura 3.3. Huellas hídricas directa e indirecta en cada etapa de la cadena de suministro de un producto de origen animal**

La huella hídrica de los consumidores de un área no equivale a la huella hídrica dentro de un área, pero sí que están relacionados. La [figura 3.4](#) muestra la relación existente entre la huella hídrica del consumo nacional y la huella hídrica dentro de una nación

en un ejemplo simplificado de dos naciones que mantienen relaciones comerciales. La huella hídrica interna del consumo nacional equivale a la huella hídrica dentro de ese país, en la medida en que esta no esté relacionada con la producción de productos para exportar. La huella hídrica externa del consumo nacional se puede calcular observando la importación de productos (y, por consiguiente, el agua de forma virtual) y la huella hídrica asociada dentro de la nación exportadora.

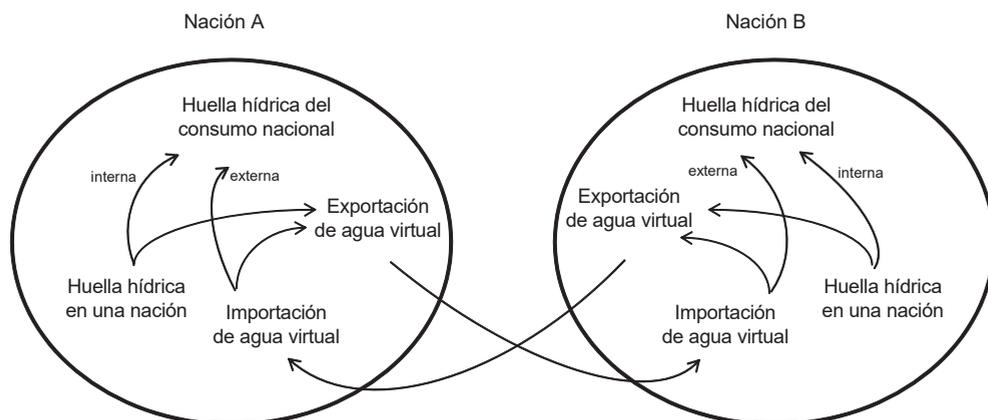


Figura 3.4. Relación entre la huella hídrica del consumo nacional y la huella hídrica dentro de una nación en un ejemplo simplificado de dos naciones con relaciones comerciales

La huella hídrica se expresa en términos de volumen de agua por unidad de producto o como el volumen de agua por unidad de tiempo ([cuadro 3.2](#)). Por tanto, la huella hídrica de un proceso se expresa como volumen de agua por unidad de tiempo. Cuando se divide entre la cantidad de producto que resulta de un proceso, también se puede expresar como el volumen de agua por unidad de producto. La huella hídrica de un producto siempre se expresa en términos de volumen de agua por unidad de producto (normalmente en  $\text{m}^3/\text{t}$  o litros/kg). La huella hídrica de un consumidor, de un productor o dentro de un área también se expresa siempre como el volumen de agua por unidad de tiempo. Dependiendo del nivel de detalle que se pretenda mostrar, la huella hídrica puede ser expresada por día, mes o año.

#### Cuadro 3.2. Unidad de una huella hídrica

- La huella hídrica de un proceso se expresa como el volumen de agua por unidad de tiempo. Cuando se divide entre la cantidad de un producto que resulta del proceso (unidades de producto por unidad de tiempo), también puede expresarse como el volumen de agua por unidad de producto.

- La huella hídrica de un producto se expresa siempre como el volumen de agua por unidad de producto. Ejemplos:
  - Volumen de agua por unidad de masa (para productos cuyo peso es un buen indicador de la cantidad).
  - Volumen de agua por unidad de dinero (para productos cuyo valor económico tiene más importancia que su peso).
  - Volumen de agua por pieza (para productos que se cuentan por piezas y no por peso).
  - Volumen de agua por unidad de energía (para productos, por kcal; para electricidad o combustibles, por julios).
- La huella hídrica de un consumidor o empresa se expresa como el volumen de agua por unidad de tiempo. Puede expresarse como el volumen de agua por unidad monetaria cuando la huella hídrica por unidad de tiempo se divide entre los ingresos (para los consumidores) o los beneficios (para las empresas). La huella hídrica de una comunidad de consumidores puede expresarse en términos de volumen de agua por unidad de tiempo per cápita.
- La huella hídrica en un área geográficamente delimitada se expresa como el volumen de agua por unidad de tiempo. Puede expresarse como volumen de agua por unidad monetaria cuando se divide entre los ingresos en el área.

### 3.3. Huella hídrica de una etapa del proceso

#### 3.3.1. Huella hídrica azul

La huella hídrica azul es un indicador del uso consuntivo de la denominada “agua azul”, es decir, del agua dulce superficial o subterránea. La expresión “uso consuntivo del agua” se refiere a uno de los cuatro casos siguientes:

1. El agua se evapora.
2. El agua se incorpora al producto.
3. El agua no regresa a la misma zona de captación, por ejemplo, regresa a otra zona de captación o al mar.
4. El agua no regresa en el mismo período, por ejemplo, se extrae en un período seco y vuelve en un período húmedo.

El primer componente, la evaporación es, en general, el más significativo. Por tanto, a menudo se verá que el uso consuntivo equivale a la evaporación, pero los otros tres

componentes deben incluirse cuando sean relevantes. Toda la evaporación relativa a la producción cuenta, incluyendo el agua que se evapora durante el almacenamiento (por ejemplo, la de embalses de agua artificiales), transporte (por ejemplo, desde canales abiertos), procesamiento (por ejemplo, la evaporación de agua calentada que no se recoge) y la recogida y el vertido (por ejemplo, de canales de drenaje y de plantas de tratamiento de aguas residuales).

El uso consuntivo de agua no significa que el agua desaparezca, ya que permanecerá dentro del ciclo y volverá siempre a algún lugar. El agua es un recurso renovable, lo que no significa, sin embargo, que su disponibilidad sea ilimitada. En un determinado período, la cantidad de agua que recarga las reservas de aguas subterráneas y la que fluye por un río están siempre limitadas a una cantidad determinada. El agua de los ríos y acuíferos puede ser usada para el riego o para fines domésticos o industriales, pero en cierto período no se puede consumir más de la disponible. La huella hídrica azul mide la cantidad de agua disponible consumida en un período determinado (en otras palabras, que no regresa inmediatamente a la misma zona de captación). De este modo, proporciona una medida de la cantidad de agua azul disponible consumida por los humanos. El resto, los flujos de agua subterránea y de agua superficial que no hayan sido consumidos para la actividad humana se dejan para mantener los ecosistemas que dependan de ellos.

La huella hídrica azul en una etapa del proceso se calcula de la siguiente manera:

$$HH_{proc, azul} = \text{evaporación de agua azul} + \text{incorporación de agua azul} + \text{flujo de retorno perdido} \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (1)$$

El último componente se refiere a la parte del flujo de retorno que no está disponible para su uso en la misma zona de captación de la que fue extraída, ya sea porque regresa a otra zona de captación (o vertida al mar) o porque regresa en un período de tiempo distinto.

Al evaluar la huella hídrica azul de un proceso puede ser importante (dependiendo del alcance del estudio) distinguir entre los diferentes tipos de fuentes de agua azul. La división más importante se encuentra entre el agua superficial, el agua subterránea que fluye (renovable) y el agua subterránea fósil. Se puede hacer una distinción al hablar respectivamente de la huella hídrica azul superficial, la subterránea renovable y subterránea fósil (o la huella hídrica azul clara, la azul oscura o la negra, si realmente se le da importancia al uso de colores). En la práctica, es por lo general muy difícil hacer esas distinciones, ya que no existen suficientes datos y es precisamente por ello por lo que dichas distinciones a menudo no se realizan. Sin embargo, si los datos lo permiten, es posible especificar la huella hídrica azul por las fuentes (véanse ejemplos en Aldaya y Llamas 2008; Aldaya y Hoekstra, 2010; o Mekonnen y Hoekstra, 2010b).

Cuando se especifica la huella hídrica azul total por la fuente, es posible que también se quiera distinguir explícitamente el uso consuntivo de agua de lluvia recolectada. Podría decirse que la captación de agua de lluvia es un caso particular, ya que se podría discutir

si el agua de lluvia recolectada es agua azul o verde. A grandes rasgos, la captación de agua de lluvia se refiere a la recolección de agua que de otro modo se convertiría en escorrentía. Ya que el uso consuntivo de agua de lluvia captada sería sustraído de la escorrentía, recomendamos considerar esta agua como parte de la huella hídrica azul.

Existen diversos tipos de técnicas de captación de agua de lluvia para proporcionar agua potable, agua para el ganado o agua para el riego de cultivos o jardines. Mientras que se hable de captación local de escorrentía (como es el caso de la captación del agua de lluvia de los tejados u otras superficies duras, o en el caso de conducir la lluvia a pequeños estanques) se puede categorizar el uso consuntivo de esta agua bajo la huella hídrica azul. Si, por el contrario, se habla de las medidas para incrementar la capacidad de retención del agua en el suelo o de la retención de agua en los tejados verdes, el uso consuntivo de esta agua para la producción de cultivos se situaría bajo la huella hídrica verde.

La unidad de huella hídrica azul del proceso es el volumen de agua por unidad de tiempo, ya sea por día, mes o año. Cuando se divide entre la cantidad de producto que resulta del proceso, la huella hídrica del proceso puede ser expresada también en términos de volumen por unidad de producto. En el [cuadro 3.3](#) se ve reflejado dónde se obtienen los datos necesarios para la contabilidad de la huella hídrica azul.

Finalizamos este apartado presentando dos casos específicos que podrían generar dudas al lector sobre cómo realizar la contabilidad correctamente. El primero se refiere al reciclaje y la reutilización del agua; el segundo a cómo realizar la contabilidad en caso de un trasvase entre dos cuencas hidrográficas.

### Cuadro 3.3. Fuentes de datos para el cálculo de la huella hídrica azul

- **Procesos industriales:** cada componente de la huella hídrica azul del proceso puede medirse directa o indirectamente. Generalmente se conoce cuánta agua se añade para entrar a formar parte del producto. Normalmente no se mide directamente cuánta agua se evapora durante el almacenamiento, el transporte, el procesamiento y el vertido, pero se puede deducir de la diferencia entre la extracción y los volúmenes de vertido final. Lo ideal sería contar con bases de datos que contuvieran información sobre el uso consuntivo del agua para varios tipos de procesos de fabricación. Sin embargo, la realidad es que dichas bases de datos apenas existen y normalmente recogen información sobre la extracción de agua, no sobre su uso consuntivo. Además, estas bases de datos generalmente no recogen los detalles necesarios y aportan información sobre el uso del agua para el sector industrial (por ejemplo, plantas de refinado de azúcar, molinos textiles, molinos de papel, etc.), más que para el proceso de producción. Dos compendios muy ricos en información son Gleick (1993) y van der Leeden *et al.* (1990), pero ambos están centrados en Estados Unidos y principalmente limitados a extracciones de agua. También se pueden consultar bases de datos de propietarios como Ecoinvent (2010), pero las de este tipo generalmente

recogen información sobre extracción de agua y no sobre su uso consuntivo. Las mejores fuentes sobre el consumo de agua azul en procesos de fabricación son los propios productores o las oficinas regionales/globales de organizaciones.

- **Procesos agrícolas:** las estadísticas disponibles sobre el uso de agua azul en agricultura muestran generalmente el total de extracciones de agua únicamente para riego, no el *uso consuntivo* de agua azul. Medir la evapotranspiración del agua en un campo es una tarea laboriosa; incluso cuando se midiera la evapotranspiración total se necesitaría estimar la proporción de agua azul. Por tanto, nos basaremos en modelos de balance hídrico que utilizan datos del clima, suelo, características del cultivo y riego efectivo. El [apartado 3.3.4](#) muestra más detalladamente cómo estimar la huella hídrica azul en el crecimiento de los cultivos basándose un modelo de balance hídrico. Algunos grupos de investigación comenzaron a hacer estimaciones espacialmente explícitas de las huellas hídricas azules (y verdes) del desarrollo de los cultivos, tomando como referencia mapas globales de diferentes cultivos por región y mapas globales del clima, suelos y riego. Solo para el trigo, por ejemplo, existen cuatro bases de datos a nivel mundial: Liu *et al.* (2007, 2009), Siebert y Döll (2010), Mekonnen y Hoekstra (2010a) y Zwart *et al.* (2010). En la página web de la Red de la Huella Hídrica ([www.waterfootprint.org](http://www.waterfootprint.org)) existen datos geográficamente explícitos sobre la huella hídrica del crecimiento de los cultivos, disponible para los principales cultivos en el mundo. Podemos usar estas bases de datos para la contabilidad de la huella hídrica en el nivel B (véase la [tabla 2.1](#)). Para la contabilidad en el nivel C, tenemos que aplicar un modelo apropiado y específico de balance hídrico junto con datos locales específicos.

## Reciclaje y reutilización del agua

Reciclaje y reutilización del agua se usan normalmente como sinónimos. Nosotros definimos “reciclaje de agua” específicamente como la reutilización local del agua para el mismo fin; y “reutilización de agua” como el nuevo uso de esta en otra parte, posiblemente para un fin diferente. En el caso del reciclaje, podemos proponer una distinción extra entre el reciclaje de las aguas residuales (tratándolas para su reutilización) y el reciclaje del vapor de agua (condensando el vapor para su reutilización). En la [figura 3.5](#) se muestran los diferentes tipos de reciclaje y reutilización del agua con un simple ejemplo. Esta figura muestra dos procesos: el segundo reutiliza las aguas residuales (tratadas) del primero. El esquema muestra que, para la huella hídrica azul de los dos procesos, el uso consuntivo del agua es el que cuenta (evaporación e incorporación a productos). El reciclaje y la reutilización de agua pueden ser decisivos en la reducción de la huella hídrica azul de un proceso, siempre y cuando este reduzca eficientemente el uso consuntivo del agua. El reciclaje y la reutilización del agua pueden ser decisivos también para reducir la huella hídrica gris de los usuarios del agua, cuestión que trataremos más adelante en el [apartado 3.3.3](#).

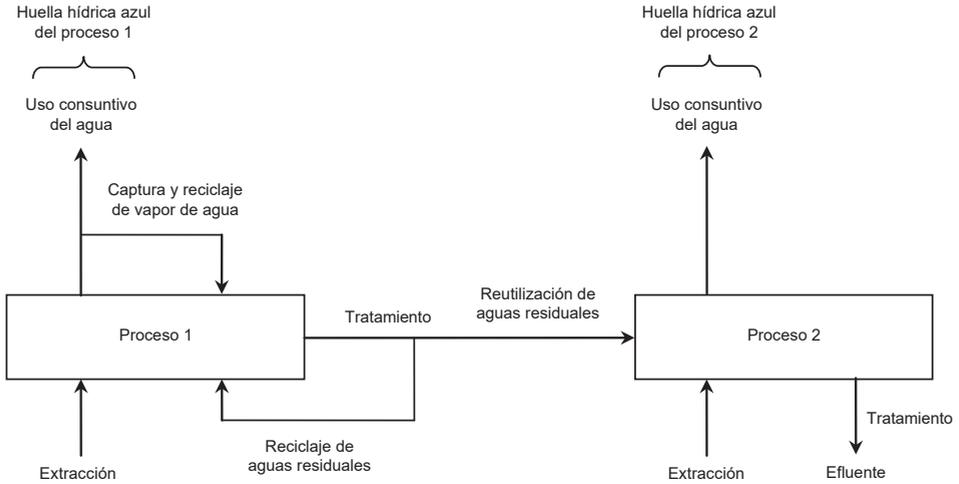


Figura 3.5. La contabilidad de la huella hídrica azul en el caso del reciclaje y reutilización del agua

### Trasvase entre cuencas hidrográficas

Un trasvase entre cuencas en una extracción de agua de una cuenca hidrográfica A para moverla [a través de tuberías, canales o mediante transporte de carga (un camión o un barco, por ejemplo)] a otra cuenca hidrográfica B. Según la definición de la huella hídrica azul, extraer agua de una cuenca se clasifica como huella hídrica azul de esa cuenca, ya que se trata de un uso consuntivo del agua. La huella hídrica azul del trasvase total será asignada a los beneficiarios del agua en la cuenca receptora. Por consiguiente, los procesos en la cuenca B que usan agua de otra cuenca A tienen una huella hídrica azul localizada en la cuenca A y su tamaño equivale a la cantidad de agua recibida más las posibles pérdidas de agua durante el trasvase. Si los usuarios receptores de agua de la cuenca B devuelven (parte de) el agua usada a su propia cuenca, vemos que esta agua se añade a los recursos hídricos de la cuenca B. Esta agua añadida puede compensar la huella hídrica azul de otros usuarios que hayan consumido agua de la cuenca B; en este sentido, se podría discutir que un trasvase entre cuencas crea una huella hídrica azul negativa en la cuenca receptora (siempre y cuando el agua no se evapore y se añade al sistema hídrico de la cuenca receptora). La huella hídrica azul negativa en la cuenca B compensa parcialmente la huella hídrica azul positiva de otros usuarios de la cuenca B.

Obsérvese que esto no compensa la huella hídrica azul en la cuenca hidrográfica A. Cuando el objetivo sea evaluar la huella hídrica total de los seres humanos en la cuenca B, recomendamos incluir una posible huella hídrica azul negativa que existe como resultado del trasvase de agua real a la cuenca (siempre y cuando compense

una huella hídrica azul positiva en la cuenca en un mismo período). En el caso de la contabilidad de la huella hídrica de procesos individuales, productos, consumidores o productores, es importante mantener las huellas hídricas azules negativas fuera de los cálculos de la huella hídrica con el fin de separar claramente la discusión sobre la huella hídrica global de un proceso, producto, consumidor o productor y la discusión sobre posibles compensaciones. El tema de la compensación (sustractabilidad) es debatible y debe ser tratado aparte de la fase de contabilidad. Se ha considerado que realizar una acción positiva en una cuenca (mediante la huella hídrica azul negativa en esa cuenca) no puede compensar la huella hídrica azul positiva en otra cuenca, ya que la disminución del agua y sus consiguientes impactos en un lugar no pueden ser resueltos añadiendo agua en un lugar diferente. En este caso, añadir una huella hídrica azul negativa a una huella hídrica azul positiva produciría un resultado erróneo. En el [capítulo 5 \(cuadro 5.2\)](#) puede leerse más a cerca de la imposibilidad de compensar la huella hídrica en una cuenca añadiendo agua en otra.

### 3.3.2. Huella hídrica verde

La huella hídrica verde es un indicador del uso que hacen los seres humanos de la llamada agua verde, que se refiere a las precipitaciones terrestres que no se transforman en escorrentía ni en aguas subterráneas, sino que se almacenan en el suelo o se quedan de forma temporal en la superficie del suelo o de la vegetación. Con el tiempo, esta parte de la precipitación se evapora o transpira a través de las plantas. El agua verde puede ser productiva para el crecimiento de los cultivos (sin embargo, no toda el agua verde puede ser asimilada por ellos, puesto que siempre habrá evaporación del suelo y porque no todos los períodos del año o zonas son adecuados para el crecimiento del cultivo).

La huella hídrica verde es el volumen de agua de lluvia consumida durante el proceso de producción. Esto es especialmente importante para productos agrícolas y forestales (a base de cultivos o madera), donde nos referimos a la evapotranspiración total del agua de lluvia (de campos y plantaciones) más el agua incorporada a los cultivos o madera recolectados. La huella hídrica verde del proceso equivale a:

$$HH_{proc, verde} = \text{evaporación de agua verde} + \text{incorporación de agua verde} \quad [volumen/tiempo] \quad (2)$$

La diferencia entre la huella hídrica azul y la verde es importante porque los impactos hidrológicos, ambientales y sociales, además de los costes de oportunidad económicos en cuanto al uso del agua superficial y subterránea para la producción, son muy diferentes a los impactos y costes del uso del agua de lluvia (Falkenmark y Rockström, 2004; Hoekstra y Chapagain, 2008).

Podemos medir o estimar el consumo de agua verde para la agricultura con una serie de fórmulas empíricas o con un modelo de cultivo apropiado para estimar la

evapotranspiración basada en datos de entrada sobre las características del clima, del suelo y de los cultivos. En el [apartado 3.3.4](#) se ampliará la información sobre cómo calcular en detalle la huella hídrica verde en el crecimiento de los cultivos.

### 3.3.3. Huella hídrica gris

La huella hídrica gris de una etapa del proceso es un indicador del grado de contaminación de agua dulce que puede asociarse con la etapa del proceso. Se define como el volumen de agua dulce que se necesita para asimilar la carga de contaminantes basado en las concentraciones en condiciones naturales y en las normas o legislación de calidad ambiental del agua existentes. El concepto de huella hídrica gris surgió del reconocimiento de que la magnitud de contaminación del agua puede expresarse en términos de volumen de agua necesario para diluir los contaminantes de forma que se vuelvan inocuos ([cuadro 3.4](#)).

Cuadro 3.4. La historia del concepto de huella hídrica gris

La huella hídrica gris se refiere al volumen de agua necesario para asimilar contaminantes, cuantificado como el volumen de agua necesario para diluir los contaminantes de modo que la calidad del agua en el medio se mantenga por encima de las normas de calidad del agua acordadas. La idea de expresar la contaminación del agua en términos de volumen de agua necesario para diluir los contaminantes no es nueva. Falkenmark y Lindh (1974) sugirieron, como regla general, usar un factor de dilución equivalente a 10-50 veces el flujo de aguas residuales. Postel *et al.* (1996) aplicaron un factor de dilución para la absorción de contaminantes de 28 litros por segundo por cada 1.000 personas. Estos factores genéricos de dilución no tienen en cuenta el tipo de contaminación y el nivel de tratamiento antes del vertido, pero asumen de manera implícita algunas características tipo de los flujos de contaminantes humanos. Chapagain *et al.* (2006b) propusieron que el factor de dilución dependiera del tipo de contaminante y que se usara la norma o legislación de calidad ambiental del agua para un determinado contaminante como criterio para cuantificar la necesidad de dilución.

El término “huella hídrica gris” fue introducido por primera vez por Hoekstra y Chapagain (2008) y se definió como la carga contaminante dividida entre la concentración máxima permitida en la masa de agua receptora. Posteriormente se reconoció que la huella hídrica gris se calculaba de forma más precisa dividiendo la carga contaminante entre la diferencia entre la concentración máxima permitida y la concentración natural (Hoekstra *et al.*, 2009a). La actividad del grupo de trabajo sobre huella hídrica gris de la Red de la Huella Hídrica (Zarate, 2010a) ha sido posteriormente perfeccionado, incluyendo el reconocimiento de que debe tomarse en cuenta la calidad del agua de entrada y la idea de un enfoque a varios niveles para poder distinguir entre los diversos niveles de detalle a la hora de evaluar la huella hídrica gris en el caso de contaminación difusa.

Aunque la huella hídrica gris pueda ser entendida como un requisito de la dilución del agua, preferimos no utilizar ese término puesto que parece haber causado confusión entre algunas personas que pensaron que el término implicaba que había que diluir contaminantes en vez de reducir su emisión, lo que no es a lo que se refiere el término en absoluto. La huella hídrica gris es un indicador de la contaminación, por lo que cuanto menos contaminación, mejor. El tratamiento de aguas residuales antes de su vertido se traducirá en una disminución de la huella hídrica gris, posiblemente hasta cero.

Citamos algunos estudios recientes que incluyen la cuantificación de la huella hídrica gris: Dabrowski *et al.* (2009); Ercin *et al.* (2009); Gerbens-Leenes y Hoekstra (2009); van Oel *et al.* (2009); Aldaya y Hoekstra (2010); Bulsink *et al.* (2010); Chapagain y Hoekstra (2010); y Mekonnen y Hoekstra (2010a, b).

La huella hídrica gris se calcula dividiendo la carga de contaminante ( $L$ , en masa/tiempo) entre la diferencia entre la norma de calidad ambiental del agua de ese contaminante (la concentración máxima permitida  $c_{m\acute{a}x}$ , en masa/volumen) y su concentración natural en la masa de agua receptora ( $c_{nat}$ , en masa/volumen).

$$HH_{proc,gris} = \frac{L}{c_{m\acute{a}x} - c_{nat}} \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (3)$$

La concentración natural en una masa de agua receptora es la concentración en dicho medio que tendrá lugar si en su zona de captación no existe intervención por parte del hombre. Para sustancias de origen antrópico que de forma natural no están presentes en el agua,  $c_{nat} = 0$ . Cuando no se conocen con precisión las concentraciones naturales, pero se estima que sean bajas, para simplificar se puede asumir que  $c_{nat} = 0$ . Esto, sin embargo, se traduce en una subestimación de la huella hídrica gris porque, de hecho,  $c_{nat}$  no es igual a 0.

Muchos de nuestros lectores se preguntarán por qué se usa como referencia la concentración natural y no la concentración real en la masa de agua receptora. La respuesta es que la huella hídrica gris es un indicador de la capacidad apropiada de asimilación. Esta capacidad de asimilación de una masa de agua receptora depende de la diferencia entre el máximo permitido y la concentración natural de una sustancia. Si se comparase la concentración máxima permitida con la concentración real de una sustancia, se observaría la capacidad de asimilación *restante*, que obviamente está en continuo cambio, como una función del nivel de contaminación real en un momento determinado.

Los cálculos de la huella hídrica gris se realizan con la utilización de las normas de la calidad ambiental para la masa de agua receptora, es decir, las normas con respecto a las concentraciones máximas permitidas. La razón es que el objetivo de la

huella hídrica gris es mostrar el volumen necesario de agua del medio para asimilar productos químicos. Las normas de la calidad ambiental forman una categoría específica dentro de las normas de la calidad del agua. Otros tipos de normas son, por ejemplo, las normas de la calidad del agua potable, las normas de la calidad del riego y las normas de emisiones (o efluentes). Se debe tener precaución cuando se utilizan las normas de calidad ambiental del agua. Para una sustancia en particular, la norma de la calidad ambiental puede variar de una masa de agua a otra. Además, la concentración natural puede variar de un lugar a otro. Como consecuencia, una determinada carga contaminante puede tener una huella hídrica gris en un lugar y otra en un lugar diferente. Esto es razonable, ya que el volumen de agua necesario para asimilar una determinada carga de contaminante variará dependiendo de la diferencia entre el máximo permitido y la concentración natural.

Aunque las normas de la calidad ambiental suelen estar definidas en la legislación nacional o estatal, o definidas como zona de captación y masa de agua en el marco de la legislación nacional o por acuerdos regionales [como es el caso de la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea (véase EU, 2000)], estas no existen para todas las sustancias ni para todos los lugares. Lo más importante es, por supuesto, especificar qué normas de la calidad de agua y de las concentraciones naturales han sido usadas en la preparación de la contabilidad de la huella hídrica gris.

Tanto las normas de la calidad ambiental como las concentraciones naturales de fondo varían en las masas superficiales y subterráneas. Los umbrales en las aguas subterráneas se basan generalmente en requisitos para el agua potable, mientras que las concentraciones máximas permitidas en aguas superficiales están determinadas normalmente por consideraciones ecológicas. Se podría entonces proponer el cálculo de la huella hídrica gris de los sistemas de aguas superficiales de forma independiente a la de la huella hídrica gris de las aguas subterráneas. El problema es que las aguas subterráneas, por lo general, terminan siendo superficiales, así que para una carga contaminante de aguas subterráneas se puede calcular la diferencia entre la norma de la calidad del agua y las concentraciones naturales para la masa de agua más crítica (tanto para el sistema subterráneo como para el superficial). Para las cargas del sistema superficial podemos considerar los datos relevantes. Cuando se conocen exactamente las cargas que llegan (en primer lugar) al sistema de aguas subterráneas y las que llegan al sistema de aguas superficiales, tiene sentido mostrar dos componentes de la huella hídrica gris: la huella hídrica gris subterránea y la huella hídrica gris superficial.

Una huella hídrica gris mayor que cero no implica automáticamente que se estén violando las normas de la calidad ambiental del agua; simplemente muestra que parte de la capacidad de asimilación ya ha sido consumida. Mientras que la huella hídrica gris calculada sea menor que el caudal del río o el flujo de aguas subterráneas, aún queda suficiente agua para diluir los contaminantes a una concentración menor

que la de la norma. Cuando la huella hídrica gris calculada sea precisamente igual al caudal de agua ambiente, entonces la concentración resultante será exactamente la de la norma. Cuando el efluente contenga una gran carga de productos químicos, es posible que el cálculo de la huella hídrica gris supere el caudal del río o el flujo de aguas subterráneas. En tal caso, la contaminación sobrepasa la capacidad de asimilación de la masa de agua receptora. El hecho de que la huella hídrica gris pueda ser mayor al caudal de agua no muestra el volumen de agua contaminada (ya que no es posible contaminar un volumen superior al existente). Por el contrario, la huella hídrica gris es un indicador de la gravedad de la contaminación del agua expresada en términos de los volúmenes de agua dulce necesarios para asimilar la carga de contaminantes existente.

El enfoque que se da en la contabilidad de la huella hídrica gris es el mismo que el denominado enfoque de carga crítica ([cuadro 3.5](#)). En ambos casos, el reconocimiento básico es que la capacidad para la absorción de contaminantes de una masa de agua está limitado por la diferencia entre la concentración máxima y la natural. La carga crítica se refiere a la situación en la que la capacidad para la absorción de contaminantes ha sido agotada. En la carga crítica, la huella hídrica gris es igual al caudal de agua disponible, que será necesario para diluir totalmente las sustancias químicas a niveles de concentración aceptables.

### Cuadro 3.5. El concepto de carga crítica

Cuando la carga depositada en una masa de agua corriente alcanza una cierta carga crítica, la huella hídrica gris será igual a la escorrentía, lo que significa que la escorrentía total es apropiada para la asimilación de los contaminantes. La carga crítica ( $L_{crit}$ , en masa/tiempo) es la carga de contaminantes que consumen por completo la capacidad de asimilación de la masa de agua receptora. Puede calcularse multiplicando la escorrentía de la masa de agua ( $R$ , en volumen/tiempo) por la diferencia entre la concentración máxima aceptable y la natural:

$$L_{crit} = R \times (c_{m\acute{a}x} - c_{nat}) \quad [\text{masa/tiempo}]$$

El concepto de carga crítica es similar al concepto de carga máxima total diaria (CMTD) introducido por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés, 2010a). La CMTD calcula la cantidad máxima permitida de un contaminante para una determinada masa de agua, de modo que se cumplan y se continúen cumpliendo las normas de la calidad del agua para dicho contaminante, asignando esa carga a fuentes puntuales y difusas y se incluirán, tanto fuentes antropogénicas de los contaminantes como las de origen natural. Otro concepto que está muy relacionado con el concepto de la carga crítica es el concepto de adición máxima admisible (AMA), que se define como la diferencia entre la concentración máxima permitida (CMP) y la concentración natural; es decir,  $c_{m\acute{a}x} - c_{nat}$  (Crommentuijn *et al.*, 2000).

## Fuentes puntuales de contaminación del agua

En el caso de las fuentes puntuales de contaminación del agua, es decir, cuando se vierten productos químicos a una masa de agua superficial en forma de vertido de aguas residuales, se puede estimar la carga midiendo el volumen del efluente y la concentración de un producto químico en este. Más concretamente, se puede calcular la carga contaminante como el volumen del efluente ( $Efl$ , en volumen/tiempo) multiplicado por la concentración de contaminante en el efluente ( $c_{efl}$ , en masa/volumen) menos el volumen de extracción del agua ( $Extr$ , en volumen/tiempo) multiplicado por la concentración real del agua extraída ( $c_{real}$ , en masa/volumen). Por tanto, se puede calcular la huella hídrica gris mediante la ecuación siguiente:

$$HH_{proc,gris} = \frac{L}{c_{m\acute{a}x} - c_{nat}} = \frac{Efl \times c_{efl} - Extr \times c_{real}}{c_{m\acute{a}x} - c_{nat}} \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (4)$$

La carga del contaminante  $L$  se define como la carga añadida a la ya existente en la masa de agua receptora antes de que se realice la actividad en cuestión. En el anexo IV se muestra un ejemplo práctico de la aplicación de esta ecuación. En la mayor parte de los casos, la cantidad de sustancias químicas depositadas en una masa de agua ( $Efl \times c_{efl}$ ) será igual o mayor a la cantidad de sustancias químicas presentes en el agua extraída ( $Extr \times c_{real}$ ). Como resultado, la carga contaminante será positiva. En casos excepcionales (cuando  $c_{efl} < c_{real}$  o cuando  $Efl < Extr$ ), se puede obtener una carga negativa, que debe ser ignorada en el cálculo de la huella hídrica (puesto que, en dicho caso, el resultado de la huella hídrica sería cero). La contribución positiva al medio ambiente en el caso excepcional de una carga negativa se debe tener en cuenta, pero no se debe incluir en la contabilidad de la huella hídrica con el fin de evitar la discusión de una posible compensación de la huella hídrica con otras huellas positivas existentes. La compensación de la huella hídrica es un debate en sí mismo (véase el [cuadro 5.2 en el capítulo 5](#)), que debe tratarse por separado, hacerse explícita y no ser excluida del cálculo. Es importante puntualizar que, cuando el agua se extrae de la zona de captación A para cierto proceso mientras que el efluente es vertido en la zona de captación B, hay que considerar  $Extr = 0$  para la contabilidad de la huella hídrica gris en la zona de captación B.

Cuando no existe un uso consuntivo del agua, es decir, cuando el volumen del efluente es igual al volumen de extracción, la ecuación anterior se simplifica, dando lugar a:

$$HH_{proc,gris} = \frac{c_{efl} - c_{real}}{c_{m\acute{a}x} - c_{nat}} \times Efl \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (5)$$

El coeficiente de la variable  $Efl$  es el denominado “factor de dilución”, que representa el número de veces que el volumen del efluente debe diluirse con agua ambiente para llegar al nivel de concentración máximo aceptable. En el [cuadro 3.6](#) se verá más detalladamente cómo funciona esta ecuación en diferentes casos.

### Cuadro 3.6. La huella hídrica gris en diferentes casos de contaminación puntual

Consideremos el caso común en el que el volumen del efluente es igual (o parecido) al volumen de extracción.

- Cuando  $c_{eff} = c_{real}$ , la huella hídrica gris asociada es nula. Esto es fácilmente entendible, ya que la concentración de la masa de agua receptora permanecerá inalterada.
- Cuando  $c_{eff} = c_{m\acute{a}x}$ , la huella hídrica gris es igual a una cierta fracción del volumen de efluente. Cuando además  $c_{real} = c_{nat}$ , la huella hídrica gris es exactamente igual al volumen del efluente. Podría surgir la pregunta: ¿por qué existe una huella hídrica gris mayor que cero cuando la concentración del efluente cumple con las normas de la calidad ambiental? La respuesta es que se ha consumido parte de la capacidad de asimilación de los contaminantes. Como consecuencia, la adición de contaminantes, la concentración de productos químicos en la masa de agua receptora hace que el valor de  $c_{nat}$  se aproxime al de  $c_{m\acute{a}x}$ . En el caso extremo en que toda el agua de un río sea extraída y devuelta en forma de efluente con una concentración igual al  $c_{m\acute{a}x}$ , se ha consumido la capacidad total de asimilación del río y por tanto, la huella hídrica gris será igual a la escorrentía total del río.
- Cuando  $c_{eff} < c_{real}$ , la huella hídrica gris será negativa, lo que se explica con el hecho de que el efluente es más limpio que el agua extraída. "Limpiar" el río cuando se encuentra aún en condiciones naturales no tiene sentido, puesto que algunas concentraciones de fondo son aparentemente naturales. Si, por el contrario, ya ha habido otras actividades que hayan incrementado la concentración natural, limpiar contribuye a devolver la calidad del agua ambiental en la dirección de las condiciones naturales, así que esto contribuye de manera positiva a la calidad del agua. Sin embargo, las huellas hídricas grises negativas tienen que ser ignoradas en la contabilidad con el fin de distinguir entre la huella hídrica positiva real de alguien y el posible papel de alguien en términos de compensación. El asunto de la compensación de las huellas hídricas se amplía en el [capítulo 5 \(cuadro 5.2\)](#).
- Cuando  $c_{m\acute{a}x} = 0$ , (en el caso de una prohibición absoluta de un contaminante muy persistente o tóxico, por lo que también  $c_{nat} = 0$ ), cualquier efluente con una concentración mayor que cero creará una huella hídrica gris infinitamente grande. Esta tendencia al infinito se debe a la prohibición total: siempre que un contaminante sea totalmente inaceptable, la huella aumenta muy acusadamente.
- En el caso de  $c_{m\acute{a}x} = c_{nat}$ , la huella hídrica gris también alcanzará valores altísimos, pero este caso no ocurrirá puesto que el establecimiento de criterios máximos aceptables iguales a la concentración natural no tiene sentido.

## Reciclado y reutilización del agua

En la [ecuación 5](#) podemos ver que el reciclado o reutilización del agua afecta a la huella hídrica gris. Cuando el agua se recicla o reutiliza totalmente para el mismo u otro fin (tras su tratamiento, si fuese necesario), no se depositarán efluentes al medio ambiente y, por tanto, la huella hídrica gris será igual a cero. Si tras ser reutilizada una o más veces esa agua se sigue vertiendo al medio ambiente, existirá una huella hídrica gris que estará relacionada con la calidad del efluente.

## Tratamiento de aguas residuales

Cuando las aguas residuales siguen un tratamiento antes de ser vertidas en el medio ambiente, obviamente se reduce la concentración de contaminantes en el efluente final y, de este modo, se reducirá la huella hídrica gris. Hay que tener en cuenta que la huella hídrica gris de un proceso depende de la calidad del efluente en la forma en que se vierte al medio y no de la calidad antes del tratamiento. El tratamiento de aguas residuales puede disminuir la huella hídrica gris a cero cuando las concentraciones de contaminantes en el afluente sean iguales o menores a las concentraciones en el agua en el momento de su extracción. Cabe mencionar también que el proceso de tratamiento de aguas residuales en sí tendrá una huella hídrica azul cuando, durante el proceso de tratamiento en estanques abiertos, se produzca la evaporación.

Podemos dar un enfoque parecido al de la contaminación por productos químicos en el caso de la contaminación térmica. La huella hídrica gris se calcula entonces como la diferencia entre la temperatura de un caudal efluente y la de la masa de agua receptora ( $^{\circ}\text{C}$ ), dividido por el aumento de la temperatura máximo aceptable (en  $^{\circ}\text{C}$ ), multiplicado por el volumen del efluente (volumen/tiempo):

$$HH_{proc,gris} = \frac{T_{efl} - T_{real}}{T_{m\acute{a}x} - T_{nat}} \times Efl \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (6)$$

El aumento de temperatura máximo aceptable ( $T_{m\acute{a}x} - T_{nat}$ ) depende del tipo de agua y de las condiciones locales. Si no existiese ninguna directriz local, recomendamos considerar un valor predeterminado de  $3^{\circ}\text{C}$  (EU, 2006).

## Fuentes difusas de contaminación de agua

La estimación de la carga de productos químicos en el caso de fuentes difusas no es tan simple como en el caso de las fuentes puntuales. Cuando se aplica o deposita un producto químico en el suelo, como es el caso del vertido de residuos sólidos o el uso de fertilizantes o pesticidas, puede ocurrir que solo una porción de ellos se filtre a las aguas subterráneas o que sean arrastrados por la escorrentía superficial hasta una corriente de agua superficial. En este caso, la carga contaminante es la fracción

del total de productos químicos depositados o aplicados en el suelo y que acaban alcanzando las aguas subterráneas o superficiales. La cantidad de sustancias químicas aplicadas puede medirse, pero la fracción de estas que alcanza las aguas subterráneas o superficiales no, ya que entran en el agua de manera difusa y, por tanto, no está claro dónde y cuándo medir. Una posible solución podría ser medir la calidad del agua en la salida de una zona de captación, pero aparecen conjuntamente diferentes formas de contaminación y, por ello, el reto consiste en asignar las concentraciones medidas a diferentes fuentes. Por consiguiente, es práctica común (además de recomendado) estimar la fracción de las sustancias químicas aplicadas que entran en el sistema hídrico usando modelos simples o más avanzados. El más simple consiste en asumir que una determinada fracción fija de las sustancias químicas aplicadas acaba por alcanzar las aguas subterráneas o superficiales:

$$HH_{proc,gris} = \frac{L}{c_{m\acute{a}x} - c_{nat}} = \frac{\alpha \times Apl}{c_{m\acute{a}x} - c_{nat}} \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (7)$$

donde:

- $\alpha$  factor adimensional que representa la fracción de lixiviación-escorrentía superficial, definida como la fracción de las sustancias químicas aplicadas que alcanzan las masas de agua dulce.
- $Apl$  cantidad de sustancias químicas depositadas en el suelo durante un proceso determinado (masa/tiempo).

Este es el método más simple y menos detallado para estimar la huella hídrica gris en el caso de contaminación difusa. Se recomienda usarlo solamente como un método por defecto que debe utilizarse en el caso en que no haya tiempo de realizar un estudio más detallado. Es posible obtener mayor grado de detalle dividiéndolo en tres niveles: desde el nivel 1 (método por defecto) al nivel 3 (el más detallado). En los niveles 2 y 3 hay que utilizar datos más específicos y métodos más avanzados ([cuadro 3.7](#)).

### Cuadro 3.7. Enfoque a tres niveles para estimar las cargas de contaminación difusa

Se recomienda un enfoque en tres niveles para estimar las cargas de contaminación difusa similar al propuesto por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) para la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2006). Con niveles del 1 al 3 aumenta la precisión, pero disminuye su factibilidad.

El nivel 1 utiliza una fracción fija para traducir los datos de la cantidad de sustancias químicas aplicadas en el suelo a la cantidad de sustancias químicas que alcanza las aguas superficiales o subterráneas. La fracción debe ser obtenida de la literatura existente y puede depender de la sustancia química en cuestión. La estimación del

nivel 1 funcionará como una estimación preliminar que, sin embargo, excluye factores relevantes como el tipo de suelo, las prácticas agrícolas, la hidrología del suelo y la interacción entre las diferentes sustancias químicas en el suelo.

El nivel 2 aplica enfoques de modelos simples y estandarizados que se pueden utilizar basándose en datos ampliamente disponibles (como el balance de los nutrientes agrícolas, datos sobre la pérdida del suelo, información básica sobre la hidrología, petrología e hidromorfología). Estos enfoques de modelos simples y estandarizados deben ser derivados de otros modelos ampliamente aceptados y validados.

El nivel 3 utiliza técnicas de modelado sofisticado en el caso de que los recursos disponibles lo permitan y que el tema tratado así lo requiera. Mientras que existen modelos mecánicos detallados de flujos contaminantes a través del suelo, su complejidad a menudo los hace inadecuados para su aplicación en el modelado de cargas de contaminación difusa del nivel 3. Sin embargo, existen modelos empíricamente validados basados en información referente a las prácticas agrícolas y que usan datos simplificados sobre el suelo y el clima, disponibles para su uso en estudios de carga difusa. Los estudios de nivel 3 deben usarse para perfeccionar los enfoques del nivel 2.

## El efecto de la evaporación en la calidad del agua

Un tipo específico de contaminación puede surgir cuando la calidad del agua se deteriora a causa de la evaporación. Cuando una parte del agua se evapora, aumenta la concentración de sustancias químicas en el flujo de agua remanente, ya que cuando el agua se evapora, las sustancias químicas del agua permanecen. Consideremos, como ejemplo, el caso de grandes concentraciones de sal en agua de drenaje de campos de regadío. Cuando hay riego continuado con poco drenaje en comparación con el volumen de agua que se evapora, las sales que contiene el agua de riego de forma natural se acumulan en el suelo (ya que se evapora el agua y no la sal). Como consecuencia, también el agua de drenaje tendrá una concentración de sal relativamente alta. Podría decirse que esto es contaminación; sin embargo, es obviamente diferente al tipo de contaminación producida por el vertido de sustancias químicas al agua por parte de los seres humanos porque en este caso no está presente la acción del hombre, pero las sustancias químicas presentes en el agua de manera natural se concentran por la evaporación del agua. Este caso se podría generalizar al resto de ocasiones en que “el agua se retira del sistema mediante la evaporación”. Por ejemplo, también ocurre en reservas artificiales donde el agua se evapora y las sustancias químicas se acumulan.

Incrementar la concentración de sustancias químicas en una masa de agua eliminando agua mediante evaporación al tiempo que se mantienen las sustancias químicas es, a todos los efectos, lo mismo que añadir cierta carga adicional. Si se extraen  $X \text{ m}^3$  de agua pura, la carga equivalente será  $X \text{ m}^3$  veces la concentración natural en la masa de agua ( $c_{nat}$  de masa por  $\text{m}^3$ ). La carga equivalente de  $X \times c_{nat}$  (expresada en masa) es

natural, pero ya no está incluida en el agua natural porque el agua ha sido retirada (se ha evaporado). Esta carga equivalente tiene que ser asimilada por otras aguas naturales. Podemos calcular la huella hídrica gris relativa a esta carga equivalente con una ecuación estándar, en la que la huella hídrica gris es igual a la carga equivalente dividida entre la diferencia entre la concentración máxima y la natural ([ecuación 3](#)). Esta huella hídrica gris se añade al resto de huellas hídricas grises relacionadas con las cargas reales en la cuenca; es decir, las cargas químicas añadidas por actividades humanas.

## **Integración en el tiempo y diferentes contaminantes**

Los valores diarios de la huella hídrica gris se pueden integrar a lo largo del año para así obtener valores anuales. Cuando un flujo de contaminantes afecta a más de un tipo de contaminación (como suele ocurrir), la huella hídrica gris se determina con el contaminante más crítico que se asocia con la mayor huella hídrica gris específica de los contaminantes. Para identificar un indicador global de la contaminación del agua, basta con la huella hídrica gris de la sustancia crítica. En el caso de estar interesados en las huellas hídricas grises para cada contaminante, se pueden comunicar esos valores de manera individual. Esto es muy relevante a la hora de formular medidas de respuesta dirigidas a contaminantes específicos. Sin embargo, para una visión general en términos de contaminación, basta con mostrar la huella hídrica gris de la sustancia crítica.

Como observación final, cabe resaltar que las huellas hídricas grises se miden basándose en las cargas (introducidas por el hombre) que se introducen en las masas de agua dulce y no basándose en las cargas que pueden ser finalmente medidas en el río o en el flujo de aguas subterráneas en algún punto aguas abajo. Dado que la calidad del agua evoluciona con el tiempo y en el curso del flujo de agua como resultado de los procesos naturales, la carga de cualquier sustancia química en un punto de aguas abajo puede variar significativamente con respecto a la suma de las cargas que entraron en el curso de agua (aguas arriba). Optar por medir la huella hídrica gris en el punto donde los contaminantes acceden a los sistemas de aguas subterráneas y superficiales tiene la ventaja de que es relativamente simple (puesto que no se necesita modelar el proceso que modifica la calidad del agua en el curso del río) y seguro (porque es posible que la calidad del agua mejore a lo largo del flujo de un río gracias a un proceso de autodepuración), pero sigue sin quedar claro por qué se debe utilizar como indicador la calidad mejorada de las aguas abajo en vez de medir el impacto inmediato de una carga en el punto en el que entra en el sistema. Mientras que el indicador de huella hídrica gris no tiene en cuenta los procesos naturales que puedan mejorar la calidad a lo largo del flujo del agua, tampoco tiene en cuenta los procesos que consideran el efecto combinado de los contaminantes, que en ocasiones puede ser mayor de lo que se podría esperar si tomamos como base la concentración de sustancias químicas consideradas por separado. En última instancia, la huella hídrica gris depende de las normas de calidad ambiental del agua (concentraciones máximas aceptables). Esto es

razonable teniendo en cuenta que estas normas se basan en los mejores conocimientos disponibles sobre los posibles efectos nocivos de las sustancias químicas incluyendo su posible interacción con otras sustancias.

### 3.3.4. Cálculo de la huella hídrica verde, azul y gris de cultivos agrícolas o forestales

Muchos productos contienen ingredientes procedentes del sector agrícola o forestal. Los cultivos agrícolas se utilizan para la alimentación humana, la alimentación de ganado, la obtención de fibra, de combustible, de aceites, de jabones y de cosméticos, entre muchos otros. Los árboles y arbustos se usan para la obtención de madera, papel y combustible. Como los sectores agrícola y forestal son grandes consumidores de agua, los productos que necesiten de alguno de estos dos sectores para su sistema de producción tendrán, por lo general, una huella hídrica significativa. Para todos esos productos es importante observar la huella hídrica del proceso de crecimiento de los cultivos agrícolas y de la silvicultura. Este apartado aborda los detalles de la evaluación del proceso de la huella hídrica en ellos. El método puede aplicarse tanto a cultivos anuales como perennes. En esta distinción, la silvicultura puede ser considerada como cultivo perenne. A partir de ahora el término cultivo se usará en un sentido amplio, que también incluirá la silvicultura.

La huella hídrica total de un proceso de cultivo de cosechas y árboles ( $HH_{proc}$ ) es la suma de los componentes verdes, azules y grises:

$$HH_{proc} = HH_{proc, verde} + HH_{proc, azul} + HH_{proc, gris} \quad [\text{volumen/masa}] \quad (8)$$

En esta apartado expresaremos todas las huellas hídricas de proceso por unidad de producto, es decir, en volumen de agua por masa. Normalmente, expresamos las huellas hídricas de procesos de los sectores agrícola y forestal como  $\text{m}^3/\text{t}$ , que equivale a litro/kg.

El componente verde en la huella hídrica del proceso de cultivo de una cosecha o árbol ( $HH_{proc, verde}$ ,  $\text{m}^3/\text{t}$ ) se calcula como el componente verde del uso de agua del cultivo ( $UAC_{verde}$ ,  $\text{m}^3/\text{ha}$ ) dividido entre el rendimiento del cultivo ( $R$ ,  $\text{t}/\text{ha}$ ). El componente azul ( $HH_{proc, azul}$ ,  $\text{m}^3/\text{t}$ ) se calcula de forma similar:

$$HH_{proc, verde} = \frac{UAC_{verde}}{R} \quad [\text{volumen/masa}] \quad (9)$$

$$HH_{proc, azul} = \frac{UAC_{azul}}{R} \quad [\text{volumen/masa}] \quad (10)$$

Los rendimientos anuales de los cultivos pueden estar basados en las estadísticas de producción agrícola. En el caso de cultivos permanentes, se debe considerar

el rendimiento medio anual a lo largo de todo el ciclo del cultivo. De este modo, debemos considerar el hecho de que el rendimiento en el primer año de cultivo es bajo o igual a cero, que los rendimientos son más altos después de algunos años y en descenso cuando el ciclo del cultivo perenne llegue a su fin. Para determinar el uso del agua para estos cultivos hay que tomar en cuenta el uso de agua medio anual para el cultivo durante su ciclo de vida completo.

El componente gris de la huella hídrica de un cultivo agrícola o forestal ( $HH_{proc,gris}$ ,  $m^3/t$ ) se calcula multiplicando la tasa de aplicación de sustancias químicas por hectárea ( $TA$ ,  $kg/ha$ ) por la fracción de lixiviación-escorrentía superficial ( $\alpha$ ) dividido entre la concentración máxima permitida ( $c_{m\acute{a}x}$ ,  $kg/m^3$ ) menos la concentración natural para el contaminante en cuestión ( $c_{nat}$ ,  $kg/m^3$ ) y posteriormente dividido entre el rendimiento del cultivo ( $R$ ,  $t/ha$ ).

$$HH_{proc,gris} = \frac{(\alpha \times TA) / (c_{m\acute{a}x} - c_{nat})}{R} \quad [\text{volumen/masa}] \quad (11)$$

Los contaminantes, generalmente, son fertilizantes (nitrógeno, fósforo, etc.), pesticidas e insecticidas. Hay que considerar únicamente el flujo de contaminantes que se vierten a las masas de agua dulce, lo que normalmente es una fracción de la aplicación total de fertilizantes o pesticidas en el campo. Es necesario tener en cuenta solo el contaminante más crítico, es decir, el que dé lugar al mayor volumen de agua según la fórmula anterior.

Los componentes verde y azul en el uso de agua del cultivo ( $UAC$ ,  $m^3/ha$ ) se calculan por acumulación de la evapotranspiración diaria ( $ET$ ,  $mm/d\acute{a}a$ ) durante todo su ciclo de desarrollo:

$$UAC_{verde} = 10 \times \sum_{d=1}^{pcc} ET_{verde} \quad [\text{volumen/\acute{a}rea}] \quad (12)$$

$$UAC_{azul} = 10 \times \sum_{d=1}^{pcc} ET_{azul} \quad [\text{volumen/\acute{a}rea}] \quad (13)$$

donde:

$ET_{verde}$  evapotranspiración del agua verde.

$ET_{azul}$  evapotranspiración del agua azul.

La función del factor 10 es la de convertir la profundidad del agua (en milímetros) en volúmenes de agua por superficie terrestre (en  $m^3/ha$ ). La suma se realiza a lo largo del período que abarca desde el día de la plantación (día 1) hasta el día de la recolección ( $pcc$  se refiere al período que dura el crecimiento del cultivo en días). El hecho de que diversos tipos de cultivo puedan tener distintos períodos de crecimiento puede influir significativamente en el uso de agua del cultivo calculada. Para cultivos permanentes (perennes) y en la producción forestal se debe calcular la evapotranspi-

ración durante todo el año. Además, con el fin de tener en cuenta las diferencias en la evapotranspiración durante el ciclo de vida completo de un cultivo permanente o árbol, se debe considerar el promedio anual de evapotranspiración durante el ciclo de vida completo de la cosecha o árbol. Supongamos, por ejemplo, que un determinado cultivo perenne tiene un ciclo de vida de 20 años, pero que empieza a producir solo a partir del sexto año. En este caso, el uso de agua de ese cultivo durante esos 20 años tiene que dividirse por el rendimiento total durante los 15 años de producción. El uso de agua verde para el cultivo representa el total del agua de lluvia evaporada del campo durante el período de crecimiento; el uso de agua “azul” para el cultivo representa la cantidad total de agua de riego evaporada del campo.

La evapotranspiración de un campo puede ser medida o estimada por medio de un modelo basado en fórmulas empíricas. Medir la evapotranspiración es costoso y muy poco habitual. Por lo general, la evapotranspiración se estima indirectamente con un modelo que utiliza datos sobre el clima, propiedades del suelo y características de los cultivos. Existen muchas alternativas para realizar modelos de *ET* y crecimiento de los cultivos. Uno de los modelos más utilizados es el EPIC (Williams *et al.*, 1989; Williams, 1995), también disponible en formato ráster (Liu *et al.*, 2007). Otro modelo es el CROPWAT, desarrollado por la Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2010b) y basado en el método descrito en Allen *et al.* (1998). Otro modelo es el AQUACROP, específicamente desarrollado para estimar el crecimiento del cultivo y *ET* en condiciones de déficit hídrico (FAO, 2010e).

El modelo CROPWAT ofrece dos opciones diferentes para calcular la evapotranspiración: la opción de requerimiento de agua del cultivo (asumiendo que las condiciones sean óptimas) y la opción de calendario de riego (que incluye la posibilidad de especificar el riego real en el tiempo). Recomendamos aplicar la segunda opción siempre que sea posible, ya que es aplicable tanto para condiciones de crecimiento óptimas como para las no óptimas y porque es más precisa (puesto que el modelo subyacente incluye un balance de agua de suelo dinámico). Un manual completo para el uso práctico del programa CROPWAT está disponible *online* (FAO, 2010b). El [apéndice I](#) resume cómo utilizar la opción de requerimiento de agua del cultivo para hacer una estimación de la evapotranspiración del agua verde y azul en condiciones óptimas; también resume la opción de calendario de riego, que puede ser aplicado en todas las situaciones. El [apéndice II](#) presenta un ejemplo práctico sobre el cálculo de la huella hídrica del proceso de crecimiento de un cultivo.

Estimar las huellas hídricas verde, azul y gris de un cultivo requiere una gran cantidad de fuentes de datos ([cuadro 3.8](#)). Por lo general, siempre es preferible aportar datos locales referentes a la ubicación del campo de cultivo. En muchos casos es muy laborioso recopilar datos específicos para la ubicación del campo de cultivo debido al objetivo de la evaluación. Si este permite obtener una estimación aproximada, se puede decidir si trabajar con datos de áreas cercanas o con medias regionales/nacionales que pueden ser más accesibles.

En los cálculos anteriores no se han contabilizado todavía el agua verde y la azul incorporadas al cultivo recolectado. Tan solo con observar la fracción de agua del cultivo recolectado podemos hallar ese componente de la huella hídrica; para frutas se encuentra comúnmente entre el 80 y 90 por ciento de la masa húmeda y para vegetales normalmente entre el 90 y 95 por ciento. La proporción de agua verde-azul que se incorpora al cultivo puede suponerse igual al ratio  $UAC_{verde} / UAC_{azul}$ . Sin embargo, añadir el agua incorporada al agua evaporada supondrá muy poco para la huella hídrica final, ya que el agua incorporada generalmente se encuentra entre el 0,1 y, como mucho, el 1 por ciento del agua evaporada.

En este apartado hemos examinado el cálculo de la huella hídrica del crecimiento de un cultivo en el campo. La huella hídrica azul calculada para este caso se refiere a la evapotranspiración del agua de riego únicamente del campo de cultivo. No incluye la evaporación de los embalses de agua superficial artificiales creados para el almacenamiento de agua de riego ni la evaporación de los canales que transportan el agua de riego desde el punto de extracción hasta el campo. El almacenamiento y el transporte de agua son dos procesos que preceden al proceso del crecimiento del cultivo en el campo y tienen su propia huella hídrica (figura 3.6). Las pérdidas por evaporación en las etapas de esos dos procesos anteriores pueden ser muy importantes y deberían ser incluidas a la hora de calcular la huella hídrica del producto del cultivo recolectado.

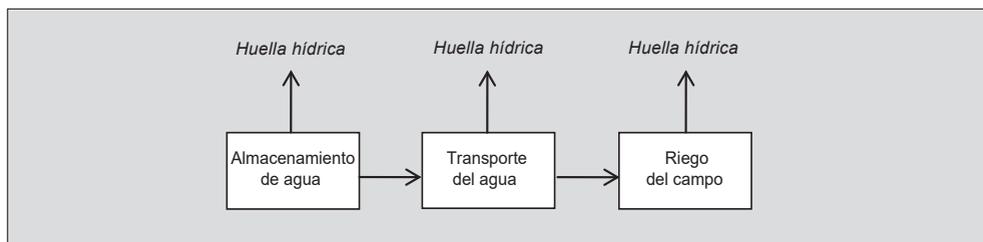


Figura 3.6. Los procesos subsecuentes en el riego: almacenamiento de agua, transporte de agua, riego en el campo. Cada paso tiene su propia huella hídrica

#### Cuadro 3.8. Fuentes de datos para el cálculo de la huella hídrica del crecimiento de un cultivo

- **Datos climáticos:** los cálculos deben realizarse por medio de datos climáticos de las estaciones meteorológicas más representativas cercanas al campo de cultivo considerado o dentro de la región de producción de los cultivos considerada. Para las regiones con más de una estación meteorológica, podemos realizar los cálculos para cada una de ellas y ponderar los resultados. La base de datos climática CLIMWAT 2.0 (FAO, 2010a) aporta los datos climáticos necesarios con el formato apropiado requerido por el modelo CROPWAT 8.0. La base de datos no aporta información específica por años, sino medias de 30 años. Otra fuente es LocClim 1.1

(FAO, 2005), que aporta estimaciones de las condiciones climáticas medias en áreas donde no existen observaciones. También pueden usarse bases de datos climáticos en formato ráster: se pueden obtener valores mensuales de los parámetros climáticos principales con una resolución espacial de 30 minutos de arco de CRU TS-2.1 a través de CGIAR-CSI GeoPortal (Mitchell y Jones, 2005). El Centro Nacional de Datos Climáticos de Estados Unidos aporta datos climáticos diarios sobre un gran número de estaciones a nivel mundial (NCDC, 2009). Además, a través de su página web GeoNetwork, la FAO facilita la precipitación media a largo plazo y la evapotranspiración de referencia con una resolución espacial de 10 minutos de arco (FAO, 2010g).

- **Parámetros de cultivo:** los coeficientes de cultivo y los patrones de cultivo (fechas de plantación y recolección) es preferible tomarlos de datos locales. La variedad de cultivo y el período de cosecha adecuado para un determinado tipo de cultivo dependen en gran medida del clima y de muchos otros factores tales como: costumbres locales, tradiciones, estructura social, normativa y políticas existentes, etc. Por tanto, los datos más fiables sobre los cultivos son los aportados por las estaciones locales de investigaciones agrícolas. Las bases de datos globales que se pueden usar son: Allen *et al.* (1998, tablas 11-12), FAO (2010b), USDA (1994). El Sistema Mundial de Información y Alerta de la FAO (SMIA), disponible en red, ofrece calendarios de cultivo para los cultivos más importantes de los países en desarrollo. A través de la web es posible acceder a los archivos comprimidos de imágenes de los calendarios de los cultivos agrupados por continente (FAO, 2010f).
- **Mapas de cultivo:** las áreas y los rendimientos agrícolas de 175 cultivos están disponibles, en una cuadrícula con una resolución de 5 minutos de arco, en la página web del grupo de investigación sobre el Uso del Suelo y Cambio Ambiental Global del Departamento de Geografía de la Universidad de McGill (Monfreda *et al.*, 2008).
- **Rendimiento de cultivo:** la mejor manera de obtener los datos sobre el rendimiento es de forma local, en el nivel de resolución espacial requerido. Hay que cerciorarse de que está clara la forma en que se mide el rendimiento (por ejemplo, qué parte del cultivo, peso seco o húmedo). A través de la FAO (2010d) podemos encontrar una base de datos global.
- **Mapas de suelo:** ISRIC-WISE proporciona un banco de datos globales sobre las propiedades del suelo, con resoluciones de 5 y 30 minutos de arco (Batjes, 2006). Además, la página web GeoNetwork de la FAO proporciona los datos sobre la humedad máxima disponible del suelo con una resolución de 5 minutos de arco (FAO, 2010h). Cuando se aplica la opción de calendario de riego en el modelo CROPWAT, se necesita información del suelo; si esta no estuviera disponible, se recomienda elegir la opción suelo medio por defecto.
- **Mapas de riego:** el *Mapa Mundial de Superficies de Riego* (GMIA, por sus siglas en inglés) en su versión 4.0.1 (Siebert *et al.*, 2007), con una resolución espacial de 5 minutos de arco, define las superficies equipadas para el riego. Los mapas de

riego de los 26 principales cultivos con una resolución de 5 y 30 minutos de arco puede obtenerse de la página web de la Universidad de Frankfurt (Portmann *et al.*, 2008, 2010). Estos datos también proporcionan información sobre las áreas de cultivo en secano para los mismos 26 cultivos.

- **Tasas de aplicación de fertilizantes:** es preferible utilizar información local. Una base de datos útil es FertiStat (FAO, 2010c). La Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes (IFA, por sus siglas en inglés; 2009) proporciona datos sobre el consumo anual de fertilizantes por país. Heffer (2009) proporciona datos sobre el uso de fertilizantes por cultivo, para los principales tipos de cultivo y para los principales países productores.
- **Tasas de aplicación de pesticidas:** es preferible utilizar información local. El Servicio Nacional de Estadísticas Agrícolas (NASS, por sus siglas en inglés; 2009) proporciona una base de datos online para EE. UU. sobre el uso de sustancias químicas por cultivo. La Fundación CropLife (2006) proporciona una base de datos sobre el uso de pesticidas en EE. UU. Para datos sobre Europa, está el Eurostat (2007).
- **Fracción de lixiviación-escorrentía superficial:** no existen bases de datos por el momento. Habrá que trabajar con datos experimentales sobre estudios de suelo y realizar suposiciones aproximadas. Podemos suponer que existe un 10% de lixiviación para fertilizantes nitrogenados, de acuerdo con Chapagain *et al.* (2006b).
- **Normas de la calidad ambiental:** es preferible usar normativa local tal como está dispuesto en la legislación. Esta información está disponible solo para ciertas partes del mundo, tales como la Unión Europea (EU, 2008), EE. UU. (EPA, 2010b), Canadá (Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente, 2010), Australia/Nueva Zelanda (ANZECC y ARMCANZ, 2000), China (Ministerio de Protección Medioambiental, 2002), Japón (Ministerio de Medio Ambiente, 2010), Austria (Ministerio federal de Agricultura, Silvicultura, Medio Ambiente y Gestión del Agua, 2010), Brasil (CONAMA, 2005), Sudáfrica (Departamento de Asuntos Hídricos y Silvicultura, 1996), Alemania (LAWA-AO, 2007) y Gran Bretaña (UKTAG, 2008). Podemos encontrar una compilación de todos ellos en MacDonald *et al.* (2000). Si las normas sobre calidad ambiental del agua no estuvieran disponibles y fuera necesario que la masa de agua sea apta para agua potable, podemos decidir que se apliquen las normas para regular el agua potable. Véase, por ejemplo, EU (2000) y EPA (2005).
- **Concentraciones naturales en masas de agua receptoras:** en ríos más o menos vírgenes, podemos asumir que las concentraciones naturales son iguales a las concentraciones reales y que, por tanto se basan en medias diarias o mensuales a largo plazo proporcionadas por una estación de medición cercana. Para ríos alterados, habrá que basarse en registros históricos o estudios con modelos. Existen buenos estudios hechos para ciertas partes del mundo; para los de EE. UU. véanse, por ejemplo, Clark *et al.* (2000) y Smith *et al.* (2003); para Austria, véase Ministerio federal de Agricultura, Silvicultura, Medio Ambiente y Gestión del Agua (2010); o para Alemania, véase LAWA-AO (2007). Como referencia, está disponible a través de UNEP (2009) una base de datos a nivel mundial sobre las concentraciones reales

(no naturales). Cuando no exista información hay que calcular la concentración natural de acuerdo con la mejor estimación o suponer que esta es cero.

- **Concentración real del agua extraída:** existe una base de datos global con concentraciones reales disponible en UNEP (2009).

## 3.4. La huella hídrica de un producto

### 3.4.1. Definición

La huella hídrica de un producto se define como el volumen total de agua dulce que se usa directa o indirectamente para la producción de un producto. La estimación se realiza considerando el consumo de agua y la contaminación en todas las etapas de la cadena de producción<sup>1</sup>. El procedimiento contable es parecido al de toda clase de productos, ya sean productos derivados del sector primario, secundario o terciario.

La huella hídrica de un producto se divide en los componentes verde, azul y gris. Un término alternativo para la huella hídrica de un producto es “el contenido de agua virtual”, pero el significado del último es mucho más específico ([cuadro 3.9](#)).

#### Cuadro 3.9. Terminología: huella hídrica, contenido de agua virtual y agua incorporada

La huella hídrica de un producto es parecida a lo que se ha denominado de forma alternativa en otras publicaciones como “contenido de agua virtual” de un producto o el agua integrada, incorporada, exógena y oculta del producto (Hoekstra y Chapagain, 2008). Sin embargo, los términos “contenido de agua virtual” y “agua incorporada” se refieren al volumen de agua incorporado al producto como tal, mientras que el término “huella hídrica” se refiere no solo al volumen, sino también al tipo de agua utilizada (verde, azul, gris) y a cuándo y dónde se ha usado esa agua. La huella hídrica de un producto es, por tanto, un indicador multidimensional mientras que el “contenido de agua virtual” o el “agua incorporada” se refieren únicamente al volumen. Recomendamos usar el término “huella hídrica,” ya que su alcance es mucho mayor.

<sup>1</sup> Sabemos que el uso del agua relacionado con un producto no está limitado a su fase de producción. En el caso de muchos productos (por ejemplo, una lavadora), la fase de uso del producto necesita utilizar agua. Sin embargo, este componente de uso de agua no forma parte de la huella hídrica del producto. El agua utilizada durante el uso del producto se incluye en la huella hídrica del consumidor. El agua destinada a la reutilización, reciclaje o la fase de eliminación de un producto, se incluye en la huella hídrica de una empresa u organización que presta ese servicio y se añaden las huellas hídricas de los consumidores que se benefician de dicho servicio.

El volumen es solo un aspecto del uso de agua; el lugar y tiempo del uso del agua y el tipo de agua utilizada son igualmente importantes. Además, el término “huella hídrica” puede también utilizarse en contextos en los que se hable de la huella hídrica de un consumidor o de un productor. Sería extraño hablar sobre contenido de agua virtual de un consumidor o productor.

El término “agua virtual” se utiliza en el contexto de flujos de agua virtual internacionales (o interregionales). Si una nación (región) exporta o importa un producto, también exporta o importa agua de forma virtual. En este contexto se puede hablar de exportación o importación de agua virtual o, de manera más general, de flujo o intercambio de agua virtual.

En el caso de productos agrícolas, la huella hídrica se expresa generalmente en términos de  $\text{m}^3/\text{t}$  o litros/kg. En muchos casos, cuando los productos agrícolas son contables, la huella hídrica también puede expresarse como un volumen de agua por unidad de producto. En el caso de productos industriales, la huella hídrica también puede expresarse como  $\text{m}^3/\$$  estadounidenses o volumen de agua por unidad de producto. Otras maneras de expresar la huella hídrica de un producto son, por ejemplo, el volumen de agua/kcal (para productos destinados a la alimentación) o el volumen de agua/julios (en el caso de electricidad o combustibles).

### 3.4.2. Esquematización del sistema de producción en etapas de un proceso

Con el fin de realizar la estimación de la huella hídrica de un producto, hay que empezar por entender su modo de producción. Por ello, habrá que identificar el sistema de producción. Un sistema de producción consiste en una serie de etapas de procesos secuenciales. Un ejemplo (simplificado) del sistema de producción de una camisa de algodón consiste en cultivar el algodón, recogerlo, desmotarlo, cardarlo, tejerlo, blanquearlo, teñirlo, estamparlo y darle el acabado. Dado que muchos productos requieren múltiples productos de entrada, suele ocurrir que muchas etapas del proceso preceden a una etapa siguiente. En tal caso no tendríamos una cadena lineal de las etapas del proceso, sino un “árbol de productos”. Un ejemplo (simplificado) de un árbol de productos consiste en producir un alimento y todo tipo de productos de entrada necesarios para la cría intensiva de ganado, la cría de animales y, finalmente, la producción de carne. Como los sistemas de producción normalmente producen más de un producto final (por ejemplo, las vacas pueden dar tanto leche, como carne, como cuero) incluso la metáfora de un árbol de producción resulta insuficiente. En realidad, los sistemas de producción son redes complejas de procesos relacionados que, en muchos casos, son circulares.

Para la estimación de la huella hídrica de un producto es necesario esquematizar el sistema de producción en un número limitado de etapas del proceso. Además, cuando se intenta ir más allá de un análisis superficial basado en medias globales, habrá que especificar las etapas en tiempo y espacio, lo que significa que habrá que localizar el origen (de los productos de entrada) del producto. En el ejemplo anterior de la producción de la camisa, el cultivo de algodón puede darse en un lugar (China), mientras que la fabricación se da en otro lugar (Malasia) y el consumo, en otro lugar diferente (Alemania). Las circunstancias de producción y las características del proceso serán distintas de un lugar a otro, por lo que el lugar de producción influirá en el tamaño y el color de la huella hídrica. Otra razón para controlar los lugares de los diferentes procesos es que es posible que se quiera localizar geográficamente la huella hídrica de un producto final.

La esquematización de un sistema de producción entre distintas etapas del proceso requiere realizar hipótesis y simplificaciones. El problema del truncamiento, mencionado en el [capítulo 2](#), es especialmente importante. En teoría, como muchos sistemas de producción contienen componentes circulares, podríamos estar localizando los productos de entrada de un producto de forma infinita a través de la red de las etapas conectadas del proceso. En la práctica se debería dejar de analizar en el punto en el que trabajos adicionales no van a añadir información significativa para el propósito del análisis.

Podemos encontrar diagramas de los sistemas de producción para productos agrícolas en la FAO (2003) y Chapagain y Hoeskstra (2004), por ejemplo. En el caso de productos industriales, se puede construir un diagrama del sistema de producción en una forma relativamente fácil basándose en fuentes de datos públicos. Por supuesto, sería mejor buscar información sobre qué etapas del proceso se utilizan en la cadena de suministro del producto en cuestión. Para ello, es necesario localizar todos los ingredientes del producto.

### 3.4.3. Cálculo de la huella hídrica de un producto

La huella hídrica de un producto puede calcularse de dos formas diferentes: desde el enfoque de la suma de cadenas o desde el enfoque secuencial acumulativo. El primero solo se puede aplicar a casos específicos; el último es un enfoque genérico.

#### Enfoque de la suma de cadenas

Este enfoque es más simple que el siguiente, pero se puede utilizar únicamente en caso de que un sistema de producción genere un producto final ([figura 3.7](#)). En este caso específico, las huellas hídricas que pueden asociarse con las diferentes etapas del proceso en el sistema de producción se pueden atribuir por completo al producto resultante del sistema.

En este simple sistema de producción, la huella hídrica de un producto  $p$  (volumen/masa) es igual a la suma de las huellas hídricas de los procesos relevantes dividida entre la cantidad producida del producto  $p$ :

$$HH_{prod}[p] = \frac{\sum_{s=1}^k HH_{proc}[s]}{P[p]} \quad [\text{volumen/masa}] \quad (14)$$

donde:

$HH_{proc}[s]$  huella hídrica la etapa  $s$  del proceso (volumen/tiempo).

$P[p]$  cantidad producida del producto  $p$  (masa/tiempo).

En la práctica, casi no existen los sistemas de producción simples que solo tengan un producto final, por lo que necesitamos una manera más genérica de contabilización que pueda distribuir el agua usada a lo largo del sistema de producción para los varios productos finales resultantes de dicho sistema sin que exista doble contabilidad.

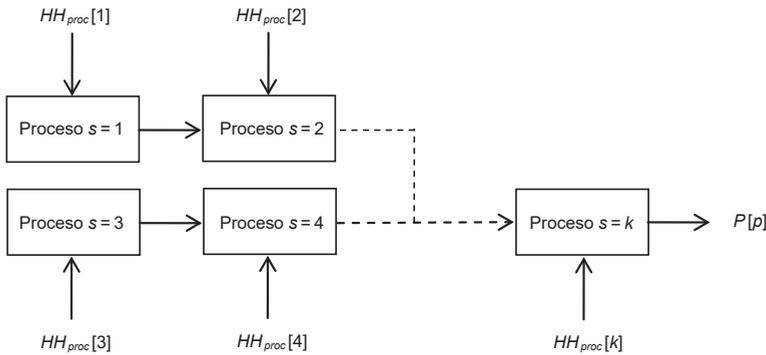


Figura 3.7. Esquematzación del sistema de producción usado para la producción del producto  $p$  en  $k$  etapas del proceso.

Algunas etapas ocurren en serie y otras en paralelo.

La huella hídrica del producto final  $p$  se calcula sumando las huellas hídricas de proceso de los procesos que constituyen el sistema de producción.

Nota: este esquema simplificado presupone que  $p$  es el único producto final resultante del sistema de producción

### Enfoque secuencial acumulativo

Este enfoque es una forma genérica de calcular la huella hídrica de un producto basado en las huellas hídricas de los productos de entrada que fueron necesarias en la última etapa de producción para generar el producto final y la huella hídrica de proceso de esa etapa del proceso. Supongamos que tenemos un número de productos de entrada a la

hora de hacer un producto final. En este caso, podemos obtener la huella hídrica del producto final sumando las huellas hídricas de los productos de entrada y añadiendo la huella hídrica de proceso. Supongamos otro caso en el que tenemos un producto de entrada único y varios productos finales. En este caso, es necesario distribuir la huella hídrica del producto de entrada a los diferentes productos. Se puede realizar de forma proporcional al valor de los productos finales o incluso proporcional al peso de los productos, pero este último supuesto será menos significativo. Finalmente, se considera el caso más genérico (figura 3.8). El objetivo es calcular la huella hídrica de un producto  $p$ , que se elabora a partir de  $y$  productos de entrada, los cuales son numerados desde  $i = 1$  a  $y$ . Supongamos que el procesamiento de  $y$  productos de entrada resulta en  $z$  productos finales, los cuales son numerados desde  $p = 1$  a  $z$ .

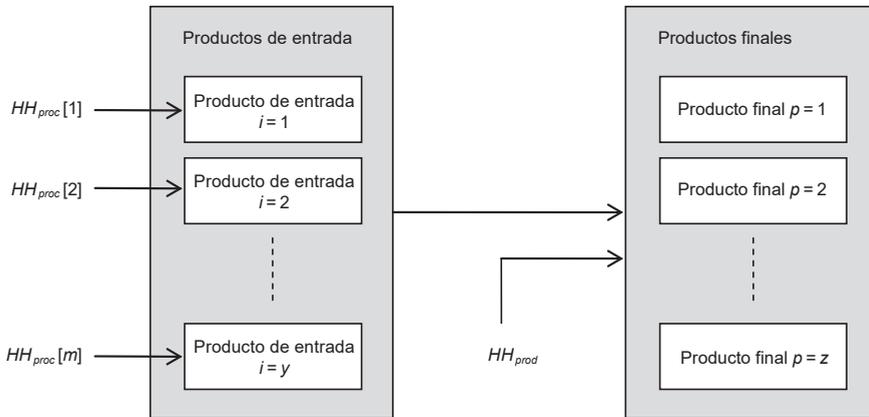


Figura 3.8. Esquemización de la última etapa del proceso en el sistema de producción del que resulta el producto  $p$ . La huella hídrica de un producto final  $p$  se calcula basándonos en las huellas hídricas de los productos de entrada y la huella hídrica al transformar los productos de entrada en productos finales

Si hay agua involucrada en el proceso, la huella hídrica de proceso se añade a las huellas hídricas de los productos de entrada antes de que el total sea distribuido a los diversos productos finales. La huella hídrica de un producto final  $p$  se calcula con la siguiente fórmula:

$$HH_{prod}[p] = (HH_{proc}[p] + \sum_{i=1}^y \frac{HH_{prod}[i]}{f_p[p, i]}) \times f_v[p] \quad [\text{volumen/masa}] \quad (15)$$

donde:

$HH_{prod}[p]$  huella hídrica (volumen/masa) del producto final  $p$ .

$HH_{prod}[i]$  huella hídrica del producto de entrada  $i$ .

$HH_{proc}[p]$  huella hídrica de proceso de la etapa del proceso que transforma los productos de entrada  $y$  en los productos finales  $z$ , expresados en uso de agua por unidad de producto procesado  $p$  (volumen/masa).

$f_p[p, i]$  fracción de producto.

$f_v[p]$  fracción de valor.

Las dos últimas se definirán más adelante. Hay que tener en cuenta que es necesario considerar la ecuación de la huella hídrica de proceso en términos de volumen de agua por unidad de producto *procesado*; cuando la huella hídrica de proceso se da por unidad de un producto de entrada específico, es necesario dividir el volumen dado entre la fracción de producto de ese producto de entrada.

La fracción de producto de un producto final  $p$  que resulta del procesamiento de un producto de entrada  $i$  ( $f_p[p, i]$ , masa/masa) se define como la cantidad de producto final ( $peso[p]$ , masa) obtenido por la cantidad de producto de entrada ( $peso[i]$ , masa):

$$f[p, i] = \frac{peso[p]}{peso[i]} \quad [—] \quad (16)$$

La fracción de valor de un producto final  $p$  ( $f_v[p]$ , unidad monetaria/unidad monetaria) se define como la relación entre el valor de mercado de este producto y el valor agregado de mercado de todos los productos finales (de  $p = 1$  a  $z$ ) resultante de los productos de entrada:

$$f_v[p] = \frac{precio[p] \times peso[p]}{\sum_{p=1}^z (precio[p] \times peso[p])} \quad [—] \quad (17)$$

en la que  $precio[p]$  se refiere al precio del producto  $p$  (unidad monetaria/masa). El denominador se suma a los productos finales  $z$  (de  $p = 1$  a  $z$ ) que resultan de los productos de entrada. Obsérvese que tomamos el precio como un indicador del valor de mercado de un producto, cosa que no ocurre siempre, por ejemplo, cuando no exista mercado para un determinado producto o cuando el mercado esté distorsionado. Por supuesto, es mejor tomar el valor económico real.

Obsérvese también que en un caso simple en el que se procesa únicamente un producto de entrada para la producción de un producto final, el cálculo de la huella hídrica del producto final se vuelve bastante simple:

$$HH_{prod}[p] = HH_{proc}[p] + \frac{HH_{prod}[i]}{f_p[p, i]} \quad [\text{volumen/masa}] \quad (18)$$

Para calcular la huella hídrica de un producto final en un sistema de producción es preferible empezar calculando las huellas hídricas de los recursos más básicos (donde empieza la cadena de suministro) y posteriormente calcular, paso por paso, las huellas hídricas de los productos intermedios hasta que se llegue al cálculo de la huella hídrica del producto final. El primer paso es siempre obtener las huellas hídricas de los productos de entrada y el agua usada para convertirlos en productos finales. Posteriormente, el total de estos componentes se distribuye a los diferentes productos finales, basados en las fracciones de producto y de valor.

En el [apéndice III](#) podemos encontrar un ejemplo práctico del cálculo de la huella hídrica de un producto de origen agrícola.

La mejor forma de obtener las fracciones de producto es por medio de la documentación disponible para un proceso de producción específico. Normalmente, las fracciones de producto están circunscritas a un intervalo reducido pero, a veces, la cantidad del producto final por unidad de producto de entrada depende del proceso específico aplicado. En dicho caso, es importante saber qué tipo de proceso se está aplicando en el caso en cuestión. Para productos agropecuarios, las fracciones de productos están disponibles en FAO (2003) y en Chapagain y Hoekstra (2004, vol. 2). Las fracciones de valor fluctúan de año en año dependiendo de la evolución de los precios, por lo que, para evitar una gran incidencia en la fluctuación de los precios en el resultado de la huella hídrica, recomendamos estimar las fracciones de valor basadas en el precio medio de un período de al menos cinco años. Las fracciones de valor para una escala mayor de productos agrícolas y ganaderos se recogen en Chapagain y Hoekstra (2004). Sin embargo, recomendamos buscar primero información que esté relacionada con el caso en cuestión antes que tomar datos predeterminados por la documentación existente.

La huella hídrica de proceso en una etapa específica de proceso puede variar dependiendo del tipo de método aplicado (por ejemplo, la molienda en seco o húmeda, la limpieza en seco o húmeda o el sistema de refrigeración cerrado o abierto con evaporación de agua). Para muchos procesos, en la documentación existente podemos encontrar estimaciones sobre la extracción de agua, pero no sobre el uso consuntivo de esta. La información general sobre contaminación por proceso también es escasa; variarán notablemente de un lugar a otro, así que utilizar estimaciones generales puede ser muy impreciso. Habrá que buscar información en las propias fuentes, es decir, en los productores y fábricas.

## 3.5. La huella hídrica de un consumidor o grupo de consumidores

### 3.5.1. Definición

La huella hídrica de un consumidor se define como el volumen total de agua dulce consumida y contaminada para la producción de bienes y servicios usados por un consumidor. La huella hídrica de un grupo de consumidores es la suma de las huellas hídricas de cada consumidor individual.

### 3.5.2. Cálculo

La huella hídrica de un consumidor ( $HH_{cons}$ ) se calcula sumando la huella hídrica directa del individuo y su huella hídrica indirecta:

$$HH_{cons} = HH_{cons.dir} + HH_{cons.indir} \quad [\text{volumen/masa}] \quad (19)$$

La huella hídrica directa se refiere al consumo y a la contaminación relacionados con el uso de agua en casa o en el jardín; mientras que la huella hídrica indirecta se refiere al consumo y a la contaminación del agua relacionados con la producción de bienes y servicios usados por el consumidor. Con esta última nos referimos al agua utilizada para producir, por ejemplo, comida, ropa, papel, energía y bienes industriales. La huella hídrica indirecta se calcula multiplicando todos los productos por la huella hídrica de los respectivos productos:

$$HH_{cons.indir} = \sum_p (C[p] \times HH_{prod}^*[p]) \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (20)$$

donde:

$C[p]$  consumo de un producto  $p$  (unidades de producto/tiempo).

$HH_{prod}^*[p]$  huella hídrica de este producto (volumen de agua/unidad de producto).

La serie de productos en cuestión se refiere a la gama total de bienes y servicios de consumo finales. La huella hídrica de un producto se define y calcula tal como se ha descrito en el apartado anterior.

El volumen total del producto de consumo  $p$  normalmente tendrá origen en diferentes lugares  $x$ . La huella hídrica media de un producto  $p$  se calcula de la manera siguiente:

$$HH_{prod}^*[p] = \frac{\sum_x (C[x,p] \times HH_{prod}^*[x,p])}{\sum_x (C[x,p])} \quad [\text{volumen/unidad de producto}] \quad (21)$$

donde:

$C[x, p]$  consumo del producto  $p$  desde el origen  $x$  (unidades de producto/tiempo).

$HH^*_{prod}[x, p]$  huella hídrica de un producto  $p$  desde el origen  $x$  (volumen de agua/unidad de producto).

Dependiendo del nivel de detalle que se quiera en el análisis, se puede localizar la procedencia de los productos con mayor o menor precisión. de los productos con mayor En caso de no poder localizar la procedencia de un producto, habrá que basarse en estimaciones medias mundiales o nacionales. Si, por el contrario, existe una disposición a localizar la procedencia de los productos, podemos estimar las huellas hídricas de producto con un mayor nivel de detalle espacial (véase la explicación sobre niveles espaciotemporales alternativos en la contabilidad de huella hídrica descrita en el [capítulo 2](#)). Preferiblemente, el consumidor conocerá, por producto, cuánto consume de diferentes orígenes. Si este no fuera el caso, podemos asumir que la variación en el origen equivale a la variación en el origen según la disponibilidad de dicho producto en el mercado nacional. El valor de  $HH^*_{prod}[p]$  puede ser calculado con la fórmula que veremos más adelante en el [apartado 3.7.3](#).

Las huellas hídricas de bienes o servicios privados finales se atribuyen exclusivamente al consumidor de dicho bien privado. La huella hídrica de bienes y servicios públicos o compartidos se atribuyen a los consumidores en base a la parte que cada consumidor utiliza individualmente.

## 3.6. La huella hídrica dentro de un área geográficamente delimitada

### 3.6.1. Definición

La huella hídrica dentro de un área geográfica se define como el total del consumo y contaminación de agua dulce dentro de los límites de un área. Es crucial que se definan claramente los límites del área en cuestión; puede ser una zona de captación, una cuenca hidrográfica, una provincia, estado o nación, o cualquier otra unidad espacial hidrológica o administrativa.

### 3.6.2. Cálculo

La huella hídrica dentro de un área geográficamente delimitada ( $HH_{\text{área}}$ ) se calcula como la suma de las huellas hídricas de proceso de todos los procesos que requieren agua en la zona:

$$HH_{\text{área}} = \sum_q HH_{\text{proc}} [q] \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (22)$$

donde:

$HH_{\text{proc}} [q]$  huella hídrica de un proceso  $q$  dentro de un área geográficamente delimitada.

La ecuación suma todos los procesos que consuman o contaminen agua en el área.

La exportación de agua real de un área, como es el caso de un trasvase de una cuenca hidrográfica a otra, se considerará como una huella hídrica de proceso en el área desde la que se exporta el agua.

Desde la perspectiva de la protección de los recursos hídricos en un área determinada, especialmente cuando el agua es escasa, es interesante conocer qué cantidad de agua se utiliza para producir productos de exportación y qué se importa de forma virtual (en forma de productos de uso intensivo de agua) para que no tengan que ser producidos en esa área; es decir, es interesante conocer el balance de agua virtual de un área. El balance de agua virtual de un área geográficamente delimitada en un período específico de tiempo se define como las importaciones netas de agua virtual en este período ( $V_{i, \text{net}}$ ), que es igual a la importación bruta de agua virtual ( $V_i$ ) menos la exportación bruta ( $V_e$ ):

$$V_{i, \text{net}} = V_i - V_e \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (23)$$

Un balance de agua virtual positivo implica un flujo neto de entrada de agua virtual proveniente de otras áreas; un balance negativo implica un flujo neto de salida de agua virtual. La importación bruta de agua virtual es interesante porque ahorra agua dentro del área en cuestión. La exportación bruta de agua virtual es interesante porque se refiere a la huella hídrica del área relacionada con el consumo de personas que viven fuera de esta área. El cálculo de las importaciones y las exportaciones de agua virtual se puede hacer siguiendo el mismo enfoque tratado de manera específica para el caso de países en el [apartado 3.7.3](#).

## 3.7. La contabilidad de la huella hídrica nacional

### 3.7.1. Esquema de contabilidad de la huella hídrica nacional

Los resultados totales de la huella hídrica nacional se obtienen combinando los resultados de la huella hídrica del consumo nacional (resultados referentes a los consumidores presentado en el [apartado 3.5](#)) y los resultados sobre la huella hídrica dentro

de una nación (resultados referentes a las áreas presentados en el [apartado 3.6](#)) en un esquema exhaustivo. La [figura 3.9](#) muestra una representación visual del esquema de cálculo de la huella hídrica nacional introducido por Hoekstra y Chapagain (2008).

Los cálculos tradicionales relativos al consumo de agua en un territorio nacional se refieren únicamente a la extracción de agua en un país. No se distingue entre el uso de agua destinada a productos para consumo doméstico y el uso de agua destinada para productos de exportación. También se excluyen los datos sobre el uso del agua fuera del país para apoyar el consumo nacional. Además, se incluye únicamente el uso de agua azul, excluyendo el agua verde y gris. Para respaldar un tipo de análisis más amplio y ofrecer apoyo para la toma de decisiones, es necesario ampliar los cálculos de los usos tradicionales del agua en una nación.

La huella hídrica de los consumidores de una nación ( $HH_{cons, nac}$ ) tiene dos componentes: la huella hídrica interna y la externa.

$$HH_{cons, nac} = HH_{cons, nac, int} + HH_{cons, nac, ext} \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (24)$$

La huella hídrica interna del consumo nacional ( $HH_{cons, nac, int}$ ) se define como el total de los recursos hídricos nacionales utilizado para producir los bienes y servicios consumidos por la población de un país. Es la suma de la huella hídrica dentro de una nación ( $HH_{\acute{a}rea, nac}$ ) menos el volumen de la exportación de agua virtual a otras naciones, en la medida en que se relaciona con la exportación de productos producidos con recursos hídricos de uso doméstico ( $V_{e, d}$ ):

$$HH_{cons, nac, int} = HH_{\acute{a}rea, nac} - V_{e, d} \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (25)$$

La huella hídrica externa del consumo nacional ( $HH_{cons, nac, ext}$ ) se define como el volumen de recursos hídricos utilizados en otras naciones para producir los bienes y servicios consumidos por la población de la nación en cuestión. Equivale a la importación de agua virtual de la nación ( $V_i$ ) menos el volumen de las exportaciones de agua virtual a otras naciones como resultado de la reexportación de productos importados ( $V_{e, r}$ ):

$$HH_{cons, nac, ext} = V_i - V_{e, r} \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (26)$$

La exportación de agua virtual ( $V_e$ ) de una nación consiste en agua de origen interno ( $V_{e, d}$ ) y agua reexportada de origen extranjero ( $V_{e, r}$ ):

$$V_e = V_{e, d} + V_{e, r} \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (27)$$

Parte de la importación de agua virtual realizada por una nación se consumirá, por lo que supone una huella hídrica externa de consumo nacional ( $HH_{cons, nac, ext}$ ) y parte se reexportará ( $V_{e, r}$ ):

$$V_i = HH_{cons, nac, ext} + V_{e, r} \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (28)$$

La suma de  $V_i$  y  $HH_{\text{área}, \text{nac}}$  es igual a la suma de  $V_e$  y  $HH_{\text{cons}, \text{nac}}$ . Esta suma se llama el presupuesto de agua virtual ( $V_p$ ) de una nación:

$$V_p = V_i + HH_{\text{área}, \text{nac}} = V_e + HH_{\text{cons}, \text{nac}} \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (29)$$

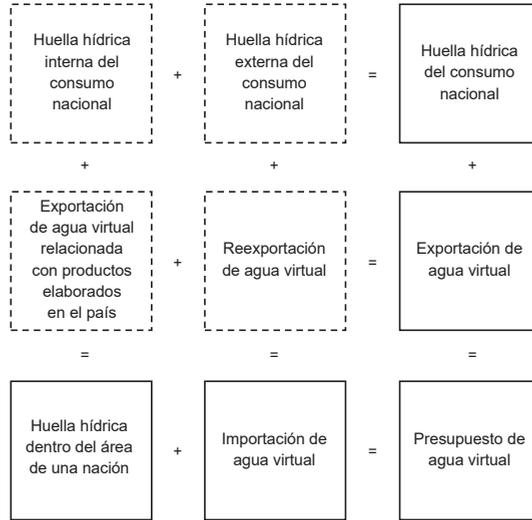


Figura 3.9. El esquema de contabilidad de la huella hídrica nacional. El esquema de contabilidad muestra varios balances de huella hídrica relacionados con el consumo nacional ( $HH_{\text{cons}, \text{nac}}$ ), la huella hídrica en el territorio nacional ( $HH_{\text{área}, \text{nac}}$ ), la exportación total del agua virtual ( $V_e$ ) y la importación total de agua virtual ( $V_i$ ).

### 3.7.2. Cálculo de la huella hídrica dentro de una nación

La huella hídrica dentro de una nación ( $HH_{\text{área}, \text{nac}}$ , volumen/tiempo) se define como el volumen total de agua dulce consumida o contaminada dentro del territorio de una nación. Se puede calcular siguiendo el método descrito en el [apartado 3.6](#):

$$HH_{\text{área}, \text{nac}} = \sum_q HH_{\text{proc}} [q] \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (30)$$

donde  $HH_{\text{proc}} [q]$  se refiere a la huella hídrica del proceso  $q$  dentro de una nación que consume o contamina agua. La ecuación suma el total de los procesos que consumen o contaminan el agua en un país. Las huellas hídricas de proceso se expresan en volumen/tiempo.

### 3.7.3. Cálculo de la huella hídrica del consumo nacional

La huella hídrica del consumo nacional ( $HH_{cons, nac}$ ) puede calcularse mediante dos enfoques alternativos: el enfoque “de arriba hacia abajo” (*top-down*) y el enfoque “de abajo hacia arriba” (*bottom-up*).

#### Enfoque de arriba hacia abajo

En este enfoque, la huella hídrica del consumo nacional ( $HH_{cons, nac}$ , volumen/tiempo) se calcula como la huella hídrica dentro de una nación ( $HH_{área, nac}$ ) más la importación de agua virtual ( $V_i$ ) menos la exportación de agua virtual ( $V_e$ ):

$$HH_{cons, nac} = HH_{área, nac} + V_i - V_e \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (31)$$

La importación bruta de agua virtual se calcula de la siguiente manera:

$$V_i = \sum_{n_e} \sum_p (T_i[n_e, p] \times HH_{prod}[n_e, p]) \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (32)$$

donde:

$T_i[n_e, p]$  cantidad importada de un producto  $p$  de una nación exportadora  $n_e$  (unidades de producto/tiempo)

$HH_{prod}[n_e, p]$  huella hídrica de un producto  $p$  en la nación exportadora  $n_e$  (volumen/unidad de producto).

Si no hubiera más detalles disponibles, se puede asumir que el producto está elaborado en el país exportador. Se puede, por tanto, tomar la media de la huella hídrica del producto en el país exportador. Si se conoce la procedencia dentro del país exportador, se puede tomar la huella hídrica del producto específica del lugar de procedencia del mismo. Cuando se importa un producto de un país que no produce dicho producto y, en este caso, falta información sobre su procedencia real, se puede asumir la huella hídrica media global. Idealmente, para cada producto importado se tomaría la huella hídrica de producto medida a lo largo de la cadena de suministro, pero en la práctica este caso solo es viable si se analiza caso por caso [de acuerdo con lo presentado por Chapagain y Orr (2008) en un estudio sobre la huella hídrica británica] y no de modo genérico para todos los productos de un país. Obviamente, es necesario especificar las suposiciones utilizadas a este respecto.

La exportación bruta de agua virtual se calcula de la manera siguiente:

$$V_e = \sum_p T_e[p] \times HH_{prod}^*[p] \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (33)$$

donde:

$T_e[p]$  cantidad de un producto  $p$  exportado de una nación (unidades de producto/tiempo).

$HH^*_{prod}[p]$  media de la huella hídrica del producto exportado  $p$  (volumen/unidad de producto, que se calcula de la manera siguiente:

$$HH^*_{prod}[p] = \frac{P[p] \times HH_{prod}[p] + \sum_{n_e} (T_i[n_e, p] \times HH_{prod}[n_e, p])}{P[p] + \sum_{n_e} T_i[n_e, p]} \quad \text{[volumen/unidad de producto]} \quad (34)$$

donde:

$P[p]$  producción de la cantidad de producto  $p$  de una nación.

$T_i[n_e, p]$  cantidad importada del producto  $p$  desde una nación exportadora  $n_e$ .

$HH_{prod}[p]$  huella hídrica del producto  $p$  cuando se produce en la nación en cuestión.

$HH_{prod}[n_e, p]$  huella hídrica del producto  $p$  como en la nación exportadora  $n_e$ .

La suposición que se toma es que la exportación procede de la producción interna y la importación es proporcional a sus volúmenes relativos.

## Enfoque de abajo hacia arriba

Este enfoque se basa en el método de cálculo de la huella hídrica de un grupo de consumidores ([apartado 3.5](#)), que está formado por los habitantes de una nación. La huella hídrica del consumo nacional se calcula sumando las huellas hídricas directas e indirectas de los consumidores de una nación:

$$HH_{cons, nac} = HH_{cons, nac, dir} + HH_{cons, nac, indir} \quad \text{[volumen/tiempo]} \quad (35)$$

La huella hídrica directa se refiere al consumo y contaminación del agua debido al uso en casa o en el jardín por parte de los consumidores. La huella hídrica indirecta de un consumidor se refiere al uso del agua por parte de otros para la realización de los bienes y servicios consumidos. Se refiere al agua que ha sido usada para la producción, por ejemplo, de comida, ropa, papel, energía y bienes industriales. La huella hídrica

indirecta se calcula multiplicando todos los productos consumidos por los habitantes de la nación por la huella hídrica de los respectivos productos:

$$HH_{cons, nac, indir} = \sum_p (C[p] \times HH_{prod}^*[p]) \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (36)$$

donde:

$C[p]$  consumo del producto  $p$  por parte de los consumidores de la nación (unidades de producto/tiempo).

$HH_{prod}^*[p]$  huella hídrica del producto (volumen/unidad de producto).

El conjunto de productos en cuestión se refiere a toda la gama de bienes y servicios del consumidor final. Por lo general, parte del volumen de  $p$  consumido en una nación procederá de la misma nación y otra parte, de otras naciones. La huella hídrica media de un producto  $p$  consumido en una nación se estima aplicando la misma suposición usada en el enfoque de arriba hacia abajo:

$$HH_{prod}^*[p] = \frac{P[p] \times HH_{prod}[p] + \sum_{n_e} (T_i[n_e, p] \times HH_{prod}[n_e, p])}{P[p] + \sum_{n_e} T_i[n_e, p]} \quad [\text{volumen/unidad de producto}] \quad (37)$$

La suposición es que el consumo procede de la producción interior y las importaciones son proporcionales a sus volúmenes relativos.

### El enfoque de abajo hacia arriba frente al de arriba hacia abajo

Teóricamente, los cálculos de los enfoques de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo aportarían los mismos resultados, siempre que no exista un cambio de existencias del producto de un año a otro. El cálculo del enfoque de arriba hacia abajo puede dar, en teoría, un resultado un poco mayor (menor) si las existencias de los productos que utilizan el agua de forma intensiva aumentaran (disminuyeran) de un año para otro. La razón es que el enfoque de arriba hacia abajo presupone el siguiente balance:  $HH_{\acute{a}rea, nac}$  más  $V_i$  es igual a  $HH_{cons, nac}$  más  $V_e$ . Esto es solo una aproximación, porque, para ser más precisos:  $HH_{\acute{a}rea, nac}$  más  $V_i$  es igual a  $HH_{cons, nac}$  más  $V_e$  más el incremento de las existencias de agua virtual.

Otra desventaja del enfoque de arriba hacia abajo es que puede haber retrasos entre el momento del uso de agua para la producción y el momento del comercio del producto. Por ejemplo, en el caso del comercio de productos derivados de la ganadería podría ocurrir lo siguiente: los productos cárnicos o el cuero comercializados en

un año provienen de ganado criado y alimentado en años anteriores. Parte del agua integrada de forma virtual en productos cárnicos o cuero se refiere al agua que ha sido usada para el cultivo de forrajes en años anteriores. Como consecuencia de esto, el balance presupuesto en el enfoque de arriba hacia abajo será válido a lo largo de algunos años, pero no necesariamente en un solo año.

Además de las diferencias teóricas entre los dos enfoques, también se pueden encontrar diferencias que resultan del uso de diferentes tipos de datos para efectuar los cálculos. El enfoque de abajo hacia arriba depende de la calidad de los datos de consumo, mientras que el enfoque de arriba hacia abajo se basa en la calidad de los datos de comercio internacional. Cuando no exista consistencia entre una y otra base de datos, los resultados de ambos enfoques serán diferentes. En un tipo de caso particular, el resultado del enfoque de arriba hacia abajo puede resultar muy vulnerable a pequeños errores en los datos de entrada. Esto ocurre cuando la importación y la exportación de un país son relativamente grandes en comparación con la producción interna, lo que es típico de países relativamente pequeños y especializados en el comercio exterior. Esto se observó en un caso práctico en Holanda (van Oel *et al.*, 2009). En este caso, la huella hídrica del consumo nacional calculada con el enfoque de arriba hacia abajo será sensible a los datos usados sobre importaciones y exportaciones. En cambio, errores relativamente pequeños en las estimaciones de importación y exportación de agua virtual se traducen en un error relativamente grande en la estimación de la huella hídrica. En tal caso, el enfoque de abajo hacia arriba producirá una estimación más precisa que el enfoque de arriba hacia abajo. En países donde el comercio exterior es relativamente pequeño comparado con la producción interna, la precisión de los resultados de ambos enfoques dependerá de la cantidad relativa de bases de datos usados para cada enfoque.

## La huella hídrica externa del consumo nacional

Tanto con el enfoque de arriba hacia abajo como con el de abajo hacia arriba, podemos calcular la huella hídrica total del consumo nacional ( $HH_{cons, nac}$ ). Con el primero se puede calcular la importación de agua virtual a un país ( $V_i$ ). Anteriormente, en el [apartado 3.7.2](#), hemos observado cómo se puede calcular la huella hídrica dentro de una nación ( $HH_{área, nac}$ ). Basándonos en estos datos, la huella hídrica externa del consumo nacional ( $HH_{cons, nac, ext}$ ) se puede calcular de la manera siguiente:

$$HH_{cons, nac, ext} = \frac{HH_{cons, nac}}{HH_{área, nac} + V_i} \times V_i \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (38)$$

Podemos aplicar esta fórmula por separado para la categoría de productos agrícolas (cultivos y productos ganaderos) y para la categoría de productos industriales. La fórmula indica que solo una fracción de la importación bruta de agua virtual puede

considerarse huella hídrica externa del consumo nacional y que dicha fracción es igual a la parte del presupuesto de agua virtual (suma de la huella hídrica dentro de una nación y la importación de agua virtual) que se atribuye al consumo nacional<sup>2</sup>. La otra parte del presupuesto de agua virtual se exporta y, por tanto, no forma parte de la huella hídrica del consumo nacional.

Se puede estimar la huella hídrica externa del consumo nacional por la nación exportadora y el producto  $p$  considerando que la proporción nacional entre la huella hídrica externa y la importación total de agua virtual es aplicable a todas las naciones asociadas y productos importados<sup>3</sup>:

$$HH_{cons, nac, ext}[n_e, p] = \frac{HH_{cons, nac, ext}}{V_i} \times V_i[n_e, p] \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (39)$$

Puede ocurrir que los productos se importan desde naciones en las que no han sido producidos. Para estos productos es necesario localizar su país de origen. Para algunos grupos de productos la producción mundial se concentra en regiones específicas y para conocer el origen de dichos productos se puede hacer una estimación aproximada basándonos en datos mundiales de producción. Esto significa que la huella hídrica de un país no productor se distribuye entre otros países productores, según la distribución de la producción mundial.

### 3.7.4. El ahorro de agua relacionado con el comercio internacional

El ahorro de agua nacional  $A_n$  (volumen/tiempo) de una nación como consecuencia del comercio internacional de un producto  $p$  se define de la manera siguiente:

$$A_n[p] = T_i[p] - T_e[p] \times HH_{prod}[p] \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (40)$$

donde:

$HH_{prod}[p]$  huella hídrica (volumen/unidad de producto) de un producto  $p$  en dicha nación.

<sup>2</sup> Este consumo implica que

$$\frac{HH_{cons, nac, ext}}{V_{e, r}} = \frac{HH_{cons, nac, int}}{V_{e, d}} = \frac{HH_{cons, nac}}{V_e} \quad \text{y que} \quad \frac{HH_{cons, nac, ext}}{HH_{cons, nac, int}} = \frac{V_{e, r}}{V_{e, d}} = \frac{V_i}{HH_{area, nac}}$$

<sup>3</sup> Hay que hacer una excepción para las categorías de productos para los cuales la reexportación es una parte importante de la importación. La proporción nacional entre el  $HH_{cons, nac, ext}$  y  $V_i$  no sería una buena suposición para este caso. Por el contrario, se recomienda aplicar una proporción específica de  $HH_{cons, nac, ext}$  a  $V_i$  válida a la categoría del producto en cuestión.

$T_i[p]$  volumen importado de producto  $p$  (unidad de producto/tiempo).

$T_e[p]$  volumen exportado del producto (unidades de producto/tiempo).

Obviamente,  $A_n$  podría tener signo negativo, lo que significaría una pérdida neta de agua en lugar de un ahorro.

El ahorro global de agua  $A_g$  (volumen/tiempo) en el comercio de un producto  $p$  desde una nación exportadora ne a una importadora ni es:

$$A_g[n_e, n_i, p] = T[n_e, n_i, p] \times (HH_{prod}[n_i, p] - HH_{prod}[n_e, p])$$

[volumen/tiempo] (41)

donde  $T$  es el volumen de comercio de  $p$  (unidades de producto/tiempo) entre dos naciones. Por tanto, el ahorro global se obtiene de la diferencia entre la productividad de agua de los socios comerciales. Cuando, en un caso especial la nación importadora no es capaz de producir el producto internamente, es recomendable tomar la diferencia entre la media global de huella hídrica del producto y la huella hídrica de la nación exportadora.

El ahorro global total de agua puede obtenerse sumando el ahorro global de todos los flujos de internacionales de comercio. Por definición, el ahorro global total de agua es igual a la suma del ahorro nacional de todos los países.

### 3.7.5. Dependencia nacional de agua frente a la autosuficiencia

Definimos la dependencia de importación de agua virtual ( $DA$ , %) de una nación como la relación entre la huella hídrica externa y la huella hídrica total del consumo nacional:

$$HH = \frac{HH_{cons, nac, ext}}{HH_{cons, nac}} \times 100 \quad [\%] \quad (42)$$

La autosuficiencia nacional de agua ( $ASN$ , %) se define como la relación entre la huella hídrica interna y la huella hídrica total del consumo nacional:

$$ASN = \frac{HH_{cons, nac, int}}{HH_{cons, nac}} \times 100 \quad [\%] \quad (43)$$

La mejor manera de calcular tanto la dependencia de agua como la autosuficiencia es de forma anual o como la media de un período de años.

La autosuficiencia es del 100% cuando toda el agua necesaria está disponible y efectivamente se extrae del propio territorio nacional. La autosuficiencia de agua se aproxima a 0 si la mayor parte de la demanda de bienes y servicios de una nación se

satisface con las importaciones brutas de agua virtual, es decir, la huella hídrica externa de una nación es bastante más grande que la interna.

### 3.8. Contabilidad de la huella hídrica en cuencas hidrográficas

Los cálculos de la contabilidad completa de la huella hídrica de las cuencas hidrográficas son parecidos a los de la huella hídrica nacional total, como se ha visto en el apartado anterior. La única diferencia la encontramos en la definición de los límites geográficos considerados. Los cálculos de la huella hídrica nacional incluyen la huella hídrica dentro del territorio nacional y la huella hídrica de los consumidores de ese territorio. Los cálculos de huella hídrica en cuencas incluyen los resultados de la huella hídrica de los consumidores que viven en la cuenca (cálculo de los consumidores, tal como se ha visto en el [apartado 3.5](#)) y los resultados de la huella hídrica dentro de la cuenca (cálculo del área, tal como se ha visto en el [apartado 3.6](#)). La [figura 3.10](#) muestra una representación visual del esquema de contabilidad de la huella hídrica de una cuenca hidrográfica que, de hecho, efectivamente es similar al esquema de contabilidad de la huella hídrica nacional.

A modo de guía se puede seguir el mismo método para la contabilidad de la huella hídrica nacional ([apartado 3.7](#)). Basta con sustituir “nacional” por “cuenca”. La única diferencia (práctica) con la contabilidad de huella hídrica nacional es el hecho de que los datos de comercio internacional no están disponibles como sí ocurre en el caso de las naciones, por lo que no es posible hacer uso de las estadísticas del comercio. Por el contrario, es necesario deducir los flujos de comercio de los datos disponibles en la producción y el consumo dentro de una cuenca. Podemos asumir que un excedente de producción (cuando  $\text{producción} > \text{consumo}$  en la cuenca) ha sido exportado fuera de la zona de captación (siempre y cuando no exista almacenamiento en la cuenca para el año siguiente); del mismo modo, se puede asumir que un déficit de producción ( $\text{producción} < \text{consumo}$ ) ha sido importado.

Cabe resaltar que no es siempre necesario realizar la contabilidad completa de la huella hídrica de una cuenca como se muestra en la [figura 3.10](#): depende del objetivo perseguido. Los gestores de la cuenca hidrográfica estarán principalmente interesados en la huella hídrica dentro de su cuenca y no tanto en la huella hídrica externa de los habitantes de la cuenca. Seguramente tampoco les interese demasiado si la huella hídrica dentro de una cuenca es fruto de la elaboración de productos para el consumo en la cuenca o para la exportación. En tal caso, puede bastar con calcular la huella hídrica dentro de un área tal como se ha visto en el [apartado 3.6](#). Sin embargo, para poder entender mejor la relación entre el uso del agua en una zona de captación y el sustento de una comunidad que la habita, será necesario realizar el cálculo total de la huella hídrica de la cuenca.

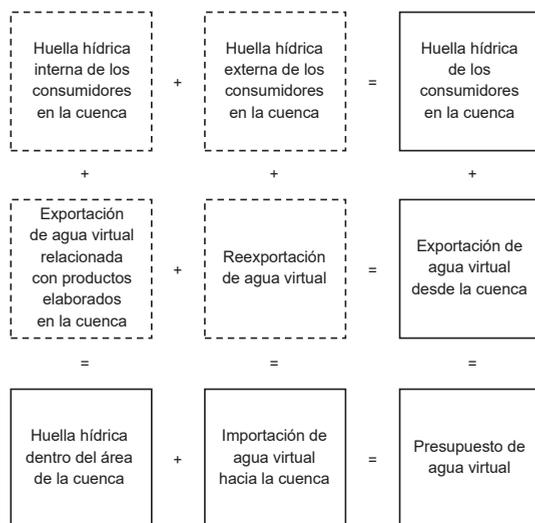


Figura 3.10. Esquema de cálculo de la huella hídrica de una cuenca hidrográfica.

El esquema de contabilidad muestra diversos balances relacionados con la huella hídrica de los consumidores que viven en el área donde encontramos la cuenca hidrográfica, la huella hídrica dentro de la cuenca, la exportación total de agua virtual de la cuenca y la importación total de agua virtual a la cuenca

### 3.9. La contabilidad de huella hídrica de municipios, provincias u otras unidades administrativas

Los cálculos de huella hídrica de municipios, provincias u otras unidades administrativas son similares a los cálculos de la huella hídrica para una nación ([apartado 3.7](#)) o los de una cuenca hidrográfica ([apartado 3.8](#)). Se puede aplicar el mismo esquema de contabilidad de huella hídrica dentro de una nación ([figuras 3.9 y 3.10](#)). Los cálculos de huella hídrica a nivel estatal o provincial han sido desarrollados en el caso de China (Ma *et al.*, 2010), India (Verma *et al.*, 2009), Indonesia (Bulsink *et al.*, 2010) y España (Garrido *et al.*, 2010). Hasta la fecha no se han realizado estudios acerca de la huella hídrica municipal. Cabe esperar que cuanto más pequeña sea la unidad administrativa, más grande será la fracción de huella hídrica de los consumidores en esa área, especialmente en áreas urbanas.

### 3.10. La huella hídrica de una empresa

#### 3.10.1. Definición

La huella hídrica de una empresa se define como el volumen total de agua dulce que se usa de forma directa o indirecta para su funcionamiento. Incluye en dos componentes principales: la huella hídrica operacional (o directa) de una empresa, que es el volumen de agua dulce consumido o contaminado por la actividad empresarial; y la huella hídrica de la cadena de suministro (o indirecta) de una empresa, que es el volumen de agua dulce consumido o contaminado para producir todos los bienes y servicios que forman los productos de entrada de producción de la empresa. Además del término “huella hídrica de una empresa”, podemos utilizar “huella hídrica corporativa” o “huella hídrica organizacional”.

La huella hídrica total de una empresa se puede esquematizar en componentes como se muestra en la [figura 3.11](#). Tras haber hecho la diferencia entre huella hídrica operacional y de la cadena de suministro, es posible distinguir la huella hídrica que puede ser inmediatamente asociada con los productos producidos por la empresa y con la huella hídrica de las actividades generales. Esta última se define como la huella hídrica perteneciente a actividades generales resultantes de la ejecución empresarial y

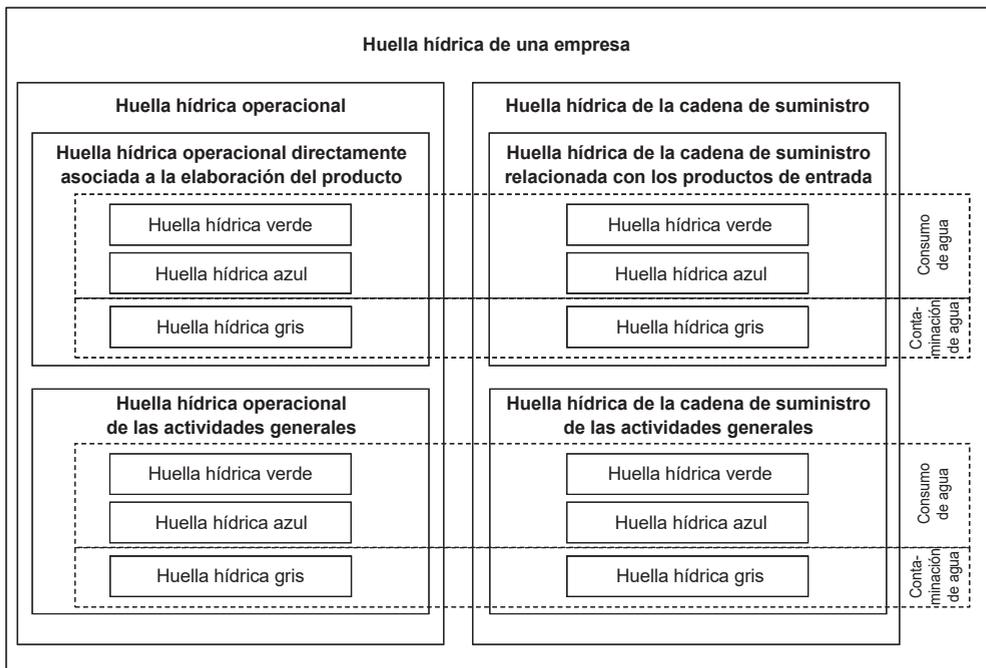


Figura 3.11. Composición de la huella hídrica de una empresa

a los bienes y servicios generales consumidos por dicha empresa. El término “huella hídrica de las actividades generales” se usa para identificar el consumo de agua necesario para la ejecución empresarial continuada, pero no se relaciona directamente con la producción de un producto en particular. En cada caso podemos distinguir un componente de huella hídrica verde, azul y gris. En la [tabla 3.1](#) se dan ejemplos de diferentes componentes presentes en la huella hídrica de una empresa.

Tabla 3.1. Ejemplos de componentes de la huella hídrica de una empresa

Huella hídrica operacional		Huella hídrica de la cadena de suministro	
Huella hídrica directamente asociada a la elaboración de producto(s) de la empresa	Huella hídrica de las actividades generales	Huella hídrica directamente asociada a la elaboración de producto(s) de la empresa	Huella hídrica de las actividades generales
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua incorporada al producto.</li> <li>• Agua consumida o contaminada por un proceso de lavado.</li> <li>• Agua contaminada de forma térmica por el uso de refrigeración.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo o contaminación de agua relacionados con el uso de agua en cocinas, baños, limpieza, jardinería o el lavado de prendas de trabajo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Huella hídrica de los ingredientes de un producto comprados por la empresa.</li> <li>• Huella hídrica de otros artículos comprados por la empresa para la elaboración de su producto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Huella hídrica de infraestructura (materiales de construcción, etc.).</li> <li>• Huella hídrica de materiales y energía para uso general (material de oficina, coches y camiones, combustible, electricidad, etc.).</li> </ul>

Además de la huella hídrica operacional y la de la cadena de suministro, es posible que una empresa quiera identificar una “huella hídrica de la fase de utilización” de su producto. Esta huella hídrica se refiere al consumo y contaminación de agua por consumidores al usar dicho producto. Pensemos, por ejemplo, en la contaminación de agua resultante de uso de jabones de uso doméstico. Estrictamente hablando, la huella hídrica de la fase de utilización de un producto no se considera como parte de la huella hídrica del producto ni de la empresa, sino parte de la huella hídrica del consumidor. Los consumidores pueden usar los productos de diversas maneras, por lo que será necesario realizar suposiciones sobre el uso promedio para estimar la huella hídrica de la fase de utilización de un producto.

Por definición, la huella hídrica de una empresa es igual a la suma de las huellas hídrica de los productos finales de la empresa. La huella hídrica de la cadena de suministro de una empresa es igual a la “suma de las huellas hídricas de los productos de entrada

de la empresa. Calcular la huella hídrica de una empresa o calcular la huella hídrica de los productos principales elaborados por una empresa es prácticamente lo mismo, pero con un enfoque diferente. En el cálculo de la huella hídrica de una empresa existe una gran fijación por diferenciar la huella hídrica operacional (directa) de la de la cadena de suministro (indirecta). Esto es especialmente relevante desde la perspectiva de las políticas de gestión, puesto que una empresa tiene control directo sobre su huella hídrica operacional e influencia indirecta sobre su huella hídrica de la cadena de suministro. Al calcular la huella hídrica de un producto, no existe diferencia entre la huella hídrica directa y la indirecta; simplemente se considera la huella hídrica de proceso para todos los procesos relevantes en los sistemas de producción, ignorando el hecho de que el sistema de producción puede pertenecer o ser operado por empresas diferentes. En este sentido, es posible establecer un híbrido entre el cálculo de la huella hídrica de un producto y la de una empresa centrándonos en el cálculo de la huella hídrica de un producto en particular (por ejemplo, observando uno de los muchos productos elaborados por una empresa) pero especificando qué parte de la huella hídrica del producto se produce durante las operaciones de la propia empresa y qué parte durante la cadena de suministro de esta.

La contabilidad de la huella hídrica de una empresa ofrece una nueva perspectiva para desarrollar una estrategia corporativa de información sobre el uso de agua. Esto se debe a que la huella hídrica como indicador del uso de agua es diferente al indicador de extracción de agua en las operaciones propias de la empresa, utilizado por la mayoría de las empresas hasta el momento. El [cuadro 3.10](#) expone unas pocas posibles implicaciones para empresas que empiezan a analizar sus huellas hídricas

**Cuadro 3.10. ¿Qué hay de nuevo para las empresas a la hora de considerar la huella hídrica de su empresa?**

Tradicionalmente, las empresas se han centrado en el uso del agua en sus operaciones, no en su cadena de suministro. La huella hídrica, por su parte, adopta un enfoque integrado. La mayor parte de las empresas descubrirán que su huella hídrica de la cadena de suministro es mucho mayor que la operacional. Como consecuencia, las empresas pueden concluir que es más rentable dejar de invertir en la reducción de su uso operacional de agua para poder ampliar los esfuerzos en reducir la huella hídrica de su cadena de suministros y los riesgos asociados que esto conlleva.

Tradicionalmente, las empresas han buscado reducir las extracciones de agua. La huella hídrica muestra el uso del agua en términos de consumo más que de extracciones. Los flujos de retorno se pueden reutilizar, por lo que tiene sentido centrarse en el uso consuntivo del agua.

Las empresas se aseguran de tener una licencia o derecho al uso de agua. Sin embargo, su posesión no es suficiente para reducir los riesgos relacionados con el agua. Es útil

observar los detalles espaciotemporales de la huella hídrica de una empresa, porque los detalles sobre dónde y cuándo se ha usado esa agua pueden servir de insumos para un análisis detallado de la sostenibilidad de la huella hídrica para identificar los impactos ambientales, sociales y económicos y para descubrir riesgos empresariales asociados.

Tradicionalmente, las empresas han buscado respetar las normas de emisiones (de efluentes). La huella hídrica gris analiza el volumen necesario de agua para asimilar los efluentes según las normas de la calidad ambiental. El cumplimiento de las normas de emisiones es una cosa, pero observar cómo estos suponen realmente una reducción en la capacidad de asimilación de las masas de agua dulce y los riesgos empresariales asociados es otra. El cumplimiento de las normas de efluentes (que han sido formuladas de acuerdo con las concentraciones) puede hacerse fácilmente tomando agua para diluir los efluentes antes de su vertido. Esto puede ser útil a la hora de cumplir con las normas de efluentes, pero no a la hora de reducir la huella hídrica gris, porque esta última está relacionada con la carga total de sustancias químicas introducidas en el medio ambiente, no con la concentración de estas sustancias en el efluente (el primer ejemplo del [apéndice IV](#) ilustra esto correctamente).

### 3.10.2. Elegir los límites organizacionales de la empresa

Una empresa se concibe como una entidad coherente productora de bienes o servicios que se suministran a consumidores u otras empresas. Puede ser privada o corporación, pero también puede ser una organización gubernamental o no gubernamental. Puede referirse a varios niveles de escala como, por ejemplo, una unidad o división específica de una empresa, una empresa entera o un sector empresarial completo. En el sector público nos podemos referir tanto a una unidad dentro de un municipio como al gobierno nacional como conjunto. El término “empresa” también se puede definir como un consorcio o una sociedad conjunta de compañías (*joint venture* o UTE) cuyo objetivo es la producción de un determinado bien o servicio. De hecho, el término “empresa” también puede referirse a cualquier proyecto (como la construcción de una obra) o actividad (por ejemplo, la organización de un gran evento deportivo). En este sentido, el término tiene una definición tan amplia que puede referirse a todo tipo de corporaciones, organizaciones, proyectos y actividades. En términos técnicos, entendemos por empresa una entidad o actividad coherente que transforma una serie de productos de entrada en uno o más productos finales.

Con el fin de evaluar la huella hídrica de una empresa, la empresa tiene que estar claramente perimetrada. Los límites de la empresa en cuestión han de estar claros. Tiene que ser posible esquematizar la empresa en un sistema que se distinga claramente de su entorno y en el que sus productos de entrada y productos finales sean de sobra conocidos.

Independientemente del tipo de empresa, la mayoría están conformadas (compuestas) por un número de unidades. Por ejemplo, una empresa puede tener operaciones (como fábricas) en diferentes lugares o tener divisiones separadas en un mismo lugar. Con el fin de realizar la contabilidad de la huella hídrica, generalmente es útil distinguir entre diferentes unidades de la empresa. Por ejemplo, cuando una compañía fabricante tiene factorías en diferentes lugares, es probable que cada una de ellas opere bajo condiciones diferentes y obtenga sus productos de entrada de lugares distintos. En este caso, es útil realizar en primer lugar la contabilidad de la huella hídrica por unidad de negocio y posteriormente sumar los resultados individuales para obtener la huella hídrica global de la empresa.

Es necesario definir la empresa por medio de la descripción de las unidades de negocio que serán diferenciadas y especificar los productos de entrada y productos finales anuales por unidad de negocio. Ambos se incluyen en las unidades físicas. Preferentemente, una unidad de negocio se referirá a una parte de la empresa total que elabora un producto determinado en un lugar determinado. Cuando una misma empresa opere en diferentes lugares, es preferible esquematizar la empresa por unidad de negocio, de modo que las unidades individuales operen en un mismo lugar. Además, es preferible esquematizar las operaciones de una empresa que estén situadas en un lugar determinado en diferentes unidades de negocio, de las cuales cada una elabora un producto diferente. Es más útil esquematizar la empresa basándose en los diferentes productos primarios distribuidos por dicha empresa. Sin embargo, también es posible distinguir las unidades de servicio que aporten únicamente bienes o servicios de las unidades de producción primarias.

A modo de ejemplo, la [figura 3.12](#) muestra una empresa que elabora los productos finales A, B y C. Está dividida en tres unidades de negocio. La unidad 1 produce el producto A. Parte de A se manda a la unidad 2, pero la mayor parte se vende a terceras empresas. La unidad 2 elabora el producto B, que se vende en parte a una tercera empresa y parte es enviado a la unidad 3. La unidad 3 elabora el producto C, tanto para mandarlo a la unidad 2 como para venderlo de manera externa. Cada unidad recibe una cantidad determinada de productos de entrada por parte de empresas que se encuentran aguas arriba en la cadena de producción, con usos directos e indirectos de agua dulce. Un esquema como el que se muestra en la [figura 3.12](#) puede sentar las bases para calcular la huella hídrica de una empresa, tal como se explicará en el siguiente apartado.

Cuando una empresa es grande y heterogénea (diferentes lugares, diferentes productos), puede ser interesante esquematizarla en algunas unidades de negocio principales y, a su vez, cada unidad principal en un número de unidades más pequeñas. De esta forma, se puede esquematizar la empresa como un sistema con subsistemas a diversos niveles. Posteriormente se pueden sumar las cuentas de la huella hídrica al nivel más bajo a las cuentas al segundo nivel más bajo y así sucesivamente, hasta que se cubran todos los niveles de la empresa.

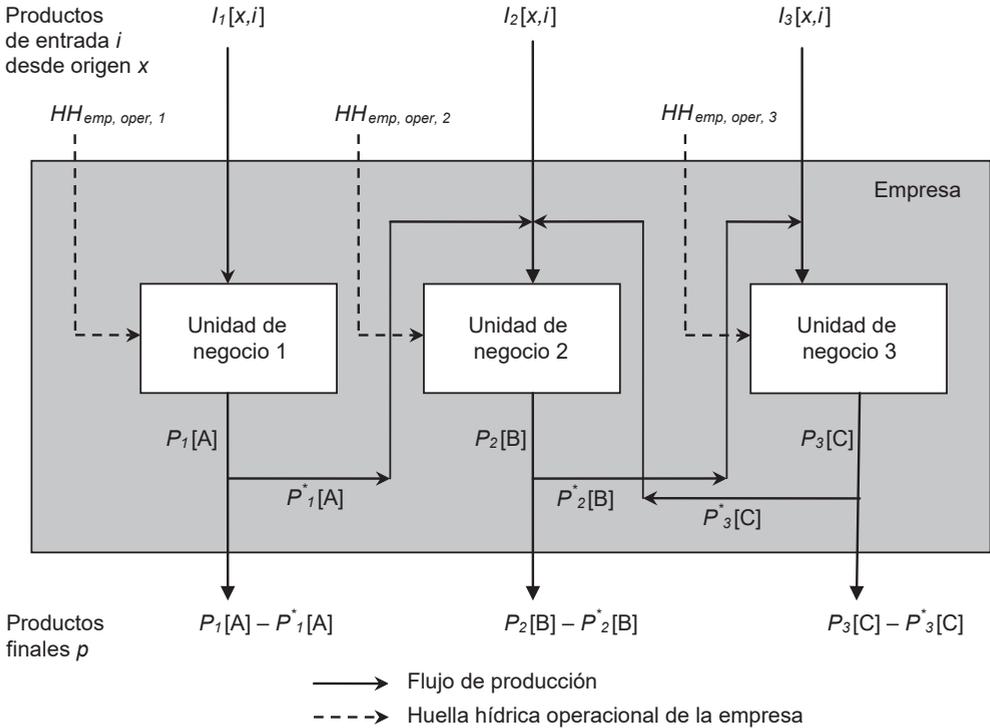


Figura 3.12. Empresa que contiene tres unidades de negocio que elaboran productos A-C respectivamente. La entrada de productos  $I_u[x, i]$  se refiere al volumen anual de productos de entrada  $i$  desde la fuente  $x$  hasta la unidad de negocio  $u$ . La salida de productos  $P_u[p]$  se refiere al volumen de salidas anuales del producto  $p$  desde la unidad de negocio  $u$ . El flujo de producto  $P^*_u[p]$  se refiere a la parte de  $P_u[p]$  que está destinada a otra unidad de negocio dentro de la misma empresa

### 3.10.3. Cálculo de la huella hídrica de una empresa

Más adelante se muestra cómo calcular la huella hídrica de una unidad de negocio. Al final del apartado se mostrará cómo calcular la huella hídrica de una empresa formada por varias unidades de negocio. La huella hídrica de una unidad de negocio ( $HH_{emp}$ , volumen/tiempo) se calcula sumando la huella hídrica operativa de las unidades de negocio a la huella hídrica de su cadena de suministro.

$$HH_{emp} = HH_{emp, oper} + HH_{emp, sum} \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (44)$$

Ambos componentes consisten en una huella hídrica que puede asociarse directamente con la elaboración del producto de la unidad de negocio y en un componente de actividades generales:

$$HH_{emp, oper} = HH_{emp, oper, insumos} + HH_{emp, oper, act. gen} \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (45)$$

$$HH_{emp, sum} = HH_{emp, sum, insumos} + HH_{emp, sum, act. gen} \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (46)$$

La huella hídrica operacional es igual al uso consuntivo del agua y la contaminación del agua que puede estar asociada con las operaciones de la empresa. Según las directrices expuestas en el [apartado 3.3](#), se puede simplemente observar el flujo de evaporación de las operaciones, el volumen de agua incorporada a los productos y los flujos de retorno de agua de otras cuencas de donde se extrajo el agua. Además, es conveniente considerar los volúmenes de efluentes y las respectivas concentraciones de sustancias químicas. La huella hídrica de las actividades generales (consumo de agua y contaminación relacionada con las actividades generales que precisan del uso del agua en la unidad de negocio) se puede identificar y cuantificar como la huella hídrica operacional directamente asociada al proceso de producción. Sin embargo, la huella hídrica de las actividades generales podrá aplicarse a más de una unidad de negocio de la empresa en cuestión. Por ejemplo, las actividades generales de una empresa con dos líneas de producción tendrán que ser distribuidas entre las dos líneas de producción. En caso de que una de las unidades de negocio se haya definido como una de las líneas de producción, es necesario calcular la parte de la huella hídrica de las actividades generales que tiene que ser contabilizada en la línea de producción. Esto se puede realizar de acuerdo con los valores de producción de ambas líneas de producción.

La huella hídrica de la cadena de suministro por unidad de negocio (volumen/tiempo) puede calcularse multiplicando los diferentes volúmenes de productos de entrada (datos aportados por la misma empresa) por las huellas hídricas de sus respectivos productos (datos aportados por los proveedores). Suponiendo que existan diferentes productos de entrada  $i$  que deriven de diferentes fuentes  $x$ , la huella hídrica de la cadena de suministro de una unidad de negocio se calcula de la manera siguiente:

$$HH_{emp, sum} = \sum_x \left( \sum_i (HH_{prod}[x, i] \times I[x, i]) \right) \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (47)$$

donde:

$HH_{emp, sum}$  huella hídrica de la cadena de suministro de la unidad de negocio (volumen/tiempo).

$HH_{prod}[x, i]$  huella hídrica de los productos de entrada  $i$  desde la fuente  $x$  (volumen/unidad de producto).

$I[x, i]$  volumen de productos de entrada  $i$  desde la fuente  $x$  a la unidad de negocio (unidades de producto/tiempo).

La huella hídrica del producto depende del origen de este. Cuando un producto viene de otra unidad dentro de la misma empresa, el valor de la huella hídrica del producto se conoce gracias al sistema de contabilidad de la propia empresa (véase el final de este apartado). Cuando el origen de un producto está en un proveedor externo a la empresa, el valor de la huella hídrica del producto, el proveedor ha de facilitarlo o tendremos que estimarlo basándonos en información indirecta sobre las características de producción de dicho proveedor. Las diferentes huellas hídricas de producto están compuestas por tres colores (verde, azul, gris) y han de ser contabilizadas por separado para que la huella hídrica de la cadena de suministro de la unidad de negocio resultante conste también de estos tres componentes.

La huella hídrica de cada producto final de una unidad de negocio se estima dividiendo la huella hídrica de la unidad de negocio entre el volumen de productos finales. La huella hídrica se puede asignar a los productos finales de diferentes maneras como, por ejemplo, según la masa, el contenido energético o el valor económico. Siguiendo los procesos tradicionales de los estudios de análisis del ciclo de vida, se recomienda asignar la huella hídrica de acuerdo con el valor económico de los productos. Por tanto, la huella hídrica del producto del producto final  $p$  de una unidad de negocio ( $HH_{prod}[p]$ , volumen/unidad de producto) puede calcularse de la siguiente manera:

$$HH_{prod}[p] = \frac{E[p]}{\sum_p E[p]} \times \frac{HH_{emp}}{P[p]} \quad [\text{volumen/unidad de producto}] \quad (48)$$

en la que  $P[p]$  es el volumen de los productos finales  $p$  de una unidad de negocio (unidades de producto/tiempo),  $E[p]$  el valor económico total de los productos finales  $p$  (unidad monetaria/tiempo) y  $\sum E[p]$  el valor económico total de todos los productos finales (unidad monetaria/tiempo). Si la unidad de negocio distribuye solo un producto la ecuación queda de la manera siguiente:

$$HH_{prod}[p] = \frac{HH_{emp}}{P[p]} \quad [\text{volumen/unidad de producto}] \quad (49)$$

Todas las ecuaciones anteriores han de ser aplicadas a nivel de unidad de negocio. Supongamos que se esquematiza la empresa en una serie de unidades de negocio  $u$ ; la huella hídrica de la empresa como conjunto ( $HH_{emp, tot}$ ) se calcula sumando todas las huellas hídricas de las unidades de negocio. Para evitar duplicar el cálculo, es

necesario restarle los flujos de agua virtual entre las diferentes unidades de negocio dentro de la empresa:

$$HH_{emp, tot} = \sum_u HH_{emp}[u] - \sum_u \sum_p (HH_{prod}[u, p] \times P^*[u, p])$$

[volumen/tiempo] (50)

en la que  $P^*[u, p]$  se refiere al volumen anual del producto final  $p$  desde una unidad de negocio  $u$  a otra unidad de negocio dentro de la misma empresa (unidades de producto/tiempo).



# 4

## Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica

### 4.1. Introducción

La huella hídrica es un indicador de la apropiación de agua dulce ( $\text{m}^3/\text{año}$ ) desarrollada como análoga de la huella ecológica, que es, a su vez, un indicador del uso del espacio biológicamente productivo (en ha). Para hacerse una idea de lo que significa el tamaño de la huella hídrica es necesario compararla con los recursos disponibles de agua dulce (también expresados en  $\text{m}^3/\text{año}$ ), del mismo modo que es necesario comparar la huella ecológica con el espacio biológicamente productivo disponible (en ha) (Hoekstra, 2009). Esencialmente, el análisis de sostenibilidad de huella hídrica consiste en realizar la comparación entre la huella hídrica humana y lo que la Tierra puede soportar de manera sostenible. Sin embargo, a la hora de entrar en este asunto, descubrimos que existen numerosos interrogantes al respecto que nos podemos plantear y que existe un alto grado de complejidad. Por ejemplo, la sostenibilidad tiene diferentes dimensiones (ambiental, social y económica), los impactos pueden ser formulados a distintos niveles (primarios y secundarios) y la huella hídrica tiene diferentes colores (verde, azul y gris). En este capítulo se presenta una guía para el análisis de sostenibilidad de la huella hídrica, que ha surgido gracias al incremento de atención que el tema ha recibido en el transcurso del pasado reciente ([cuadro 4.1](#)).

#### Cuadro 4.1. La historia del análisis de sostenibilidad de la huella hídrica

Durante los primeros años del surgimiento del concepto de la huella hídrica (2002-2008), el enfoque principal estaba en su contabilidad. La huella hídrica es principalmente una innovación en lo que se refiere a cómo medir la apropiación de agua dulce por parte de los seres humanos. Anteriormente, el agua no se medía a lo largo de las cadenas de suministro y el agua verde y gris se excluían de las estadísticas de consumos de agua. Además, las medidas se centraban en la extracción de agua dulce, ignorando que es específicamente su uso consuntivo lo que determina el impacto en el sistema

hídrico de una zona de captación. Desde el inicio se reconoció que la contabilidad de la huella hídrica solo se refiere a la apropiación de agua dulce, que hay que comparar las huellas hídricas verde y azul en un área geográfica con el agua verde y azul disponible y que hay que comparar la huella hídrica gris con la capacidad de la zona de captación para asimilar las cargas de contaminante. Sin embargo, los trabajos a este respecto eran escasos. Hoekstra (2008a) aclaró por primera vez que tras la fase de contabilidad era necesaria una fase de análisis de sostenibilidad, aunque en ese momento se denominara evaluación de impacto. Van Oel *et al.* (2008), Kampman *et al.* (2008) y Chapagain y Orr (2008) fueron los primeros en comparar las huellas hídricas con la disponibilidad real de agua e identificar puntos críticos de escasez.

En el primer *Manual de la Huella Hídrica* el término “evaluación de impacto” se cambió por el de “análisis de sostenibilidad”, porque el último refleja mejor lo que debe abarcar (Hoekstra *et al.* 2009, 2009a). El término “impacto” dirige la atención a efectos locales, especialmente aquellos que son inmediatamente perceptibles en la zona afectada, lo que supone una visión demasiado restrictiva. Como los recursos de agua dulce del mundo son limitados, es necesario considerar la sostenibilidad de las huellas hídricas en un contexto mucho más amplio. Obviar el tema de la contaminación del agua o su desperdicio en zonas con abundancia de agua es tan preocupante como malgastar la energía en países productores de petróleo. Un uso eficiente del agua en zonas con abundante agua para producir materias primas que requieren un uso intensivo de agua reduce la necesidad de utilizar agua para producir dichas materias primas en zonas donde el agua es escasa. Por tanto, el análisis de sostenibilidad de la huella hídrica supone más que solo fijarse en si la huella hídrica tiene impacto local inmediato.

En la primera versión del *Manual de Huella Hídrica* se dio un paso inicial para estructurar la fase de análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica. Posteriormente, en el período de diciembre de 2009 a julio de 2010, el grupo de trabajo de la WFN que se encargaba del análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica revisó el manual e hizo una serie de recomendaciones (Zarate, 2010b) que fueron tomadas en cuenta a la hora de realizar el presente manual. Más específicamente, hemos adoptado la idea de los límites de la sostenibilidad ambiental” (según Richter, 2010) y el concepto de los impactos primario-secundarios. Como se podrá observar cuando comparemos el presente manual con el primero, el capítulo sobre el análisis de sostenibilidad ha sido totalmente reestructurado. Ahora está más claro que estimar la sostenibilidad de la huella hídrica total en un área geográfica es diferente que estimar la sostenibilidad de un proceso, un producto, un productor o un consumidor específico. Se establece una clara distinción entre los diferentes tipos de cuestiones existentes y las diferentes formas en las que deben ser abordados.

La cuestión de la sostenibilidad de la huella hídrica puede ser considerada desde una serie de puntos de vista diferentes. Desde el punto de vista geográfico, cabría preguntarse si la huella hídrica total dentro de una determinada área geográfica es sostenible. Este no sería el caso cuando, por ejemplo, el caudal mínimo ecológico o las normas de calidad ambiental en una zona de captación se ven afectados o cuando

la asignación de agua en la zona de captación sea injusta o ineficiente. Al considerar un proceso específico que emplea agua cabría preguntarse si la huella hídrica de este proceso es sostenible. La respuesta depende de dos criterios: el primero de ellos sería que la huella hídrica de un proceso no es sostenible cuando dicho proceso se sitúa en un período específico del año en una zona de captación o cuenca específica, donde la huella hídrica total no es sostenible. El segundo, que la huella hídrica de un proceso no sea sostenible en sí misma (independientemente del contexto geográfico) cuando las huellas hídricas verde, azul o gris del proceso puedan reducirse o evitarse completamente (con un coste social aceptable). Desde el punto de vista de un producto, la pregunta que habría que plantearse es si la huella hídrica del producto es sostenible. La respuesta a esta pregunta depende de la sostenibilidad de las huellas hídricas de los procesos que son parte del sistema de producción del producto. Desde el punto de vista del productor, cabría preguntar si la huella hídrica del productor es sostenible. Como la huella hídrica de un productor es igual a la suma de las huellas hídricas de los productos elaborados por dicho productor, la respuesta a esta pregunta dependerá de la sostenibilidad de los productos elaborados por el productor. Por último, desde el punto de vista de un consumidor, cabría preguntar si la huella hídrica de este es sostenible. Como la huella hídrica del consumidor es igual a la suma de las huellas hídricas de todos los productos consumidos por él, la respuesta dependerá de la sostenibilidad de las huellas hídricas de todos los productos que haya consumido. Sin embargo, para analizar la sostenibilidad de la huella hídrica de un consumidor entra en juego otro criterio, ya que esta también depende de si su huella hídrica es menor o mayor que la proporción justa de huella hídrica que un individuo puede tomar, dadas las limitaciones de la huella hídrica humana.

La sostenibilidad de la huella hídrica de un producto, productor o consumidor depende en parte de los contextos geográficos en donde se localizan los diferentes componentes de sus huellas hídricas. Pocas veces es la huella hídrica de un producto, productor o consumidor en particular la que crea problemas de escasez de agua y contaminación, tal como los percibimos. Dichos problemas surgen de un efecto acumulativo de todas las actividades en el área geográfica en cuestión. La huella hídrica total de un área geográfica es la suma de muchas huella hídricas más pequeñas, cada una de las cuales relacionándose a un proceso, productor, producto o consumidor específico. Cuando la huella hídrica de un proceso, producto, productor o consumidor *contribuya* a una situación insostenible observada dentro de un determinado contexto geográfico, cabría decir que esta huella hídrica es también insostenible.

En este capítulo empezaremos por enseñar cómo analizar la sostenibilidad de una huella hídrica dentro de una zona de captación o una cuenca. Posteriormente, mostraremos cómo analizar la sostenibilidad de la huella hídrica de un proceso, producto, productor y consumidor. Se ha elegido este orden a propósito, puesto que en apartados posteriores nos volveremos a referir a apartados anteriores. No podemos analizar la sostenibilidad de la huella hídrica de un proceso sin conocer la sostenibilidad de la huella hídrica

total en la zona de captación donde se localiza el proceso. Tampoco podemos analizar la sostenibilidad de la huella hídrica de un producto sin saber la sostenibilidad del proceso involucrado. Y, por último, no podemos analizar la sostenibilidad de la huella hídrica de los productores y consumidores sin saber la sostenibilidad de los productos producidos o consumidos.

## 4.2. Sostenibilidad geográfica: sostenibilidad de la huella hídrica dentro de una zona de captación o una cuenca hidrográfica

### 4.2.1. Introducción

La mejor manera de analizar la sostenibilidad de la huella hídrica total en un área geográfica es hacerlo considerando la zona de captación o cuenca hidrográfica. En el ámbito de una unidad hidrológica como esta, es posible comparar la huella hídrica verde o azul con la disponibilidad de agua verde o azul, o la huella hídrica gris con la capacidad disponible de asimilación de cargas de contaminantes. Además, las cuestiones referentes a la asignación de recursos hídricos de forma justa y eficiente son más relevantes en el ámbito de una zona de captación o cuenca hidrográfica.

La sostenibilidad de la huella hídrica dentro de una zona de captación o cuenca hidrográfica puede analizarse desde tres perspectivas: la ambiental, la social y la económica. Existen criterios de sostenibilidad para cada una de las tres ([cuadro 4.2](#)). Un criterio de sostenibilidad define cuándo una huella hídrica en una zona de captación o cuenca deja de considerarse sostenible.

#### Cuadro 4.2. Criterios de sostenibilidad para el uso y asignación del agua dentro de una zona de captación o cuenca hidrográfica

Es necesario que la huella hídrica dentro de una zona de captación o cuenca hidrográfica cumpla una serie de criterios para ser sostenible. La sostenibilidad tiene tanto una dimensión ambiental como social y económica.

- **Sostenibilidad ambiental:** la calidad del agua debe permanecer dentro de ciertos límites. Como indicador de estos, lo más adecuado es considerar las normas de la calidad ambiental, tal como se ha acordado. Además, los flujos de aguas superficiales y subterráneas deben permanecer dentro de unos límites comparados con la escorrentía natural, para mantener los ecosistemas que dependen de los ríos y de las aguas subterráneas y los medios de vida de las personas que dependen de dichos ecosistemas. En el caso de los ríos, el llamado caudal mínimo ecológico define los límites para las alteraciones de la escorrentía, que son comparables con el modo en el que las normativas ambientales de

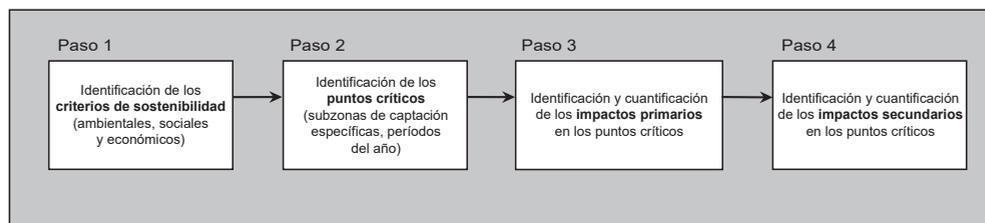
calidad del agua definen los límites para la contaminación (Richter, 2010). En el caso del agua verde, las necesidades de agua de los ecosistemas terrestres definen los límites de apropiación del agua verde para el uso humano.

- **Sostenibilidad social:** es necesario asignar una cantidad mínima del agua dulce disponible en la Tierra a las necesidades básicas humanas, más específicamente al suministro mínimo de agua para uso doméstico, es decir, para beber, lavar y cocinar, así como a la producción de alimentos para asegurar un suministro suficiente de comida para todos. Este criterio implica que solo la fracción del suministro de agua dulce disponible que queda tras restar las necesidades hídricas del medio ambiente y para las necesidades básicas humanas, puede destinarse a bienes de “lujo”. Es necesario asegurar a nivel de zona de captación o cuenca hidrográfica un suministro mínimo de agua para uso doméstico para beber, lavar y cocinar. Igualmente, se hace necesario asegurar una asignación mínima de agua para la producción de alimentos a nivel global, puesto que las comunidades dentro de una cuenca hidrográfica no son necesariamente autosuficientes en la producción de sus alimentos, dado que la seguridad alimentaria se garantiza por medio de las importaciones de estos.
- **Sostenibilidad económica:** es preciso asignar y usar el agua de una forma eficiente desde el punto de vista económico. Los beneficios de una huella hídrica (verde, azul o gris) que resultan del uso de agua para un fin determinado deben ser mayores a los costes totales asociados a la misma huella hídrica, incluyendo externalidades, costes de oportunidad y una renta de escasez. Si este no fuera el caso, la huella hídrica es insostenible.

Cuando la huella hídrica verde, azul o gris en una zona de captación no cumpla con uno de los criterios de sostenibilidad ambiental, social o económica, no podemos considerarla como geográficamente sostenible.

La identificación y cuantificación de los criterios de sostenibilidad es el primer paso a la hora de analizar la sostenibilidad de la huella hídrica en una zona de captación o cuenca hidrográfica ([figura 4.1](#)). El segundo paso es identificar los puntos críticos dentro de la zona de captación o cuenca hidrográfica, concretamente las subcuencas y los períodos del año en los que la huella hídrica se considera no sostenible. En los pasos tres y cuatro, cuantificaremos los impactos primarios y secundarios en los puntos críticos.

Un punto crítico es un período específico del año (por ejemplo, el período seco) en una (sub)zona de captación específica en la que la huella hídrica no es sostenible, ya sea porque pone en juego las necesidades ambientales de agua o las normas de calidad del agua, o porque el uso o asignación del agua en la zona de captación es injusto o económicamente ineficiente. En un punto crítico ocurren problemas de escasez o contaminación del agua, o conflicto por la misma. Los puntos críticos son lugares y períodos del año en los que las huellas hídricas no son sostenibles y, por consiguiente, tienen que ser reducidas.



**Figura 4.1. Análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica dentro de una zona de captación o cuenca hidrográfica en cuatro pasos**

Cuando se considera una zona de captación o cuenca hidrográfica en su totalidad, sin detallar las subzonas de captación, se puede categorizar (o no) como un punto crítico dependiendo de si surgen problemas a nivel de la subzona de captación o cuenca en su totalidad. La ventaja de buscar puntos críticos a nivel de zonas de captación relativamente pequeñas (por ejemplo, hasta 100 km<sup>2</sup>) es que se pueden identificar los puntos críticos que desaparecerían empleando una resolución menor, como en el caso de zonas de captación más grandes o de cuencas en su totalidad.

Si comparamos la huella hídrica gris dentro de una cuenca con la capacidad de asimilación de cargas de contaminantes dentro de la misma cuenca en su totalidad, es posible que se muestre que la capacidad de asimilación de las cargas de contaminantes es suficiente, mientras que este puede no ser el caso en algunas subzonas de captación específicas aguas arriba donde se concentre la mayor parte de la contaminación de la cuenca. La desventaja de buscar puntos críticos con una resolución espacial alta es que se necesita mucha más información (sobre cómo se distribuyen de forma espacial el total de las huellas hídricas verde, azul y gris en la cuenca, así como la disponibilidad de agua verde y azul y la capacidad de asimilación de cargas de contaminantes en la misma). Otra desventaja es que algunos problemas pueden surgir únicamente con una mayor resolución espacial, por ejemplo, porque los contaminantes se acumulan aguas abajo. Por tanto, el mejor enfoque es tomar como unidad analítica la cuenca hidrográfica en conjunto y distinguir subzonas de captación relativamente pequeñas dentro de dicha cuenca. De esta forma se pueden hacer los análisis de sostenibilidad tanto a nivel detallado de la subzona de captación como a nivel agregado de zonas de captación más grandes o la cuenca en su totalidad.

Tras identificar los puntos críticos es posible estudiar las implicaciones ambientales, sociales y económicas de forma más detallada. Distinguimos entre impactos primarios y secundarios. Los primarios se refieren a la alteración de los flujos y la calidad de agua (comparados con las condiciones naturales, sin intervención humana). Se muestra, por ejemplo, qué cantidad de la escorrentía de una zona de captación ha disminuido a causa de la huella hídrica azul humana en dicha zona de captación y hasta qué punto esto entra en conflicto con los caudales mínimos ecológicos. Además, también se muestra cómo la calidad del agua ha cambiado con respecto a sus

condiciones naturales, por ejemplo, para cada parámetro de la calidad de agua, y qué parámetros violan las normas de la calidad ambiental. Los impactos secundarios son aquellos bienes o servicios ecológicos, sociales y económicos que se ven deteriorados en una zona de captación debido a los impactos primarios; pueden medirse en términos de especies desaparecidas, reducción de biodiversidad, reducción de la seguridad alimentaria, daños en la salud humana, reducción de ingresos de actividades económicas que dependen del agua, etc.

#### 4.2.2. Criterios de sostenibilidad para identificar puntos críticos ambientales

La huella hídrica en una zona de captación no es sostenible desde el punto de vista ambiental y, por tanto, se crea un punto crítico ambiental cuando se violan las necesidades hídricas ambientales o cuando la contaminación sobrepasa la capacidad de asimilación de cargas de contaminantes. Para obtener una indicación sobre la gravedad de un punto crítico, podemos calcular la escasez de agua verde y azul y el nivel de contaminación del agua, tal como será definido más adelante.

Nos referimos a un punto crítico ambiental cuando la escasez de agua verde o azul o el nivel de contaminación del agua sobrepasa el 100%. En el caso de la huella hídrica azul, es también importante evaluar si la huella hídrica genera una reducción de los niveles de agua subterránea o de los lagos hasta el punto que esas reducciones excedan un umbral ambiental determinado.

Los puntos críticos ambientales se pueden relacionar específicamente con la huella hídrica verde, azul o gris en una zona de captación, por lo que se desarrollarán individualmente a continuación. Lo siguiente puede aplicarse a diferentes tamaños de zonas de captación, incluyendo las cuencas hidrográficas en su totalidad.

#### Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica verde

Que la totalidad de la huella hídrica verde en una zona de captación es importante no solo se sabrá cuando se ponga en el contexto la cantidad de agua verde disponible. Una huella hídrica verde en una zona de captación específica crea un punto crítico ambiental cuando sobrepasa la disponibilidad de agua verde. La disponibilidad de agua verde ( $DA_{verde}$ ) en una cuenca  $x$  en un período determinado  $t$  se define como la evapotranspiración total del agua de lluvia almacenada en el suelo ( $ET_{verde}$ ) menos la evapotranspiración del agua del suelo reservado para la vegetación natural ( $ET_{veg}$ ) y menos la evapotranspiración en las superficies improductivas:

$$DA_{verde} [x, t] = ET_{verde} [x, t] - ET_{veg} [x, t] - ET_{improd} [x, t] \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (51)$$

Todas las variables se expresan en términos de volumen/tiempo. La variable  $ET_{veg}$  representa las necesidades de agua verde de los ecosistemas y se refiere a la cantidad de agua verde usada por la vegetación natural en áreas de la zona de captación que están reservadas a la naturaleza, con el fin de preservar la biodiversidad y apoyar los modos de subsistencia humana que dependen de los ecosistemas naturales. Podemos cuantificar las necesidades de agua verde de los ecosistemas estimando la evapotranspiración de las áreas terrestres que necesitan ser protegidas desde el punto de vista de la conservación de la naturaleza ([cuadro 4.3](#)). La variable  $ET_{improd}$  se refiere a la evapotranspiración que no puede usarse en la producción agrícola, es decir, a la evapotranspiración en áreas o períodos del año que son inadecuados para el cultivo. Pensemos en la evapotranspiración en zonas montañosas donde las pendientes no permiten la actividad agrícola, la evaporación en áreas urbanizadas o la evapotranspiración en períodos demasiado fríos para la producción agrícola (en los últimos casos, la  $ET$  es baja por lo general, por lo que este flujo improductivo no es tan grande).

#### Cuadro 4.3. Requisitos ambientales de agua verde

Es necesario que una parte importante del flujo evaporativo se reserve para la vegetación natural. Cuando se conserva el terreno en su estado natural, automáticamente queda reservado el flujo evaporativo de ese terreno para la naturaleza, quedando no disponible para la producción agrícola destinada al uso humano. Cuando queremos conocer la cantidad disponible de agua verde para uso humano, no deberíamos tomar la evapotranspiración total desde el suelo, sino más bien sustraer de esta la evapotranspiración de suelos que han sido reservados para la naturaleza. En su Estrategia Global para la Conservación Vegetal (CBD, 2002), la Convención sobre Diversidad Biológica fijó unos objetivos para el año 2010: al menos el 10% de cada una de las regiones ecológicas del mundo deben estar conservadas de manera efectiva y el 50% de las superficies más importantes para la diversidad vegetal estarán protegidas. Los cálculos estimados sobre el total de áreas a nivel global que han de ser reservadas para protección de los ecosistemas, varían bastante. Según la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (WCED, por sus siglas en inglés; 1987), será necesario que al menos el 12% de todos los tipos de ecosistemas sean preservados para la protección de la biodiversidad. Noss y Cooperrider (1994) estiman que la mayor parte de las regiones tendrán que reservar un 25-75% del terreno para la conservación de la biodiversidad. Svancara *et al.* (2005) compararon más de 200 objetivos con respecto al porcentaje del terreno que tiene que conservarse para la protección de la biodiversidad, como ha sido propuesto en varios informes y concluyeron que el porcentaje medio recomendado de superficie para los objetivos documentados con evidencias fue casi tres veces más alto que el recomendado en los estudios con enfoque político. La conservación del 10-15% de la superficie total para la protección de biodiversidad, tal como se ha propuesto en procesos políticos (como el CBD, 2002; la WCED, 1987) no representaría la necesidad biológica real, que se encontraría alrededor del 25-50%. El porcentaje debería variar por regiones, dependiendo de las características de estas.

Cuando faltan datos sobre una zona de captación específica, se recomienda partir de un valor predeterminado de al menos el 12%. Trabajar con un valor predeterminado de 30% es probablemente más realista desde el punto de vista ecológico.

Veamos un ejemplo para poder entender mejor el concepto de disponibilidad de agua verde. Consideremos una zona de captación con un área de 1.000 km<sup>2</sup>. La evapotranspiración anual media es de 450 mm, así que la evapotranspiración total ( $ET_{verde}$ ) de esa zona de captación es de 1.000 km<sup>2</sup> × 450 mm = 450 millones de m<sup>3</sup>. Supongamos que los estudios muestran que para la conservación de la biodiversidad es necesario reservar el 30% de la zona de captación para la naturaleza y que la evapotranspiración media en un año de esta zona es de 500 mm. Por tanto, las necesidades de agua verde de los ecosistemas ( $ET_{veg}$ ) en esta zona de captación son 0,3 × 1.000 km<sup>2</sup> × 500 mm = 150 millones de m<sup>3</sup>. Además, supongamos que otro 30% de la zona de captación no es apropiada para el cultivo (superficies urbanizadas, incluyendo carreteras y otras infraestructuras) y que la evapotranspiración media anual en estas áreas es de 400 mm. La evapotranspiración desde esta área improductiva es 0,3 × 1.000 km<sup>2</sup> × 400 mm = 120 millones de m<sup>3</sup>. La evapotranspiración anual en el resto de la zona de captación es 0,4 × 1.000 km<sup>2</sup> × 450 mm = 180 millones de m<sup>3</sup>. En la mitad del año, durante el invierno, el clima no es apropiado para el cultivo, pero durante este período, la evapotranspiración anual es relativamente baja, 100 mm. Por tanto, la evapotranspiración durante este período de improductividad en la superficie disponible para el cultivo es 0,4 × 1.000 km<sup>2</sup> × 100 mm = 40 millones de m<sup>3</sup>. Como consecuencia, la evapotranspiración total en la zona de captación que no puede hacerse productiva para usos agrícolas ( $ET_{improd}$ ) es 120 + 40 = 160 millones de m<sup>3</sup>. A partir de este ejemplo podemos ver que, aunque la evapotranspiración total ( $ET_{verde}$ ) de la zona de captación es de 450 millones de m<sup>3</sup>, la disponibilidad de agua verde es solo 450 – 150 – 160 = 140 millones de m<sup>3</sup>.

Cuando se habla de escasez de agua, generalmente se refiere a la escasez de agua azul. Sin embargo, la disponibilidad de agua verde es también limitada, por lo que los recursos de agua verde también son escasos. El nivel de escasez de agua verde en una zona de captación  $x$  en un período  $t$  se define como la proporción entre el total de huellas hídricas verdes en la zona de captación y la disponibilidad de agua verde:

$$EA_{verde}[x, t] = \frac{\sum HH_{verde}[x, t]}{DA_{verde}[x, t]} \quad [-] \quad (52)$$

Así definido, el indicador de escasez de agua verde denota, de hecho, la fracción de apropiación de los recursos de agua verde disponibles. Se puede medir la escasez de agua verde de manera diaria pero, en general, basta con hacerlo mensualmente para poder observar la variación durante el año. La escasez de agua verde del 100% significa que se ha consumido la totalidad del agua verde disponible. Los valores de escasez por encima del 100% no son sostenibles.

Hay que admitir que el tema de analizar la escasez de agua verde es un terreno prácticamente sin explorar. La dificultad reside en la estimación de la disponibilidad de agua verde. Principalmente faltan datos sobre las necesidades de agua verde de los ecosistemas ([cuadro 4.3](#)) y sobre las cantidades de evapotranspiración que no puede hacerse productiva para propósitos agrícolas. Estas cantidades limitan seriamente la disponibilidad de agua verde y, por tanto, es vital que se tengan en cuenta; sin embargo, sin consenso sobre la cantidad de terreno (y su respectiva evapotranspiración) que debe estar reservada para la naturaleza y sobre cómo definir con precisión cuándo y dónde no es posible hacer la evapotranspiración productiva, es imposible hacer un análisis cuantitativo. Obviamente, este es un tema que requiere investigación adicional. Por el momento recomendamos excluir la evaluación cuantitativa de la escasez de agua verde en la configuración de políticas públicas, pero se incluirá en estudios piloto para explorar la utilidad de dicho análisis y para trabajar en una definición de la disponibilidad de agua verde libre de ambigüedades.

Obsérvese que (cuando existe una diferencia entre la evapotranspiración de la vegetación natural y un campo de cultivo) la huella hídrica verde puede afectar a la disponibilidad de agua azul, aunque el efecto a escala de una cuenca hidrográfica será, por lo general, pequeño. En términos generales, este efecto puede ignorarse ([cuadro 4.4](#)).

#### Cuadro 4.4. **Efecto de la huella hídrica verde en la disponibilidad de agua azul**

La huella hídrica verde en una zona de captación puede ocasionar un patrón de escorrentía alterado aguas abajo. Normalmente, la evapotranspiración de agua de lluvia en un campo de cultivo no es muy diferente de la evapotranspiración de la misma superficie en condiciones ambientales, pero puede presentar diferencias significativas durante algunos períodos determinados del año. A veces la evapotranspiración puede ser más baja, otras más alta, lo que lleva a un incremento o a un descenso de la escorrentía respectivamente. Esto significa que la huella hídrica verde puede afectar la disponibilidad de agua azul. Se sugirió utilizar el término “huella hídrica verde neta” para referirse a la diferencia entre la evapotranspiración de un cultivo y la evapotranspiración en condiciones naturales (SABMiller y WWF-UK, 2009). Sin embargo, esta terminología no es consistente con la definición básica del concepto de la huella hídrica como indicador de apropiación de agua dulce, lo que exige que se observen los valores totales. Recomendamos hablar sobre escorrentía modificada como resultado de la huella hídrica verde en vez de huella hídrica verde neta.

La agricultura no es el único factor humano que afecta la fracción de la precipitación que se convierte en escorrentía (afectando, de ese modo, a la disponibilidad de agua azul); también factores como la urbanización y otros cambios en el paisaje afectarán a la escorrentía y, por tanto, a la disponibilidad de agua azul. Estos factores deben ser considerados a la hora de evaluar la escasez de agua azul y sus causas subyacentes. Como la escasez de agua azul se refiere a la proporción entre la huella hídrica azul en un área determinada y la disponibilidad de agua azul (véase el texto principal),

la escasez de esta agua puede incrementarse ya sea debido al aumento de la huella hídrica azul o a la reducción de la disponibilidad de agua azul. En todas las cuencas hidrográficas, el aumento histórico de la huella hídrica azul ha sido mucho mayor que los cambios en la disponibilidad de agua azul y, por tanto, al evaluar la escasez de esta, puede bastar con comparar la huella hídrica azul variable históricamente con la disponibilidad de agua azul, esta última como una constante geográfica.

## Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica azul

La huella hídrica azul total en una zona de captación es igual a la suma de todas las huellas hídricas azules de proceso dentro de esta zona de captación. La huella hídrica azul en un período determinado y en una zona de captación determinada genera un punto crítico cuando excede la disponibilidad de agua azul. La disponibilidad de agua azul ( $DA_{azul}$ ) en una zona de captación  $x$  en un período determinado  $t$  se define como la escurrentía natural de la zona de captación ( $E_{nat}$ ) menos el caudal mínimo ecológico ( $CME$ ):

$$HH_{azul}[x, t] = E_{nat}[x, t] - CME[x, t] \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (53)$$

Cuando en un período y zona de captación determinados la huella hídrica azul sobrepasa la disponibilidad de agua azul, significa que se ha violado el caudal mínimo ecológico en ese período y en esa zona de captación. Es necesario formular el caudal mínimo ecológico en cuanto a la cantidad y la periodicidad de los flujos de agua necesarios para preservar los ecosistemas de agua dulce y estuarios y el modo de vida y bienestar de las personas que dependen de estos ecosistemas. En el [apéndice V](#) se discute en detalle sobre el concepto de caudal mínimo ecológico. La [figura 4.2](#) muestra cómo la huella hídrica azul a lo largo de un año puede compararse con la disponibilidad de agua azul durante ese mismo año. En el ejemplo se simula una violación del caudal mínimo ecológico durante un período del año determinado, pero no durante el resto del año. El caudal mínimo ecológico se extrae de la escurrentía natural, no de la escurrentía real, ya que esta última ya ha sido afectada por el consumo de agua aguas arriba. Podemos estimar la escurrentía natural como la escurrentía real más la huella hídrica azul dentro de la zona de captación.

Cuando en un mes específico la huella hídrica azul de una zona de captación excede la disponibilidad de agua azul, es insostenible desde el punto de vista ambiental, ya que se estaría violando el caudal mínimo ecológico. Sin embargo, hay más criterios a tener en cuenta: la huella hídrica en una zona de captación no afectará únicamente al flujo de escurrentía, sino que también afectará a las reservas de agua azul de la cuenca, especialmente a las reservas de agua subterránea y el volumen de agua en lagos. Por tanto, otra manera de identificar condiciones insostenibles es observar el efecto de la huella hídrica azul en los niveles de aguas subterráneas y lagos de la zona de captación ([cuadro 4.5](#)).

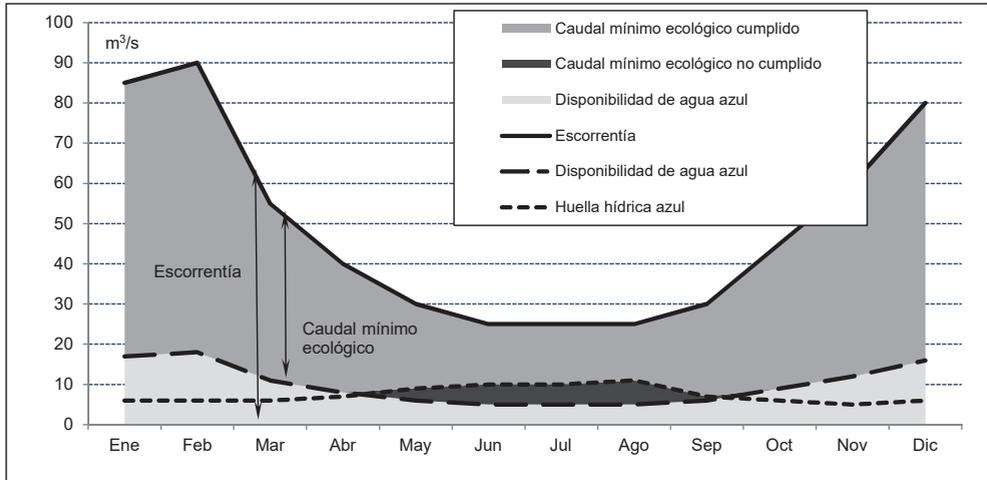


Figura 4.2. Huella hídrica azul a lo largo de un año comparada con la disponibilidad de agua azul, donde la última es igual a la escorrentía (en su estado original) menos el caudal mínimo ecológico

#### Cuadro 4.5. La sostenibilidad de la huella hídrica azul depende de cómo afecte a los flujos y las reservas de agua azul

La huella hídrica en una zona de captación, definida como un volumen durante un período de tiempo determinado, debería compararse con la disponibilidad de agua azul en la zona de captación durante el mismo período. Obviamente, por unidad de tiempo, no se debería consumir más de lo que se encuentra disponible. Tanto la huella hídrica azul como la disponibilidad de agua azul se expresan como volumen por unidad de tiempo y, por tanto, se denominan caudales. Como ya se ha explicado, para analizar la sostenibilidad ambiental de la huella hídrica azul en una zona de captación en un período de tiempo determinado habría que comparar el caudal consumido (la huella hídrica azul) con el caudal disponible (escorrentía menos el caudal mínimo ecológico). Sin embargo, además de esto, es necesario analizar los efectos de la huella hídrica azul sobre las reservas de agua azul (el volumen de agua almacenado bajo tierra y en los lagos). Veamos esto con un ejemplo:

Imaginemos que un lago es alimentado por un río por un lado y drenado por el mismo río, por el otro. Para simplificar, supongamos que la precipitación sobre el lago y su evaporación son relativamente bajas comparadas con el caudal del río, por lo que el caudal de salida es igual al caudal de entrada. Supongamos que el caudal de entrada se reduce en un 20% como consecuencia de la huella hídrica azul aguas arriba. El nivel del lago bajará hasta un nivel en el que el caudal de salida se iguale al de entrada. El lago, por tanto, llega a un nuevo equilibrio con un volumen de agua menor y un nivel de agua asociado, también menor. Cuando el caudal de salida del lago depende

directamente del volumen activo de dicho lago (el volumen por encima de la cota de la parte más baja del punto de salida), un descenso del 20% del caudal de salida corresponde a un descenso del 20% del volumen activo del lago, que resulta en una reducción del nivel del lago. La cuestión entonces no es solo si el 20% de la reducción del caudal del río es sostenible, sino también si un descenso del 20% en el volumen de agua del lago y su correspondiente descenso del nivel del lago son sostenibles. La primera depende del caudal mínimo ecológico. La última depende del descenso máximo permitido del nivel del lago que, a su vez, depende de la vulnerabilidad de los ecosistemas acuáticos del lago y de los ecosistemas ribereños con relación a los cambios en el nivel del agua.

Un ejemplo parecido puede aplicarse a las reservas renovables de agua subterránea. La extracción neta de agua subterránea de un acuífero debería permanecer por debajo de su disponibilidad (la tasa de recarga del agua subterránea menos la fracción del caudal natural de salida de agua subterránea necesaria para preservar el caudal mínimo ecológico del río). Además, se debe analizar de qué forma las extracciones de agua subterránea pueden afectar el nivel de la capa freática. La sostenibilidad de una determinada reducción del nivel de agua subterránea depende del descenso máximo permitido del nivel de la capa freática, que depende de la vulnerabilidad de los ecosistemas terrestres en relación con las alteraciones en ese nivel. Es necesario puntualizar que a la hora de medir el descenso de agua subterránea y de los lagos hay que tener cuidado al diferenciar entre causas naturales y humanas. Las variaciones inter e intraanuales en los niveles de agua subterránea y de los lagos son naturales y están relacionados con la variabilidad del clima. Antes de atribuir el descenso del nivel de agua subterránea o de un lago a la huella hídrica azul en la zona de captación, es preciso verificar que este descenso no se debe a cambios en los patrones climáticos dentro del período en cuestión. De modo similar al caudal mínimo ecológico, los descensos máximos permitidos en los niveles de agua subterránea y de los lagos varían según el contexto y debemos calcularlos individualmente por zona de captación.

Para analizar la sostenibilidad de la huella hídrica azul en una zona de captación es necesario compararla con la disponibilidad de agua azul, pero, además, es necesario evaluar si los niveles de agua subterránea o de los lagos permanecen dentro de sus límites de sostenibilidad (Richter, 2010). El agua subterránea fósil es un tema aparte. Cuando la huella hídrica azul tenga el agua subterránea fósil como base, cada gota del agua consumida disminuirá las existencias de agua subterránea fósil disponible. El consumo de agua subterránea fósil se considera siempre un descenso en la cantidad de esta y, por tanto, por definición, es insostenible.

La escasez de agua azul en una zona de captación  $x$  ( $EA_{azul}$ ) se define como la relación entre el total de las huellas hídricas azules en la zona de captación ( $\sum HH_{azul}$ ) y la disponibilidad de agua azul ( $DA_{azul}$ ):

$$EA_{azul}[x, t] = \frac{\sum HH_{azul}[x, t]}{DA_{azul}[x, t]} \quad [—] \quad (54)$$

Una escasez de agua azul del 100% significa que el agua azul disponible ha sido completamente consumida. Si la escasez de agua azul está por encima del 100%, es insostenible. La escasez de agua azul depende del tiempo; varía dentro de un mismo año y de año a año. La medición se puede realizar diariamente, pero basta con hacerlo de manera mensual para observar la variación a lo largo del año. En la [figura 4.2](#) se puede observar que la medición de la escasez de agua azul a nivel anual no es una buena idea. En el ejemplo dado, está claro que durante cinco meses al año (de mayo a septiembre) la escasez de agua supera el 100%. Durante los siete meses restantes, la escasez de agua se halla por debajo del 100%. En este ejemplo, la media de los valores de escasez mensual durante todos los meses del año da un valor de escasez mensual de agua azul en la zona de captación de un poco más del 100%. En el ejemplo dado, si se considera la huella hídrica azul anual sobre la disponibilidad anual de agua azul, se obtiene un valor del 75%, una cifra que omite el hecho de que se está violando el caudal mínimo ecológico durante cinco meses al año, es decir, durante todo el período seco!

Cabe resaltar que la escasez de agua azul, según como se ha definido aquí, es un concepto físico y ambiental. Se considera físico porque compara los volúmenes apropiados con los disponibles y ambiental porque tiene en cuenta el caudal mínimo ecológico. No se trata de un indicador de escasez económica: un indicador de este tipo utilizaría valores monetarios para expresarla. Por otro lado, el indicador de escasez de agua azul, tal como ha sido definido, es diferente a los indicadores de escasez de agua convencionales en muchos sentidos y básicamente intenta solventar las deficiencias de los indicadores convencionales ([cuadro 4.6](#)).

#### Cuadro 4.6. **Cómo la escasez de agua azul definida en los estudios de huella hídrica difiere de los indicadores convencionales de escasez de agua**

Los indicadores de escasez de agua se basan en dos componentes principales: la medida del uso de agua y la disponibilidad de agua. El indicador más común de la escasez de agua azul es la relación entre la extracción anual de agua en una zona determinada y la escurrimiento total anual en dicha zona, también conocida como nivel de utilización de agua (Falkenmark, 1989), la relación entre extracción y disponibilidad (Alcamo y Henrichs, 2002) o la relación entre uso y recurso (Raskin *et al.*, 1996). Existen cuatro críticas a este enfoque. La primera es que la extracción de agua no es el mejor indicador del uso de agua si se está interesado en el efecto que la extracción tiene al nivel de la zona de captación en su totalidad, ya que parte de la extracción de agua regresa a la zona de captación (Perry, 2007). Por tanto, tiene más sentido expresar el uso de agua azul en términos de uso consuntivo del agua, es decir, considerando la huella hídrica azul. La segunda es que la escurrimiento total no es el mejor indicador de la disponibilidad hídrica, ya que ignora el hecho de que parte de la escurrimiento necesita ser mantenida para el medio ambiente. Por tanto, es mejor restar el caudal mínimo ecológico de la escurrimiento total (Smakhtin *et al.*, 2004; Poff *et al.*, 2010). La tercera es que comparar el uso del agua con la escurrimiento real de una zona de captación es problemático cuando ha disminuido notablemente debido al uso del agua dentro de la zona de captación. Tiene más sentido comparar el uso del agua con la escurrimiento

*natural* de la zona de captación, es decir, la escorrentía que tendría lugar sin el uso consuntivo del agua dentro de la zona de captación. Por último, no es tan preciso evaluar la escasez de agua por medio de la comparación de valores *anuales* de uso del agua y la disponibilidad (Savenije, 2000). En realidad, la escasez de agua se manifiesta más bien de forma mensual que anual debido a las variaciones intraanuales tanto del uso del agua como de su disponibilidad. En el contexto de los estudios de la huella hídrica, la escasez de agua azul en una zona de captación se define de forma que se subsanen los cuatro puntos débiles descritos.

### Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica gris

El efecto de la huella hídrica gris total en una zona de captación depende de la escorrentía disponible en la zona de captación para asimilar las cargas de contaminantes. Una huella hídrica gris en un período específico en una zona de captación específica genera un punto crítico cuando se violan las normas de la calidad ambiental en ese período y en esa zona de captación, es decir, cuando se consume por completo la capacidad de asimilación de las cargas de contaminantes.

Se puede calcular el nivel de contaminación del agua (*NCA*) dentro de la zona de captación como un indicador de impacto local importante que mide el grado de contaminación. Se define como la porción de la capacidad de asimilación de cargas de contaminantes consumida y calculada tomando la relación entre el total de huellas hídricas grises en una zona de captación ( $\sum HH_{gris}$ ) y la escorrentía real de esa zona de captación ( $E_{real}$ ). Un nivel de contaminación de agua igual o superior al 100% significa que la capacidad de asimilación de cargas de contaminantes ha sido completamente consumida. Cuando el nivel de contaminación del agua sobrepasa el 100%, se violan las normas de la calidad ambiental. El nivel de contaminación del agua se calcula para una zona de captación  $x$  y tiempo  $t$  como se muestra a continuación:

$$NCA [x, t] = \frac{\sum HH_{gris} [x, t]}{E_{real} [x, t]} \quad [—] \quad (55)$$

Tanto la huella hídrica gris como la escorrentía pueden variar a lo largo del año, por lo que el nivel de contaminación del agua también variará durante el año. En la mayoría de los casos, el cálculo mensual es probablemente lo suficientemente bueno como para representar la variación temporal; por supuesto, también es posible hacer el cálculo para un período menor, si fuese necesario.

Es posible calcular el nivel de contaminación de agua para zonas de captación grandes o pequeñas. La desventaja de evaluar el nivel de contaminación de agua para zonas de captación relativamente grandes de una sola vez es que se calcula un valor promedio para la zona de captación en su totalidad, lo que significa que el resultado no mostrará las diferencias en los niveles de contaminación dentro de la zona de captación. El segundo ejemplo de cálculo presentado en el [apéndice IV](#) ilustra este caso.

En resumen, los indicadores de escasez de agua verde y azul y del nivel de contaminación de agua se han definido de manera que cuando sobrepasen el 100%, se reflejan condiciones insostenibles e indican un punto crítico ambiental. Un punto crítico ambiental se define como el período de tiempo en una zona de captación en la que se violan las necesidades ambientales de agua verde o azul o las normas de calidad del agua.

### **4.2.3. Criterios de sostenibilidad para identificar puntos críticos sociales**

La huella hídrica total en una zona de captación es socialmente insostenible y, por consiguiente, causa un punto crítico social cuando no se cubren las necesidades humanas básicas para todos los habitantes de la zona de captación o cuando no se cumplen las normas básicas de equidad, siempre y cuando podamos relacionarlo parcialmente con la huella hídrica de la zona de captación. Las necesidades humanas básicas relacionadas con el agua incluyen una cantidad mínima de suministro seguro y limpio de agua dulce para beber, lavar y cocinar (ONU, 2010b) y que se asigne un mínimo de agua a la producción de alimentos para asegurar un nivel suficiente de suministro de estos para todos. El último derecho mencionado, el derecho a agua para alimentos no se ha establecido formalmente, pero la alimentación en sí como un derecho humano se encuentra reflejada en la Declaración Universal de los Derechos Humanos (ONU, 1948).

Otra necesidad básica es el trabajo, que puede correr peligro cuando, por ejemplo, la contaminación aguas arriba afecta a los pescadores aguas abajo. Las normas básicas de equidad incluyen los principios “usuario-pagador” y “quien contamina paga”. No sería justo y, por tanto, tampoco sostenible que personas aguas arriba generen una huella hídrica azul o gris que conlleve problemas para las personas aguas abajo, cuando las primeras (usuario y aquellos que contaminan) no compensan a las últimas.

Otra norma de equidad es el uso justo de los bienes públicos. Como el agua dulce es básicamente un bien público, se podría considerar injusto que algunos usuarios consuman por encima de la cota razonable de un acuífero o un lago de agua dulce. Un ejemplo es cuando los agricultores de gran tamaño (comerciales) cavan pozos hondos en busca de agua para regar sus cultivos, dificultando el acceso al agua a los agricultores de cultivos de menor tamaño de la zona.

Las necesidades humanas básicas y las normas de equidad son criterios muy difíciles de cuantificar porque no tienen límites definidos. Juzgar si se han violado las necesidades humanas básicas relacionadas con el agua o las normas de equidad de una zona de captación determinada, o no, depende de una valoración especializada. La existencia de conflictos sobre el agua podría ser una indicación práctica (Gleick,

2010; Oregon State University, 2010). En la práctica, los conflictos sociales sobre el agua aparecen normalmente al mismo tiempo que los conflictos ambientales. Por tanto, la identificación de puntos críticos ambientales también proporcionará una lista potencial de puntos críticos sociales.

#### **4.2.4. Criterios de sostenibilidad para identificar puntos críticos económicos**

La huella hídrica total en una zona de captación es económicamente insostenible y, por consiguiente, genera un punto crítico económico cuando el agua no se asigna y usa de manera económicamente eficiente. Los beneficios de una huella hídrica (verde, azul o gris) que son resultado del uso de agua para un determinado fin deberían superar el coste total asociado con esta huella hídrica, incluyendo las externalidades, costes de oportunidad y los costes de escasez del agua. Es necesario asignar el agua en una zona de captación de manera económicamente eficiente a los diferentes usuarios (eficiencia en la asignación) y cada usuario debería, por su parte, usar dicha agua de manera eficiente (eficiencia productiva). Cuando el precio del agua para el usuario está por debajo de su coste económico real, generalmente resulta en un uso ineficiente, por lo que el grado de cobrar el coste económico completo al usuario del agua podría ser un indicador.

#### **4.2.5. Evaluación de los impactos primarios y secundarios en los puntos críticos identificados**

Con la información de puntos críticos podemos conocer en qué zonas de captación y en qué períodos del año la escasez y la contaminación del agua entran en conflicto con los criterios de sostenibilidad medioambiental, social y económica. También podemos conocer la severidad de los puntos críticos, ya que cuanto mayor sea la escasez de agua verde o azul o el nivel de contaminación, mayor será el problema. Tras localizar los puntos críticos y haber establecido la severidad de cada uno de ellos, podemos evaluar los impactos primarios y secundarios de cada punto crítico en más detalle, si esto fuera parte del alcance fijado para la evaluación.

Se pueden mostrar los impactos primarios en los puntos críticos a diferentes niveles de detalle. Se puede aplicar un modelo simplificado de balance de agua o un modelo hidrológico avanzado o cualquier modelo hidrológico intermedio para estimar el efecto de la huella hídrica verde y azul en la hidrología de la zona de captación. Los modelos de calidad del agua también están disponibles en todas sus formas, desde los más simples, que necesitan pocos datos de entrada hasta los más avanzados, que necesitan mucha información. Las variables más importantes a tener en cuenta para

los impactos primarios son: la escorrentía y los niveles de agua asociados y algunos parámetros de calidad de agua de relevancia para el caso estudiado. Para que tenga sentido, es necesario que todas las variables se comparen con las condiciones de referencia, tanto hidrológicas como de calidad del agua. Como tales condiciones de referencia, se pueden considerar las condiciones naturales de la zona de captación en su estado original para que, de este modo, se pueda visualizar el impacto humano total.

Cuando hablamos de evaluar los impactos secundarios de las huellas hídricas verde, azul y gris entramos en un terreno del que ya existe mucha documentación, aunque la estructuración de una evaluación de impactos ambientales, sociales y económicos aún sigue suponiendo un gran reto. Para una evaluación más amplia se hace la diferencia explícita entre impactos ambientales, sociales y económicos. La primera cuestión es, generalmente, saber qué variables de impacto hay que tener en cuenta. Por lo general, los libros sobre evaluación de impactos aportan largas listas de variables de impacto que han de incluirse. Las variables ambientales habitualmente incluyen parámetros como la abundancia de ciertas especies, la biodiversidad o la pérdida de hábitat. Las variables sociales, normalmente, incluyen aspectos como la salud humana, el empleo, la distribución de la riqueza y la seguridad alimentaria. Las variables económicas incluirán los ingresos en diferentes sectores de la economía (en el caso de los flujos de agua reducidos o el deterioro de la calidad del agua, es posible que sectores específicos como la pesca, el turismo, la generación de hidroelectricidad y la navegación se vean afectados).

Es siempre un reto cuantificar las variables de los impactos secundarios. Cuando se ha definido con qué variables de estos impactos se va a trabajar, la siguiente cuestión es cómo valorar si los impactos primarios (alteraciones en los flujos y la calidad del agua) se pueden traducir en previsiones fiables de los impactos secundarios. Para dar este paso es posible utilizar modelos, evaluaciones especializadas y enfoques participativos. Recomendamos que se consulte toda la documentación existente sobre la evaluación de impactos.

### **4.3. Sostenibilidad de la huella hídrica de un proceso**

Que la huella hídrica de un proceso específico sea o no sostenible, depende de dos criterios:

1. Contexto geográfico: la huella hídrica de un proceso es insostenible cuando el proceso se encuentra en un punto crítico; en otras palabras, en una zona de captación determinada y en un período del año en el que la huella hídrica total es insostenible desde el punto de vista ambiental, social o económico.

2. Características del proceso como tal: la huella hídrica de un proceso es insostenible en sí misma (independientemente del contexto geográfico) cuando esta se pueda reducir o evitar (a un coste social aceptable).

Ambos criterios tienen que evaluarse individualmente para la huella hídrica verde, azul y también, para la gris. El primero de los criterios implica que cuando la huella hídrica de un proceso contribuya a generar un punto crítico en el cual la huella hídrica total sea insostenible, la huella hídrica de este proceso en particular tampoco será sostenible. Mientras que la huella hídrica total en una zona de captación en un período específico sea insostenible, toda contribución específica a esta se considera insostenible, aunque la contribución sea relativamente pequeña. Esta noción se basa en el reconocimiento de que existen riesgos y responsabilidades compartidas. Si la huella hídrica total en una zona de captación es insostenible (por ejemplo, porque la huella hídrica azul exceda la disponibilidad de agua azul), no se puede señalar solo un componente como el causante del problema, puesto que el total es lo que lo genera. Cuando la huella hídrica de un proceso contribuye a generar un punto crítico, esta es insostenible porque forma parte de una situación insostenible. En el apartado anterior se ha expuesto ampliamente cómo definir los puntos críticos desde un punto de vista ambiental, social o económico. Por tanto, en este apartado necesitaremos explicar únicamente el segundo criterio.

La huella hídrica verde, azul o gris de un proceso es insostenible en sí misma cuando pueda ser evitada o reducida gracias a la disponibilidad de una mejor tecnología a un coste social aceptable. Esto podría ocurrir en zona de captación con escasez de agua, pero también en las que hay abundancia de agua. Muchos procesos podrían mejorarse o ser reemplazados por otros que tengan una huella hídrica mucho menor o igual a 0 a un coste social razonable o, incluso, con un beneficio social añadido. El pensamiento general es que reducir las huellas hídricas cuesta dinero (tratamiento de aguas residuales, técnicas más eficientes de riego o medidas para generar un uso más eficiente del agua de lluvia) pero, generalmente, esta es una perspectiva “micro” desde el punto de vista de aquel que tiene que realizar la inversión inicial para tomar las medidas necesarias. Desde un punto de vista “macro”, cuando se internalizan las externalidades económicas y ambientales ocasionadas por una sobreexplotación y una contaminación de los recursos hídricos, la disminución de la huella hídrica supondrá un beneficio social o, por lo menos, un coste social razonable.

La mayor parte de las formas de contaminación del agua son innecesarias y evitables. Por tanto, prácticamente todos los procesos que producen una huella hídrica gris son insostenibles. Muchos de los procesos con una huella hídrica azul también son insostenibles. En las industrias, solo cuando es necesario incorporar el agua dulce al producto, no es posible evitar la huella hídrica azul asociada, pero las huellas hídricas azules relativas a la evaporación de agua en procesos industriales pueden evitarse, por lo general, a través de la recuperación de esa agua. Un proceso insostenible es, por

ejemplo, el enfriamiento con agua sin capturar la evaporación para su reutilización. En agricultura, las huellas hídricas azules son insostenibles cuando se usan técnicas de riego ineficientes que generan evaporación adicional innecesaria.

Por tanto, los procesos que se describen como insostenibles no causan necesariamente problemas inmediatos de escasez de agua o de contaminación en la zona de captación en la que tienen lugar (por ejemplo, cuando hay pocos usuarios de agua, de manera que se respeta el caudal mínimo ecológico y la capacidad de asimilación de cargas de contaminantes no ha sido del todo consumida); sin embargo, no son sostenibles, ya que tienen un consumo de agua innecesario y reducen la capacidad de asimilación de cargas de contaminantes. Cuando las huellas hídricas verde y azul en áreas abundantes en agua son innecesariamente grandes, se refleja generalmente una baja productividad del agua, es decir, una baja producción por unidad de volumen de agua consumida. Esto es insostenible, puesto que es necesario que la productividad del agua incremente en las zonas abundantes en agua para así reducir la necesidad de producir productos con uso intensivo de agua en áreas de escasez hídrica.

Desafortunadamente, aún no existen criterios claros para determinar si un proceso determinado es insostenible en sí mismo, así que, por ahora, habrá que depender de la opinión de los especialistas basada en las técnicas disponibles. Es necesario desarrollar niveles de referencia globales para que se pueda comparar la huella hídrica de un proceso determinado con la referencia global de dicho proceso. El nivel de referencia global debe indicar la huella hídrica máxima razonable por unidad de producto final que haya sido resultado de un cierto proceso, expresado de forma individual para la huella hídrica verde, la azul y la gris.

## **4.4. Sostenibilidad de la huella hídrica de un producto**

### **4.4.1. Identificación de los componentes insostenibles en la huella hídrica de un producto**

La huella hídrica de un producto es la suma de las huellas hídricas de las etapas necesarias para elaborar el producto (véanse los [apartados 3.2](#) y [3.4](#)). Por tanto, la sostenibilidad de la huella hídrica del producto depende de la sostenibilidad de la huella hídrica de las diferentes etapas del proceso. Cada una de ellas tiene lugar en una o más zonas de captación específicas, normalmente en un tiempo específico del año. Por tanto, la huella hídrica total de un producto consiste en muchos componentes individuales, cada uno de los cuales se refiere a un proceso específico y tiene lugar en un período específico del año en una zona de captación determinada. Cada compo-

nente individual de la huella hídrica de un producto puede evaluarse en términos de sostenibilidad basándose en dos criterios:

1. El componente de la huella hídrica ¿está localizado en una zona de captación y en un período del año identificado como un punto crítico?
2. ¿Es la huella hídrica del proceso insostenible en sí misma? Es decir, ¿se puede evitar la huella hídrica en su totalidad o reducirse con un coste social razonable?

Es necesario llevar a cabo este procedimiento de manera individual para el componente verde, el azul y el gris de la huella hídrica del producto. El procedimiento sobre un producto hipotético se muestra en la [tabla 4.1](#). Su sistema de producción consiste de seis etapas. Algunas de estas se encuentran en más de una zona de captación.

Los dos criterios mencionados anteriormente se aplican de forma individual para cada componente de la huella hídrica. Algunos componentes tienen una puntuación negativa en uno de los criterios, otros tienen una puntuación negativa en el otro criterio, otros tienen dos puntuaciones negativas y otros tienen dos puntuaciones positivas. Ambos criterios sobre sostenibilidad geográfica y del proceso en sí, se complementan. Esto significa que cada componente de la huella hídrica de un producto por separado puede ser insostenible, ya sea porque contribuye a una situación geográficamente insostenible (punto crítico) o porque se refiere a un proceso que es insostenible en sí.

La conclusión final tras haber evaluado la sostenibilidad de una huella hídrica del producto se puede expresar como  $x\%$  de la huella hídrica del producto es insostenible. Se puede mostrar cuáles son los componentes insostenibles de la huella hídrica total y se puede explicar por qué estos componentes son insostenibles: ya sea porque se refieren a una huella hídrica que puede evitarse completamente o reducirse con un coste social razonable o porque contribuyen a la formación de un punto crítico. Es necesario intervenir en los componentes insostenibles de la huella hídrica de un producto para mejorar la situación. Basándonos en la proporción de un componente determinado de la huella hídrica en la huella hídrica total del producto, se pueden establecer prioridades de acción. Se puede incluso decidir ignorar los componentes que son insostenibles, pero cuya contribución a la huella hídrica total del producto se encuentra por debajo de un límite (por ejemplo, del 1%). También se puede priorizar en base a la severidad relativa de los diversos puntos críticos en los cuales los diferentes componentes insostenibles de la huella hídrica contribuyen, o en base a las mejoras que se pueden conseguir más rápida y fácilmente.

En cuanto a los procesos individuales, es necesario establecer también niveles de referencia globales para los productos. De este modo, seremos capaces de comparar la huella hídrica de un producto específico con el nivel de referencia global del mismo, el cual se refiere a la huella hídrica máxima aceptable por unidad de producto. La última puede considerarse como la suma de las huellas hídricas máximas aceptables que se hayan establecido con anterioridad para las etapas del proceso en el sistema de elaboración del producto.

Tabla 4.1. Ejemplo de cómo evaluar hasta qué punto la huella hídrica de un producto es sostenible, basándose en dos criterios: la sostenibilidad geográfica de las huellas hídricas en las zonas de captación en las que están localizadas las etapas del proceso y la sostenibilidad de las etapas del propio proceso. Los componentes prioritarios en la huella hídrica de un producto pueden identificarse basándose en los componentes que son insostenibles y la proporción de un componente en la huella hídrica total de un producto. Es preciso rellenar una tabla para cada huella hídrica (verde, azul y gris) del producto

Datos derivados del cálculo de la huella hídrica del producto			Verificar la sostenibilidad de la huella hídrica total en la zona de captación donde tiene lugar el proceso	Verificar la sostenibilidad de la huella hídrica del proceso en sí	Conclusión	Verificar la relevancia desde la perspectiva del producto	Verificar si se necesita intervención	
Etapas del proceso <sup>a</sup>	Zona de captación en la que tiene lugar el proceso <sup>b</sup>	Huella hídrica (m <sup>3</sup> por unidad de producto final)	¿Es la zona de captación un punto crítico?	¿Puede reducirse o evitarse la huella hídrica?	¿Se trata de un componente sostenible en la huella hídrica del producto?	Fracción de la huella hídrica del producto que no es sostenible	Porcentaje por encima del límite del 1% <sup>c</sup>	¿Se trata de un componente prioritario?
1	A	45	No	No	Sí		Sí	No
	B	35	Sí	Sí	No	35%	Sí	Sí
2	A	10	No	No	Sí		Sí	No
	C	6	No	No	Sí		Sí	No
	D	2	Sí	No	No	2%	Sí	Sí
3	E	1,1	No	Sí	No	1,1%	Sí	Sí
	F	0,5	Sí	No	No	0,5%	No	No
	A	0,3	No	No	Sí		No	No
4	A	0,1	No	Sí	No	0,1%	No	No
Total		100				38,7%		

<sup>a</sup> El sistema de producción del producto consta de una serie de etapas de proceso secuenciales o paralelas (véase el [apartado 3.4.2](#)).

<sup>b</sup> Una etapa del proceso (por ejemplo, un cultivo determinado que es un ingrediente del producto en cuestión) puede localizarse en zonas de captación diferentes.

<sup>c</sup> La elección del límite puede ser tema de debate.

### 4.4.2. Índices de impacto de la huella hídrica que reflejan los impactos ambientales locales

Una evaluación detallada sobre la sostenibilidad de la huella hídrica de un producto, tal como se ha resumido en la [tabla 4.1](#), es útil para identificar los puntos más críticos con el fin de poder tomar las medidas más apropiadas. Para algunos fines, especialmente para el de llevar a cabo un análisis del ciclo de vida (ACV), es conveniente resumir la información sobre la sostenibilidad de la huella hídrica del producto en uno o algunos índices. El objetivo de los estudios de ACV es evaluar el impacto ambiental general de los productos: los impactos sobre el uso de los recursos hídricos y la calidad del agua son solo dos de los tipos de impactos ambientales entre una serie de otros impactos ambientales de los productos. En los estudios de ACV es necesario expresar todos los impactos en índices simples, lo que requiere agregación de información más específica.

Los recursos de agua dulce de la Tierra son limitados y en muchos sitios ya se ha hecho un uso abusivo de ellos. La medición del uso de los recursos hídricos mediante la cuantificación de los volúmenes de agua consumida y contaminada debe ser, por tanto, un elemento clave en un estudio de ACV. Las huellas hídricas verde, azul y gris de un producto son buenos indicadores del consumo total de los recursos hídricos y del uso de la capacidad de asimilación de cargas de contaminantes relacionados con el producto y, por tanto, se pueden utilizar directamente como indicadores de ACV. Sin embargo, aparte del hecho de que es importante cuantificar el volumen de apropiación de agua dulce, también es interesante analizar los impactos ambientales locales relacionados con la apropiación de agua dulce. Este impacto ambiental local depende de la escasez de agua y del nivel de contaminación del agua en las zonas de captación en las que se localiza la huella hídrica del producto.

Como medida de los impactos ambientales de la huella hídrica de un producto se pueden usar los índices de impacto de la huella hídrica, tal como se describen en este apartado. Recientemente, los investigadores de ACV han centrado su atención en estos impactos ambientales locales del uso del agua, ignorando el problema mayor sobre la escasez global de agua (Pfister y Hellweg, 2009; Ridoutt y Pfister, 2010). Queremos destacar que estos impactos locales son solo una parte de la cuestión del agua; el asunto sobre qué cantidad total de agua está siendo apropiada para la producción de un producto es igual o incluso más importante. Cuando dos productos tienen la misma huella hídrica representan una demanda similar sobre los recursos hídricos limitados del planeta, aunque cuando se elaboran en dos lugares diferentes, el impacto ambiental a nivel local puede ser diferente.

Cuando un producto determinado contribuye a la huella hídrica azul total de una zona de captación, el impacto de esa huella hídrica específica depende de dos factores:

1. El tamaño de la huella hídrica azul en cuestión.
2. La escasez de agua azul en la zona de captación.

Para la huella hídrica verde se puede seguir el mismo planteamiento.

De modo similar, cuando un cierto producto contribuye a la huella hídrica gris total en una zona de captación, su impacto depende de:

1. El tamaño de la huella hídrica gris en cuestión.
2. El nivel de contaminación del agua en la zona de captación.

La huella hídrica es una medida volumétrica que muestra el consumo y contaminación de agua dulce en tiempo y espacio. Las huellas hídricas aportan información relevante sobre cómo los recursos hídricos son asignados a diferentes fines. La huella hídrica de un producto muestra el agua asignada a ese producto. El agua asignada a un producto no puede asignarse a otro. En términos de apropiación de agua dulce, una huella hídrica azul de  $1 \text{ m}^3$  siempre es equivalente a otra huella hídrica azul de  $1 \text{ m}^3$ , aunque la primera pertenezca a una zona de captación con escasez de agua y la última a una con abundancia. En el marco global sobre apropiación de agua dulce, realmente no importa cuál de las dos huellas está localizada en la zona de captación con escasez, porque podría haber ocurrido al contrario. Ambas huellas tienen el mismo impacto para la apropiación de agua dulce en general.

El volumen de agua apropiada para un proceso o producto aporta información clave en la discusión sobre la asignación del recurso, pero no aporta información sobre si contribuye, o no, a un problema inmediato de escasez de agua o contaminación dentro de la zona de captación donde tiene lugar. En términos de impacto local, una huella hídrica de  $1 \text{ m}^3$  no tiene por qué ser equivalente a otra huella hídrica de  $1 \text{ m}^3$ , ya que una de ellas puede tener lugar en una zona de captación en que se viola el caudal mínimo ecológico mientras que la otra puede tener lugar en una zona de captación donde no ocurre esto.

Con el fin de conocer el impacto local, es necesario situar la huella hídrica azul de un producto específico en el contexto de la escasez de agua azul en la zona de captación donde tiene lugar la huella. De modo similar, es necesario considerar la huella hídrica verde en el contexto de escasez de agua verde. Por último, hay que observar la huella hídrica gris de un producto específico en una determinada zona de captación en el contexto del nivel de contaminación de agua en la misma zona de captación.

El índice de impacto de la huella hídrica verde ( $IIHH_{verde}$ ) es una medida acumulada y ponderada del impacto ambiental de una huella hídrica verde. Se basa en dos datos de entrada:

1. La huella hídrica verde de un producto especificada por zona de captación  $x$  y por mes  $t$ .
2. La escasez de agua verde por zona de captación y por mes.

Obtenemos el índice multiplicando las dos matrices y posteriormente sumando los elementos de la matriz resultante. Podemos interpretar el resultado como una huella hídrica verde ponderada según la escasez de agua verde en los lugares y períodos del año en que tienen lugar los diferentes componentes de la huella hídrica verde.

$$IIHH_{verde} = \sum_x \sum_t (HH_{verde}[x, t] \times EA_{verde}[x, t]) \quad (56)$$

El índice de impacto de la huella hídrica azul ( $IIHH_{azul}$ ) es una medida acumulada y ponderada del impacto ambiental de una huella hídrica azul. Se basa en:

1. La huella hídrica azul de un producto especificada por zona de captación  $x$  y por mes  $t$ .
2. La escasez de agua azul por zona de captación y por mes.

Obtenemos el índice multiplicando las dos matrices y, posteriormente, sumando los elementos de la matriz resultante. Podemos interpretar el resultado como una huella hídrica azul ponderada según la escasez de agua azul en los lugares y períodos del año en que tienen lugar los diferentes componentes de la huella hídrica azul.

$$IIHH_{azul} = \sum_x \sum_t (HH_{azul}[x, t] \times EA_{azul}[x, t]) \quad (57)$$

El índice de impacto de la huella hídrica gris ( $IIHH_{gris}$ ) es una medida acumulada y ponderada del impacto ambiental de una huella hídrica gris. Se basa en:

1. La huella hídrica gris de un producto especificada por zona de captación  $x$  y por mes  $t$ .
2. El nivel de contaminación del agua por zona de captación y por mes.

Obtenemos el índice multiplicando las dos matrices y posteriormente, sumando los elementos de la matriz resultante. Podemos interpretar el resultado como una huella hídrica gris ponderada según el nivel de contaminación en los lugares y períodos del año en que tienen lugar los diferentes componentes de la huella hídrica gris.

$$IIHH_{gris} = \sum_x \sum_t (HH_{gris}[x, t] \times NCA[x, t]) \quad (58)$$

Los tres índices de impacto de huella hídrica se refieren a los diferentes tipos de uso del agua que no son comparables. Para tener un índice de impacto de huella hídrica total, podemos sumar simplemente los tres índices. Como la escasez de agua verde es generalmente más baja que la azul, las huellas hídricas verdes contarán menos que las azules.

En líneas generales, nos gustaría enfatizar que los índices de impacto, tal como se han estado explicando, tienen un valor limitado ya que la información más relevante para las acciones de respuesta se encuentra en las variables subyacentes. Es importante conocer el tamaño y el color de la huella hídrica para saber cuándo y dónde tienen lugar y en qué contexto (grado de escasez de agua, nivel de contaminación del agua). Si englobamos esta información en los tres índices o, aún más, si sintetizamos los tres en un índice general, toda la información estará contemplada. Lo restante es una impresión poco precisa del impacto ambiental local de la huella hídrica como conjunto, lo que puede ser útil a la hora de compararlo de manera aproximada con el impacto local de otra huella hídrica, pero no es útil para la formulación de medidas específicas de respuesta. También cabría decir que los índices de impacto de huella hídrica citados anteriormente solo consideran los impactos ambientales, no los sociales ni los económicos. Además, muestran impactos a nivel de zona de captación. En términos de uso sostenible del agua, las medidas volumétricas aportadas por el indicador de huella hídrica son más útiles. Sin embargo, los índices presentados son relevantes para los estudios de ACV, que requieren unos índices de impacto altamente integrados.

Los índices de impacto de huella hídrica son relevantes únicamente como indicadores iniciales del impacto ambiental a nivel de zona de captación; los índices agregados ya no contienen información espacial ni temporal. Como base para formular medidas de respuesta adecuadas, es más útil identificar puntos críticos (como ya se ha explicado anteriormente) que calcular los índices agregados de impacto de la huella hídrica. Cabe destacar, además, que el objetivo de los índices de impacto en cuestión es el de medir los impactos ambientales a nivel de zona de captación; para analizar la sostenibilidad de la asignación del agua, los índices que reflejan impactos locales no son útiles. A este fin, es preferible utilizar los cálculos volumétricos de la huella hídrica, puesto que la asignación se refiere a la distribución de recursos escasos, no a los impactos locales.

## 4.5. Sostenibilidad de la huella hídrica de una empresa

La huella hídrica de una empresa es la suma de todas las huellas hídricas de los productos finales elaborados por ella (véanse los [apartados 3.2](#) y [3.10](#)). Por tanto, en primer lugar, hay que analizar la sostenibilidad de las huellas hídricas de los productos elaborados por el productor y, en segundo lugar, analizar la sostenibilidad de la huella hídrica de la empresa. Esta es una etapa secundaria, puesto que los resultados sobre la sostenibilidad de la huella hídrica de los productos de las empresas por separado pueden ofrecer una conclusión inmediata sobre la sostenibilidad de la huella hídrica de la misma.

Supongamos que una empresa elabora dos productos finales y que tres cuartas partes de la huella hídrica de la empresa están relacionadas con un producto entero (al 100%) y una cuarta parte con el otro. Se ha descubierto que un tercio de la huella hídrica del primer producto no es sostenible y que la huella hídrica del segundo es insostenible en su totalidad. En este caso, se deduce que  $(3/4 \times 1/3 + 1/4 \times 1) = 50\%$  de la huella hídrica de la empresa es insostenible. Los análisis de sostenibilidad de la huella hídrica de ambos productos pueden usarse para determinar los procesos responsables de los componentes insostenibles en la huella hídrica de la empresa y para identificar en qué zonas de captación tienen lugar dichos procesos.

## 4.6. Sostenibilidad de la huella hídrica de un consumidor

La huella hídrica de un consumidor es igual a la suma de las huellas hídricas de los productos utilizados por el consumidor. Por tanto, la sostenibilidad de la huella hídrica de un consumidor depende de la sostenibilidad de las huellas hídricas de los productos consumidos. Podemos simplemente aplicar el método descrito en el [apartado 4.4](#) para todos esos productos. De este modo, podemos calcular la sostenibilidad para cada componente de la huella hídrica de un consumidor. Sin embargo, para analizarla, no basta con fijarse en la sostenibilidad de los componentes individuales de la huella hídrica del mismo. Es necesario también analizar la huella hídrica en su totalidad. Por tanto, entra en escena un segundo criterio: la sostenibilidad de la huella hídrica de un consumidor también depende de si su huella hídrica es mayor o menor que la cuota equitativa de un individuo, teniendo en cuenta las limitaciones de la huella hídrica humana.

La huella hídrica de muchos consumidores estará determinada apenas por unos pocos componentes. En el caso de los consumidores de carne, por lo general, esta será la huella hídrica del consumo de carne (Hoekstra, 2010b). Para consumidores con una huella hídrica relativamente grande, puede que se quieran identificar los productos que más contribuyen. Estos son productos de lujo que están asociados a una huella hídrica relativamente grande. La asignación de agua a gran escala para bienes de lujo puede hacerse en detrimento del suministro hídrico al medio ambiente o del suministro hídrico para la producción de alimentos básicos. Además de la carne, otros bienes de lujo que tienen una gran huella hídrica incluyen, por ejemplo, los productos cosméticos de origen agrícola y el biodiésel o el bioetanol de primera generación. Estos productos no son inmediatamente insostenibles si se producen a pequeña escala, siempre que su elaboración tenga lugar en zonas de captación que no sean puntos críticos, pero pasan a ser insostenibles en el momento en que la asignación de los recursos hídricos para estos productos, a escala global, perjudique a la asignación

de los recursos hídricos globales escasos para actividades que cubren las necesidades básicas. Esto puede ocurrir, por ejemplo, cuando un cereal como el maíz se usa cada vez más para producir bioetanol para beneficio de algunos, mientras que, al mismo tiempo, otros se enfrentan a una seguridad alimentaria reducida debido al aumento del precio del maíz. Los productos que más inquietan están asociados a huellas hídricas grandes que configuran la componente principal de la huella hídrica humana, es decir, el componente de “lujo” de la huella hídrica humana. Es necesario reducir o frenar el crecimiento de esta componente de la huella hídrica humana para reservar suficiente agua que se destinará al medio ambiente y a las necesidades humanas básicas.

La sostenibilidad de la huella hídrica de un grupo de consumidores (por ejemplo, los consumidores de una nación) depende de la sostenibilidad de las huellas hídricas de cada consumidor. De este modo, podemos analizar si la huella hídrica de un consumidor es mayor o menor que su cuota equitativa y, además, también podemos analizar si el consumo nacional en su totalidad, en relación con los limitados recursos mundiales de agua dulce, supera o permanece por debajo de la cuota equitativa de la nación.

# 5

## Opciones de medidas para la reducción de la huella hídrica

### 5.1. Responsabilidad compartida

Podría decirse que los consumidores son responsables de lo que consumen, por lo que también son responsables del uso indirecto de los recursos relacionados con su patrón de consumo. En este sentido, los consumidores son responsables de su huella hídrica y deberían tomar medidas para asegurarse de que esta es sostenible. Si se hiciera así, los productores se verían forzados a elaborar productos sostenibles. También podría “darse la vuelta a la tortilla” y alegar que son los productores los que tienen la responsabilidad de suministrar productos sostenibles. Esto implicaría que estos deberían tomar medidas para hacer sostenibles las huellas hídricas de sus productos. Los inversores, por supuesto, deberían incluir consideraciones del uso sostenible del agua en sus decisiones de inversión. Al fin y al cabo, el agua es un bien público, por lo que los gobiernos no pueden eludir la responsabilidad de establecer normativas apropiadas e incentivos para asegurar una producción y un consumo sostenibles. Argumentamos que los consumidores, los productores, los inversores y los gobiernos tienen una responsabilidad compartida. Este capítulo repasará las opciones disponibles para los consumidores, los productores, los inversores y los gobiernos para reducir las huellas hídricas y mitigar sus impactos.

El objetivo no es ser normativo; este manual no pretende decir lo que hay que hacer, sino que está restringido a una serie de opciones. Como esta es la primera versión de un inventario de estas características, no pretende en ningún caso ser exhaustivo. Sin embargo, puede ser una guía útil para entender qué estrategias de respuesta alternativas se pueden formular. Una estrategia de respuesta podría ser una combinación de una o más opciones descritas en el presente manual.

## 5.2. Reducir la huella hídrica humana: ¿qué es posible?

Técnicamente, tanto la huella hídrica azul como la verde de las industrias y hogares se puede reducir a cero reciclando toda el agua. En un círculo cerrado no habrá pérdidas por evaporación ni efluentes contaminados. En fábricas o sistemas de refrigeración, el agua evaporada se puede capturar y reciclar o devolver a la masa de agua de la que fue extraída. Existen algunas excepciones en las que la huella hídrica azul de un proceso no se puede reducir completamente a cero, especialmente cuando el agua se usa para su incorporación a un producto; esta parte de la huella hídrica azul no puede evitarse, pero estaríamos hablando de fracciones mínimas en la huella hídrica azul humana. Otra excepción podría ser el conocer cuándo será necesario aplicar el agua a cielo abierto en cuyo caso, un poco de evaporación es inevitable. El único tipo de huella hídrica gris que no puede reducirse siempre a cero es la relacionada con la contaminación térmica, pero incluso, en este caso, el calor puede capturarse parcialmente desde los efluentes calentados de los sistemas de refrigeración y ser usados para otros fines antes de que el efluente se deposite en el medio ambiente.

En agricultura, la huella hídrica gris se puede reducir a cero evitando aplicar sustancias químicas al suelo. Se puede disminuir sustancialmente utilizando menos sustancias químicas, empleando mejores técnicas y mejorando los períodos de aplicación (para que lleguen menos sustancias químicas al sistema de agua mediante escorrentía del suelo o por lixiviación). Las huellas hídricas verde y azul ( $m^3/t$ ) en agricultura pueden reducirse considerablemente con el incremento de la productividad de agua verde y azul ( $t/m^3$ ). Por lo general, la agricultura se centra en maximizar la productividad del suelo ( $t/ha$ ), que tiene sentido cuando el suelo es escaso y el agua dulce abundante; pero cuando el agua es más escasa que el suelo, es más importante maximizar la productividad del agua. En el caso del agua azul, esto implicaría aplicar menos agua de riego de una manera más inteligente para obtener un rendimiento mayor por metro cúbico de agua evaporada.

En la [tabla 5.1](#) se resume la posible reducción de la huella hídrica por componente y por sector. Las huellas hídricas azul y verde operacionales en el sector industrial se pueden anular en mayor o menor medida. En el sector agrícola se necesita más investigación para formular objetivos razonables de reducción cuantitativa de la huella hídrica. En teoría, la huella hídrica gris puede reducirse a cero practicando agricultura ecológica. En la práctica, reemplazar la agricultura tradicional por la orgánica puede suponer un reto y requerir bastante tiempo. Además, las estimaciones aproximadas indican que, dentro de unas décadas, la huella hídrica azul total del mundo podrá ser reducida a la mitad. Esto se logrará en parte gracias al incremento de la productividad de agua azul en la agricultura de regadío (aplicando técnicas de riego que ahorren agua y técnicas de riego deficitario que sustituyan a las de riego completo) y en parte incrementando la fracción de producción basada en el agua verde en vez de en el agua azul.

Tabla 5.1. Posibles objetivos de reducción de la huella hídrica por sector y componente de huella hídrica

	Agricultura	Industria
Huella hídrica verde	Disminuir la huella hídrica verde ( $m^3/t$ ) incrementando la productividad del agua verde ( $t/m^3$ ) tanto en la agricultura de secano como en la de regadío.  Aumentar la producción total de agricultura de secano.	Irrelevante.
Huella hídrica azul	Disminuir la huella hídrica azul ( $m^3/t$ ) incrementando la productividad del agua azul ( $t/m^3$ ) en la agricultura de regadío.  Disminuir la proporción de huella hídrica azul/verde.  Disminuir la huella hídrica azul global (en un 50%, por ejemplo).	Huella hídrica azul igual a cero: no se producen pérdidas por evaporación (reciclado total) no se puede evitar únicamente la huella hídrica azul relacionada con la incorporación de agua.
Huella hídrica gris	Reducir el uso de fertilizantes artificiales y pesticidas; aplicación más efectiva.  Disminuir casi hasta cero la huella hídrica gris gracias a la agricultura orgánica.	Huella hídrica gris igual a cero: no hay contaminación (reciclaje total, recuperando calor de efluentes calentados y tratamiento de las cuencas de retorno restantes).

La reducción de la huella hídrica puede conseguirse de dos maneras diferentes. En una cadena de producción determinada se puede reemplazar una técnica con otra para que cause una huella hídrica menor o incluso igual a cero o se puede evitar el uso de un ingrediente determinado o la totalidad de un producto final.

Algunos ejemplos de tecnología de producción mejorada son: reemplazar el riego con aspersor por riego por goteo; reemplazar la agricultura tradicional por la orgánica; o reemplazar sistemas de refrigeración con circuito abierto por los de circuito cerrado.

Algunos ejemplos de actitudes que pueden evitar la huella hídrica son: reemplazar la dieta basada principalmente en carne por una dieta vegetariana o con menos presencia cárnica (usando otras fuentes de proteínas que necesiten menos agua); evitar la aplicación de sustancias químicas tóxicas que, por medio de los desagües, acaben vertiéndose en el agua superficial o subterránea; o evitar el uso de biocombustibles que necesiten mucha agua (y reemplazarlos, por ejemplo, por electricidad producida por energía solar o eólica). Reducir evitando es generalmente más necesario que reducir mejorando la producción, puesto que evitar requiere, por lo general, una reconsideración de los patrones de producción y de consumo en sí, mientras que la producción mejorada consiste en seguir haciendo lo mismo que antes, pero de una

manera más eficiente desde el punto de vista ecológico. A la hora de buscar opciones para reducir las huellas hídricas es esencial explorar ambas prácticas.

Se suele pensar que la reducción de la huella hídrica solo es relevante en lugares donde existen problemas de escasez y contaminación. La idea es que es innecesario reducir la huella hídrica azul en un área en la que la disponibilidad del agua azul es abundante, por lo que también sería inútil reducir la huella hídrica gris en zonas con suficiente agua disponible como para diluir los contaminantes y que dichas concentraciones se mantengan por debajo de las concentraciones máximas permitidas. De la misma manera, se suele pensar que es innecesario reducir la huella hídrica verde en la agricultura, ya que el agua de lluvia va a caer de todas formas y, por el contrario, sería improductiva. La lógica de esta forma de pensar es que cuando la huella hídrica en una zona de captación determinada en un período determinado no conduce a la escasez o a la contaminación del agua, su huella hídrica debe ser sostenible. Sin embargo, está basada en el concepto erróneo de que la sostenibilidad del uso de agua depende únicamente de su uso en el contexto geográfico local. Como ya se ha explicado en el [apartado 4.3](#), la huella hídrica de un proceso determinado es insostenible y, por tanto, es necesario reducirla cuando:

1. La huella hídrica del proceso contribuye a la creación de un punto crítico.
2. La huella hídrica puede reducirse o evitarse en su totalidad, independientemente de su contexto geográfico. Este criterio implica que es necesario reducir las huellas hídricas en áreas con abundante agua, siempre que sea posible, no para resolver problemas locales de agua en estas zonas, sino para contribuir a un uso del agua global más sostenible, justo y eficiente. Reducir las huellas hídricas ( $m^3/t$ ) en áreas con abundante agua incrementando la productividad de agua ( $t/m^3$ ) es clave para reducir la presión sobre los recursos hídricos de zonas con escasez hídrica, puesto que es necesario incrementar la producción de bienes que necesiten abundante agua en áreas donde hay suficiente disponibilidad hídrica cuando los límites de producción ya se hayan sobrepasado en áreas con escasez.

La preocupación debería estar en la huella hídrica total de la humanidad. El hecho de que esta sea demasiado grande se pone de manifiesto en áreas de puntos críticos, donde los problemas locales de escasez y contaminación del agua son visibles durante momentos específicos del año. Reducir la huella hídrica en dichos puntos críticos es una necesidad clara. Pero esto es solo una parte; sorprendentemente, la solución al problema en áreas con escasez hídrica reside en las áreas con abundancia. En estas últimas áreas, es común encontrar una baja productividad hídrica en agricultura de secano (huella hídrica verde). Aumentar la productividad hídrica (es decir, reducir la huella hídrica verde) para este tipo de agricultura en áreas con abundancia hídrica aumenta la producción global, disminuyendo la necesidad de productos que requieren

abundante agua de áreas con escasez hídrica y, por tanto, ayuda a aliviar la presión sobre los recursos de agua azul en estas áreas. Desde una perspectiva global, es necesario entonces reducir las huellas hídricas por tonelada de producto donde sea posible, incluso en áreas con abundancia hídrica.

Desde un punto de vista global, reducir la huella hídrica 1 m<sup>3</sup> en una zona de captación es equivalente a reducir el mismo volumen de huella hídrica en otra, aunque una de ellas muestre unos niveles de escasez o contaminación mucho mayores que la otra. La razón es que (dada la limitación de recursos de agua potable a nivel mundial) cualquier reducción contribuye a la disminución de la demanda total de recursos. Cuando en determinadas zonas de captación se puedan producir más productos que necesiten abundante agua con el mismo volumen de agua, se puede reducir la producción de bienes que necesiten mucha agua en zonas con escasez y, de ese modo, la huella hídrica total en dichas áreas se puede reducir. Se trata de una forma indirecta, pero importante, de aliviar la presión sobre los recursos hídricos en zonas con escasez.

Desde un punto de vista local y más inmediato, es importante saber si la reducción de 1 m<sup>3</sup> se produce en una zona de captación con abundancia o con escasez de agua. Reducir la huella hídrica en una zona con escasez contribuye a disminuir la presión, siempre y cuando la huella hídrica reducida por unidad de producción no quede anulada por el incremento de producción al mismo tiempo. Así que, aunque todas las reducciones de huella hídrica contribuyan a solucionar el problema global de recursos limitados de agua dulce, la prioridad debería ser la reducción de las huellas hídricas situadas en puntos críticos, porque la acción en estos tiene lógica global y local, mientras que la actuación fuera de dichos puntos solo tiene una lógica global. La [tabla 5.2](#) resume de forma muy esquemática cómo se pueden definir las prioridades de reducción de la huella hídrica.

Tabla 5.2. **Prioridades en la reducción de la huella hídrica**

	Puntos no críticos	Puntos críticos*
Bajo potencial de reducción	0	+
Alto potencial de reducción **	+	++

\* Un punto crítico es un período del año específico (por ejemplo, el período seco) en una (sub)zona de captación específica en la que la huella hídrica es insostenible, por ejemplo, porque compromete las necesidades ambientales de agua o las normas de la calidad hídrica, o porque la asignación y uso de agua en la zona de captación se consideran injustos o económicamente ineficientes.

\*\* Existe un alto potencial de reducción cuando la huella hídrica se puede evitar por completo o reducir considerablemente a un coste social razonable.

Cuando se habla de la reducción de la huella hídrica a cero, se puede usar el término “neutralidad en agua”, término elegido como análogo de la “neutralidad en

carbono”, que se utiliza para las actividades con una huella de carbono igual a cero. El término neutralidad en agua puede interpretarse de diferentes maneras, lo que lo hace un concepto un poco problemático ([cuadro 5.1](#)). Es más claro cuando se refiere simplemente a una huella hídrica igual a cero, que es posible en el caso de las operaciones industriales, donde la huella hídrica nula es técnicamente posible. El concepto de neutralidad en agua es menos claro cuando incluye una forma de compensación. La idea de compensación de la huella hídrica, obviamente, se ha desarrollado como análoga al concepto de compensación de carbono. Si el término de “compensación de carbono” ya presenta problemas a la hora de definir lo que incluye, el concepto de compensación de la huella hídrica es incluso más polémico ([cuadro 5.2](#)). Recomendamos dar prioridad a la definición cuantitativa de objetivos referentes a la reducción de huellas hídricas asociadas a impactos en vez de a la compensación.

#### Cuadro 5.1. Neutralidad en agua

Neutralidad en agua es una idea similar a la de neutralidad en carbono. Sin embargo, igual que en el caso de la neutralidad en carbono, el término neutralidad en agua es cuestionable. El problema empieza en su definición: se usó por primera vez la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible, celebrada en Johannesburgo en 2002. La idea era cuantificar el consumo de agua durante la conferencia por las delegaciones y transformarlo en dinero. Se animó a los delegados, a las corporaciones y a los grupos de sociedad civil a hacer que la cumbre tuviera neutralidad en agua por medio de la compra de certificados para compensar su consumo de agua durante los diez días que duraba la cumbre, cuya inversión estaba reservada a la instalación de bombas de agua en comunidades sudafricanas con falta de agua y para iniciativas de conservación (Water Neutral, 2002). En 2007, la empresa The Coca-Cola Company<sup>TM</sup> se comprometió a que sus operaciones tuvieran neutralidad en agua, que se refiere a

1. Reducir el uso del agua en sus operaciones.
2. Devolver el agua usada de sus operaciones en forma de agua limpia al medio ambiente.
3. Compensar por el agua contenida en las bebidas mediante programas de conservación y reciclaje.

También en 2007, el Ministerio de Vivienda del Reino Unido presentó datos oficiales sobre el proyecto de reurbanización *Thames Gateway* con neutralidad en agua (que, en este contexto, se refiere a que la región no requiere del uso adicional de agua a pesar de la multitud de nuevas viviendas construidas y de personas que se mudan a ellas). Esto podría hacerse con la compensación de una demanda adicional de agua en los nuevos edificios mediante la reducción de su uso en los edificios existentes (Agencia

Medioambiental, 2007). En los tres casos anteriores, el uso del agua se mide en términos de extracción de agua (no de consumo de agua) y en los tres casos se incluye una forma de compensación. Además, los tres casos consideran únicamente el uso directo de agua, no las formas indirectas. Sin embargo, las tres aplicaciones del concepto de neutralidad en agua tienen diferente peso en la reducción del uso de agua frente a la compensación. Los casos de Johannesburgo y *Thames Gateway* se basan básicamente en la compensación, mientras que el caso de la Coca-Cola utiliza la compensación solo para la parte del consumo de agua que realmente no puede reducirse (el agua destinada a la bebida). Los casos de Johannesburgo y *Thames Gateway* se diferencian en que el último busca la compensación dentro de la misma área claramente definida, mientras que el primero no se detiene tanto en ese aspecto. Hoekstra (2008a) propuso relacionar el concepto de neutralidad en agua con el concepto de huella hídrica y definirlo de la siguiente manera: reducir la huella hídrica de una actividad o producto lo máximo posible y compensar por las externalidades negativas de la huella hídrica restante. Al relacionar el concepto de neutralidad en agua con la huella hídrica también se contempla el uso indirecto del agua.

En algunos casos específicos, cuando se puede evitar la interferencia con el ciclo de agua por completo (por ejemplo, reciclando toda el agua y haciendo la contaminación igual a cero) la neutralidad en agua, según su definición, significa que la huella hídrica se anula; en muchos otros casos, como el de los cultivos, el consumo de agua no puede anularse. Por tanto, con esta definición, la neutralidad en agua no siempre significa que el consumo de agua se reduzca a cero, sino que la huella hídrica se reduce lo máximo posible y que los posibles impactos de la huella hídrica restante se compensan completamente. Dicha compensación se puede hacer con la contribución (inversión) a un uso más sostenible y equitativo del agua en las unidades hidrológicas en las que se localizan los impactos de la huella hídrica restante. En la última definición del concepto de neutralidad en agua, quedan sin resolver un número importante de cuestiones. Entre ellas: ¿cuánta reducción de la huella hídrica cabe esperar? ¿Qué precio es apropiado para la compensación hídrica? ¿Qué tipo de acciones cuentan como compensación? Mientras dichas cuestiones queden sin resolver, el riesgo que conlleva este concepto es que su contenido depende del usuario. Como consecuencia, muchos lo utilizarán para referirse a medidas verdaderamente efectivas, adoptadas tanto en operaciones como en la cadena de suministro, mientras que otros lo usarán únicamente para cuestiones de *marketing*.

El riesgo del concepto de neutralidad en agua también reside en que la atención cambie de la reducción de la huella hídrica a su compensación. Una huella hídrica puede medirse de forma empírica, así como su reducción. Definir la compensación y medir su efectividad es mucho más difícil, ya que aumenta el riesgo de su uso indebido. Además, las medidas compensatorias deberían considerarse como última opción y plantearse su uso tras haber reducido, antes que nada, la huella hídrica de la empresa.

### Cuadro 5.2. **Compensación de la huella hídrica**

El concepto de la compensación de la huella hídrica no está todavía bien definido. En términos generales significa tomar medidas para compensar los impactos negativos de la huella hídrica que queda tras las medidas de reducción implementadas. Pero los dos puntos débiles de la definición son:

1. No especifica qué tipo de medidas de compensación y qué nivel de compensación son lo suficientemente buenos para compensar un impacto de huella hídrica determinado.
2. No especifica qué impactos han de ser compensados de forma precisa ni cómo medir dichos impactos.

En el [capítulo 4](#), hemos visto que el término impacto puede interpretarse de manera muy amplia. El hecho de que el concepto de compensación esté aún mal definido significa que es fácil hacer un uso indebido del mismo. Sin una definición clara, las medidas tomadas como compensación pueden convertirse en una forma de “lavado verde” más que un esfuerzo real destinado a la compensación total. Por ello, recomendamos fervientemente centrarnos en reducir la huella hídrica y ver la compensación únicamente como un último recurso.

Otra razón es que las huellas hídricas y sus impactos asociados son siempre locales. En este sentido, la huella hídrica es muy diferente a la de carbono. La idea de un mercado de compensación global como el que se ha ido desarrollando para la huella de carbono en los últimos años no tiene sentido en el caso del agua. Una compensación por huella hídrica siempre tiene que ocurrir en la zona de captación donde se localiza dicha huella hídrica. Esto dirige la atención hacia la huella hídrica de la empresa y no permite pensar en términos de esquemas de compensación general donde se pueda simplemente “comprar” una compensación.

## 5.3. Consumidores

La huella hídrica de un consumidor es sostenible cuando:

1. El total se mantenga por debajo de la proporción equitativa del consumidor en el mundo,
2. Ningún componente de la huella hídrica total se localiza en un punto crítico.
3. Ningún componente de la huella hídrica total se puede reducir o evitar por completo a un coste social razonable.

Los consumidores pueden reducir su huella hídrica directa (uso doméstico de agua) instalando inodoros o alcachofas de ducha con sistemas de ahorro de agua, cerrando

el grifo al lavarse los dientes, usando menos agua en el jardín y no tirando medicinas, pinturas u otros contaminantes por el desagüe.

La huella hídrica indirecta de un consumidor es, por lo general, mucho mayor que la directa. Un consumidor tiene básicamente dos opciones para reducir su huella hídrica indirecta. Una opción es cambiar el patrón de consumo sustituyendo un producto específico con una huella hídrica grande por otro con una huella hídrica menor, entre ellos: comer menos carne o hacerse vegetariano, beber agua en lugar de café o llevar prendas que contengan menos algodón y más fibras artificiales. Este enfoque tiene limitaciones, ya que no es fácil pasar de comer carne a ser vegetariano, ni dejar de consumir café o llevar prendas de algodón.

Una segunda opción sería seleccionar algodón, carne o café con una huella hídrica menor o que se encuentre en un área sin grandes niveles de escasez de agua. Sin embargo, para esto es necesario que los consumidores tengan información adecuada para su elección. Por lo general, esta información no está siempre disponible y, por ello, los consumidores podrían requerir a las empresas transparencia en los productos y regulación por parte de los gobiernos. Cuando se dispone de información sobre los impactos de un artículo específico en el sistema hídrico, los consumidores pueden realizar elecciones conscientes de lo que compran.

## 5.4. Empresas

Una estrategia de huella hídrica de una empresa incluye una variedad de objetivos y actividades ([tabla 5.3](#)). Las empresas pueden reducir su huella hídrica operacional por medio de la disminución del consumo de agua en sus operaciones propias y disminuir la contaminación hídrica a cero. Las palabras clave son: evitar, reducir, reciclar y tratar antes de eliminar. Evitando cualquier tipo de evaporación, la huella hídrica azul puede reducirse a cero. Reduciendo la producción de aguas residuales lo máximo posible y tratando la que sigue produciéndose, la huella hídrica gris también se puede reducir a cero. El tratamiento se puede llevar a cabo en las propias instalaciones de la empresa o en instalaciones públicas de tratamiento de aguas residuales; la calidad del agua vertida al sistema de agua ambiente es lo que determinará la huella hídrica gris.

Para la mayor parte de las empresas, la huella hídrica de la cadena de suministro es mucho más extensa que la operacional. Es por tanto crucial que la empresa se ocupe también de ella. Las mejoras en la cadena de suministro son más difíciles de conseguir (porque no tienen el control directo), pero pueden ser más efectivas. Las empresas pueden reducir su huella hídrica de la cadena de suministro haciendo acuerdos sobre el mismo, incluyendo ciertas normas con sus distribuidores o,

simplemente, cambiándolos por otro. En muchos casos esta tarea puede resultar complicada, puesto que es posible que todo el modelo de negocio necesite transformarse para incorporar o controlar mejor las cadenas de suministro y hacerlas totalmente transparentes para los consumidores.

Una empresa también puede pretender reducir la huella hídrica del consumidor propia del uso de su producto. Cuando un consumidor utiliza jabón, champú, limpiadores o pintura, es probable que lo eliminen por el desagüe. Cuando no se trata el agua o cuando el producto químico es tal que no se puede eliminar, ni siquiera parcialmente, se producirá una huella hídrica gris que la empresa podría haber evitado utilizando sustancias menos tóxicas, menos dañinas y más fácilmente degradables.

Entre las múltiples alternativas o herramientas complementarias que ayudan a mejorar la transparencia son: ajustarse a las definiciones y métodos compartidos (expresados en el presente manual), informar sobre la huella hídrica y divulgar información relevante. Se puede mejorar la claridad sobre las actividades realizadas para reducir la huella hídrica corporativa estableciendo objetivos de reducción cuantitativa a lo largo del tiempo. Una herramienta importante para grandes empresas o sectores específicos es la evaluación comparativa o *benchmarking*: lo que podemos conseguir en (la cadena de suministro de) una fábrica también debería ser posible en (la cadena de suministro de) otra fábrica.

Tabla 5.3. Opciones de respuesta a la huella hídrica de una empresa

---

Objetivos de reducción de la huella hídrica: operaciones

- Evaluar comparativamente productos o lugares. Definir las buenas prácticas y establecer objetivos para implementarlas en toda la empresa. Se puede hacer en la propia empresa o en un sector en conjunto.
- Reducir la huella hídrica azul en general. Reducir el uso consuntivo del agua en operaciones por medio del reciclaje, adopción de dispositivos de ahorro de agua y la sustitución de procesos de uso intensivo de agua por otros de uso extensivo.
- Reducir la huella hídrica azul en puntos críticos. Priorizar las medidas en áreas con escasez de agua o donde se viole el caudal mínimo ecológico de un río, o donde los niveles del agua subterránea o de los lagos esté disminuyendo.
- Reducir la huella hídrica gris en general. Reducir el volumen de aguas residuales, reciclar las sustancias químicas, realizar el tratamiento de aguas residuales antes de su eliminación y recuperar el calor de los efluentes.
- Reducir de la huella hídrica gris en los puntos críticos. Priorizar las medidas en áreas donde se violen las normas de la calidad ambiental.

Objetivos de reducción de la huella hídrica: cadena de suministro

- Acordar objetivos de reducción con los distribuidores.

- Cambiar de distribuidor.
- Tener más control, o total, a lo largo de la cadena de suministro. Cambiar el modelo de negocio para así incorporar o tener más control sobre la cadena de suministro.

Objetivos de reducción de la huella hídrica: uso final

- Reducir las necesidades propias del agua en la fase de uso. Reducir el uso de agua esperado cuando se use el producto (por ejemplo, con cisternas de doble descarga, equipos de saneamiento en seco, alcachofas de ducha con ahorro de agua, lavadoras con ahorro de agua, equipo de riego con ahorro de agua).
- Reducir el riesgo de contaminación en la fase de uso. Evitar o minimizar el uso de sustancias en productos que pudieran ser dañinos al contacto con el agua (por ejemplo, en jabones o champú).

Medidas de compensación de la huella hídrica:

- Compensación medioambiental. Invertir en una mejor gestión y sostenibilidad del uso del agua en la zona de captación donde se localice la huella hídrica (residual) de la empresa.
- Compensación social. Invertir en un uso equitativo del agua en la zona de captación donde se localice la huella hídrica (residual) de la empresa, por ejemplo, con la mitigación de la pobreza y un acceso mejorado al suministro y saneamiento de agua.
- Compensación económica. Compensar a los usuarios aguas abajo que sean afectados por un uso intensivo aguas arriba en la zona de captación donde se localice la huella hídrica (residual) de la empresa.

Transparencia del producto y de la empresa

- Ajustarse a las definiciones y métodos compartidos. Promover y adoptar la norma global sobre contabilidad y evaluación de la huella hídrica, como se ha presentado en este manual.
- Promover la contabilidad hídrica a lo largo de la cadena de suministro total. Cooperar con los demás agentes de la cadena de suministro para ser capaces de establecer cálculos completos para los productos finales.
- Informar sobre la huella hídrica de la empresa. Informar sobre los esfuerzos, metas y progresos referentes al agua en el informe anual de sostenibilidad, incluyendo la cadena de suministro.
- Divulgar la huella hídrica del producto. Divulgar la información relevante por medio de informes o internet.
- Etiquetar el uso del agua en el producto. Lo mismo que en el caso anterior, pero, en este caso, informando en una etiqueta, ya sea aparte o incluida en una mayor.
- Realizar la certificación de agua de la empresa. Promover y ayudar a establecer un esquema de certificación del agua y ajustarse a él.

Compromiso:

- Establecer la comunicación con el consumidor y el compromiso con las organizaciones de la sociedad civil.
  - Realizar un trabajo proactivo con gobiernos para desarrollar normas y legislación relevantes.
-

## 5.5. Agricultores

La agricultura es un tipo de negocio y, como tal, se aplica el mismo enfoque que en el apartado anterior. Para los ganaderos, la mayor preocupación debería ser la huella hídrica del pienso que compran o que producen ellos mismos. Para los agricultores existe una serie de opciones para reducir la huella hídrica, como se muestra en la [tabla 5.4](#). La ventaja de reducir las huellas hídricas verdes por unidad de cultivo en la agricultura de secano es que la producción total de suelo de secano aumenta. Como consecuencia de este aumento, la cantidad que se necesita producir en otro lugar es menor, reduciendo las demandas de suelo y de recursos hídricos (verdes y azules) en otros lugares. Reducir la huella hídrica verde por tonelada de cultivo en un lugar puede suponer una disminución de la huella hídrica azul del cultivo como un todo.

Tabla 5.4. **Opciones disponibles a los agricultores para reducir su huella hídrica**

---

Reducir la huella hídrica verde de los cultivos:

- Aumentar la productividad del suelo (rendimiento, t/ha) en agricultura de secano mejorando las prácticas agrícolas; como la lluvia en el suelo se mantiene constante, su productividad (t/m<sup>3</sup>) aumentará y la huella hídrica verde (m<sup>3</sup>/t) disminuirá.
- Usar la cobertura del suelo para reducir la evaporación de la capa superficial.

Reducir la huella hídrica azul de los cultivos:

- Cambiar a una técnica de riego con menor pérdida por evaporación.
- Elegir un nuevo cultivo u otra variedad que se adapte mejor al clima regional que necesite menos riego.
- Aumentar la productividad del agua azul (t/m<sup>3</sup>) en vez de maximizar la productividad del suelo (rendimiento, t/ha).
- Mejorar el calendario de riego optimizando el momento y el volumen de aplicación.
- Regar menos (déficit de riego o riego suplementario) o no regar nada.
- Reducir las pérdidas por evaporación del almacenaje de agua en reservas y desde los sistemas de distribución de agua.

Reducir la huella hídrica gris de los cultivos:

- Aplicar menos sustancias químicas (fertilizantes artificiales, pesticidas) o no aplicarlas en absoluto, practicando, por ejemplo, la agricultura orgánica.
  - Aplicar fertilizantes o abonos de forma que se facilite la absorción por parte de las plantas y, de ese modo, se reduzcan la lixiviación y la escorrentía.
  - Optimizar el volumen y la técnica de adición de sustancias químicas para que se precise de menor cantidad o haya menos lixiviación o escorrentía.
-

En la agricultura de regadío, cambiar las técnicas y la filosofía de riego pueden reducir, en gran medida, la huella hídrica azul. El uso de riego por goteo en vez de por aspersión o por surcos puede reducir bastante la evaporación. Además, la estrategia de la agricultura tradicional para optimizar el rendimiento (t/ha) suele conducir a un uso innecesario del agua de riego. En vez de aplicar riego total, sería más apropiado elegir un déficit de riego, una filosofía cuyo objetivo sea obtener la máxima productividad del agua en el cultivo ( $t/m^3$ ) en vez del máximo rendimiento (t/ha). En el déficit de riego, el agua se aplica durante las etapas de crecimiento sensibles a la sequía; fuera de estos períodos, el agua se limita o incluso es innecesaria la lluvia proporciona un suministro mínimo de agua. Otra alternativa es la conocida como riego suplementario, que ahorra incluso más agua. En esta estrategia, se añaden pequeñas cantidades de agua a los cultivos que sean principalmente de secano en períodos en los que el agua de lluvia no pueda aportar suficiente humedad para el cultivo de plantas y, de ese modo, mejorar y estabilizar el rendimiento.

La huella hídrica gris en las operaciones del agricultor puede reducirse en gran medida implementando la agricultura orgánica, que excluye o limita de forma estricta el uso de fertilizantes artificiales, pesticidas y otras sustancias químicas.

## 5.6. Inversores

No abordar el tema de la huella hídrica de una empresa ni formular para ella respuestas apropiadas (véase el apartado anterior) podría conllevar una serie de riesgos para la organización (Levinson *et al.*, 2008; Pegram *et al.*, 2009; Morrison *et al.*, 2009, 2010; Barton, 2010). En primer lugar, nos encontramos con el riesgo físico de las empresas que podrían encontrar escasez de agua, lo que afectaría a su cadena de suministro o a las operaciones propias. En segundo lugar, la imagen corporativa de la empresa podría verse afectada por una situación en la que se planteen cuestiones al público y a los medios de comunicación sobre si la aborda cuestiones sobre el uso sostenible y equitativo del agua. Un riesgo para la reputación de la empresa pueden ser los problemas relacionados con la escasez o la contaminación del agua en la cadena de suministro o las operaciones de la empresa, así como la falta de estrategias mitigadoras. En tercer lugar, a causa del deseo de conseguir un uso más sostenible y equitativo de los recursos escasos de agua dulce, sin duda aumentará la intervención y la regulación gubernamental en el área sobre el uso del agua. La incertidumbre sobre el control de regulación futuro constituye un riesgo para las empresas y es preferible anticiparse que ignorarlo.

Los tres riesgos descritos anteriormente podrían traducirse en un riesgo financiero en términos del aumento de costes o la reducción de ingresos. Por tanto, los inversores

están cada vez más interesados en la divulgación de información sobre los riesgos relativos al agua de la empresa en la que invierten.

El riesgo se puede convertir en oportunidad para aquellas empresas que respondan de manera proactiva a los desafíos que suponen la escasez global de agua. Los pioneros en crear la transparencia del producto antes que los demás, que formulen objetivos específicos y cuantificables con respecto a la reducción de la huella hídrica (con especial atención a las áreas donde el problema de la escasez de agua y contaminación sea más crítico) y que puedan demostrar mejoras reales, pueden transformar esto en una ventaja competitiva.

Por último, además de la necesidad de abordar los riesgos y las oportunidades para aprovecharse de una estrategia proactiva, es necesario abordar los problemas relativos a la escasez y la contaminación de agua dulce como parte de la responsabilidad social de la empresa. Actualmente, las preocupaciones medioambientales de las empresas están cada vez más relacionadas con problemas energéticos. Uno de los grandes desafíos medioambientales, junto con el calentamiento global, es la escasez de agua dulce y, por tanto, parece lógico aumentar la atención en este campo.

## 5.7. Gobiernos

Desarrollar e implementar buenas políticas sobre el agua es solo una parte de la buena gobernanza. Esto también requiere que los gobiernos traduzcan el objetivo del uso sostenible de los recursos hídricos a lo que supone para otras políticas. La intención de los gobiernos de promover el uso de los recursos de agua dulce de forma sostenible para el medio ambiente y de forma equitativa desde el punto de vista social y económicamente eficiente, necesita que se refleje no solo en la política sobre el agua de dicho gobierno, sino también en las políticas sobre medio ambiente, agricultura, industria, energía, comercio y relaciones internacionales. La coherencia entre las políticas de sectores diferentes es muy importante, ya que la política de aguas, en su significado más estricto y convencional, no tiene impacto si se encuentra descompensada por una política agrícola, por ejemplo, que lleve al agravamiento de la demanda hídrica en un área con escasez.

Además, se necesita coherencia a diferentes niveles de gobierno; desde el local al nacional, siendo el internacional también crucial. Una política nacional que se encargue de implantar estructuras adecuadas de cobro por el uso hídrico en agricultura es vulnerable a fallos si en un contexto internacional, no se acuerda que el resto de países vayan a adoptar medidas similares, ya que habría riesgo de competencia desleal. Otro ejemplo es que, para alcanzar la transparencia de la producción también se necesita la

cooperación internacional, ya que muchas cadenas de suministro de materias primas que utilizan mucha agua son internacionales.

Tradicionalmente, los países formulan planes nacionales de recursos hídricos con el objetivo de satisfacer las necesidades de los usuarios. Aunque hoy en día los países consideren opciones para reducir la demanda de agua además de las opciones para aumentar el suministro, por lo general no incluyen la dimensión global de la gestión del agua. En este sentido, no consideran de manera explícita ninguna opción para ahorrar agua por medio de la importación de productos que requieren abundante agua. Además, si observamos solamente el uso de agua en su propio país, la mayoría de los gobiernos tiene un punto ciego en lo referente a la sostenibilidad del consumo nacional. De hecho, muchos países han externalizado su huella hídrica de manera significativa sin pararse a observar si los productos importados están relacionados con la escasez o la contaminación de agua en los países productores. Los gobiernos pueden y deberían comprometerse con los consumidores y las empresas para trabajar para conseguir productos finales sostenibles. La contabilidad de la huella hídrica nacional debería ser un componente normativo en las estadísticas nacionales de agua y proporcionar una base para formular un plan nacional de agua, así como de cuencas hidrográficas que sean coherentes con las políticas nacionales referentes al medio ambiente, la agricultura, la industria, la energía, el comercio, las relaciones internacionales o la cooperación internacional.

Los cálculos de la huella hídrica y el comercio de agua virtual pueden suponer una base de datos importante para la formulación de varios tipos de políticas gubernamentales como: de agua nacional o estatal, de cuencas hidrográficas, de agua local, medioambiental, agrícola, industrial/económica, energética, comercial, internacional y de cooperación al desarrollo ([tabla 5.5](#)). Como la organización gubernamental puede observarse como un negocio en sí, otro aspecto a tener en cuenta por parte de los gobiernos es considerar la posibilidad de reducir su propia huella hídrica.

Los elementos clave en una estrategia gubernamental cuyo fin sea la disminución de la huella hídrica son: concienciar sobre el agua tanto a consumidores como a productores, promover tecnologías de ahorro de agua en todos los sectores de la economía, reestructurar los mecanismos de cobro por el uso de agua de forma que los costes totales de los insumos de agua lleguen a formar parte del coste total de las materias primas, promover la transparencia del producto a lo largo de las cadenas de suministro y reestructurar las economías basadas en suministros insostenibles de agua. Estos son todos los desafíos que requiere la cooperación intersectorial y en muchos casos, también la internacional. Como las responsabilidades políticas están fragmentadas en diferentes niveles y campos, la verdadera tarea es la de descubrir qué medidas hay que tomar en los diferentes niveles y campos de gobernanza con el fin de facilitar acuerdos de acción necesarios.

**Tabla 5.5. Opciones de los gobiernos para reducir la huella hídrica y mitigar sus impactos**

Política del agua a nivel nacional, de cuenca hidrográfica y local:

- Adoptar el esquema de contabilidad de la huella hídrica nacional para ampliar la base de conocimiento para tomar decisiones fundamentadas. Usar información sobre la huella hídrica y el comercio de agua virtual para respaldar la formulación de planes tanto nacionales como de cuenca hidrográfica.
- Incrementar la eficiencia de uso del agua a nivel del usuario en todos los sectores, promoviendo técnicas que aumenten la productividad del agua y, por tanto, reduzcan las huellas hídricas por unidad de producción.
- Incrementar el uso eficiente a nivel de la cuenca hidrográfica, destinando los recursos hídricos a actividades con mayor beneficio social.
- Promover la asignación de recursos hídricos domésticos disponibles de forma que el país produzca bienes para los que tiene una ventaja comparativa en relación con otros países.
- Para el ahorro de agua a nivel nacional: disminuir las exportaciones de agua virtual, aumentar las importaciones de agua virtual y reducir la huella hídrica de la nación (Allan, 2003; Chapagain *et al.*, 2006a).
- Para reducir la dependencia nacional de agua: reducir la huella hídrica externa.

Política medioambiental nacional:

- Para la producción sostenible: plantearse objetivos de reducción sobre la huella hídrica dentro de la nación, que serán específicos por zona de captación, centrarse en los puntos críticos con mayores impactos y traducir los objetivos de las zonas de captación a planes operacionales que incluyan los sectores relevantes.
- Para el consumo sostenible: establecer metas relacionadas con la reducción de la huella hídrica interna y externa del consumo nacional, centrarse en los puntos críticos y traducir las metas a categorías de producto y sectores económicos específicos.
- Traducir los objetivos de protección de la naturaleza y la preservación de la biodiversidad en necesidades ambientales de agua azul y verde e integrar necesidades ambientales del agua a la planificación de la cuenca hidrográfica (Dyson *et al.*, 2003; Acreman y Dumbar, 2004; Poff *et al.*, 2010).
- Comprometerse con organizaciones de consumidores de la sociedad civil, medio ambiente, etc., ayudándoles a la sensibilización de consumidores, agricultores y dueños de empresas.
- Fijar objetivos relacionados con la reducción de aguas residuales en toda la cadena alimentaria (desde el campo hasta las pérdidas de alimentos en los hogares) y plantear medidas apropiadas. Estas pérdidas de alimentos equivalen a las pérdidas de agua.

Política agrícola nacional:

- Incluir el objetivo de un uso sostenible de los recursos hídricos para uso doméstico creando políticas nacionales de seguridad alimentaria.
- No subvencionar la agricultura intensiva en áreas con escasez de agua.

- Fomentar los cultivos apropiados y adaptarlos al clima local para reducir la demanda de riego.
- Apoyar las inversiones en sistemas y técnicas de riego que ahorren agua.
- Fomentar que los agricultores eviten o reduzcan el uso de fertilizantes, pesticidas e insecticidas o que los apliquen de mejor manera para que menos sustancias químicas lleguen al sistema de agua.
- Fomentar la disminución de la huella hídrica en agricultura (véase la [tabla 5.4](#)). Esto se puede llevar a cabo de maneras diferentes o complementarias: normativas o legislación (sobre los períodos, los volúmenes y las técnicas de riego y de aplicación de productos químicos, por ejemplo), licencias de uso del agua, cuotas, tarificación del coste total del agua, permisos de uso del agua negociables, subsidios para técnicas de riego específicas, mediciones obligatorias de agua y toma de conciencia.

#### Política industrial/económica nacional:

- Fomentar la transparencia del producto. Implementarla por medio de acuerdos voluntarios por sector o por legislación.
- Traducir metas nacionales sobre la disminución de la huella hídrica en metas específicas de reducción para productos, productores o sectores e implementarlas a través de la legislación o incentivos económicos (impuestos sobre la huella hídrica o subsidios para medidas específicas de reducción de la huella hídrica).

#### Política de energía nacional:

- Estudiar las implicaciones de los escenarios energéticos de demanda de agua, con especial atención a la huella hídrica de la bioenergía.
- Armonización de las políticas de agua y energía para que las políticas energéticas no aumenten la huella hídrica del sector energético y que las políticas del agua no incrementen el uso de energía ni la huella de carbono del sector hídrico.

#### Política de comercio nacional:

- Asegurar la coherencia entre el comercio y las políticas del agua. Reducir las exportaciones de productos de bajo valor que hagan un uso intensivo del agua en zonas con escasez hídrica (e incrementar las importaciones). Utilizar la abundancia de agua local como factor para fomentar la producción de bienes de uso intensivo de agua, con el fin de exportarlas.
- Reducir la dependencia de las importaciones de agua virtual (es decir, reducir la huella hídrica externa) si fuese necesario, desde el punto de vista de la seguridad nacional.
- Fomentar la transparencia de los productos comercializados para que la huella hídrica de los productos pueda ser rastreada.

#### Política de relaciones internacionales y cooperación internacional:

- Fomentar acuerdos internacionales sobre la reducción de la huella hídrica mundial bajo la forma de un protocolo de licencia de la huella hídrica internacional, por ejemplo, estableciendo huellas hídricas máximas para cada país (Hoekstra, 2006, 2010a; Hoekstra y Chapagain, 2008; Verkerk *et al.*, 2008).

- Promover un acuerdo internacional sobre la transparencia de los productos (Hoekstra, 2010a, 2010b).
- Promover un protocolo internacional de tarificación del agua (Hoekstra, 2006, 2010a; Hoekstra y Chapagain, 2008; Verkerk *et al.*, 2008).
- Colaborar con gobiernos y otros agentes en países en desarrollo para reducir las huellas hídricas, centrarse en puntos críticos mundiales donde los problemas de escasez y contaminación sean más acusados y donde la nación contribuya con su propia huella hídrica externa.

Reducir la huella hídrica de organizaciones y servicios gubernamentales:

- Véanse las opciones dadas para empresas ([tabla 5.3](#)).
  - Incluir la huella hídrica de los productos como criterio de la política de sostenibilidad de las licitaciones del gobierno.
-

# 6

## Limitaciones

La huella hídrica es un concepto relativamente nuevo y su evaluación, una nueva herramienta. Como suele ser el caso de los conceptos nuevos y herramientas prometedoras y que responden a la imaginación de las personas, las expectativas no son siempre realistas. Como los recursos mundiales de agua dulce son limitados, la huella hídrica es un indicador muy útil, ya que muestra cuándo, dónde y cómo los consumidores, los productores y los procesos individuales y los productos reivindican este recurso limitado. La evaluación de las huellas hídricas es una herramienta útil para cuantificar y localizarlas, para evaluar si son sostenibles y para identificar las opciones para reducirlas donde sea necesario. Dicho esto, la huella hídrica no es más que un indicador importante en la extensa temática de asignación y uso sostenible, justo y eficiente de los recursos naturales. Obviamente, es necesario complementarla con una amplia variedad de otros indicadores importantes para que tenga lugar un entendimiento más integrado.

De modo similar, la evaluación de la huella hídrica no es más que una herramienta para entender las complejas relaciones entre las sociedades y sus ambientes. Se centra en el uso de los recursos de agua dulce teniendo en cuenta su naturaleza limitada. No aborda problemas de agua que no estén relacionados con la escasez, como las inundaciones o la falta de infraestructuras para un mejor suministro hídrico a comunidades pobres, así como tampoco aborda problemas medioambientales que no estén relacionados con la escasez de dulce.

La evaluación de huella hídrica es una herramienta parcial que ha de ser usada en combinación con otros medios analíticos para proporcionar entendimiento acerca de la gama completa de temas relevantes a la hora de tomar decisiones. La rápida adopción de la huella hídrica como indicador integral de la apropiación de agua dulce por parte de los humanos es muy útil para situar el problema de la escasez de agua dulce en las primeras posiciones de las agendas de gobiernos y empresas, pero

siempre existe el riesgo de una simplificación excesiva. Existe una tendencia, tanto de los gobiernos como de las empresas, para reducir la compleja realidad a un número limitado de indicadores. En el caso de los gobiernos, la mayor parte de la atención se encuentra en un único indicador, el del producto nacional bruto y en las empresas, en el indicador de beneficio. De modo más general, los gobiernos suelen centrarse en un número limitado de indicadores sociales, medioambientales y económicos, en los que el producto nacional bruto es uno de los indicadores económicos. Por lo general, las empresas usan un número limitado de indicadores clave del rendimiento, a menudo categorizados bajo los tres términos personas, planeta y beneficio (el triple resultado, tal como lo propuso Elkington, 1997). La huella hídrica puede verse como otro indicador y añadirlo al panel de legisladores y directores ejecutivos puede ser útil, pero presenta el mismo problema que otros indicadores medioambientales, sociales y económicos muy extendidos: no nos aporta todos los datos, sino que únicamente los reduce a una medida simplista. Los indicadores solo son útiles si se utilizan correctamente.

Las visiones obtenidas del análisis de una huella hídrica siempre deberían combinarse con otras visiones de índole medioambiental, social, institucional, cultural, política y económica antes de tomar decisiones bien fundamentadas y realizar compensaciones relacionadas. Reducir y redistribuir la huella hídrica de la humanidad es un asunto clave en el desarrollo sostenible, pero no es el único. Con el fin de reducir la huella hídrica, es fundamental tener en cuenta todo el resto de factores clave a la hora de plantearnos estrategias sobre cómo aplicar diferentes medios técnicos, institucionales, políticos, comunicativos, económicos y legales.

Para entender mejor lo que es y lo que no es la evaluación de la huella hídrica, hay que considerar la siguiente lista (no exhaustiva) de limitaciones:

- Se centra en analizar el uso de agua dulce desde el punto de vista de recursos limitados; no se abordan otros asuntos medioambientales como el cambio climático, la extracción de metales, la fragmentación de hábitats, la disponibilidad de terreno limitada o la degradación del suelo, como tampoco abarca asuntos sociales ni económicos como son la pobreza, el empleo o el bienestar. La evaluación de la huella hídrica aborda temas de índole medioambiental, social y económico en la medida en que el uso de los recursos de agua dulce afecte a la biodiversidad, a la salud, al bienestar o a una distribución justa. Obviamente, cuando exista un interés en asuntos más generales medioambientales, sociales y económicos, muchos más factores aparte del agua dulce desempeñan un papel importante. Hay que reconocer que reducir la huella hídrica humana donde sea necesario es solo un reto más dentro de un contexto más amplio.
- Aborda asuntos de escasez y contaminación de agua dulce, pero no el tema de las inundaciones, como tampoco el de las personas que no tienen acceso a suministros apropiados de agua limpia, puesto que no se trata de un problema

de escasez, sino de pobreza. Además, la huella hídrica se refiere al agua dulce y no al uso y a la contaminación del agua del mar. La evaluación de la huella hídrica está limitada a aquellas actividades humanas que tengan impacto en la cantidad o la calidad de agua dulce dentro de una zona de captación o cuenca hidrográfica.

- Es un indicador del uso de agua dulce que tiene en cuenta su consumo y su contaminación. Esto es interesante desde una perspectiva de zona de captación, ya que la disponibilidad de agua dulce en ella es limitada. Las huellas hídricas verde, azul y gris muestran cómo las actividades humanas y los productos reivindican estos recursos limitados de agua dulce. Otro indicador útil de agua dulce es la clásica extracción de agua azul. Es interesante conocerla, no tanto desde el punto de vista de una zona de captación, sino desde el de un usuario de agua, ya que es importante conocer todos los componentes de su balance hídrico.
- Las empresas muestran un creciente interés en su riesgo de agua (Levinson *et al.*, 2008; Pegram *et al.*, 2009; Morrison *et al.*, 2009, 2010; Barton, 2010). La evaluación de huella hídrica de una empresa ayuda a entender parte de este riesgo mostrando qué componentes de la misma son insostenibles, sin embargo, una evaluación de este tipo no es lo mismo que una evaluación exhaustiva de riesgos. Los componentes insostenibles en la huella hídrica de una empresa suponen un riesgo físico, de reputación y regulatorio para la empresa, afectando la licencia social de la empresa para operar, pero si el riesgo de agua es el centro de atención, una evaluación de la huella hídrica es insuficiente.
- Los gobiernos tienen una gran responsabilidad de legislar sobre los recursos públicos. Durante las últimas décadas se ha ido reconociendo cada vez más que los enfoques integrados son importantes, donde se considera esencial la consistencia y la coherencia en ámbitos políticos diferentes. En el ámbito de la gestión del agua, este enfoque suele conocerse como gestión integrada de recursos hídricos (GIRH) y de forma alternativa, cuando existe una atención específica en la zona de captación, es conocido como gestión integrada de cuencas hidrográficas (GICH) (GWP, 2000; GWP y RIOCI, 2009; UNESCO, 2009). GIRH y GICH son dos conceptos muy amplios que abarcan cuestiones sustanciales (¿cómo es un buen plan integral?), cuestiones de organización (¿cómo desarrollamos e implementamos dicho plan?) y cuestiones institucionales (¿cómo creamos condiciones propicias adecuadas?).

Está claro que la clave de la evaluación de la huella hídrica no es reemplazar la GIRH o la GICH, sino que ha de ser vista como una herramienta analítica que puede ayudar a ampliar el conocimiento base de estos tipos de gestión. La evaluación de huella hídrica amplía el alcance tradicional en el análisis de escasez hídrica introduciendo la cadena de suministro e incluyendo las dimensiones de

escasez y contaminación de agua en el comercio. De este modo, puede contribuir a tomar decisiones mejor fundamentadas en el contexto de la gestión hídrica.

Por último, cabe mencionar que el concepto de la huella hídrica, tras haber existido en el ámbito académico desde 2002, no se introdujo en el mundo de los negocios, los gobiernos y la sociedad civil hasta la segunda mitad de 2007. Esto significa que la experiencia práctica con el concepto es limitada. Por tanto, es difícil encontrar ilustraciones prácticas de evaluaciones completas de huella hídrica. Así, la mayor parte de los estudios han puesto el acento en la fase de contabilidad. Aparte de los estudios de huella hídrica (Hoekstra y Chapagain, 2007a, 2008), se han llevado a cabo una gran cantidad de estos en diversos contextos geográficos (véase un resumen en Kuiper *et al.*, 2010). El Gobierno de España ha sido el primero en adoptar formalmente el concepto de la huella hídrica al solicitar el análisis de la misma a nivel de la cuenca hidrográfica para la preparación de los planes de gestión de las cuencas hidrográficas (Boletín Oficial del Estado, 2008; Garrido *et al.*, 2010).

Muchas empresas ya han analizado las huellas hídricas de algunos de sus productos, pero solo unas pocas han alcanzado el nivel en el que se pueden divulgar los resultados (SABMiller y WWF-UK, 2009; SABMiller *et al.*, 2010; TCCC y TNC, 2010; IFC *et al.*, 2010; Chapagain y Orr, 2010). Pocos estudios contienen una evaluación completa de la huella hídrica tal como se describe en el presente manual. Se espera que, a medida que vayan apareciendo más aplicaciones prácticas, se irán proporcionando más datos para pulir los procedimientos y métodos, tal como se describen aquí.

# 7

## Desafíos futuros

### 7.1. Metodología y datos de la evaluación de la huella hídrica

A la hora de realizar una evaluación de huella hídrica surgen bastantes cuestiones prácticas. En muchos casos, este manual orientará de manera suficiente, pero en otros, existe una clara necesidad de un desarrollo posterior de directrices prácticas. Una de las cuestiones principales será, normalmente, cómo manejar la falta de información necesaria. ¿Qué datos predeterminados tendríamos que tener en cuenta en estas circunstancias y qué simplificaciones pueden hacerse? Por tanto, un desafío principal es el de desarrollar unas directrices más detalladas en cuanto a qué datos predeterminados pueden usarse cuando no existan estimaciones locales precisas. En este contexto, es importante desarrollar una base de datos con estimaciones predeterminadas sobre la huella hídrica para una gran variedad de procesos y productos, diferenciando entre regiones de producción como, por ejemplo, países, lo que podría ser muy útil a la hora de evaluar la huella hídrica de los consumidores y productores que, aunque saben lo que compran, muchas veces no conocen los detalles importantes de las cadenas de producción y suministro de lo que adquieren.

Una cuestión práctica de la contabilidad de huella hídrica es el problema del truncamiento, del que ya hemos hablado en el [apartado 2.2](#). La cuestión es saber qué debería incluirse y qué puede excluirse del análisis. A la hora de estimar la huella hídrica, si se aplica un alcance muy amplio del análisis, podemos descubrir que algunos componentes no contribuyen de manera significativa al cálculo la huella hídrica total del producto y que una búsqueda posterior continuada de la cadena de suministro no genera un valor adicional. Es necesario buscar más experiencias prácticas relativas a la contabilidad de la huella hídrica de un producto para que, así, se puedan desarrollar directrices prácticas sobre lo que puede excluirse (por regla general) del análisis. También será

importante a la hora de saber qué productos finales o de entrada pueden excluirse del análisis de la huella hídrica de un consumidor o empresa, respectivamente.

Un tema al que no se ha prestado todavía demasiada atención es el hecho de cómo manejar la variabilidad y los cambios a largo plazo. Muchos tipos de uso de agua varían a lo largo de los años, aunque no todos. Pensemos, por ejemplo, en el uso del agua de riego en agricultura, que depende del patrón de lluvias en un año determinado (Garrido *et al.*, 2010). Además, la productividad hídrica puede variar de año en año debido a todo tipo de factores (incluyendo aquellos que no tienen nada que ver con el agua), lo que produce variaciones de huella hídrica a la larga. De esta forma, los cambios en la huella hídrica de un año a otro no pueden ser interpretados como una mejora o empeoramiento estructural del uso del agua. Por ese motivo, si se presentan medias de varios años, la información sobre la huella hídrica mostrará generalmente una visión mucho más significativa. La pregunta que surge de esto es la siguiente: ¿qué podemos tomar como un período de análisis? ¿cinco, diez o más años? y ¿cuándo será posible analizar una tendencia a largo plazo? Además, posiblemente se verá que algunos tipos de datos iniciales pueden ser considerados en un período amplio de tiempo (por ejemplo, 30 años como en la información climática), mientras que otro tipo de información puede considerarse anualmente o como una media de solo 5 años. Sería útil crear directrices en este campo aceptando que, al fin y al cabo, las decisiones también dependerán del propósito del análisis.

Con relación al tema de la variabilidad, pero más extenso, es el tema de la incertidumbre. La incertidumbre en los datos utilizados para la contabilidad de la huella hídrica puede ser muy importante, lo que significa que hay que interpretar los resultados de forma muy cuidadosa. Es muy recomendable realizar un análisis de la incertidumbre y de la sensibilidad, aunque a veces, la falta de tiempo no permite hacerlo de forma detallada. Aunque actualmente no existan estudios sobre la incertidumbre, sería muy útil al menos tener indicaciones aproximadas que muestren la magnitud de estas en varios tipos de contabilidades de la huella hídrica a los que poder acudir.

En cuanto al detalle en la contabilidad de la huella hídrica, es posible encontrar que la diferencia entre las huellas hídricas verde, azul y gris es muy precaria. Si se quisiera, se podría dividir la contabilidad de huella hídrica azul en cálculos de huella hídrica superficial, huella subterránea renovable y huella subterránea fósil, por ejemplo (véase el [apartado 3.3.1](#)). La huella hídrica gris puede dividirse de acuerdo con los cálculos de las huellas relacionadas con contaminantes específicos (véase el [apartado 3.3.3](#)).

En el caso de la huella hídrica gris, desarrollar directrices sobre cómo definir concentraciones naturales y máximas es un desafío: ambas deberían ser específicas para cada zona de captación, pero en muchos casos, ese tipo de información no está disponible. Las directrices podrían sugerir la adopción de una concentración natural igual a cero para una lista específica de sustancias químicas y recomendar las suposiciones que habría que hacer en el caso de otras sustancias químicas en el caso de que los valores de cada

zona de captación no estén disponibles. Además, un asunto que tiene que aclararse es si habría que considerar, por ejemplo, medias de concentración diarias o mensuales. Las concentraciones máximas permitidas para la calidad del agua en el ambiente no están disponibles para todas las sustancias; en tal caso, las directrices deberían estar disponibles para aconsejar los valores predeterminados que deberían usarse.

Una cuestión que se plantea a la hora de medir la huella hídrica azul es qué resolución y qué escala son las mejores para aplicar. ¿Qué hacer cuando la extracción de agua se hace en un lugar y regresa a otro situado aguas abajo? Según la definición, la huella hídrica azul se refiere al uso consuntivo del agua: a la evapotranspiración, a la incorporación al producto o al agua que no regresa a la misma zona de captación de la que fue extraída. La escala de análisis depende, obviamente, de si el uso del flujo de aguas abajo de la extracción es consuntivo o no. Puede que haya casos dudosos en que a nivel local se considere como uso consuntivo y a una mayor escala existe retorno, por lo que se considere como no consuntivo. Todavía queda por determinar dónde trazar la línea, que se hará cuando se realicen más estudios y tras haber encontrado buenos argumentos sobre una mejor escala.

Otra cuestión es qué hacer cuando se extrae agua subterránea y, tras usarla, se devuelve al agua dulce superficial. Cuando el agua azul (incluyendo tanto la subterránea como la superficial) se considere una categoría, este tipo de interferencia no se reflejará en la huella hídrica azul. Lo anterior no es un problema en muchos casos, pero en estudios más detallados sería conveniente distinguir entre la huella hídrica azul subterránea y la superficial. Además, en los casos del agua subterránea, es crucial diferenciar entre agua subterránea renovable y fósil.

Una mejora interesante es el uso de la teledetección para calcular las huellas hídricas verde y azul en agricultura con una resolución espaciotemporal muy elevada (Zwart *et al.*, 2010; Romaguera *et al.*, 2010), pero se necesita más investigación para validar este enfoque y ponerlo en práctica.

Se necesita investigar más sobre la cuantificación del caudal mínimo ecológico ([apéndice V](#)) y las necesidades de agua verde de los ecosistemas ([cuadro 4.3](#)) de cada zona de captación, ya que estos datos son clave a la hora de analizar la sostenibilidad de las huellas hídricas azul y verde de cada zona de captación, respectivamente. Además, se necesita más investigación en relación con la cuantificación de la reducción máxima permitida a nivel de aguas subterráneas y de lagos ([cuadro 4.5](#)) de acuerdo con el contexto propio de cada caso.

El capítulo sobre el análisis de sostenibilidad de la huella hídrica muestra que es preciso prestar más atención a la definición de los criterios de sostenibilidad, especialmente los criterios de sostenibilidad social y económica ([apartado 4.2.3 a 4.2.4](#)). Asimismo, se ha mostrado que la investigación de impactos primarios y secundarios depende mucho de las decisiones tomadas en cuanto a qué tipo de impactos incluir y

cuáles excluir de la evaluación. El presente manual ofrece pocas directrices sobre los impactos que hay que tener al menos en cuenta y los que tienen menos importancia. Sería conveniente desarrollar más directrices sobre qué tipo de impactos incluir, dependiendo del objeto de análisis.

Por último, es necesario comprender cómo los diferentes tipos de respuesta pueden contribuir a la reducción de las huellas hídricas verde, azul y gris de las diversas actividades, incluyendo las percepciones referentes a la efectividad de los diferentes tipos de acción.

## 7.2. Aplicación de la huella hídrica en diferentes contextos

El número de aplicaciones del concepto de la huella hídrica va en aumento. Como se puede ver en el resumen mostrado en la [tabla 7.1](#), la mayor parte de los estudios se han publicado a partir del 2007. Los diferentes estudios de huella hídrica que se han llevado a cabo se pueden categorizar en globales, nacionales, regionales y a nivel de cuenca hidrográfica, de producto general y de empresa. Pocos estudios se centran en todas las fases de la evaluación de la huella hídrica y casi todos lo hacen mayoritariamente o completamente en la contabilidad de la huella hídrica. El principal desafío en estudios futuros es el de considerar también las fases de evaluación de sostenibilidad y de formulación de respuestas.

Tabla 7.1. Resumen de los estudios de huella hídrica

Estudios globales y supranacionales de la huella hídrica y del comercio del agua virtual	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Global (Hoekstra y Hung, 2002, 2005; Hoekstra, 2003, 2006, 2008b; Chapagain y Hoekstra, 2004, 2008; Hoekstra y Chapagain, 2007a, 2008; Liu <i>et al.</i>, 2009; Siebert y Döll, 2010).</li> <li>• Asia central (Aldaya <i>et al.</i>, 2010c).</li> </ul>
Estudios nacionales de huella hídrica y de comercio de agua virtual	<ul style="list-style-type: none"> <li>• China (Ma <i>et al.</i>, 2006; Liu y Savenije, 2008; Hubacek <i>et al.</i>, 2009; Zhao <i>et al.</i>, 2009).</li> <li>• Alemania (Sonnenberg <i>et al.</i>, 2009).</li> <li>• India (Kumar y Jain, 2007; Kampman <i>et al.</i>, 2008; Verma <i>et al.</i>, 2009).</li> <li>• Indonesia (Bulsink <i>et al.</i>, 2010).</li> <li>• Marruecos (Hoekstra y Chapagain, 2007b).</li> <li>• Holanda (Hoekstra y Chapagain, 2007b; van Oel <i>et al.</i>, 2008, 2009).</li> </ul>

- Rumanía (Ene y Teodosiu, 2009).
  - España (Novo *et al.*, 2009; Aldaya *et al.*, 2010b; Garrido *et al.*, 2010).
  - Túnez (Chahed *et al.*, 2008).
  - Reino Unido (Chapagain y Orr, 2008; Yu *et al.*, 2010).
- Estudios subnacionales de huella hídrica y de comercio de agua virtual
- Provincias chinas (Ma *et al.*, 2006).
  - Ciudad de Pekín (Wang y Wang, 2009).
  - Estados indios (Kampman *et al.*, 2008).
  - Región de la Mancha occidental, España (Aldaya *et al.*, 2010d).
  - Andalucía, España (Dietzenbacher y Velázquez, 2007).
  - Ribera occidental, Palestina (Nazer *et al.*, 2008).
  - Cuenca del Guadiana, España (Aldaya y Llamas, 2008).
  - Bajo Valle del Fraser y cuencas de Okanagan, Canadá (Brown *et al.*, 2009).
  - Cuenca del Nilo, África (Zeitoun *et al.*, 2010).
- Estudios de huella hídrica de productos
- Bioenergía (Gerbens-Leenes *et al.*, 2009a, 2009b; Gerbens-Leenes y Hoekstra, 2009, 2010; Dominguez-Faus *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2009; Galán-del-Castillo y Velázquez, 2010; van Lienden *et al.*, 2010).
  - Café (Chapagain y Hoekstra, 2007; Humbert *et al.*, 2009)
  - Algodón (Chapagain *et al.*, 2006b).
  - Flores (Mekonnen y Hoekstra, 2010b).
  - Jatropha (Jongschaap *et al.*, 2009; Maes *et al.*, 2009; Gerbens-Leenes *et al.*, 2009c; Hoekstra *et al.*, 2009c).
  - Mango (Ridoutt *et al.*, 2010).
  - Maíz (Aldaya *et al.*, 2010a)
  - Carne (Chapagain y Hoekstra, 2003; Galloway *et al.*, 2007; Hoekstra, 2010b).
  - Cebollas (IFC *et al.*, 2010).
  - Papel (van Oel y Hoekstra, 2010).
  - Pasta (Aldaya y Hoekstra, 2010).
  - Pizza (Aldaya y Hoekstra, 2010).
  - Arroz (Chapagain y Hoekstra, 2010).
  - Bebidas analcohólicas (Ercin *et al.*, 2009).
  - Semilla de soja (Aldaya *et al.*, 2010a).
  - Azúcar (Gerbens-Leenes y Hoekstra, 2009).
  - Té (Chapagain y Hoekstra, 2007).

- Tomates (Chapagain y Orr, 2009).
  - Trigo (Liu *et al.*, 2007; Aldaya *et al.*, 2010a; Zwart *et al.*, 2010; Mekonnen y Hoekstra, 2010a).
  - Comida en general (Chapagain y Hoekstra, 2004; Hoekstra y Chapagain, 2008; Hoekstra, 2008c).
- Estudios de huella hídrica de empresas
- Cerveza de SABMiller™ (SABMiller y WWF-UK, 2009; SABMiller *et al.*, 2010).
  - Cola y zumo de naranja de The Coca-Cola Company™ (TCCC y TNC, 2010).
  - Cereales de desayuno de Nestlé™ (Chapagain y Orr, 2010).
  - Caramelos y salsa para pasta de Mars™ (Ridoutt *et al.*, 2009).
- 

### 7.3. Incorporar la huella hídrica a las cuentas e informes existentes sobre agua y medioambiente

Las estadísticas tradicionales sobre el uso del agua (ya sean cálculos nacionales o corporativos) están restringidos sobre todo a la extracción de agua. La base de la información es muy reducida en este sentido, ya que ignora tanto el uso de agua verde y gris como su uso indirecto. En el caso de las cuentas de las empresas, el planteamiento tradicional no da ninguna importancia al consumo de agua y a la contaminación en la cadena de suministro. En el caso de los cálculos nacionales, el enfoque convencional pasa por alto las importaciones y exportaciones de agua virtual, así como el hecho de que parte de la huella hídrica del consumo nacional se encuentre fuera del país. Será necesario empezar a incorporar gradualmente las estadísticas de huella hídrica en las de los gobiernos y hacer que aparezcan también en estadísticas internacionales como las que publican, por ejemplo, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO-AQUASTAT, FAOSTAT), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP-Geo Data Portal), el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP), la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD), la División de Estadísticas de las Naciones Unidas, la Comisión Europea (Eurostat) y el Banco Mundial. Las estadísticas nacionales de huella hídrica ya se incluyeron en un número de publicaciones sobre el estado del mundo (WWE, 2008, 2010; ONU, 2010a). En el caso de las empresas, será necesario empezar a incorporar los cálculos de huella hídrica en los informes corporativos, medioambientales y de sostenibilidad.

## 7.4. Relación de la huella hídrica con los métodos de huella ecológica, energética y de carbono

La huella hídrica es parte de la familia de conceptos de huella. El más antiguo es el de la huella ecológica, introducido por William Rees y Mathis Wackernagel en la década de los 90 del siglo pasado (Rees, 1992; 1996; Rees y Wackernagel, 1994; Wackernagel y Rees, 1996). La huella ecológica mide el uso de espacio bioproductivo disponible y se mide en hectáreas. El concepto de huella de carbono tiene su origen la discusión de la huella ecológica y desde 2005 empezó a utilizarse más (Safire, 2008). Se refiere a la suma de las emisiones de gas de efecto invernadero (GEI) causadas por una organización, evento o producto y se expresa en unidades equivalentes de CO<sub>2</sub>. Aunque el concepto de la huella de carbono es relativamente nuevo, la idea de calcular las emisiones de GEI es mucho más antigua; la primera evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), por ejemplo, data del año 1990. Más antiguos incluso que los conceptos de huella ecológica y de carbono, tenemos los conceptos de energía incorporada y “energía”, aplicados en estudios sobre energía (Odum, 1996; Herendeen, 2004). Estos conceptos se refieren a la energía total utilizada para producir un producto y se expresan en julios.

La huella hídrica se introdujo en el campo de los estudios hídricos en 2002 (Hoekstra, 2003). El término se eligió por analogía con el concepto de huella ecológica, pero las raíces de la huella hídrica se encuentran más bien en los estudios de agua que en los medioambientales. Aunque los conceptos de huella ecológica, hídrica y de carbono y energía incorporada estén estrechamente relacionados, cada uno de ellos tiene su origen específico. Como consecuencia, los métodos para cuantificar los diferentes indicadores muestran tanto las similitudes como las diferencias. Dos diferencias entre la huella ecológica y la hídrica son, por ejemplo, que las primeras se calculan en base a la productividad media global, mientras que las segundas se calculan en base a la productividad local; y que, normalmente las huellas ecológicas no son espacialmente explícitas, mientras que las hídricas sí lo son (Hoekstra, 2009).

Hay que observar los distintos conceptos de huella como indicadores complementarios del uso del capital natural en relación con el consumo humano. Ninguno de los indicadores puede sustituir a otro, simplemente porque cada uno de ellos aporta información diferente. Sería insuficiente fijarse solo en las necesidades del área o solo en las hídricas o energéticas, puesto que del mismo modo que el terreno disponible puede ser un factor crítico en el desarrollo, también pueden serlo el agua dulce y la energía disponibles. Unir varios conceptos de huella y métodos relacionados en un marco conceptual y analítico consistente es uno de los desafíos futuros.

## 7.5. Relación de la huella hídrica con el análisis de los flujos materiales, la modelización *input-output* y el análisis del ciclo de vida

El análisis de flujos materiales (AFM) es un modo de estudiar los flujos de materiales en un sistema bien definido. A escala nacional o regional, el AFM puede utilizarse para estudiar el intercambio de materiales en una economía y entre una economía y el medio natural. En las industrias, el AFM puede usarse para analizar los flujos materiales dentro de una empresa o a lo largo de la cadena de suministro industrial donde están incluidas varias empresas. Cuando nos referimos a un producto en especial, el AFM se refiere al estudio de las entradas (recursos) y salidas (emisiones) a lo largo de los diferentes pasos en el sistema de producción de un producto. El último tipo de análisis de flujo material es similar a la llamada fase de inventario del análisis del ciclo de vida (ACV). El ACV es la investigación y la evaluación de los impactos medioambientales de un producto o servicio determinado y consiste en cuatro fases: objetivo y alcance, inventario de ciclo de vida, evaluación del impacto de ciclo de vida e interpretación (Rebitzer *et al.*, 2004).

Marcos como el AFM, el ACV y la modelización *input-output* consideran el uso de varios tipos de recursos medioambientales y observan los diferentes tipos de impactos en el medio ambiente. Por el contrario, los análisis de la huella ecológica, hídrica, de carbono y de la energía incorporada adoptan la perspectiva de un recurso o impacto en particular. Aunque parezca lógico que las huellas sean precisamente los indicadores típicamente utilizados en el AFM, el ACV y los estudios de *input-output*, los métodos aplicados en estudios de huella y los aplicados en los de AFM, ACV e *input-output* no forman un marco coherente de métodos. Desde una perspectiva hídrica, los estudios de AFM, ACV e *input-output* todavía no incluyen el agua dulce de forma adecuada.

En la comunidad de investigación de *input-output*, existe un creciente interés en incluir el agua (véase, por ejemplo, Dietzenbacher y Velázquez, 2007; Zhao *et al.*, 2009; Wang y Wang, 2009; Yu *et al.*, 2010). Los estudios de huella hídrica pueden aportar información sobre la huella hídrica operacional por sector económico, que son datos de entrada fundamentales para profundizar en los estudios de *input-output* desde el punto de vista medioambiental que pretende incluir el uso del agua dulce.

En la comunidad ACV existe también un creciente interés en la cuestión del agua (Koehler, 2008; Milà i Canals *et al.*, 2009). El objetivo de los estudios de ACV es el de evaluar el impacto medioambiental total de los productos. Hasta hace poco, no se había prestado suficiente atención al uso de agua dulce en los estudios de ACV. Existen dos temas independientes: el primero es que los recursos de agua dulce son limitados, por lo que medir la apropiación de agua dulce observando el consumo y la contaminación del agua en términos de volumen debería ser clave en un estudio de

ACV. Las huellas hídricas verde, azul y gris de un producto son buenos indicadores para la apropiación total de agua dulce. Para este último propósito, la contabilidad de la huella hídrica y el análisis de sostenibilidad pueden usarse en los estudios de ACV como se indica en la [tabla 7.2](#). El cálculo de la huella hídrica de un producto contribuye al inventario del ciclo de vida del producto; el análisis de sostenibilidad de huella hídrica contribuye a la evaluación de impacto del ciclo de vida.

Tabla 7.2. **Cómo se pueden usar las evaluaciones de huella hídrica en el ACV**

Fase de evaluación de la huella hídrica	Resultado	Significado físico	Resolución	Fase del ACV
Contabilidad de la huella hídrica del producto ( <a href="#">apartado 3.4</a> ).	Huellas hídricas verde, azul y gris (volumétrico).	Volumen de agua consumida o contaminada por unidad de producto.	Espaciotemporalmente explícita.	Inventario del ciclo de vida.
Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica del producto ( <a href="#">apartado 4.4.1</a> ).	Evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica verde, azul y gris de un producto desde un punto de vista medioambiental, social y económico.	Diferentes variables de impacto cuantificable.	Espaciotemporalmente explícita.	Evaluación de impacto del ciclo de vida.
Agregación de información seleccionada del análisis de sostenibilidad de huella hídrica ( <a href="#">apartado 4.4.2</a> ).	Índices de impacto de las huellas hídricas agregadas.	Ninguno.	Espaciotemporalmente no explícita.	

Fuente: basada en Hoekstra *et al.* (2009b)

Algunos autores de ACV han propuesto usar el término “huella hídrica” para lo que en este manual se denomina “índice de huella hídrica azul” ([apartado 4.4.2](#)). De esta forma, el término huella hídrica dejaría de ser una medida volumétrica de la apropiación de agua dulce para convertirse en un índice del impacto medioambiental local (Pfister *et al.*, 2009; Ridoutt *et al.*, 2009; Ridoutt y Pfister, 2010; Berger y Finkbeiner, 2010). También se ha propuesto ignorar la huella hídrica verde, ya que su impacto sería inexistente (Pfister y Hellweg, 2009). Sin embargo, no tiene sentido

redefinir la huella hídrica desde una perspectiva de gestión de recursos hídricos, ya que requiere información espacial y temporalmente explícita sobre huellas hídricas, tanto en volúmenes reales como en impactos reales.

Los estudios de la huella hídrica promueven dos discursos sobre la gestión de recursos hídricos. En primer lugar, la información sobre la huella hídrica de los productos, consumidores y productores aportan datos sobre el uso y la asignación de agua dulce sostenibles, igualitarios y eficientes. El agua dulce es un bien escaso y su disponibilidad anual es limitada. Es importante saber quién recibe qué porción y cómo se distribuye el agua para los diferentes fines. Por ejemplo, el agua de lluvia que se utiliza para la bioenergía no se puede usar para la comida. En segundo lugar, los cálculos de huella hídrica ayudan a estimar los impactos medioambientales, sociales y económicos a nivel de la zona de captación. La evaluación del impacto medioambiental debería incluir una comparación de cada componente de huella hídrica con el agua disponible en lugares y períodos relevantes (que justifican las necesidades ambientales de agua).

Por ello, la propuesta de usar el término huella hídrica para lo que en este manual se denomina índice de huella hídrica azul resulta muy confuso. Se ha propuesto que la huella hídrica debe incluir el impacto medioambiental porque se haría lo mismo con la huella de carbono, es decir, ponderando los diferentes gases de efecto invernadero y expresándolos en equivalentes de CO<sub>2</sub>, lo que no significa que la huella de carbono refleje los impactos medioambientales de esos gases de efecto invernadero. La huella de carbono es una medida que indica qué cantidad de GEI se deposita en el medio ambiente a causa de la actividad humana. No muestra nada que se pueda denominar “impacto”. Simplemente mide las emisiones, estandarizadas bajo un mismo denominador. La huella de carbono no describe el impacto medioambiental de los gases de efecto invernadero como las temperaturas elevadas y los patrones de evaporación y precipitación modificados. En este sentido, la huella hídrica, la huella de carbono y la ecológica son conceptos similares. La huella de carbono mide las emisiones totales de gases de efecto invernadero; la huella ecológica mide el uso total de espacio bioproductivo; la huella hídrica mide la apropiación total de agua dulce. El uso total del espacio o del agua no refleja los impactos, como tampoco lo hacen las emisiones totales de gas de efecto invernadero. Las huellas muestran la presión de los humanos en el medio ambiente, no los impactos.

# 8

## Conclusión

Este manual contiene la norma global para la definición de los términos de la huella hídrica y el método de evaluación de la misma. La normativa se está desarrollando durante los últimos dos años en el marco de un proceso abierto y transparente facilitado por la Red de la Huella Hídrica. Gracias a la participación de una gran variedad de organizaciones de todo el mundo que han estado trabajando durante todo este tiempo en este concepto, la norma se ha convertido en una norma mundialmente compartida. Cada vez es más importante tener una norma común debido a que la comunicación sobre la huella hídrica y su reducción esperada se verán seriamente amenazadas si los diferentes agentes utilizan una manera diferente de definir y calcular las huellas hídricas.

Se prevé que en futuras actualizaciones del presente manual se refine la norma y especialmente el desarrollo de directrices prácticas. Tras ocho años de desarrollo continuado, el método de contabilidad de la huella hídrica ([capítulo 3](#)) está completamente establecido y ampliamente adoptado, tanto en la comunidad científica como en la práctica. El crecente uso de la huella hídrica en contextos prácticos en los últimos años ha contribuido a la maduración del concepto. Sin embargo, aún quedan retos, entre ellos, el desarrollo de directrices prácticas por categoría de producto y por sector empresarial sobre cómo truncar el análisis (dónde parar el análisis en las cadenas de suministro) y las normas sobre cómo calcular incertidumbres y cómo abordar el tema de la variabilidad temporal a la hora de analizar las tendencias. Además, existe un gran desafío en cuanto al desarrollo de las bases de datos sobre huellas hídricas de proceso típicas (el ingrediente básico para cada análisis) y de herramientas informáticas que faciliten a los expertos el cálculo de la huella hídrica. Atender a las directrices de contabilidad tal como se ha expuesto en el presente manual, supone mucho más trabajo que cuando se podía simplemente utilizar una herramienta informática que guiaba el análisis. Por tanto, el desarrollo de una herramienta de ese tipo junto con las bases de datos es parte del programa de trabajo de la Red de la Huella Hídrica (WFN).

Los capítulos que versan sobre el análisis de sostenibilidad de la huella hídrica y las opciones de respuesta ([capítulos 4 y 5](#)) son menos avanzados que el capítulo sobre la contabilidad de la huella hídrica ([capítulo 3](#)). Esto es debido a que, hasta el momento, se ha prestado mucha menos atención a estas dos primeras fases de la evaluación, tanto en los estudios científicos como en su aplicación práctica. El capítulo sobre el análisis de sostenibilidad de la huella hídrica está limitado a una descripción del procedimiento del análisis de sostenibilidad y a una discusión sobre los principales criterios de sostenibilidad a tener en cuenta. El capítulo sobre las opciones de respuesta es básicamente un catálogo de respuestas que se podrían tomar en cuenta. En este sentido, el manual ofrece un marco de referencia para analizar la sostenibilidad y las opciones de respuesta más que un tratamiento exhaustivo sobre cómo llevar a cabo una evaluación de impacto completa o cómo podrían estudiarse opciones de respuesta específicas más detalladamente en cuanto a sus implicaciones, fortalezas y debilidades. Además, cabe puntualizar que no hay que leer los capítulos sobre el análisis de sostenibilidad y respuesta como si fueran fórmulas que conducen a respuestas sobre qué hacer. Aunque tener una fórmula pueda resultar atractivo para muchos (especialmente en el día a día de las empresas, ya que ayudaría el tener regulaciones claras y no ambiguas) la realidad es que analizar la sostenibilidad y formular respuestas son actividades muy subjetivas y con numerosos valores asociados. El objetivo de los capítulos sobre el análisis de sostenibilidad de la huella hídrica y las políticas de opciones de respuesta es el de ofrecer una orientación aproximada y no una fórmula exhaustiva.

El gran interés que suscita el concepto de la huella hídrica y su metodología comenzó en septiembre de 2007 con una pequeña reunión entre los representantes de la sociedad civil, los sectores empresarial y académico y la ONU. Desde entonces, el interés de aplicar la huella hídrica a la política gubernamental y a la estrategia corporativa ha ido creciendo de manera constante. Esto ha llevado al establecimiento de la WFN el 16 de octubre de 2008. Doce meses después, la red ya tenía 76 miembros de todos los continentes y de todos los sectores: gobierno, empresas, inversores, sociedad civil, instituciones intergubernamentales, consultores, universidades e institutos de investigación. Cuando se finalizó el manuscrito del presente manual, el 16 de octubre de 2010, justamente dos años después de su fundación, la WFN tenía ya 130 miembros. Uno de los principales desafíos es el de mantener un lenguaje común en el campo de la evaluación de la huella hídrica, puesto que los objetivos concretos relacionados con el uso sostenible de los recursos hídricos solo serán transparentes, significativos y efectivos si se formulan con una terminología común y están basados en una metodología de cálculo común, que es precisamente lo que proporciona este manual de evaluación de la huella hídrica. En el futuro se realizarán ajustes y mejoras del presente manual basados en nuevas investigaciones y evoluciones, así como en la experiencia de los profesionales que utilizan el método en sus actividades profesionales.

# Cálculo de la evapotranspiración de agua verde y azul usando el modelo CROPWAT

## La opción NAC en el modelo CROPWAT

La evapotranspiración de agua verde y azul durante el crecimiento del cultivo puede estimarse con el modelo CROPWAT de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2010b). El modelo ofrece dos alternativas. La más simple, aunque no la más precisa, es la opción NAC. En esta se asume que no existen limitaciones hídricas para los cultivos. El modelo calcula:

1. Las necesidades de agua del cultivo (*NAC*) durante el período completo de cultivo en circunstancias climáticas específicas.
2. La precipitación efectiva en ese mismo período.
3. Las necesidades de riego.

Las necesidades de agua del cultivo se refieren al agua necesaria para la evapotranspiración en condiciones de cultivo óptimas, calculadas desde el momento de la plantación hasta la recogida. El término “condiciones óptimas” se refiere a que la cantidad de agua en el suelo se mantiene gracias al agua de lluvia o al riego para que no limite el crecimiento de plantas y la productividad del cultivo. Básicamente las necesidades de agua del cultivo se calculan multiplicando la evapotranspiración de referencia del cultivo ( $ET_0$ ) por el coeficiente del cultivo ( $K_c$ ):

$$NAC = K_c \times ET_0$$

Se asume que las necesidades de agua del cultivo se cumplen totalmente cuando la evapotranspiración real del cultivo ( $ET_c$ ) sea igual a las necesidades de agua del cultivo:

$$ET_c = NAC$$

La evapotranspiración de referencia del cultivo  $ET_0$  es la tasa de evapotranspiración desde una superficie de referencia que no tenga escasez hídrica. El cultivo de referencia es una superficie hipotética con una cubierta extensiva de hierba con características estándares específicas por lo que los únicos factores que afectan la  $ET_0$  son los parámetros climáticos. La  $ET_0$  expresa la capacidad de evaporación de la atmósfera en un lugar y un período del año específicos y no tiene en cuenta ni las características del cultivo ni los factores del suelo. La evapotranspiración real de cultivo en condiciones óptimas se diferencia notablemente de la evaporación de referencia del cultivo, puesto que la cobertura del suelo, sus propiedades y la resistencia aerodinámica del cultivo son diferentes de la hierba usada como referencia. Los efectos de las características que distinguen los campos de cultivo de la hierba se integran en el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ). Este varía a lo largo del período de crecimiento. Los valores de  $K_c$  para diferentes cultivos a lo largo del período de crecimiento se pueden obtener de la literatura disponible (por ejemplo, Allen *et al.*, 1998). De manera alternativa, podemos calcular  $K_c$  como la suma de  $K_{cb}$  y  $K_e$ , donde  $K_{cb}$  es el coeficiente basal de cultivo y  $K_e$  el coeficiente de evaporación del suelo.

El coeficiente basal de cultivo se define como la proporción de la evapotranspiración de cultivo en comparación con la evapotranspiración de referencia ( $ET_c / ET_0$ ) cuando la superficie del suelo esté seca, pero exista una tasa potencial de transpiración, es decir, que el agua no limite la transpiración. Por tanto, la función  $K_{cb} \times ET_0$  representa principalmente el componente de transpiración de  $ET_c$ , pero también incluye un componente difusor de evaporación residual proporcionado por el agua proveniente del suelo que se encuentra por debajo de la superficie seca y por el agua del suelo encontrada por debajo de la vegetación densa.

El coeficiente de evaporación del suelo  $K_e$  describe el componente de evaporación de  $ET_c$ . Cuando la capa superficial del suelo esté mojada, ya sea por lluvia o por riego, el valor de  $K_e$  es máximo; cuando la superficie del suelo esté seca, el valor de  $K_e$  es pequeño o incluso igual a cero cuando no quede agua cerca de la superficie para su evaporación.

Existen diferentes técnicas de riego que humedecen el suelo a distintos niveles. El riego por aspersión, por ejemplo, moja el suelo más que el riego por goteo, lo que supone un mayor grado de  $ET_c$  directamente después del riego. Esto se traducirá en un mayor valor de  $K_c$  y, por tanto también de  $ET_c$ . Sin embargo, el modelo CROPWAT no permite la especificación por separado de  $K_{cb}$  y  $K_e$ ; requiere la especificación del  $K_c$  resultante. Además, no puede hacerse una especificación del  $K_c$  diaria, sino únicamente en tres ocasiones durante el período de crecimiento para que pueda simularse el efecto de las diferentes técnicas de riego en el modelo CROPWAT mediante el ajuste aproximado de  $K_c$  como una función de la técnica usada. Como media,  $K_c$  será mayor cuando las técnicas de riego se apliquen con el fin de mojar el suelo de forma intensiva que cuando se usen técnicas que no mojen mucho la capa superficial del

suelo. Como alternativa a CROPWAT, podemos utilizar AQUACROP (FAO, 2010e), un modelo de cultivo que simula mejor la productividad del cultivo en condiciones de estrés hídrico y que separa  $K_{cb}$  y  $K_e$ .

La precipitación efectiva ( $P_{efec}$ ) es parte de la cantidad total de precipitación que es retenida por el suelo para que esté potencialmente disponible para cumplir la necesidad hídrica del cultivo. Normalmente es menor que la precipitación total porque el cultivo no puede asumir toda el agua de lluvia debido a, por ejemplo, la escorrentía o la percolación (Dastane, 1978). Existen varias maneras de calcular la precipitación efectiva con respecto a la total; Smith (1992) recomienda el método USDA SCS (perteneciente al Servicio de Conservación del Suelo del Departamento de Agricultura de Estados Unidos). Este es uno de los cuatro métodos alternativos de entre los que los usuarios de CROPWAT pueden elegir.

La necesidad de riego ( $NR$ ) es igual a la diferencia entre las necesidades de agua del cultivo y la precipitación efectiva. La necesidad de riego es cero si la precipitación efectiva es mayor que las necesidades de agua del cultivo. Esto es,

$$NR = \text{máx} (0, NAC - P_{efec})$$

Asumimos que las necesidades de riego se cubren totalmente.

La evapotranspiración de agua verde ( $ET_{verde}$ ), es decir, la evapotranspiración de agua de lluvia, puede igualarse al mínimo de la evapotranspiración total de cultivo ( $ET_c$ ) y el agua de lluvia eficiente ( $P_{efec}$ ). La evapotranspiración de agua azul ( $ET_{azul}$ ), es decir, la evapotranspiración en el campo del agua de riego es igual a la evapotranspiración de cultivo total menos la precipitación efectiva ( $P_{efec}$ ) y será igual a cero cuando esta exceda a la evapotranspiración del cultivo:

$$ET_{verde} = \text{mín} (ET_c, P_{efec}) \quad [\text{longitud/tiempo}] \quad (59)$$

$$ET_{azul} = \text{máx} (0, ET_c - P_{efec}) \quad [\text{longitud/tiempo}] \quad (60)$$

Todos los flujos de agua se expresan en mm/día o en mm por período de simulación (por ejemplo, diez días).

## La opción del calendario de riego en el modelo CROPWAT

Podemos estimar la evapotranspiración del agua verde y azul durante el crecimiento del cultivo con el modelo CROPWAT de la FAO (FAO, 2010b). El modelo ofrece dos opciones alternativas. La opción del calendario de riego es más precisa y no mucho

más compleja que la opción NAC, lo que permite la especificación del riego real en el período de crecimiento. El modelo no utiliza el concepto de la precipitación efectiva (como se exponía anteriormente en el caso de la opción NAC), sino que incluye un balance hídrico del suelo que vigila la cantidad de humedad de este a largo plazo utilizando un intervalo de tiempo diario. Es por esto que el modelo requiere datos de entrada sobre el tipo de suelo. La evapotranspiración calculada se denomina  $ET_a$ ; la evapotranspiración ajustada al cultivo puede ser menor que la  $ET_c$  a causa de condiciones que no son las óptimas. La  $ET_a$  se calcula como la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones óptimas ( $ET_c$ ) multiplicada por el coeficiente de estrés hídrico ( $K_s$ ):

$$ET_a = K_s \times ET_c = K_s \times K_c \times ET_0 \quad [\text{longitud/tiempo}] \quad (61)$$

El coeficiente de estrés  $K_s$  describe el efecto del estrés hídrico en la transpiración del cultivo. Para condiciones que limiten el agua del suelo,  $K_s < 1$ ; cuando no exista estrés hídrico,  $K_s = 1$ . Lo mismo que se ha expuesto antes para la opción NAC, se puede aplicar para el coeficiente de cultivo  $K_c$ .

Las condiciones de secano pueden simularse por el modelo cuando se opta por no regar. En una situación de secano, la evapotranspiración del agua verde ( $ET_{verde}$ ) es igual a la evapotranspiración total simulada por el modelo y la evapotranspiración de agua azul ( $ET_{azul}$ ) es cero.

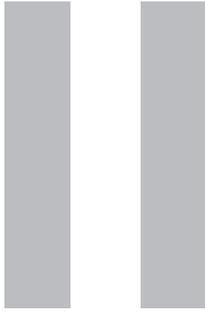
Las condiciones de riego pueden simularse especificando el modo de riego del cultivo. Las diferentes opciones de periodicidad de riego y aplicación pueden seleccionarse dependiendo de la estrategia real de riego. La opción predeterminada, regar solo cuando exista un punto crítico y rellenar el suelo hasta la capacidad del campo, asume que el riego óptimo es aquel cuyos intervalos llegan a su máximo a la vez que se evita cualquier estrés del cultivo. La profundidad media de aplicación del riego por período de riego se relaciona con el método utilizado. Por lo general, en el caso de sistemas de riego de alta frecuencia, como la microirrigación y los pivotes centrales, se aplican cada vez alrededor de 10 mm o menos. En el caso del riego por aspersión, es común una profundidad de riego de 40 mm o más. Tras haber aplicado el modelo con las opciones de riego seleccionadas, el total de agua evapotranspirada ( $ET_a$ ) en el período de cultivo es igual a lo que se denomina “uso hídrico real por cultivo en el resultado del modelo. El agua azul evapotranspirada ( $ET_{azul}$ ) es igual al mínimo de riego neto total y a la necesidad real de riego, como se especifica en el resultado del modelo. El agua verde evapotranspirada ( $ET_{verde}$ ) es igual al total de agua evapotranspirada ( $ET_a$ ) menos el agua azul evapotranspirada ( $ET_{azul}$ ), tal como se ha simulado en la opción de riego seleccionada.

De manera alternativa, se pueden dar dos casos: con y sin riego. En ambos, hay que observar las características del cultivo (tales como la profundidad de las raíces) en condiciones de riego, ya que dichas características pueden diferir considerablemente entre la agricultura de regadío y la de secano. La evapotranspiración de agua verde

en condiciones de riego puede considerarse igual a la evapotranspiración total, tal como ha sido simulado en el caso sin riego. La evapotranspiración de agua azul puede calcularse como la evapotranspiración total, tal como se ha simulado en el caso con riego, menos la evapotranspiración prevista de agua verde.

Nótese que, durante todo el período de crecimiento la evapotranspiración de agua azul es, por lo general, menor al volumen de riego aplicado. La diferencia se refiere al agua de riego que se filtra al agua subterránea o que se desliza por la superficie.





## El cálculo de la huella hídrica de proceso de un cultivo: el ejemplo de la producción de la remolacha azucarera en Valladolid (España)

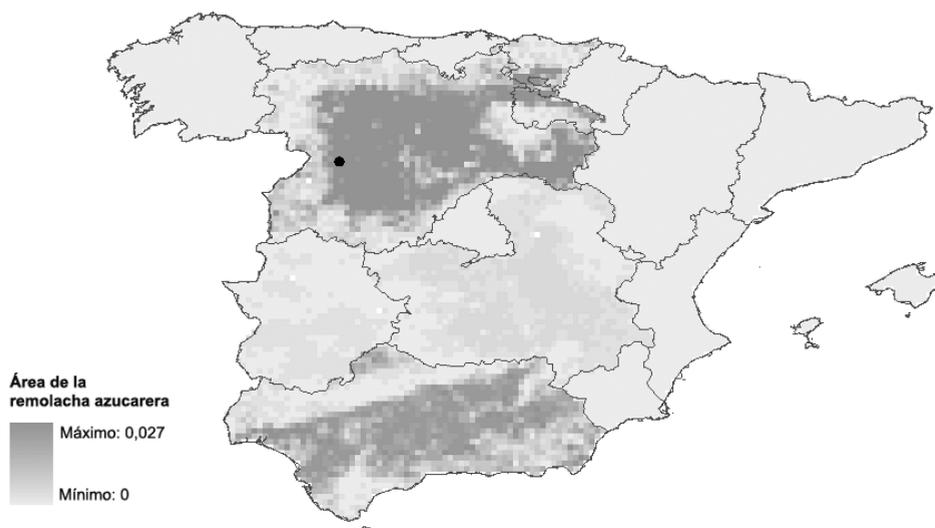
El presente apéndice ofrece un ejemplo sobre cómo estimar las huellas hídricas de proceso verde, azul y gris de la cosecha de un cultivo. Se centra en el caso de la producción de remolacha azucarera (*Beta vulgaris* var. *vulgaris*) en un campo de regadío de una hectárea de extensión en Valladolid (centro-norte de España).

### Componentes verde y azul de la huella hídrica de proceso

En primer lugar, la evapotranspiración de agua verde-azul se ha estimado usando el modelo CROPWAT 8.0 (Allen *et al.*, 1998; FAO, 2010b). Existen dos maneras diferentes para hacerlo: usando la opción de necesidad de agua del cultivo (asumiendo que hay condiciones óptimas) o la opción del calendario de riego (incluyendo la posibilidad para especificar el suministro real de riego en el momento en que tiene lugar). Podemos encontrar en internet un manual exhaustivo para el uso práctico del programa (FAO, 2010b).

En ambos casos, los cálculos se han realizado usando información sobre el clima de las estaciones meteorológicas más cercanas y representativas, situadas en la región productora del cultivo ([figura II.1](#)). Cuando ha sido posible, se han obtenido datos de las estaciones de investigaciones agrícolas y los períodos de siembra a nivel provincial se obtuvieron del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España (MAPA, 2001) ([tabla II.1](#)). En el clima templado del norte de España, la remolacha se siembra en primavera y se recolecta en otoño. En otras áreas más cálidas (Andalucía), la remolacha azucarera es un cultivo de invierno, sembrado en otoño y recolectado en primavera. Los coeficientes y la duración del cultivo, dependiendo de la

región y del clima, se obtuvieron de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (Allen *et al.*, 1998, tablas 11 y 12). Los datos sobre la profundidad de las raíces, el nivel de punto crítico y el factor de respuesta del rendimiento se obtuvieron de las bases de datos mundiales de la FAO (FAO, 2010b). Además, en la opción del calendario de riego, la información del suelo es necesaria para estimar su balance hídrico. La información referente al suelo también se obtuvo de la FAO (2010b).



Fuente del área de la remolacha azucarera: Monfreda et al. (2008)

Figura II.1. Estación meteorológica en Valladolid (España) (punto negro) y área de cultivo de la remolacha azucarera en España (unidad: proporción del área de la cuadrícula)

Tabla II.1. Fechas de siembra y recolección y productividad de la producción de la remolacha azucarera en Valladolid (España)

Cultivo	Fecha de siembra*	Fecha de recolección*	Productividad (t/ha)**
Remolacha azucarera	1 de abril (marzo-abril)	27 de septiembre (sept-oct)	81

\*Fuente: MAPA (2001).

\*\*Fuente: MARM (2009) período 2000-2006.

## Opción de las necesidades de agua del cultivo

Esta opción estima la evapotranspiración en condiciones óptimas, lo que significa que la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) es igual a las necesidades de agua del cultivo (NAC). Óptimo significa cultivos libres de enfermedades y bien fertilizados, cultivados en amplios campos, con unas condiciones hídricas del suelo óptimas y que consigan una producción total en las condiciones climáticas existentes (Allen *et al.*, 1998). La opción de las necesidades de agua del cultivo puede llevarse a cabo solo con datos climáticos y del cultivo. La  $ET_c$  se estima en intervalos de diez días a lo largo de toda la estación de crecimiento valiéndose de la precipitación efectiva. Para calcularla, se ha elegido el método del Servicio de Conservación del Suelo del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA SCS), por ser uno de los más usados. El modelo calcula la  $ET_c$  de la manera siguiente:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad [\text{duración/tiempo}] \quad (62)$$

En esta función,  $K_c$  se refiere al coeficiente de cultivo, que incorpora las características de este y los efectos medios de la evaporación desde el suelo.  $ET_0$  representa la evapotranspiración de referencia, que expresa la evapotranspiración de un cultivo hipotético de una hierba de referencia que no presente problemas de escasez hídrica.

La evapotranspiración de agua verde ( $ET_{verde}$ ) se calcula como el mínimo entre la evapotranspiración total de un cultivo ( $ET_c$ ) y la precipitación efectiva ( $P_{efec}$ ), con un intervalo de diez días. Cuando la precipitación efectiva es mayor que la evapotranspiración total del cultivo, la  $ET_{azul}$  es igual a cero. La evapotranspiración total de agua azul se obtiene sumando  $ET_{azul}$  durante todo el período de crecimiento ([tabla II.2](#)).

$$ET_{verde} = \text{mín} (ET_c, P_{efec}) \quad [\text{longitud/tiempo}] \quad (63)$$

$$ET_{azul} = \text{máx} (0, ET_c - P_{efec}) \quad [\text{longitud/tiempo}] \quad (64)$$

Tabla II.2. Evapotranspiración total de agua verde y azul basada en la tabla de resultados NAC del modelo CROPWAT 8.0

Mes	Período	Etap	$K_c$	$ET_c$	$ET_c$	$P_{efec}$	Nec. Rieg	$ET_{verde}$	$ET_{azul}$
			—	(mm/día)	(mm/período)	(mm/período)		(mm/período)	(mm/período)
Abr	1	Inic.	0,35	1,02	10,2	12,6	0	10,2	0
Abr	2	Inic.	0,35	1,13	11,3	13,8	0	11,3	0
Abr	3	Inic.	0,35	1,24	12,4	14	0	12,4	0
May	1	Inic.	0,35	1,35	13,5	14,5	0	13,5	0
May	2	Inic.	0,35	1,45	14,5	15	0	14,5	0

Mes	Período	Etapas	$K_c$	$ET_c$ (mm/día)	$ET_c$ (mm/período)	$P_{efec}$ (mm/período)	Nec. Rieg	$ET_{verde}$ (mm/período)	$ET_{azul}$ (mm/período)
May	3	Des.	0,48	2,2	24,2	13,8	10,4	13,8	10,4
Jun	1	Des.	0,71	3,55	35,5	12,7	22,7	12,7	22,8
Jun	2	Des.	0,94	5,02	50,2	11,9	38,3	11,9	38,3
Jun	3	Med.	1,15	6,6	66	9,8	56,3	9,8	56,2
Jul	1	Med.	1,23	7,58	75,8	7,1	68,6	7,1	68,7
Jul	2	Med.	1,23	8,05	80,5	5	75,6	5	75,5
Jul	3	Med.	1,23	7,8	85,8	4,8	81	4,8	81
Ago	1	Med.	1,23	7,59	75,9	4,1	71,8	4,1	71,8
Ago	2	Final	1,23	7,39	73,9	3,3	70,6	3,3	70,6
Ago	3	Final	1,13	6,05	66,6	5,7	60,9	5,7	60,9
Sep	1	Final	1	4,65	46,5	8,9	37,5	8,9	37,6
Sep	2	Final	0,87	3,51	35,1	11,2	23,8	11,2	23,9
Sep	3	Final	0,76	2,6	18,2	7,8	7	7,8	10,4
A lo largo del período total de cultivo					796	176	625	168	628

## Opción del calendario de riego

En la segunda opción podemos calcular la evapotranspiración del cultivo, tanto en condiciones óptimas como no óptimas a lo largo de todo el período de crecimiento usando un enfoque de balance hídrico diario del suelo. La evapotranspiración calculada se representa como  $ET_a$ , es decir, la evapotranspiración ajustada al cultivo. La  $ET_a$  puede ser más pequeña que la  $ET_c$  a causa de condiciones no óptimas. Varios factores pueden influenciar los movimientos del suelo, la capacidad de almacenamiento de agua del suelo y la capacidad de las plantas para usar esa agua, tales como la condición física, la fertilidad y el estado biológico del suelo. La  $ET_a$  se calcula usando el coeficiente de estrés hídrico ( $K_s$ ):

$$ET_a = K_s \times ET_c = K_s \times K_c \times ET_0 \quad [\text{longitud/tiempo}] \quad (65)$$

$K_s$  describe el efecto del estrés hídrico en la transpiración del cultivo. Para suelos en condiciones hídricas limitantes,  $K_s < 1$ ; cuando no exista estrés hídrico en el suelo,  $K_s = 1$ .

La opción de calendario de riego requiere información sobre el clima, el cultivo y el suelo. Para estimar la evapotranspiración de agua verde ( $ET_{verde}$ ) en la agricultura de secano, la opción de sin riego (secano) se marca en el botón *opciones* de la barra de herramientas (tabla II.3). En este panorama, el agua verde evapotranspirada ( $ET_{verde}$ ) es igual a la evapotranspiración total simulada, que se da en la opción de uso real de agua en el cultivo conforme a lo especificado en el resultado del modelo. En este caso, obviamente, el agua azul evapotranspirada ( $ET_{azul}$ ) es igual a cero.

Tabla II.3. **Calendario de riego en una situación de secano: tabla de resultados del modelo CROPWAT 8.0**

CALENDARIO DE RIEGO DE LOS CULTIVOS											
Estación $ET_o$ : VALLADOLID			Cultivo: remolacha azucarera				Fecha de siembra: 01/04				
Estación lluviosa: VALLADOLID			Suelo: medio (limoso)				Fecha de recolecta: 27/09				
Disminución del rendimiento: 50,1%											
Opciones de calendario de riego del cultivo											
Periodicidad: sin riego (secano)											
Aplicación: —											
Eficiencia del campo: 70%											
Formato de la tabla: balance diario de la humedad del suelo											
Fecha	Día	Etapa	Lluvia (mm)	$K_s$ (-)	$ET_o$ (mm)	Agot. (%)	Riego neto (mm)	Déficit (mm)	Pérdidas (mm)	Riego bruto (mm)	Flujo (l/s/ha)
01 abr	1	Inic.	0	1	1	1	0	1	0	0	0
02 abr	2	Inic.	0	1	1	2	0	2	0	0	0
03 abr	3	Inic.	6,7	1	1	1	0	1	0	0	0
04 abr	4	Inic.	0	1	1	2	0	2	0	0	0
05 abr	5	Inic.	0	1	1	3	0	3	0	0	0
06 abr	6	Inic.	0	1	1	4	0	4,1	0	0	0
07 abr	7	Inic.	6,7	1	1	1	0	1	0	0	0
08 abr	8	Inic.	0	1	1	2	0	2	0	0	0
09 abr	9	Inic.	0	1	1	3	0	3	0	0	0
10 abr	10	Inic.	0	1	1	4	0	4,1	0	0	0
11 abr	11	Inic.	0	1	1,1	5	0	5,2	0	0	0

Fecha	Día	Etapa	Lluvia (mm)	$K_s$ (-)	$ET_c$ (mm)	Agot. (%)	Riego neto (mm)	Déficit (mm)	Pérdidas (mm)	Riego bruto (mm)	Flujo bruto (l/s/ha)
12 abr	12	Inic.	0	1	1,1	6	0	6,3	0	0	0
13 abr	13	Inic.	7,4	1	1,1	1	0	1,1	0	0	0
...											
25 sep	178	Final	0	0,21	0,5	92	0	266,5	0	0	0
26 sep	179	Final	0	0,2	0,5	92	0	267	0	0	0
27 sep	Final	Final	0	0,2	0	90					
Totales:											
Riego bruto total			0	mm	Precipitación total			190,3	mm		
Riego neto total			0	mm	Precipitación efectiva			171,1	mm		
Pérdidas totales de riego			0	mm	Pérdida total de agua de lluvia			19,3	mm		
Uso real de agua del cultivo			432,2	mm	Déficit de humedad en la recolecta			261,1	mm		
Uso potencial de agua del cultivo			793,3	mm	Necesidad real de riego			622,3	mm		
Eficiencia del calendario de riego			—	—	Eficiencia de la precipitación			89,9	%		
Deficiencia del calendario de riego			45,5	%							
Disminuciones del rendimiento:											
Etapa		A	B	C	D	Estación					
Disminución de $ET_c$		0	0	53,3	87,7	45,5	%				
Factor de respuesta del rendimiento		0,5	0,8	1,2	1	1,1					
Disminución del rendimiento		0	0	64	87,7	50,1	%				
Disminución acumulativa del rendimiento		0	0	64	95,6		%				

Para estimar la evapotranspiración de agua verde y azul en campos de regadío se pueden seleccionar diferentes opciones de periodicidad y aplicación de riego, dependiendo de la estrategia de riego. Las opciones predeterminadas, regar solo cuando exista un punto crítico y rellenar el suelo hasta la capacidad del campo, asumen que existen unas condiciones de riego óptimas cuando los intervalos de riego están a su máximo a la vez que se evita cualquier tipo de estrés del cultivo. La profundidad media de aplicación

de riego está relacionada con el método de riego que se esté llevando a cabo. Por lo general, en el caso de sistemas de riego de alta frecuencia como la microirrigación y los pivotes centrales, se aplican cada vez alrededor de 10 mm o menos. En el caso de riego por aspersión o superficial, las profundidades son de 40 mm o más.

Para el caso específico del cultivo de la remolacha azucarera en Valladolid se aplican 40 mm cada siete días (tabla II.4). Tras ejecutar el modelo con las opciones de riego seleccionadas, el total de agua evapotranspirada es igual a  $ET_a$  en el período de crecimiento conforme a lo especificado en el resultado del modelo (uso de agua real de un cultivo). Tras ejecutar el modelo con las opciones de riego seleccionadas, el total de agua evapotranspirada ( $ET_a$ ) en el período de crecimiento es igual a lo que se denomina uso de agua real de un cultivo en el resultado del modelo. El agua azul evapotranspirada ( $ET_{azul}$ ) es igual al mínimo de riego neto total y la necesidad de riego real conforme a lo especificado en el resultado del modelo. El agua verde evapotranspirada ( $ET_{verde}$ ) es igual al total de agua evapotranspirada ( $ET_a$ ) menos el agua azul evapotranspirada ( $ET_{azul}$ ) conforme se ha simulado en el caso de riego.

Tabla II.4. **Calendario de riego en una situación de regadío: tabla de resultados del modelo CROPWAT 8.0**

CALENDARIO DE RIEGO DEL CULTIVO											
Estación $ET_o$ : VALLADOLID			Cultivo: remolacha azucarera				Fecha de siembra: 01/04				
Estación lluviosa: VALLADOLID			Suelo: medio (limoso)				Fecha de recolecta: 27/09				
Disminución del rendimiento: 0,0%											
Opciones de calendario de riego del cultivo											
Periodicidad: regar en el intervalo definido por el usuario)											
Aplicación: profundidad de aplicación fija de 40 mm											
Eficiencia del campo: 70%											
Formato de la tabla: balance diario de la humedad del suelo											
Fecha	Día	Etapa	Lluvia (mm)	$K_s$ (-)	$ET_a$ (mm)	Agot. (%)	Riego neto (mm)	Déficit (mm)	Pérdidas (mm)	Riego bruto (mm)	Flujo bruto (l/s/ha)
01 abr	1	Inic.	0	1	1	1	0	1	0	0	0
02 abr	2	Inic.	0	1	1	2	0	2	0	0	0
03 abr	3	Inic.	6,7	1	1	1	0	1	0	0	0
04 abr	4	Inic.	0	1	1	2	0	2	0	0	0
05 abr	5	Inic.	0	1	1	3	0	3	0	0	0

Fecha	Día	Etapa	Lluvia (mm)	$K_s$ (-)	$ET_c$ (mm)	Agot. (%)	Riego neto (mm)	Déficit (mm)	Pérdidas (mm)	Riego bruto (mm)	Flujo (l/s/ha)
06 abr	6	Inic.	0	1	1	4	0	4,1	0	0	0
07 abr	7	Inic.	6,7	1	1	1	40	0	39	57,1	6,61
08 abr	8	Inic.	0	1	1	1	0	1	0	0	0
09 abr	9	Inic.	0	1	1	2	0	2	0	0	0
10 abr	10	Inic.	0	1	1	3	0	3	0	0	0
11 abr	11	Inic.	0	1	1,1	4	0	4,2	0	0	0
12 abr	12	Inic.	0	1	1,1	5	0	5,3	0	0	0
13 abr	13	Inic.	7,4	1	1,1	1	0	1,1	0	0	0
...											
25 sep	178	Final	0	1	2,6	6	0	16,3	0	0	0
26 sep	179	Final	0	1	2,6	7	0	18,9	0	0	0
27 sep		Final	0	1	0	4					
Totales:											
Riego bruto total			1.428,6	mm	Precipitación total			190,3	mm		
Riego neto total			1.000,0	mm	Precipitación efectiva			125,1	mm		
Pérdidas totales de riego			344,8	mm	Pérdida total de agua de lluvia			65,2	mm		
Uso real de agua del cultivo			793,3	mm	Déficit de humedad en la recolecta			13,0	mm		
Uso potencial de agua del cultivo			793,3	mm	Necesidad real de riego			668,3	mm		
Eficiencia del calendario de riego			65,5	%	Eficiencia de la precipitación			65,7	%		
Deficiencia del calendario de riego			45,5	%							
Disminuciones del rendimiento:											
Etapa		A	B	C	D	Estación					
Disminución de $ET_c$		0	0	0	0	0	%				
Factor de respuesta del rendimiento		0,5	0,8	1,2	1	1,1					
Disminución del rendimiento		0	0	0	0	0	%				
Disminución acumulativa del rendimiento		0	0	0	0		%				

En ambas opciones (NAC y calendario de riego), la evapotranspiración de cultivo estimada en mm se convierte a m<sup>3</sup>/ha aplicado el factor 10. El componente verde en la huella hídrica de proceso de un cultivo ( $HH_{proc, verde}$ , m<sup>3</sup>/t) se calcula como el componente verde en el uso de agua del cultivo ( $UAC_{verde}$ , m<sup>3</sup>/ha) dividido entre el rendimiento del cultivo  $R$  (t/ha). El componente azul ( $HH_{proc, azul}$ , m<sup>3</sup>/t) se calcula de forma similar:

$$HH_{proc, verde} = \frac{UAC_{verde}}{R} \quad [\text{volumen/masa}] \quad (66)$$

$$HH_{proc, azul} = \frac{UAC_{azul}}{R} \quad [\text{volumen/masa}] \quad (67)$$

El resultado de ambas opciones se presenta en la [tabla II.5](#). Los resultados son parecidos al total de  $ET$  y la huella hídrica restante total, pero bastante diferentes a la proporción azul/verde.

Tabla II.5. **Cálculo de los componentes verde y azul de la huella hídrica de proceso (m<sup>3</sup>/t) del cultivo de la remolacha azucarera en Valladolid (España) usando las opciones NAC y el calendario de riego para suelo medio**

Opción CROPWAT	$ET_{verde}$	$ET_{azul}$	$ET_o$	$UAC_{verde}$	$UAC_{azul}$	$UAC_{tot}$	$R^*$	$HH_{proc, verde}$	$HH_{proc, azul}$	$HH_{proc}$
	(mm/período de crecimiento)			(m <sup>3</sup> /ha)			(t/ha)	(m <sup>3</sup> /t)		
Opción de la necesidad de agua del cultivo	168	628	796	1.680	6.280	7.960	81	21	78	98
Opción del calendario de riego	125	668	793	1.250	6.680	7.930	81	15	82	98

\*Fuente: MARM (2009) período 2000-2006.

Los cálculos anteriores se refieren a la evapotranspiración desde el campo; aún no se han contabilizado el agua verde y la azul incorporadas al cultivo. La fracción de agua de la remolacha azucarera está entre el 75 y el 80%, lo que significa que la huella hídrica de la remolacha azucarera es 0,75-0,80 m<sup>3</sup>/t si nos fijamos únicamente en el agua. Esto supone menos de un 1% de la huella hídrica con respecto al agua evaporada.

## Componente gris en la huella hídrica de proceso

El componente gris en la huella hídrica de proceso de un cultivo primario (m<sup>3</sup>/t) se calcula como la carga de contaminantes que se introduce en el sistema de agua

(kg/año) dividida entre la diferencia entre la norma de la calidad ambiental para ese contaminante (la concentración máxima permitida,  $c_{m\acute{a}x}$ ) y su concentración natural en la masa de agua receptora ( $c_{nat}$ ) (tabla II.6). Se asume que la cantidad de nitrógeno que alcanza la masa de agua fluyente es del 10% de la tasa de fertilización aplicada (en kg/ha/año) (Hoekstra y Chapagain, 2008). El efecto del uso de otros nutrientes, pesticidas y herbicidas en el medio ambiente aún no ha sido analizado. El volumen total de agua necesario por tonelada de nitrógeno se calcula teniendo en cuenta el volumen de lixiviación y escorrentía de nitrógeno (t/t) y la concentración máxima permitida en masas superficiales de agua fluyente. Para la norma de la calidad ambiental del nitrógeno, se han tomado 10 mg/litro (medidos como N). Este límite fue usado para calcular el volumen necesario de agua dulce para asimilar la carga de contaminantes. Por falta de información apropiada, se consideró que la concentración natural en la masa de agua receptora era cero. La información sobre la aplicación de fertilizantes ha sido obtenida de la base de datos FertiStat (FAO, 2010c).

Tabla II.6. Cálculo del componente gris de la huella hídrica de proceso ( $m^3/t$ ) del cultivo de la remolacha azucarera en Valladolid (España)

Tasa media de aplicación de fertilizantes*	Área	Total de fertilizantes aplicados	Lixiviación o escorrentía de nitrógeno hacia masas de agua 10%	Conc. máxima	$HH_{proc, gris}$ total de la remolacha azucarera	Producción**	$HH_{proc, gris}$ de la remolacha azucarera
(kg/ha)	(ha)	(t/año)	(t/año)	(mg/l)	( $10^6 m^3/año$ )	(t)	( $m^3/t$ )
178	1	0,2	0,02	10	0,002	81	22

\*Fuente: FertiStat (FAO, 2010c).

\*\*Fuente: MARM (2009) período 2000-2006.

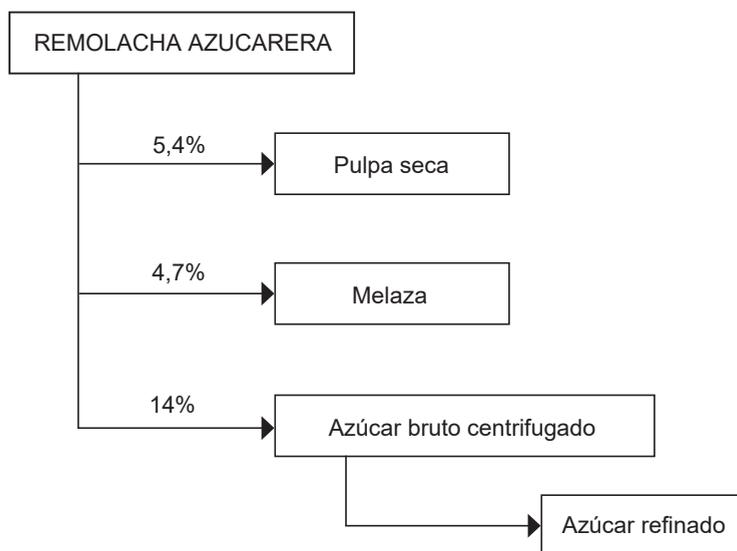


## El cálculo de la huella hídrica de un producto: ejemplo del azúcar refinado de Valladolid (España)

En este apéndice se muestra un ejemplo de cómo estimar las huellas hídricas verde, azul y gris de un producto centrándonos en el caso de la producción del azúcar refinado de Valladolid (España).

Si se procesa un cultivo primario para ser transformado en un producto (por ejemplo, la remolacha azucarera se procesa para hacer azúcar sin refinar), normalmente ocurre una pérdida de peso, puesto que solo se usa una parte del producto primario. La huella hídrica de los productos derivados de los cultivos se calcula dividiendo la huella hídrica del producto de entrada entre la fracción de producto. Esta última se define como la cantidad de producto final obtenida a partir de una determinada cantidad de producto de entrada. Las fracciones de producto para varios productos derivados de cultivos se obtienen de diferentes diagramas de árbol del producto, tal como lo definen la FAO (2003) y Chapagain y Hoekstra (2004). La [figura III.1](#) muestra el diagrama de árbol del producto para el azúcar refinado. Si el producto de entrada se procesa para obtener dos o más productos, es necesario distribuir la huella hídrica del producto de entrada entre los productos de salida separadamente. Esto se hace de manera proporcional al valor de los productos de entrada. La fracción de valor de un producto procesado se define como la relación del valor de mercado del producto final con respecto al valor de mercado agregado de todos los productos finales obtenidos a partir del producto de entrada. Si durante el proceso se hiciese uso del agua, el volumen de agua usada en el proceso se añade al valor de la huella hídrica del producto de entrada antes de distribuir este total entre los diferentes productos procesados.

La remolacha azucarera contiene azúcar en su estado natural. En una planta de producción de azúcar, esta se extrae de la remolacha y se convierte en azúcar granulado. La recolección de la remolacha empieza a mediados de septiembre y la mayor parte de esta se transporta en camiones. En primer lugar, la remolacha que se ha entregado a la planta de producción se lava con agua en grandes unidades de lavado. Esta



Fuente: elaboración propia a partir de datos de la FAO (2003).

Figura III.1 **Diagrama de producción española de azúcar refinado (a partir de la remolacha azucarera), incluyendo las fracciones de producto**

agua posteriormente pasa por plantas de purificación para su reutilización. La tierra removida se almacena en campos de almacenamiento y posteriormente se usa para construir diques, por ejemplo. La remolacha ya limpia se trocea en máquinas destinadas a ello. El azúcar contenido en estas tiras se extrae en una torre de difusión con agua tibia. El resultado es un jugo crudo con una concentración de azúcar del 14% (FAO, 2003). Esta es prácticamente la misma cantidad presente en la remolacha en su estado natural. Estas tiras de remolacha, denominadas en ese momento pulpa, se presionan o se secan y se venden como forraje para animales. La etapa que sigue en el proceso de producción es la purificación del jugo crudo: se transforma en jugo depurado con cal y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). La cal y el  $\text{CO}_2$  se producen en las mismas instalaciones en un horno a partir de piedras calcáreas y coques. La cal absorbe todas las sustancias no deseadas, que luego precipita y sedimenta gracias a la incorporación del  $\text{CO}_2$ . El material sólido que se extrae, se filtra y se utiliza como un poderoso fertilizante natural de cal que mejora la estructura del suelo y se comercializa con el nombre de “Betacal SU”. A medida que el agua se va evaporando, el jugo depurado diluido se convierte en un jarabe con una concentración de azúcar de aproximadamente el 70%. Por último, se evapora una gran cantidad de agua en las calderas de vacío, por lo que se obtiene una solución saturada. A continuación, tiene lugar un proceso de cristalización debido a la incorporación de cristales de azúcar

refinado que actúan como inóculo. Con la continua evaporación de agua, estos cristales de azúcar van alcanzando el tamaño deseado. En este proceso, los cristales de azúcar se separan del líquido (sirope) en centrífugas y, después de secarse, el azúcar se almacena en grandes silos. A ese sirope se le llama “melaza” y sirve como materia prima para la producción de alcohol.

Los productos derivados de la industria azucarera se muestran en el diagrama de producción en la [figura III.1](#). La pulpa de la remolacha se seca y se comercializa a través de la industria de la alimentación para el ganado a granjas lecheras, que utilizan la pulpa seca o almacenan la pulpa prensada en silos y utilizan el ensilaje para la producción de leche o carne. La pulpa también se vende a granjas porcinas, donde tiene un impacto medioambiental positivo, puesto que el contenido en materia seca del abono producido por los cerdos es mayor y el nivel de amoníaco en las pocilgas es menor. Se están realizando experimentos bastante prometedores que tienen por objetivo engordar a los cerdos con pulpa de remolacha azucarera. La melaza de la industria azucarera se vende a la industria del alcohol, y el derivado de esta última (vinaza) se usa en la industria de la alimentación del ganado lechero. Actualmente, los agricultores usan una pequeña parte de este producto como un fertilizante de potasio.

Durante el proceso descrito anteriormente, el uso de agua se limita lo máximo posible. Las fábricas azucareras usan principalmente el agua de las remolachas, que se libera en el proceso de producción como condensación del agua evaporada. El 75% de la remolacha azucarera es agua, por lo que, durante la producción de azúcar, se genera un excedente de agua a partir de la remolacha azucarera. Tras el proceso de purificación, esta agua se drena al agua superficial. Durante el proceso de lavado, la materia orgánica se incorpora al agua de lavado y esta es posteriormente purificada. Además de la purificación aeróbica, la anaeróbica también se realiza en los biodigestores donde se produce el biogás.

Los componentes verde, azul y gris de la huella hídrica del azúcar refinado se estiman por separado. Esta estimación se realiza en dos pasos: primero, para el producto intermedio de azúcar de remolacha sin refinar precentrifugado y segundo, para el azúcar refinado.

En primer lugar, la huella hídrica azul del azúcar de remolacha sin refinar precentrifugado se estima con la siguiente ecuación:

$$HH_{prod}[p] = (HH_{proc}[p] + \sum_{i=1}^y \frac{HH_{prod}[i]}{f_p[p, i]}) \times f_v[p] \quad [\text{volumen/masa}] \quad (68)$$

Tal como se ha descrito anteriormente, la huella hídrica de proceso ( $HH_{proc}[p]$ ) es igual a cero. La huella hídrica azul del producto de entrada que es la remolacha

azucarera ( $HH_{prod}[i]$ ) producida en Valladolid asciende a  $82\text{m}^3/\text{t}$  ([apéndice II](#)). La fracción del producto ( $f_p[p, i]$ ) de acuerdo con el diagrama de producción es  $0,14 \text{ t/t}$ ; y la fracción del valor ( $f_v[p]$ ) asciende a alrededor de  $0,89 \text{ US\$/US\$}$  calculado de la siguiente manera:

$$f_v[p] = \frac{\text{precio}[p] \times \text{peso}[p]}{\sum_{p=1}^z (\text{precio}[p] \times \text{peso}[p])} \quad [—] \quad (69)$$

$$f_v[p] = \frac{\text{precio}_{(\text{remolachabruta,centri})} \times \text{peso}_{\text{remolachabruta,centri}}}{\text{precio}_{\text{pulpaseca}} \times \text{peso}_{\text{pulpaseca}} + \text{precio}_{\text{melaza}} \times \text{peso}_{\text{melaza}} + \text{precio}_{\text{remolachabruta,centri}} \times \text{peso}_{\text{remolachabruta,centri}}} \quad [—] \quad (70)$$

En conjunto, la huella hídrica azul del azúcar de remolacha sin refinar precentrifugado asciende a  $524 \text{ m}^3/\text{t}$ .

En segundo lugar, se calcula la huella hídrica azul del azúcar refinado. En este caso, la huella hídrica de proceso ( $HH_{proc}[p]$ ) también es igual a cero. La huella hídrica azul del producto de entrada azúcar de remolacha sin refinar precentrifugado ( $HH_{prod}[i]$ ) es de  $524 \text{ m}^3/\text{t}$ . La fracción del producto ( $f_p[p, i]$ ), de acuerdo con el diagrama de producción de azúcar es de  $0,92 \text{ t/t}$  y la fracción del valor ( $f_v[p]$ ) es de  $1 \text{ US\$/US\$}$  puesto que solo existe un producto final derivado. Por último, la huella hídrica azul del azúcar refinado producido en Valladolid es de  $570 \text{ m}^3/\text{t}$ . Las huellas hídricas verde y gris se calculan de forma parecida ([tabla III.1](#)).

Tabla III.1. **Huella hídrica verde, azul y gris de la remolacha azucarera en Valladolid (España) ( $\text{m}^3/\text{t}$ )**

Huella hídrica de proceso del cultivo de la remolacha azucarera ( $\text{m}^3/\text{t}$ )				Huella hídrica del producto del azúcar refinado ( $\text{m}^3/\text{t}$ )			
$HH_{proc, verde}$	$HH_{proc, azul}$	$HH_{proc, gris}$	$HH_{total}$	$HH_{proc, verde}$	$HH_{proc, azul}$	$HH_{proc, gris}$	$HH_{total}$
15	82	22	120	107	570	152	829

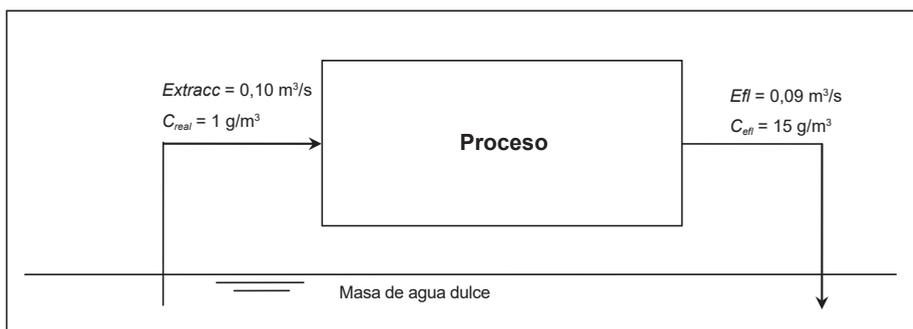
# IV

## Apéndice IV

### Ejemplos de cálculos de la huella hídrica gris

#### Ejemplo 1. La huella hídrica gris de una fuente puntual de contaminación

Consideremos un proceso que requiera el uso del agua, como se muestra a continuación. La extracción es de  $0,10 \text{ m}^3/\text{s}$ ; el efluente es de  $0,09 \text{ m}^3/\text{s}$ , un poco menor que la extracción, puesto que parte del agua extraída se ha evaporado durante el proceso, por lo que no regresa a la masa de agua dulce. La concentración natural de una cierta sustancia química en la masa de agua dulce ( $c_{nat}$ ) es de  $0,5 \text{ g}/\text{m}^3$ , pero la concentración real ( $c_{real}$ ) en el punto de extracción es de  $1 \text{ g}/\text{m}^3$ , a causa de actividades contaminantes aguas arriba. La concentración de la sustancia química en el efluente ( $c_{eff}$ ) es de  $15 \text{ g}/\text{m}^3$ . La concentración máxima permitida en la masa de agua ( $c_{máx}$ ) es de  $10 \text{ g}/\text{m}^3$ . La carga (adicional) de esta sustancia química y emitida por este proceso a la masa de agua dulce equivale a:  $0,09 \times 15 - 0,1 \times 1 = 1,25 \text{ g}/\text{s}$ . La huella hídrica asociada es de:  $1,25 / (10 - 0,5) = 0,13 \text{ m}^3/\text{s}$ .



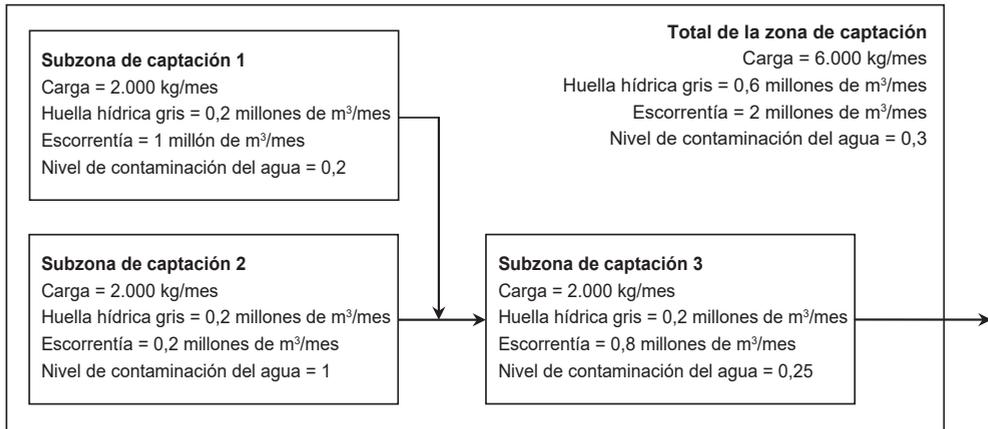
En este ejemplo, la concentración en el efluente es mayor que la concentración máxima permitida en la masa de agua dulce. Un gerente de procesos inteligente que, sin embargo, no entiende de impactos ambientales, decide extraer más agua para poder diluir el efluente, de manera que la concentración en este equivalga a la concentración máxima permitida. El volumen de extracción aumenta de 0,10 a 0,15 m<sup>3</sup>/s. El volumen del efluente pasa a ser 0,14 m<sup>3</sup>/s, porque la pérdida por evaporación en el proceso se mantiene. La concentración de la sustancia química en el efluente se diluye a un nivel de 10 g/m<sup>3</sup>. La carga (adicional) añadida a la masa de agua dulce permanece igual que antes:  $0,14 \times 10 - 0,15 \times 1 = 1,25$  g/s. Por tanto, la huella hídrica gris asociada también se mantiene:  $1,25 / (10 - 0,5) = 0,13$  m<sup>3</sup>/s. Parece que lo que ha hecho el gerente de procesos pinta bien (porque la concentración en el efluente se ha reducido hasta un nivel aceptable), pero para la masa de agua receptora no presenta ninguna diferencia (ya que la carga y huella hídrica gris permanecen inalteradas).

Finalmente, se decide nuevamente parar la captación de agua adicional para que la extracción vuelva a ser de 0,10 m<sup>3</sup>. De manera alternativa, se tratan las aguas residuales antes de devolverlas al medio ambiente. En el proceso de tratamiento se retira del efluente una gran parte de las sustancias químicas. El tratamiento se diseña de manera que no hay pérdidas por evaporación durante este, de tal manera que el volumen del efluente se mantiene en 0,09 m<sup>3</sup>/s. Sin embargo, la concentración de la sustancia química en el efluente ( $c_{eff}$ ) se reduce de 15 g/m<sup>3</sup> a 2 g/m<sup>3</sup>. La carga (adicional) del proceso a la masa de agua dulce equivale a:  $0,09 \times 2 - 0,1 \times 1 = 0,08$  g/s. La huella hídrica asociada es de:  $0,08 / (10 - 0,5) = 0,0084$  m<sup>3</sup>/s. Aunque la concentración de la sustancia química en el efluente es inferior a la concentración máxima permitida en la masa de agua dulce, se puede observar que la huella hídrica gris no es cero. Esto es debido a que la concentración en el efluente sigue estando por encima de la concentración natural de la sustancia química en la masa de agua, por lo que el proceso sigue demandando parte de la capacidad de asimilación de contaminantes de la masa de agua dulce.

## Ejemplo 2. Cálculo del nivel de contaminación del agua a diferentes escalas

Consideremos una zona de captación que pueda subdividirse en tres subzonas, tal como se esquematiza en la imagen que aparece a continuación. Dos de las subzonas de captación se encuentran aguas arriba y desembocan en una tercera, aguas abajo. Cada una de estas tres recibe una carga total de cierta sustancia química de 2.000 kg en un mes determinado. Con una concentración natural igual a cero y una concentración máxima permitida para esta sustancia química de 0,01 kg/m<sup>3</sup>, la huella hídrica gris en

cada subzona de captación se puede calcular como  $2.000 / (0,01 - 0) = 0,2$  millones de  $m^3$  en dicho mes. En ese mes, la escorrentía de la subzona de captación 1 asciende a 1 millón de  $m^3$ , la de la subzona de captación 2, a 0,2 millones de  $m^3$  y la de la 3, a 0,8 millones de  $m^3$ . Suponiendo que el tiempo de residencia del agua en la zona de captación es bajo, la escorrentía total de esta en el mes considerado, equivale a la suma de los volúmenes de escorrentía de las tres subzonas de captación, es decir, 2 millones de  $m^3$ . Se puede calcular el nivel de contaminación del agua por subzona de captación para el mes en cuestión tomando la proporción de la huella hídrica gris con respecto a la escorrentía. Los resultados se muestran en la imagen a continuación. En la subzona de captación 2, el nivel de contaminación del agua es 1, lo que significa que la capacidad de asimilación de contaminantes en esta subzona de captación se ha consumido por completo. No es el caso en las otras dos. Si observamos la zona de captación como un todo, se llega a un nivel de contaminación del agua de 0,3. Esto ilustra el hecho de que cuando se distribuye la contaminación de manera desigual en una zona de captación, los puntos críticos solo se hacen visibles cuando el nivel de resolución del análisis es lo suficientemente alto.



Este ejemplo también puede usarse para explicar por qué la huella hídrica gris se mide en base a las cargas (derivadas de la actividad humana) que llegan a las masas de agua dulce y no en base a las que pueden ser finalmente medidas aguas abajo en el río en el punto en el que abandonan la zona de captación. Supongamos que la carga añadida en la subzona de captación 1, en su recorrido hacia las otras dos, se descompone parcialmente debido a procesos bioquímicos en el río, por lo que solo el 80% de la carga original abandona finalmente la subzona de captación 3. Asumamos que ocurre lo mismo con la carga añadida en la subzona de captación 2. Y, por último, asumamos que el 90% de la carga que ha sido depositada en la subzona de captación 3, finalmente abandona dicha zona. De esta forma, podemos calcular que

la carga de sustancias químicas en el río en el punto más alejado aguas abajo asciende a 5.000 kg. Este valor es inferior a los 6.000 kg que se añadieron inicialmente al agua distribuidos por toda la zona de captación.

Calcular la huella hídrica gris o el nivel de contaminación del agua en base a las cargas aguas abajo en vez de las cargas tal como entraron al sistema, da una falsa impresión de la situación. Esto se aclara si modificamos ligeramente el ejemplo anterior. Asumamos ahora que las cargas en las subzonas de captación 1-3 ascienden a 10.000, 2.000 y 8.000 kg/mes, respectivamente. Esto significa que calculamos un nivel de contaminación del agua de 1 para cada subzona de captación. Si este fuera el caso para cada una de ellas, también debería serlo para la zona de captación en su totalidad. Sin embargo, a la hora de observar la carga de sustancias químicas en la salida de la subzona de captación 3, encontramos una carga de  $0,8 \times (10.000 + 2.000) + 0,9 \times 8.000 = 16.800$  kg/mes. Si analizamos el nivel de contaminación del agua en la zona de captación en su totalidad en base a la carga en la salida, el resultado obtenido será un engañoso 0,84.

# V

## Apéndice V Caudal mínimo ecológico

En el marco de las discusiones de la huella hídrica es esencial contar con normas sobre el caudal mínimo ecológico. Según lo establecido en la Declaración de Brisbane, elaborada en el décimo Simposio Internacional de Ríos y Conferencia de Caudales Ambientales que tuvo lugar en Brisbane, Australia, en 2007, el caudal mínimo ecológico se define como la cantidad, la periodicidad y la calidad de los flujos de agua requeridos para sostener los ecosistemas de agua dulce y estuarinos, así como el bienestar y modos de subsistencia humanos que de ellos dependen (Poff *et al.*, 2010).

Cuando nos interesamos por los impactos medioambientales de la huella hídrica azul (uso consuntivo del agua de escorrentía), es crucial saber cuál es el caudal mínimo ecológico de la zona de captación donde se localiza esta. Nos centraremos en este contexto en la cantidad y la periodicidad de los flujos de agua necesarios para los ecosistemas. La escorrentía natural de una zona de captación ( $Esc_{nat}$ ) menos el caudal mínimo ecológico ( $CME$ ) corresponde a lo que está disponible para uso humano. Por tanto, la disponibilidad de agua azul ( $DA_{azul}$ ) se define de la manera siguiente:

$$DA_{azul} = Esc_{nat} - CME \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad (71)$$

Es necesario comparar la huella hídrica azul ( $HH_{azul}$ ) en una zona de captación con la  $DA_{azul}$ . Cuando la  $HH_{azul}$  se acerca o supera la  $DA_{azul}$ , hay razón para preocuparse. La escorrentía natural se puede estimar como la escorrentía real más la huella hídrica azul. Conocemos la escorrentía de muchas zonas de captación alrededor del mundo, y en caso de que no haya datos empíricos disponibles, contamos con estimativos generados por modelos hidrológicos. La resolución temporal es, en ocasiones, diaria, pero, por lo general, conocemos la escorrentía de manera mensual. La información de la huella hídrica hasta el momento ha sido presentada de manera anual, pero detrás de esas estimaciones siempre hay información sobre su desarrollo en el tiempo, porque los cálculos de la huella hídrica están basados en los de uso del agua de riego

con una frecuencia temporal de 1 a 10 días. Comparar la  $HH_{\text{azul}}$  con la  $DA_{\text{azul}}$  puede hacerse anualmente, pero es demasiado simple y poco acertado en comparación con la realidad a lo largo del año, por lo que es mejor realizar esta comparación de manera mensual, por ejemplo. Hay suficiente documentación al respecto para concluir que establecer el *CME* en una zona de captación específica será siempre un trabajo elaborado. Resulta tentador tener una norma simple, genérica y fácil de aplicar a la hora de estimar el *CME*, para que se pueda evaluar el impacto medioambiental de la huella hídrica azul de una zona de captación cualquiera del mundo, de forma simple. La extensa literatura sobre el caudal mínimo ecológico aporta métodos, directrices y ejemplos útiles, pero existe solo un estudio a nivel mundial a este respecto basado en una simple norma y en datos fácilmente disponibles: el realizado por Smakhtin *et al.* (2004). Lo bueno que tiene es que ofrece lo que muchos profesionales requieren en la práctica (un método simple, números claros y que incluya datos mundiales); el mapa de Smakhtin suele aparecer en informes empresariales y presentaciones. Las desventajas son que el método ofrece valores de *CME* anuales y no mensuales, y que muchos expertos no están de acuerdo con las reglas de cálculo, los parámetros usados y, por tanto, con las estimaciones resultantes de *CME*. Según Arthington *et al.* (2006), el método Smakhtin subestima profundamente los caudales mínimos ecológicos.

Por razones prácticas, se propone trabajar hacia un método simple (basado en datos disponibles) y genérico (aplicable en todo el mundo) para establecer un caudal mínimo ecológico para zonas de captación, con una resolución temporal baja, pero lo suficientemente alta como para detectar las principales variaciones en un año. Las estimaciones obtenidas con este método pueden servir como estimaciones predeterminadas del *CME* en casos donde aún no estén disponibles datos más avanzados. Cabe destacar que el método genérico simple aportaría únicamente estimaciones iniciales que tendrían que ser reemplazadas por otras mejores cuando esto fuera posible. Para ello podemos apoyarnos, por ejemplo, en el marco ELOHA para el establecimiento del caudal mínimo ecológico: un marco avanzado propuesto por algunos de los mejores expertos a nivel mundial en este campo (Poff *et al.*, 2010). Este método requiere más fondos y más trabajo por lo que aún quedan algunos años para que exista un alcance de estimaciones sobre el *CME* a nivel mundial basadas en este enfoque.

Por el momento, se propone la siguiente regla para el establecimiento del caudal mínimo ecológico, que es simple y genérica:

1. para cada mes del año, la escorrentía media mensual en condiciones modificadas se encuentra en un rango de  $\pm 20\%$  del flujo medio mensual, como sería en su estado original, y
2. para cada mes del año, el caudal permanente medio mensual se encuentra en un rango de  $\pm 20\%$  del caudal permanente medio mensual, como sería en su estado original.

Los flujos medios mensuales suelen estar disponibles a través de medidas del caudal y si ese no fuera el caso, podemos utilizar estimativos producidos por modelos hidrológicos. El término caudal permanente se refiere a la contribución del agua subterránea a un río, lo que puede estimarse basándonos en 10 años de registros de caudales, por ejemplo.

Con el fin de dar el mayor detalle posible, proponemos distinguir los niveles de modificación de una cuenca hidrográfica. Con respecto a la desviación ( $\Delta$ ) de los flujos medios mensuales en condiciones modificadas en relación con aquellos en condiciones originales, puede utilizarse el siguiente esquema:

$\Delta < \pm 20\%$	Sin o con poca modificación	Estado del río A
$\pm 20\% < \Delta < \pm 30\%$	Con modificación moderada	Estado del río B
$\pm 20\% < \Delta < \pm 40\%$	Con modificación significativa	Estado del río C
$\Delta > \pm 40\%$	Con modificación acusada	Estado del río D

Hoy en día, ¿cuántas cuencas hidrográficas estarían dentro de las cuatro categorías A-D? La mayoría de los ríos no regularizados por embalses entrarían en el estado A. Los ríos regularizados por embalses estarían entre los estados B-D. La norma del 20% se considera como valores de precaución predeterminados del *CME*. Los límites mencionados anteriormente pueden llamarse potenciales umbrales de preocupación. Esta terminología refleja mejor el hecho de que los límites mencionados son indicativos más que decisivos.

La escala espacial apropiada para establecer el *CME* es a nivel de zona de captación. El *CME* a nivel de cuenca hidrográfica puede obtenerse de la suma de los valores de *CME* de todas las zonas de captación que forman la cuenca hidrográfica. Puesto que el *CME* puede expresarse mejor a nivel de zona de captación, lo ideal sería que la huella hídrica se especificase también a ese nivel de detalle. Lo mejor es que la contabilidad de la huella hídrica se realice de un modo espacial explícito usando sistemas de información geográfica (SIG), para que en dicho caso se pueda siempre localizar la huella hídrica de modo bastante preciso.

El impacto local de una huella hídrica azul en un río se puede cuantificar contando el número (medio) de meses al año en que los caudales mínimos ecológicos del río no se cumplen y analizando en qué grado estos caudales están siendo violados. Esto no quiere decir que la huella hídrica azul de la actividad en cuestión sea totalmente responsable del incumplimiento de los caudales mínimos ecológicos, puesto que es la suma de las huellas hídricas azules de todas las actividades lo que resulta en violación. Por tanto, podemos analizar también la contribución relativa de la actividad en cuestión.

La huella hídrica azul de cierta actividad en cierto lugar forma un punto crítico cuando:

- a) la huella hídrica azul de tal actividad en dicho lugar es significativa en proporción a la huella hídrica azul total en el mismo lugar, y
- b) la huella hídrica azul contribuye a la violación de los caudales mínimos ecológicos durante un cierto periodo del año.

El método anterior, que es bastante simple, está basado en ideas iniciales de algunos expertos en recursos hídricos (comunicación personal entre Jay O’Keeffe, UNESCO-IHE; Brian Richter, TNC; Stuart Orr, WWF; Arjen Hoekstra, Universidad de Twente). Es preciso que exista acuerdo y apoyo de la extensa comunidad de expertos de *CME* sobre este método genérico y simple puesto que, sin duda alguna, el método recibirá críticas, lo que es comprensible teniendo en cuenta tanto la diferencia de intereses (medio ambiente frente a los usuarios del agua) como la dificultad científica de traducir la complejidad real a reglas simples. Sin embargo, la posibilidad de críticas no impidió que los expertos establecieran normas de la calidad ambiental del agua y de toxicidad simples. Entonces, ¿por qué esto nos impediría establecer normas sobre el *CME*? Cuantificar los caudales mínimos ecológicos es esencial para poder incluirlos en la evaluación de los impactos del consumo de agua azul.

# VI

## Apéndice VI Preguntas más frecuentes

### Preguntas prácticas

#### 1. ¿Por qué debería importarnos nuestra huella hídrica?

El agua dulce es un recurso escaso; su disponibilidad anual está limitada pero su demanda está creciendo. La huella hídrica de la humanidad ha sobrepasado los niveles sostenibles en varios lugares y su distribución entre las personas es desigual. Tener buena información sobre la huella hídrica de comunidades y empresas ayudará a entender cómo conseguir un uso de agua dulce más sostenible y equitativo. Existen muchos lugares en el mundo donde existen problemas serios en cuanto a la escasez o la contaminación del agua: los ríos se están secando, los niveles de los lagos y las aguas subterráneas están descendiendo de forma acusada y hay especies en vías de extinción por culpa del agua contaminada. La huella hídrica ayuda a mostrar la conexión que existe entre nuestro consumo diario de bienes y productos, y los problemas de escasez y contaminación de agua que existen en otras partes, en regiones donde se producen dichos bienes y productos. Prácticamente todos los productos tienen una huella hídrica mayor o menor y es por ello por lo que atañe a los consumidores que compran dichos productos y a las empresas que los producen, los procesan y los comercializan en algún punto de la cadena de suministro.

#### 2. ¿Por qué debería importarle a mi empresa su huella hídrica?

En primer lugar, tanto la concienciación como la estrategia medioambiental de una empresa es normalmente parte de lo que esta considera su responsabilidad social corporativa. La reducción de la huella hídrica puede ser parte de la estrategia medioambiental de una empresa, como también lo es reducir la huella de carbono. En segundo lugar, muchas empresas hacen frente a serios riesgos relacionados con la escasez de agua dulce en sus operaciones o cadena de suministro. ¿Qué sería de una cervecera sin un suministro de agua seguro? ¿Cómo podría subsistir una empresa que se dedica a la fabricación de pantalones vaqueros sin un suministro continuo de

agua a los campos de algodón? Una tercera razón para realizar la contabilidad de la huella hídrica y poner en marcha medidas para reducir la huella hídrica de la empresa es anticipar los controles regulatorios por parte de los gobiernos. En el estado actual, no está tan claro cuál va a ser la respuesta de los gobiernos, pero obviamente se pueden esperar regulaciones en algunos sectores empresariales. Por último, algunas empresas ven la estrategia de huella hídrica corporativa como un instrumento para reforzar la imagen corporativa o para fortalecer la marca.

### **3. ¿Qué pueden hacer los consumidores para reducir su huella hídrica?**

Los consumidores pueden reducir su huella hídrica directa (uso doméstico del agua) instalando cisternas y alcachofas de ducha ahorradoras de agua, cerrando el grifo mientras se lavan los dientes, usando menos agua para el jardín y no tirando medicinas, pinturas u otros contaminantes por el desagüe. La huella hídrica indirecta de un consumidor suele ser mucho más grande que la directa. Un consumidor tiene básicamente dos opciones para reducir su huella hídrica indirecta. La primera es sustituir un producto de consumo con una huella hídrica grande por otro con una huella hídrica más pequeña. Algunos ejemplos incluyen comer menos carne o volverse vegetariano, beber té en vez de café o incluso, mejor, simplemente beber agua. También se ahorra mucha agua llevando prendas hechas de fibras artificiales en vez de algodón. Sin embargo, este enfoque tiene limitaciones porque no es fácil para mucha gente pasar de comer carne a ser vegetariana y le gusta llevar algodón y beber café.

Una segunda opción es seguir el mismo patrón de consumo, pero con productos que tengan una huella hídrica relativamente pequeña o que esté situada en un área sin riesgo de escasez hídrica. No obstante, esto requiere que el consumidor tenga acceso a una información adecuada para poder tomar la decisión. Como, por lo general, esta información no está disponible hoy en día, algo muy significativo que podrían hacer los consumidores es pedir a las empresas transparencia en la información de los productos y a los gobiernos regulaciones apropiadas. Cuando la información sobre los impactos de un artículo determinado en el sistema hídrico esté disponible, los consumidores podrán tomar decisiones deliberadas sobre lo que compran.

### **4. ¿Qué pueden hacer las empresas para reducir su huella hídrica?**

Las empresas pueden reducir su huella hídrica operacional ahorrando agua en sus propios procesos y reduciendo la contaminación de agua a cero. Las palabras clave son: evitar, reducir, reciclar y tratar antes de eliminar. Para la mayoría de las empresas, sin embargo, la huella hídrica de la cadena de suministro es mucho mayor que la huella hídrica operacional. Por tanto, es crucial que también aborden este asunto. Conseguir mejoras en la cadena de suministro puede ser más difícil (ya que la empresa

no ejerce un control directo), pero más efectivo. Pueden reducir la huella hídrica de su cadena de suministro estableciendo acuerdos con sus proveedores que cumplan ciertas normas o, simplemente, cambiando a otro proveedor. En muchos casos, esto puede suponer un proceso bastante laborioso, ya que es posible que haya que modificar todo el modelo de negocio para incorporar nuevas cadenas de suministro o tener mayor control de las ya existentes y hacerlas totalmente transparentes para los consumidores. Entre las diferentes alternativas o herramientas suplementarias que pueden ayudar a mejorar la transparencia están: establecer objetivos cuantitativos de reducción de la huella hídrica, realizar una evaluación comparativa (benchmarking), el etiquetado de productos, la obtención de certificaciones y la generación de reportes sobre huella hídrica.

## 5. ¿Por qué deberían los gobiernos calcular la huella hídrica nacional?

Tradicionalmente, los países diseñan planes nacionales de agua buscando cómo satisfacer a los usuarios. Aunque hoy en día los países consideran opciones para reducir la demanda de agua, además de opciones para aumentar el suministro, generalmente no incluyen la dimensión global de la gestión de los recursos hídricos. En este sentido, no consideran de manera explícita las opciones para ahorrar agua mediante la importación de productos que requieran un uso intensivo del agua. Además, centrándose en el uso del agua en su propio país, la mayoría de los gobiernos tiene un vacío en el tema de la sostenibilidad del consumo nacional. De hecho, muchos países han externalizado su huella hídrica de manera significativa sin tener en cuenta si los productos importados están vinculados a la generación de escasez o a la contaminación del agua en los países productores. Los gobiernos deberían comprometerse con los consumidores y con las empresas para trabajar hacia productos de consumo sostenibles. La contabilidad de la huella hídrica nacional debería ser un componente normativo en las estadísticas de agua nacionales y aportar una base para formular un plan nacional de agua y planes de cuencas hidrológicas que sean coherente con las políticas nacionales sobre medio ambiente, agricultura, industria, energía, comercio, relaciones internacionales y cooperación internacional.

## 6. ¿Cuándo es sostenible mi huella hídrica?

Como consumidor, su huella hídrica es sostenible cuando

1. El total está por debajo de su cota razonable en el mundo.
2. Ningún componente de su huella hídrica se localiza en un punto crítico.
3. Ningún componente de su huella hídrica total puede reducirse o evitarse por completo a un coste social razonable.

## **7. ¿Cómo puedo compensar mi huella hídrica?**

Esta es una pregunta frecuentemente planteada por la gente que está familiarizada con la idea de la compensación de carbono. En el caso del carbono no importa en dónde se toman las medidas de mitigación, por lo que es posible compensar las emisiones propias de CO<sub>2</sub> ayudando a reducir las o contribuyendo al secuestro de carbono en otra parte. El caso del agua es diferente, ya que la escasez o contaminación en un lugar no se puede compensar con otra medida diferente en otro sitio. Por tanto, los esfuerzos deberían centrarse en la reducción de la huella hídrica propia, más urgentemente en lugares y momentos en los que esta cause problemas. Tenemos que hacer todo lo que sea razonablemente posible para reducir nuestra huella hídrica, tanto la directa como la indirecta. Esto es aplicable a los consumidores y a las empresas. Solo en una segunda instancia, cuando ya se haya hecho todo lo posible para reducir la huella hídrica propia, podemos empezar a considerar la compensación. Esto significa que la huella hídrica residual se compensa mediante una inversión razonable, estableciendo o apoyando proyectos cuyo fin consiste en alcanzar un uso sostenible, equitativo y eficiente del agua en la zona de captación donde se localiza la huella hídrica residual. Los términos “razonablemente posible” e “inversión razonable” incluyen elementos normativos que necesitan más especificación cuantitativa y sobre los cuales es necesario llegar a un consenso social.

## **8. Ya pago por el agua, ¿no es eso suficiente?**

Por lo general, el precio que se paga por el agua azul está muy por debajo de su coste económico real. La mayoría de los gobiernos subvencionan el suministro de agua azul a gran escala, invirtiendo en infraestructuras como diques, canales, sistemas de distribución y tratamiento de aguas residuales. Normalmente, estos costes no se cargan a los usuarios del agua. Como resultado, no hay un incentivo económico suficiente de ahorro de agua para los usuarios. Además, debido al carácter público del agua, la escasez no se traduce (por lo general) en un componente adicional del precio de los bienes y servicios que se producen con ella, como sí ocurre en el caso de los bienes privados. Por último, los usuarios del agua generalmente no pagan por los impactos negativos que se causan a las personas o ecosistemas agua abajo.

## **9. ¿Por qué deberíamos reducir la huella hídrica verde?**

Se podría argumentar que la lluvia cae de manera gratuita; si los humanos no usamos el agua verde para producir alimentos, fibras, madera o bioenergía, se evaporará igualmente. Sin embargo, existen dos buenas razones para reducir la huella hídrica verde. La primera es: la lluvia es gratis, pero no ilimitada. De hecho, el agua verde es un recurso escaso (igual que la azul), especialmente en algunos lugares y durante algunos períodos del año. Como una parte de la tierra en cualquier cuenca hidro-

gráfica debe reservarse a la naturaleza, automáticamente una parte del agua verde en la misma cuenca deja de estar disponible para la agricultura. En zonas de captación donde el agua verde es escasa, es crucial incrementar su productividad (es decir, reducir la huella hídrica verde de un producto) para así conseguir una producción óptima debido a la limitación en la disponibilidad de este recurso. La segunda razón es que el incremento de la producción basada en recursos de agua verde reduce la necesidad de producir con recursos de agua azul. Es por esto por lo que también es útil reducir las huellas hídricas verdes en áreas donde su disponibilidad es abundante. Un mejor uso de la lluvia en zonas donde esta es suficiente aumentará la producción de secano, lo que reducirá la necesidad de producir productos basados en regadío en zonas con escasez hídrica.

## **10. ¿Por qué deberíamos reducir la huella hídrica azul en áreas con suficiente escorrentía?**

A primera vista parece necesario reducir las huellas hídricas azules solo en zonas de captación donde la disponibilidad de agua azul es insuficiente. Sin embargo, centrarse solo en áreas con escasez de agua es poco adecuado. Un uso ineficiente del agua en zonas con abundancia de agua implica que la producción por unidad de agua puede incrementarse, lo que es importante, ya que el aumento de la producción de bienes con uso intensivo del agua en zonas con abundancia hídrica significa que la producción de dichos bienes en zonas de escasez puede reducirse. Por tanto, disminuir la huella hídrica por unidad de producto en zonas con abundancia hídrica contribuye a la posibilidad de reducir la huella hídrica total en zonas con escasez hídrica.

Otra razón para reducir la huella hídrica azul en zonas con abundancia hídrica es que asignar agua azul para un determinado fin evita que esta pueda asignarse para otro propósito. Las huellas hídricas de productos con uso intensivo del agua o de lujo como la carne, la bioenergía o las flores pueden ejercer una presión en las zonas de captación donde el agua esté disponible en abundancia y donde los caudales mínimos ecológicos locales se cumplan, pero las implicaciones globales de estas huellas hídricas son que menos cantidad de agua puede asignarse a otros propósitos, tales como el cultivo de cereales, para satisfacer la demanda básica de alimentos. Por tanto, reducir la huella hídrica azul de un producto determinado en un área con abundancia hídrica posibilita producir más de ese mismo producto o asignar el agua ahorrada a otro producto.

## **11. ¿Cuáles son objetivos razonables de reducción de la huella hídrica?**

No existe una respuesta general a esta pregunta porque depende del producto, de la tecnología disponible, del contexto local, etc. Además, es preciso recordar que esta

pregunta incluye un elemento normativo, lo que implica que es necesario responderla dentro de un contexto sociopolítico. Sin embargo, sí se pueden decir algunas cosas generales. En primer lugar, es necesario distinguir entre objetivos de reducción en relación con las huellas hídricas verde, azul y gris. En cuanto a la huella hídrica gris, que se refiere a la contaminación del agua, es posible exigir que se reduzca a cero para todos los productos, al menos a largo plazo. La contaminación no es necesaria. Una huella hídrica gris igual a cero puede conseguirse con la prevención, el reciclaje y el tratamiento. Solo es difícil reducir a cero la contaminación térmica (debida al uso de agua para refrigeración), pero incluso esta puede prevenirse (en gran medida) con la recuperación del calor.

Se estima que la huella hídrica azul en el estadio agrícola de los productos puede reducirse probablemente a la mitad minorando las pérdidas consuntivas de agua, incrementando la productividad de agua azul y apostando más por la agricultura de secano. En el estadio industrial, dependerá mucho del sector y de lo que ya se haya hecho. Tecnológicamente, las industrias son capaces de reciclar el agua por completo de tal manera que la huella hídrica azul se reduzca en todas partes a la cantidad de agua que se está incorporando al producto. Se pueden desarrollar niveles de referencia (*benchmarks*) para productos específicos tomando como referencia el desempeño de los mejores productores. En ocasiones, las huellas hídricas verdes en la agricultura pueden reducirse sustancialmente usando los recursos de agua verde de manera más eficiente; es decir, incrementando la productividad del agua verde. Un incremento de la producción basado en los recursos de agua verde en un lugar reducirá la necesidad de producción con recursos de agua azul en otro.

Una regla general para cualquier estrategia de mitigación de la huella hídrica es evitar la presión que puede ejercer en áreas o períodos en los que se violan las demandas medioambientales de agua. Una razón final para una estrategia de mitigación de la huella hídrica puede ser el reparto justo de los recursos hídricos, que puede ser el fundamento para la reducción de la huella hídrica, especialmente para aquellos usuarios que consuman gran cantidad de agua.

## 12. ¿Son similares la huella hídrica y la huella de carbono?

Ambos conceptos se complementan y cada uno de ellos aborda una cuestión medioambiental diferente: la huella de carbono aborda el tema del cambio climático, mientras que la huella hídrica aborda el tema de la escasez de agua dulce. En ambos casos se impulsa una perspectiva de la cadena de suministro. No obstante, existen también diferencias: en el caso de las emisiones de carbono, el lugar donde se producen no es relevante, al contrario que en el caso de la huella hídrica. La emisión de carbono en un lugar puede compensarse con la reducción de emisión de carbono o el secuestro del mismo en otro lugar, mientras que esto no sucede con el agua: no es posible reducir el impacto local del uso de agua en un lugar mediante el ahorro de esta en otro.

### **13. Si el agua dulce se puede obtener mediante la desalinización del agua del mar, ¿por qué hay escasez de agua?**

La desalinización de agua salada o salobre solo puede ser una solución para la escasez de agua dulce en un número limitado de aplicaciones, no porque no se pueda conseguir la correcta calidad del agua para todos los propósitos, sino porque la desalinización requiere energía, otro recurso escaso. De hecho, la desalinización es un modo de sustituir un recurso escaso (agua dulce) por otro (energía). Si en un lugar determinado el problema del agua dulce es más acusado que el de la energía se puede optar por la desalinización, pero, en general, no tiene mucho sentido proponer la desalinización como solución general a la escasez de agua dulce. Además, aparte del argumento energético, la desalinización es aún cara, demasiado para usarla en la agricultura, donde se destina la mayor parte de esta. Por último, el agua salada o salobre solo está disponible en las costas, lo que significa que llevar agua desalinizada a otro lugar supondría costes adicionales (incluyendo, otra vez, la energía).

### **14. ¿Deberían los productos llevar una etiqueta de uso del recurso hídrico?**

En un mundo donde muchos productos están relacionados con la escasez y la contaminación de agua es muy útil que los productos tengan un historial transparente. Es bueno tener los datos disponibles públicamente para que el consumidor pueda escoger. La información puede mostrarse en una etiqueta o puede estar disponible en internet. Esto es más útil para productos que normalmente ejercen grandes impactos sobre los recursos hídricos, como los productos que contienen algodón o azúcar. Sería útil para los consumidores que la etiqueta de uso del recurso hídrico se integrara a una etiqueta que incluyese otras cuestiones, como la energía y el comercio justo.

Lo ideal sería vivir en un mundo donde no se necesitasen etiquetas porque podríamos confiar en que todos los productos cumplen criterios estrictos. Al considerar una etiqueta de uso del recurso hídrico, la pregunta es: ¿qué debería incluir? Se podría incluir la huella hídrica total del producto, lo que serviría solo para concienciar a los consumidores, no para permitirles realizar una elección deliberada entre dos productos.

Para apoyar la correcta elección de productos, sería necesario también especificar los componentes verdes, azules y grises y mencionar el grado en el que la huella hídrica de ese producto está relacionada con la violación del caudal mínimo ecológico local o de las normas de la calidad ambiental. Por ejemplo, tres cuartos de la huella hídrica se sitúan en áreas donde se cumple con el caudal mínimo ecológico o las normas de la calidad ambiental, pero el otro cuarto de la huella hídrica total está en áreas donde se violan dichas normas. Saber si un producto es bueno o no desde una perspectiva de los recursos hídricos, depende de una amplia variedad de criterios,

incluyendo la existencia o no, de los planes para conseguir mejoras continuadas a lo largo de la cadena de producción. Al fin y al cabo, el etiquetado de productos es solo una solución parcial. Puede funcionar como una manera de concienciar y como base para la selección de productos, pero solo es una forma de aportar transparencia a los productos, restringida por el problema práctico de que una etiqueta solo puede contener información limitada. Además, la disminución real de huella hídrica no tendrá lugar solo mostrando información en una etiqueta.

## Preguntas técnicas

### 1. ¿Qué es la huella hídrica?

La huella hídrica de un producto es un indicador empírico de la cantidad de agua consumida y contaminada, en qué momento y en qué lugar, medida para toda la cadena de suministro total del producto. Es un indicador multidimensional que muestra volúmenes, pero también muestra explícitamente el tipo de uso del agua (uso consuntivo del agua de lluvia, superficial o subterránea, o contaminación del agua) y el lugar y período del uso.

La huella hídrica de un individuo, comunidad o empresa se define como el volumen total de agua dulce que se usa para producir los bienes y servicios consumidos por tal individuo o comunidad, o producidos por tal empresa. Muestra la apropiación de los recursos hídricos limitados en el planeta por parte de los humanos y, por tanto, aporta una base para discutir el tema de la asignación de agua, así como aquellos asuntos relacionados con un uso del agua sostenible, igualitario y eficiente. Además, sienta las bases para la evaluación de los impactos de los bienes y servicios a nivel de la zona de captación y para la formulación de estrategias para reducir dichos impactos.

### 2. ¿Qué novedad aporta la huella hídrica?

Tradicionalmente, las estadísticas sobre el uso de agua se centran en medir la extracción de agua y su uso directo. El método de contabilidad de la huella hídrica toma una perspectiva mucho más amplia. En primer lugar, la huella hídrica mide tanto el uso directo del agua como el indirecto. Este último se refiere al uso del agua en la cadena de suministro de un producto. Por tanto, relaciona los consumidores finales, las empresas intermediarias y los comerciantes con el uso del agua a lo largo de toda la cadena de producción de un producto. Esto es relevante porque, por lo general, el uso directo del agua por parte de un consumidor es pequeño en comparación con el indirecto y el uso de agua operacional por parte de una empresa es pequeño en comparación con el de la cadena de suministro.

Teniendo esto en cuenta, el panorama real de la dependencia hídrica de un consumidor y de una empresa puede cambiar radicalmente. Por otro lado, el método de la huella hídrica difiere en que tiene en cuenta el consumo de agua (en lugar de la extracción), donde el consumo se refiere a la parte de la extracción del agua que se evapora o se incorpora a un producto. Además, la huella hídrica va más allá de la observación del uso de agua azul (uso de agua superficial y subterránea). También incluye el componente de la huella hídrica verde (uso de agua de lluvia) y el de la huella hídrica gris (agua contaminada).

### **3. ¿Es la huella hídrica algo más que una bonita metáfora?**

El término “huella” suele usarse como metáfora para referirse al hecho de que los seres humanos nos apropiamos de una gran proporción de los recursos naturales disponibles (suelo, energía o agua). Sin embargo, al igual que la huella ecológica y que la huella de carbono, la huella hídrica es más que una metáfora: existe un riguroso marco de contabilidad con variables medibles bien definidas y procedimientos de contabilidad bien establecidos para calcular las huellas hídricas de los productos, los consumidores individuales, las comunidades, las naciones o las empresas. No aconsejamos usar el concepto de huella hídrica como una metáfora porque su fuerza reside en su efectividad a la hora de usarla en un contexto de contabilidad rigurosa y objetivos de reducción medibles.

### **4. El agua es un recurso renovable, permanece dentro del ciclo, así que ¿cuál es el problema?**

El agua es un recurso renovable, pero eso no quiere decir que su disponibilidad sea ilimitada. En un período determinado, la precipitación siempre se reduce a una cierta cantidad. Lo mismo ocurre con la cantidad de agua que reabastece las reservas de agua subterránea y que fluye a través de un río. El agua de lluvia puede usarse en la producción agrícola y el agua de los ríos y acuíferos puede usarse para el riego o con fines industriales o domésticos. Pero no es posible usar más agua de la disponible. No se puede extraer de un río más de lo que lleva su caudal en un período determinado y, a largo plazo, no se puede extraer agua de los lagos ni de las reservas de agua subterránea por encima de su tasa de reabastecimiento.

La huella hídrica mide, a partir de la cantidad de agua disponible en un período determinado, el agua que se consume (evapora) o se contamina. De este modo, proporciona una medida de la cantidad disponible que ha sido apropiada por los humanos. Lo restante se deja para la naturaleza. El agua de lluvia que no se usa para la producción agrícola, sino para sustentar la vegetación natural. Los flujos de agua subterráneos y los superficiales que no hayan sido evaporados para fines humanos o contaminados se dejan para mantener ecosistemas acuáticos saludables.

## **5. ¿Existe acuerdo sobre cómo medir la huella hídrica?**

Los métodos para realizar la contabilidad de la huella hídrica se han publicado en revistas científicas arbitradas. Además, hay ejemplos prácticos disponibles sobre cómo se pueden aplicar los métodos para calcular la huella hídrica de un producto específico, de un consumidor individual, de una comunidad o de una empresa u organización. En un sentido general, existe acuerdo en relación con la definición y al cálculo de la huella hídrica. Sin embargo, cada vez que se aplica el concepto en una situación sin precedentes surgen nuevas preguntas de tipo práctico, por ejemplo: ¿qué debería incluirse y qué puede excluirse?, ¿cómo manejar situaciones en las que la cadena de suministro no se puede trazar adecuadamente?, ¿qué normas de la calidad ambiental hay que usar a la hora de calcular la huella hídrica gris?, etc. Por tanto, la discusión se centra en cómo lidiar con esas cuestiones prácticas.

## **6. ¿Por qué hay que distinguir entre la huella hídrica verde, la azul y la gris?**

La disponibilidad de agua dulce en la Tierra está determinada por la precipitación anual sobre los suelos. Una parte de esta se evapora y la otra escurre hasta el océano por medio de acuíferos y ríos. Tanto el flujo evaporativo como el de la escorrentía pueden ser aprovechados por el hombre. El flujo evaporativo puede utilizarse para la producción de cultivos o dejarse en el ambiente para mantener los ecosistemas; la huella hídrica verde mide qué parte del total del flujo evaporativo se apropia realmente para fines humanos. El flujo de escorrentía (el agua que fluye por acuíferos y ríos) puede usarse para todo tipo de fines, incluyendo regar, lavar, procesar y refrigerar. La huella hídrica azul mide el volumen de agua subterránea y superficial consumida (es decir, extraída y luego evaporada o incorporada a un producto). La huella hídrica gris mide el volumen del flujo hídrico de acuíferos y ríos que ha sido contaminado por la actividad humana.

De este modo, las huellas hídricas verde, azul y gris miden diferentes tipos de apropiación del agua. Cuando sea necesario, se puede hacer una clasificación más específica sobre los componentes. En el caso de la huella hídrica azul, puede ser relevante diferenciar entre agua superficial, agua subterránea renovable y agua subterránea fósil. En el caso de la gris, se puede considerar importante distinguir entre diferentes tipos de contaminación. De hecho, es preferible que estos datos específicos se incluyan en las cifras agregadas de la huella hídrica.

## **7. ¿Por qué deberíamos cuantificar la huella hídrica verde total de un cultivo? ¿Por qué no solo cuantificar la evaporación adicional con respecto a la evaporación de la vegetación natural?**

Depende de la primera pregunta que se quiera responder. La huella hídrica verde mide la evaporación total y sirve para alimentar el debate sobre la asignación del agua para

diferentes fines en un contexto de disponibilidad limitada. La información sobre el aumento o la disminución de la evaporación es relevante desde la perspectiva de la hidrología de la zona de captación y los posibles efectos aguas abajo. La investigación muestra que, en ocasiones, los cultivos pueden ocasionar un aumento en la evaporación en comparación con la de la vegetación natural (especialmente en los períodos de rápido crecimiento de los cultivos) y en otras ocasiones, una reducción en la evaporación (por deterioro del suelo o por una reducción de la biomasa de superficie, por ejemplo). En muchos casos las diferencias no son muy significativas a nivel de cuenca hidrográfica. El cambio en la evaporación es interesante desde una perspectiva de la hidrología de la zona de captación y los posibles efectos aguas abajo, pero no si abordamos el debate sobre cómo se distribuyen los recursos limitados de agua dulce para diferentes fines. La huella hídrica está diseñada para este último caso. El objetivo de la huella hídrica verde es el de medir la apropiación del flujo evaporativo por parte de los humanos, igual que las huellas hídricas azul y gris pretenden medir la apropiación del flujo de escorrentía por parte de las personas. La huella hídrica verde mide la parte del agua de lluvia evaporada que ha sido apropiada por los humanos y, por tanto, no está disponible para la naturaleza. Así, la huella hídrica expresa el coste de un cultivo en términos de su uso total de agua.

### **8. ¿No es demasiado simplista añadir todos los metros cúbicos de agua utilizada y expresarlos en un indicador agregado?**

La huella hídrica agregada de un producto, consumidor o productor muestra el volumen total de agua dulce apropiada (consumida o contaminada). Sirve como indicador aproximado, útil para concienciar y hacerse una idea de dónde va la mayor parte del agua. La huella hídrica se puede presentar como un número agregado, pero, de hecho, es un indicador multidimensional del uso del agua que muestra diferentes tipos de consumo y contaminación de agua como una función espaciotemporal. Para desarrollar estrategias para un uso sostenible del agua es necesario usar información más detallada, integrada en el indicador compuesto de la huella hídrica.

### **9. ¿No deberíamos ponderar los diferentes componentes de la huella hídrica basados en su impacto local?**

La idea de factores ponderados parece bastante atractiva, porque no todos los metros cúbicos de agua utilizada tienen el mismo impacto local. Sin embargo, no recomendamos este enfoque por tres razones. La primera es que la manera de ponderar es y siempre será muy subjetiva, ya que existen muchos tipos de impactos (medioambientales, sociales y económicos), algunos de los cuales ni siquiera pueden cuantificarse fácilmente. La segunda es que los impactos siempre dependen totalmente del contexto local, lo que significa que es imposible establecer factores de ponderación

universalmente válidos. El impacto de un metro cúbico de agua extraído de un punto específico de un río y en un momento específico depende de las características de dicho río, como el volumen y la variabilidad del flujo hídrico; la competencia por el agua en este punto del río y en ese momento determinado, y los efectos de la extracción en ecosistemas aguas abajo y otros usuarios. La tercera y más importante es que los datos de la huella hídrica volumétrica contienen información crucial que se pierde al momento de ponderar. La huella hídrica se refiere a volúmenes reales de agua apropiada, que en sí es una información crucial porque en un mundo en el que los recursos de agua dulce son escasos, es importante saber qué volúmenes se asignan a qué fines. Otro asunto radica en que los impactos locales del consumo o contaminación del agua difieren.

Para abordar correctamente el hecho de que los diferentes componentes de la huella hídrica sí que tienen impactos locales diferentes, queremos subrayar que la huella hídrica es un indicador multidimensional que muestra volúmenes, pero también el tipo de agua usada y los lugares y períodos de su uso. La contabilidad de huella hídrica implica que se cuantifica con todo detalle. Esto forma una base apropiada para la evaluación de impacto local, en la que se evalúan los diferentes impactos para cada componente de la huella hídrica por separado en tiempo y espacio. Obviamente, la evaluación de impacto local muestra que es diferente para cada componente de la huella hídrica por separado. Para formular políticas del agua con el fin de reducir los impactos de la huella hídrica, es más útil saber cómo se relacionan sus diferentes componentes con los diferentes impactos que tener un índice ponderado de impacto de huella hídrica. El riesgo de realizar un índice ponderado de impacto de huella hídrica supuestamente avanzado es que ese tipo de índice esconde toda la información relacionada con los impactos en vez de hacerlos explícitos.

## **10. ¿Cómo se relaciona la contabilidad de la huella hídrica con el análisis del ciclo de vida?**

La huella hídrica de un producto puede ser un indicador del análisis del ciclo de vida (ACV) de un producto. Una de las diversas aplicaciones de la huella hídrica es que puede utilizarse en un ACV. En un contexto global, es un indicador relevante de la cantidad de los escasos recursos globales de agua dulce que se usan para un producto determinado. En un contexto más local, la huella hídrica espaciotemporalmente explícita se puede intersectar con un mapa de estrés hídrico para llegar a un mapa de impacto de huella hídrica espaciotemporalmente explícito. Los diferentes impactos deberían ser ponderados y agregados posteriormente para llegar a un índice agregado de impacto de huella hídrica. Para el ACV, una pregunta importante se refiere a cómo los diferentes tipos de uso de recursos naturales e impactos medioambientales se pueden agregar (que es una exigencia específica del ACV y no es relevante en otras aplicaciones de la huella hídrica).

Otras aplicaciones de la huella hídrica son, por ejemplo, identificar áreas de puntos críticos en ciertos productos, grupos de consumidores o empresas y formular estrategias de respuesta para reducir las huellas hídricas y mitigar sus impactos asociados. Para ello, la agregación no es funcional porque la especificación espaciotemporal y del tipo de agua es esencial en dichas aplicaciones.

## **11. ¿Cómo se relaciona la huella hídrica con la huella ecológica y la huella de carbono?**

El concepto de la huella hídrica es parte de una familia más amplia de conceptos que se han ido desarrollando en la década pasada en las ciencias medioambientales. En general, una huella se conoce como una medida cuantitativa que muestra la apropiación de recursos naturales o las presiones ejercidas por los seres humanos sobre el medio ambiente. La huella ecológica es una medida del uso del espacio bioproductivo (hectáreas). La huella de carbono mide la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) producida en unidades de dióxido de carbono equivalentes (en toneladas). La huella hídrica mide el uso del agua (en metros cúbicos por año).

Los tres indicadores son complementarios, puesto que miden cosas completamente diferentes. En cuanto a la metodología, existen muchas similitudes entre las diferentes huellas, pero cada una de ellas tiene sus peculiaridades relacionadas con la singularidad de la sustancia considerada. Por ejemplo, en el caso específico de la huella hídrica, es importante especificar el espacio y el tiempo porque la disponibilidad de agua varía significativamente con el espacio y el tiempo, por lo que la apropiación de agua debería considerarse siempre en su contexto local.

## **12. ¿Cuál es la diferencia entre la huella hídrica y el agua virtual?**

La huella hídrica es un término que se refiere al agua utilizada para elaborar un producto. En este contexto, también podemos hablar sobre el contenido virtual de agua de un producto en vez de su huella hídrica. Sin embargo, este concepto tiene una aplicación más amplia. Por ejemplo, podemos hablar sobre la huella hídrica de un consumidor analizando la de los bienes y servicios consumidos, o sobre la huella hídrica de un productor (empresa, fabricante, proveedor del servicio) analizando la de bienes y servicios producidos. Además, el concepto de la huella hídrica no se refiere simplemente al volumen de agua, como en el caso del término “contenido de agua virtual” de un producto. La huella hídrica es un indicador multidimensional, no solo en lo que se refiere al volumen de agua empleado, sino que también se hace explícito el lugar en donde se localiza la huella hídrica, qué fuente de agua se utiliza y cuándo se utiliza. La información adicional es crucial para evaluar los impactos locales de la huella hídrica de un producto.



# Bibliografía

- Acreman, M. y Dunbar, M. J. (2004) “Defining environmental river flow requirements: A review”, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 8, n.º 5, 2004, pp. 861-876.
- Alcamo, J. y Henrichs, T. (2002) “Critical regions: A model-based estimation of world water resources sensitive to global changes”, *Aquatic Sciences*, vol. 64, n.º 4, pp. 352-362.
- Aldaya, M. M. y Hoekstra, A. Y. (2010) “The water needed for Italians to eat pasta and pizza”, *Agricultural Systems*, vol. 103, pp. 351-360.
- Aldaya, M. M. y Llamas, M. R. (2008) “Water footprint analysis for the Guadiana river basin”, *Value of Water Research Report Series*, n.º 35, UNESCO-IHE, Delft, Netherlands, [www.waterfootprint.org/Reports/Report35-WaterFootprint-Guadiana.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report35-WaterFootprint-Guadiana.pdf).
- Aldaya, M. M., Allan, J. A. y Hoekstra, A. Y. (2010a) “Strategic importance of green water in international crop trade”, *Ecological Economics*, vol. 69, n.º 4, pp. 887-894.
- Aldaya, M. M., Garrido, A., Llamas, M. R., Varelo-Ortega, C., Novo, P. y Casado, R. R. (2010b) “Water footprint and virtual water trade in Spain”, en A. Garrido y M. R. Llamas (eds.) *Water Policy in Spain*, CRC Press, Leiden, Holanda, pp. 49-59.
- Aldaya, M. M., Muñoz, G. y Hoekstra, A. Y. (2010c) “Water footprint of cotton, wheat and rice production in Central Asia”, *Value of Water Research Report Series*, n.º 41, UNESCO-IHE, Delft, Holanda, [www.waterfootprint.org/Reports/Report41-WaterFootprintCentralAsia.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report41-WaterFootprintCentralAsia.pdf).
- Aldaya, M. M., Martínez-Santos, P. y Llamas, M. R. (2010d) “Incorporating the water footprint and virtual water into policy: Reflections from the Mancha Occidental Region, Spain”, *Water Resources Management*, vol. 24, n.º 5, pp. 941-958.

- Allan, J. A. (2003) “Virtual water – the water, food, and trade nexus: Useful concept or misleading metaphor?”, *Water International*, vol. 28, n.º 1, pp. 106-113.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (1998) “Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements”, *FAO Irrigation and Drainage Paper*, n.º 56, Food and Agriculture Organization, Roma.
- ANZECC y ARMCANZ (Australian and New Zealand Environment and Conservation Council and Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand) (2000) “Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality”, ANZECC and ARMCANZ, <https://www.waterquality.gov.au/anz-guidelines/resources/previous-guidelines/anzecc-armcanz-2000>.
- Arthington, A. H., Bunn, S. E., Poff, N. L. y Naiman, R. J. (2006) “The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems”, *Ecological Applications*, vol. 16, n.º 4, pp. 1311-1318.
- Barton, B. (2010) “Murky waters? Corporate reporting on water risk, A benchmarking study of 100 companies”, Ceres, Boston, MA. Disponible en: [https://www.waterfootprint.org/media/downloads/Barton\\_2010.pdf](https://www.waterfootprint.org/media/downloads/Barton_2010.pdf).
- Batjes, N. H. (2006) “ISRIC-WISE derived soil properties on a 5 by 5 arc-minutes global grid”, Report 2006/02, ISRIC – World Soil Information, Wageningen, Netherlands, disponible a través de [www.isric.org](http://www.isric.org).
- Berger, M. y Finkbeiner, M. (2010) “Water footprinting: How to address water use in life cycle assessment?”, *Sustainability*, vol. 2, pp. 919-944.
- Boletín Oficial del Estado (2008) “Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica”, Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, *Boletín Oficial del Estado*, n.º 229, 22 de septiembre de 2008, Madrid, España, <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2008-15340>.
- Brown, S., Schreier, H. y Lavkulich, L. M. (2009) “Incorporating virtual water into water management: A British Columbia example”, *Water Resources Management*, vol. 23, n.º 13, pp. 2681-2696.
- Bulsink, F., Hoekstra, A. Y. y Booiij, M. J. (2010) “The water footprint of Indonesian provinces related to the consumption of crop products”, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 14, n.º 1, pp. 119-128.
- CBD (Convention on Biological Diversity) (2002) “Global strategy for plant conservation”, CBD, Montreal, Canadá, [www.cbd.int](http://www.cbd.int).

- Chahed, J., Hamdane, A. y Besbes, M. (2008) "A comprehensive water balance of Tunisia: Blue water, green water and virtual water", *Water International*, vol. 33, n.º 4, pp. 415-424.
- Chapagain, A. K. y Hoekstra, A. Y. (2003) "Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products", *Value of Water Research Report Series*, n.º 13, UNESCO-IHE, Delft, Holanda, [www.waterfootprint.org/Reports/Report13.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report13.pdf).
- Chapagain, A. K. y Hoekstra, A. Y. (2004) "Water footprints of nations", *Value of Water Research Report Series*, n.º 16, UNESCO-IHE, Delft, Holanda, [www.waterfootprint.org/Reports/Report16Voll.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report16Voll.pdf).
- Chapagain, A. K., y Hoekstra, A. Y. (2007) "The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands", *Ecological Economics*, vol. 64, n.º 1, pp. 109-118.
- Chapagain, A. K. y Hoekstra, A. Y. (2008) "The global component of freshwater demand and supply: An assessment of virtual water flows between nations as a result of trade in agricultural and industrial products", *Water International*, vol. 33, n.º 1, pp. 19-32.
- Chapagain, A. K. y Hoekstra, A. Y. (2010) "The green, blue and grey water footprint of rice from both a production and consumption perspective", *Value of Water Research Report Series*, n.º 40, UNESCO-IHE, Delft, Holanda, [www.waterfootprint.org/Reports/Report40-WaterFootprintRice.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report40-WaterFootprintRice.pdf).
- Chapagain, A. K. y Orr, S. (2008) *UK Water Footprint: The Impact of the UK's Food and Fibre Consumption on Global Water Resources*, WWF-UK, Godalming.
- Chapagain, A. K., y Orr, S. (2009) "An improved water footprint methodology linking global consumption to local water resources: A case of Spanish tomatoes", *Journal of Environmental Management*, vol. 90, pp. 1219-1228.
- Chapagain, A. K. y Orr, S. (2010) "Water footprint of Nestlé's 'Bitesize Shredded Wheat': A pilot study to account and analyse the water footprints of Bitesize Shredded Wheat in the context of water availability along its supply chain", WWF-UK, Godalming.
- Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y. y Savenije, H. H. G. (2006a) "Water saving through international trade of agricultural products", *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 10, n.º 3, pp. 455-468.
- Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y., Savenije, H. H. G. y Gautam, R. (2006b) "The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries", *Ecological Economics*, vol. 60, n.º 1, pp. 186-203.

- Clark, G. M., Mueller, D. K., Mast, M. A. (2000) "Nutrient concentrations and yields in undeveloped stream basins of the United States", *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 36, n.º 4, pp. 849-860.
- CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) (2005) *Brazilian Water Quality Standards for Rivers*, The National Council of the Environment, Brazilian Ministry of the Environment.
- Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (2010) "Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life", Canadian Environmental Quality Guidelines, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg, Canadá, <http://ceqg-rcqe.ccme.ca>.
- Crommentuijn, T., Sijm, D., de Bruijn, J., van den Hoop, M., van Leeuwen, K. y van de Plassche, E. (2000) "Maximum permissible and negligible concentrations for metals and metalloids in the Netherlands, taking into account background concentrations", *Journal of Environmental Management*, vol. 60, pp. 121-143.
- CropLife Foundation (2006) *National Pesticide Use Database 2002*, CropLife Foundation, Washington, DC.
- Dabrowski, J. M., Murray, K., Ashton, P. J. y Leaner, J. J. (2009) "Agricultural impacts on water quality and implications for virtual water trading decisions", *Ecological Economics*, vol. 68, n.º 4, pp. 1074-1082.
- Dastane, N. G. (1978) "Effective rainfall in irrigated agriculture", *Irrigation and Drainage Paper*, n.º 25, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, [www.fao.org/docrep/X5560E/x5560e00.htm#Contents](http://www.fao.org/docrep/X5560E/x5560e00.htm#Contents).
- Departamento Sudafricano de Asuntos Hídricos y Silvicultura (1996) *South African Water Quality Guidelines*, vol. 7, Aquatic Ecosystems, Department of Water Affairs and Forestry.
- Dietzenbacher, E. y Velazquez, E. (2007) "Analysing Andalusian virtual water trade in an input-output framework", *Regional Studies*, vol. 41, n.º 2, pp. 185-196.
- Dominguez-Faus, R., Powers, S. E., Burken, J. G. y Alvarez, P. J. (2009) "The water footprint of biofuels: A drink or drive issue?", *Environmental Science & Technology*, vol. 43, n.º 9, pp. 3005-3010.
- Dyson, M., Bergkamp, G. y Scanlon, J. (eds.) (2003) *Flow: The Essentials of Environmental Flows*, IUCN, Gland, Suiza.
- Ecoinvent (2010) *Ecoinvent Data v2.2*, Ecoinvent Centre, Switzerland, <https://www.ecoinvent.org/>.
- Elkington, J. (1997) *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business*, Capstone, Oxford.

- Ene, S. A. y Teodosiu, C. (2009) "Water footprint and challenges for its application to integrated water resources management in Romania", *Environmental Engineering and Management Journal*, vol. 8, n.º 6, pp. 1461-1469.
- Environment Agency (2007) "Towards water neutrality in the Thames Gateway", summary report, science report SC060100/SR3, Environment Agency, Bristol.
- EPA (Environmental Protection Agency) (2005) "List of drinking water contaminants: Ground water and drinking water", US Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/>.
- EPA (2010a) "Overview of impaired waters and total maximum daily loads program", US Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/>.
- EPA (2010b) "National recommended water quality criteria", US Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/>.
- Ercin, A. E., Aldaya, M. M. y Hoekstra, A. Y. (2009) "A pilot in corporate water footprint accounting and impact assessment: The water footprint of a sugar-containing carbonated beverage", *Value of Water Research Report Series*, n.º 39, UNESCO-IHE, Delft, Netherlands, [www.waterfootprint.org/Reports/Report39-WaterFootprint-CarbonatedBeverage.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report39-WaterFootprint-CarbonatedBeverage.pdf).
- EU (Unión Europea) (2000) "Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy", EU, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32000L0060>.
- EU (2006) "Directive 2006/44/EC of the European Parliament and of the Council of 6 September 2006 on the quality of fresh waters needing protection or improvement in order to support fish life", EU, Brussels, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32006L0044>.
- EU (2008) "Directive 2008/105/EC on environmental quality standards in the field of water policy", EU, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/105/oj>.
- Eurostat (2007) *The Use of Plant Protection Products in the European Union: Data 1992-2003*, Eurostat Statistical Books, European Commission, <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/5611788/KS-76-06-669-EN.PDFpdf/36c156f1-9fa9-4243-9bd3-f4c7c3c8286a?t=1414769021000>.
- Falkenmark, M. (1989) "The massive water scarcity now threatening Africa: Why isn't it being addressed?", *Ambio*, vol. 18, n.º 2, pp. 112-118.

- Falkenmark, M. (2003) “Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges”, *Philosophical Transaction of the Royal Society of London B*, vol. 358, n.º 1440, pp. 2037-2049.
- Falkenmark, M. y Lindh, G. (1974) “How can we cope with the water resources situation by the year 2015?”, *Ambio*, vol. 3, n.ºs 3-4, pp. 114-122.
- Falkenmark, M. y Rockström, J. (2004) *Balancing Water for Humans and Nature: The New Approach in Ecohydrology*, Earthscan, Londres.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (2003) Technical conversion factors for agricultural commodities, FAO, Roma, [www.fao.org/fileadmin/templates/ess/documents/methodology/tcf.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/ess/documents/methodology/tcf.pdf).
- FAO (2005) “New LocClim, Local Climate Estimator CD-ROM”, FAO, Roma, [www.fao.org/nr/climpag/pub/en3\\_051002\\_en.asp](http://www.fao.org/nr/climpag/pub/en3_051002_en.asp).
- FAO (2010a) “CLIMWAT 2.0 database”, FAO, Roma, [www.fao.org/nr/water/infores\\_databases\\_climwat.html](http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_climwat.html).
- FAO (2010b) “CROPWAT 8.0 model”, FAO, Roma, [www.fao.org/nr/water/infores\\_databases\\_cropwat.html](http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html).
- FAO (2010c) “FertiStat database”, FAO, Roma, [www.fao.org/ag/agl/fertistat](http://www.fao.org/ag/agl/fertistat).
- FAO (2010d) “FAOSTAT database”, FAO, Roma, <http://faostat.fao.org>.
- FAO (2010e) “AQUACROP 3.1”, FAO, Roma, [www.fao.org/nr/water/aquacrop.html](http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html).
- FAO (2010f) “Global Information and Early Warning System (GIEWS)”, FAO, Roma, [www.fao.org/giews/countrybrief/index.jsp](http://www.fao.org/giews/countrybrief/index.jsp).
- FAO (2010g) “Global map of monthly reference evapotranspiration and precipitation-at 10 arc minutes”, GeoNetwork grid database.
- FAO (2010h) “Global map maximum soil moisture – at 5 arc minutes”, GeoNetwork grid database.
- Galan-del-Castillo, E. y Velazquez, E. (2010) “From water to energy: The virtual water content and water footprint of biofuel consumption in Spain”, *Energy Policy*, vol. 38, n.º 3, pp. 1345-1352.
- Galloway, J. N., Burke, M., Bradford, G. E., Naylor, R., Falcon, W., Chapagain, A. K., Gaskell, J. C., McCullough, E., Mooney, H. A., Oleson, K. L. L., Steinfeld, H., Wassenaar, T. y Smil, V. (2007) “International trade in meat: The tip of the pork chop”, *Ambio*, vol. 36, n.º 8, pp. 622-629.

- Garrido, A., Llamas, M. R., Varela-Ortega, C., Novo, P., Rodríguez-Casado, R. y Aldaya, M. M. (2010) *Water Footprint and Virtual Water Trade in Spain*, Springer, Nueva York, NY.
- Gerbens-Leenes, P. W. y Hoekstra, A. Y. (2009) “The water footprint of sweeteners and bioethanol from sugar cane, sugar beet and maize”, *Value of Water Research Report Series*, n.º 38, UNESCO-IHE, Delft, Holanda, [www.waterfootprint.org/Reports/Report38-WaterFootprint-sweeteners-ethanol.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report38-WaterFootprint-sweeteners-ethanol.pdf).
- Gerbens-Leenes, P. W. y Hoekstra, A. Y. (2010) “Burning water: The water footprint of biofuel-based transport”, *Value of Water Research Report Series*, n.º 44, UNESCO-IHE, Delft, Holanda, <https://www.waterfootprint.org/media/downloads/Report44-BurningWater-WaterFootprintTransport.pdf>.
- Gerbens-Leenes, P. W., Hoekstra, A. Y. y van der Meer, T. H. (2009a) “The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply”, *Ecological Economics*, vol. 68, n.º 4, pp. 1052-1060.
- Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A. Y. y van der Meer, T. H. (2009b) “The water footprint of bioenergy”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106, n.º 25, pp. 10219-10223.
- Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A. Y. y van der Meer, T. H. (2009c) “A global estimate of the water footprint of *Jatropha curcas* under limited data availability”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106, n.º 40, p. E113.
- Gleick, P. H. (ed.) (1993) *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*, Oxford University Press, Oxford.
- Gleick, P. H. (2010) “Water conflict chronology”, [www.worldwater.org/conflict](http://www.worldwater.org/conflict).
- GWP (Global Water Partnership) (2000) “Integrated water resources management”, *TAC Background Papers*, n.º 4, GWP, Estocolmo.
- GWP e INBO (International Network of Basin Organizations) (2009) *A Handbook for Integrated Water Resources Management in Basins*, GWP, Stockholm, and INBO, París.
- Heffer, P. (2009) “Assessment of fertilizer use by crop at the global level”, International Fertilizer Industry Association, París.
- Herendeen, R. A. (2004) “Energy analysis and EMERGY analysis: A comparison”, *Ecological Modelling*, vol. 178, pp. 227-237.

- Hoekstra, A. Y. (ed.) (2003) “Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade”, *Value of Water Research Report Series*, n.º 12, UNESCO-IHE, Delft, Holanda, [www.waterfootprint.org/Reports/Report12.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report12.pdf).
- Hoekstra, A. Y. (2006) “The global dimension of water governance: Nine reasons for global arrangements in order to cope with local water problems”, *Value of Water Research Report Series*, n.º 20, UNESCO-IHE, Delft, Holanda, [www.waterfootprint.org/Reports/Report\\_20\\_Global\\_Water\\_Governance.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report_20_Global_Water_Governance.pdf).
- Hoekstra, A. Y. (2008a) “Water neutral: Reducing and offsetting the impacts of water footprints”, *Value of Water Research Report Series*, n.º 28, UNESCO-IHE, Delft, Holanda, [www.waterfootprint.org/Reports/Report28-WaterNeutral.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report28-WaterNeutral.pdf).
- Hoekstra, A. Y. (2008b) “The relation between international trade and water resources management”, en K. P. Gallagher (ed.) *Handbook on Trade and the Environment*, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, pp. 116-125.
- Hoekstra, A. Y. (2008c) “The water footprint of food”, en J. Förare (ed.) *Water For Food*, The Swedish Research Council for Environment, Agricultural Sciences and Spatial Planning, Estocolmo, pp. 49-60.
- Hoekstra, A. Y. (2009) “Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis”, *Ecological Economics*, vol. 68, n.º 7, pp. 1963-1974.
- Hoekstra, A. Y. (2010a) “The relation between international trade and freshwater scarcity”, Working Paper ERSD-2010-05, enero de 2010, World Trade Organization, Ginebra.
- Hoekstra, A. Y. (2010b) “The water footprint of animal products”, en J. D’Silva y J. Webster (eds.) *The Meat Crisis: Developing More Sustainable Production and Consumption*, Earthscan, Londres, pp. 22-33.
- Hoekstra, A. Y. y Chapagain, A. K. (2007a) “Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern”, *Water Resources Management*, vol. 21, n.º 1, pp. 35-48.
- Hoekstra, A. Y. y Chapagain, A. K. (2007b) “The water footprints of Morocco and the Netherlands: Global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities”, *Ecological Economics*, vol. 64, n.º 1, pp. 143-151.
- Hoekstra, A. Y. y Chapagain, A. K. (2008) *Globalization of Water: Sharing the Planet’s Freshwater Resources*, Blackwell Publishing, Oxford.
- Hoekstra, A. Y. y Hung, P. Q. (2002) “Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade”, *Value*

- of Water Research Report Series*, n.º 11, UNESCO-IHE, Delft, Holanda, [www.waterfootprint.org/Reports/Report11.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report11.pdf).
- Hoekstra, A. Y. y Hung, P. Q. (2005) “Globalization of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade”, *Global Environmental Change*, vol. 15, n.º 1, pp. 45-56.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M. y Mekonnen, M. M. (2009a) *Water Footprint Manual: State of the Art 2009*, Water Footprint Network, Enschede, Holanda, <https://waterfootprint.org/media/downloads/WaterFootprintManual2009.pdf>.
- Hoekstra, A. Y., Gerbens-Leenes, W. y van der Meer, T. H. (2009b) “Water footprint accounting, impact assessment, and life-cycle assessment”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106, n.º 40, p. E114.
- Hoekstra, A. Y., Gerbens-Leenes, W. y van der Meer, T. H. (2009c) “The water footprint of *Jatropha curcas* under poor growing conditions”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106, n.º 42, p. E119.
- Hubacek, K., Guan, D. B., Barrett, J. y Wiedmann, T. (2009) “Environmental implications of urbanization and lifestyle change in China: Ecological and water footprints”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, n.º 14, pp. 1241-1248.
- Humbert, S., Loerincik, Y., Rossi, V., Margnia, M. y Joliet, O. (2009) “Life cycle assessment of spray dried soluble coffee and comparison with alternatives (drip filter and capsule espresso)”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, n.º 15, pp. 1351-1358.
- IFA (Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes) (2009) “IFA data”, IFA, <http://ifadata.fertilizer.org/ucSearch.aspx>.
- IFC, LimnoTech, Jain Irrigation Systems and TNC (2010) *Water Footprint Assessments: Dehydrated Onion Products, Micro-irrigation Systems – Jain Irrigation Systems Ltd*, International Finance Corporation, Washington, DC.
- IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático) (2006) “2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories”, IPCC, <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/>.
- Jongschaap, R. E. E., Blesgraaf, R. A. R., Bogaard, T. A., van Loo, E. N. y Savenije, H.H. G. (2009) “The water footprint of bioenergy from *Jatropha curcas* L.”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106, n.º 35, pp. E92-E92
- Kampman, D. A., Hoekstra, A. Y. y Krol, M. S. (2008) “The water footprint of India”, *Value of Water Research Report Series*, n.º 32, UNESCO-IHE, Delft, Holanda.
- Koehler, A. (2008) “Water use in LCA: Managing the planet’s freshwater resources”, *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 13, n.º 6, pp. 451-455.

- Kuiper, J., Zarate, E, y Aldaya, M. (2010) “Water footprint assessment, policy and practical measures in a specific geographical setting”, estudio en colaboración con la UNEP Division of Technology, Industry and Economics, Water Footprint Network, Enschede, Holanda.
- Kumar, V. y Jain, S. K. (2007) “Status of virtual water trade from India”, *Current Science*, vol. 93, pp. 1093-1099.
- LAWA-AO (2007) *Monitoring framework design. Part B. Valuation bases and methods descriptions: Background and guidance values for physico-chemical components*.
- Levinson, M., Lee, E., Chung, J., Huttner, M., Danely, C., McKnight, C. y Langlois, A. (2008) *Watching Water: A Guide to Evaluating Corporate Risks in a Thirsty World*, J. P. Morgan, Nueva York, NY.
- Liu, J. y Savenije, H. H. G. (2008) “Food consumption patterns and their effect on water requirement in China”, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 12, n.º 3, pp. 887-898.
- Liu, J. G., Williams, J. R., Zehnder, A. J. B. y Yang, H. (2007) “GEPIC: Modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale”, *Agricultural Systems*, vol. 94, n.º 2, pp. 478-493.
- Liu, J., Zehnder, A. J. B. y Yang, H. (2009) “Global consumptive water use for crop production: The importance of green water and virtual water”, *Water Resources Research*, vol. 45, W05428.
- Ma, J., Hoekstra, A. Y., Wang, H., Chapagain, A. K. y Wang, D. (2006) “Virtual versus real water transfers within China”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 361, n.º 1469, pp. 835-842.
- MacDonald, D. D., Berger, T., Wood, K., Brown, J., Johnsen, T., Haines, M. L., Brydges, K., MacDonald, M. J., Smith, S. L. y Shaw, D. P. (2000) *A compendium of Environmental Quality Benchmarks*, MacDonald Environmental Sciences, Nanaimo, British Columbia.
- Maes, W. H., Achten, W. M. J. y Muys, B. (2009) “Use of inadequate data and methodological errors lead to an overestimation of the water footprint of *Jatropha curcas*”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106, n.º 34, p. E91.
- MAPA (2001) *Calendario de siembra, recolección y comercialización, años 1996-1998*, Ministerio de Agricultura de España, Madrid.

- MARM (2009) *Anuario de Estadística Agraria*, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España, [https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/forestal\\_estadistica\\_agraria.aspx](https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/forestal_estadistica_agraria.aspx).
- Mekonnen, M. M. y Hoekstra, A. Y. (2010a) “A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat”, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 14, pp. 1259-1276.
- Mekonnen, M. M. y Hoekstra, A. Y. (2010b) “Mitigating the water footprint of export cut flowers from the Lake Naivasha Basin, Kenya”, *Value of Water Research Report Series*, n.º 45, UNESCO-IHE, Delft, Netherlands, [www.waterfootprint.org/Reports/Report45-WaterFootprint-Flowers-Kenya.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report45-WaterFootprint-Flowers-Kenya.pdf).
- Milà i Canals, L., Chenoweth, J., Chapagain, A., Orr, S., Antón, A. y Clift, R. (2009) “Assessing freshwater use impacts in LCA: Part I – inventory modelling and characterization factors for the main impact pathways”, *Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 14, n.º 1, pp. 28-42.
- Ministerio Chino de Protección Medioambiental (2002) “Norma de calidad ambiental para aguas superficiales”, Ministerio chino de Protección Medioambiental, República Popular China, [http://english.mee.gov.cn/Resources/standards/water\\_environment/quality\\_standard/200710/t20071024\\_111792.shtml](http://english.mee.gov.cn/Resources/standards/water_environment/quality_standard/200710/t20071024_111792.shtml).
- Ministerio Federal Austriaco de Agricultura, Silvicultura, Medio Ambiente y Gestión del Agua (2010) “BGBI 2010 II Nr. 99: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Festlegung des ökologischen Zustandes für Oberflächengewässer (Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer – QZV Ökologie OG)”.
- Ministerio Japonés de Medio Ambiente (2010) “Normas de calidad ambiental para la contaminación del agua”, Ministerio de Medio Ambiente, Gobierno de Japón, <https://www.env.go.jp/en/water/>.
- Mitchell, T. D. y Jones, P. D. (2005) “An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids”, *International Journal of Climatology*, vol. 25, pp. 693-712.
- Monfreda, C., Ramankutty, N. y Foley, J. A. (2008) “Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000”, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 22, n.º 1, GB1022.
- Morrison, J., Morkawa, M., Murphy, M. y Schulte, P. (2009) *Water Scarcity and Climate Change: Growing Risks for Business and Investors*, CERES, Boston, MA.

- Morrison, J., Schulte, P. y Schenck, R. (2010) *Corporate Water Accounting: An Analysis of Methods and Tools for Measuring Water Use and its Impacts*, United Nations Global Compact, New York (NY), [https://pacinst.org/wp-content/uploads/sites/21/2013/02/corporate\\_water\\_accounting\\_analysis3.pdf](https://pacinst.org/wp-content/uploads/sites/21/2013/02/corporate_water_accounting_analysis3.pdf).
- NASS (2009) *Agricultural Chemical Use Database*, USDA National Agricultural Statistics Service, <https://data.nal.usda.gov/dataset/usda-national-agricultural-statistics-service-nass-agricultural-chemical-use-database>.
- Nazer, D. W., Siebel, M. A., van der Zaag, P., Mimi, Z. y Gijzen, H. J. (2008) “Water footprint of the Palestinians in the West Bank”, *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 44, n.º 2, pp. 449-458.
- NCDC (National Climatic Data Center) (2009) *Global surface summary of the day*, NCDC, <http://www.ncdc.noaa.gov/>.
- Noss, R. F. y Cooperrider, A. Y. (1994) *Saving Nature's Legacy: Protecting and Restoring Biodiversity*, Island Press, Washington, DC.
- Novo, P., Garrido, A. y Varela-Ortega, C. (2009) “Are virtual water ‘flows’ in Spanish grain trade consistent with relative water scarcity?”, *Ecological Economics*, vol. 68, n.º 5, pp. 1454-1464.
- Odum, H. T. (1996) *Environmental Accounting: Energy and Environmental Decision Making*, Wiley, Nueva York, NY.
- Oregon State University (2010) “Transboundary freshwater dispute database”, College of Earth, Ocean, and Atmospheric Sciences, Oregon State University, Corvallis, OR, <https://transboundarywaters.science.oregonstate.edu/content/transboundary-freshwater-dispute-database>.
- Pegram, G., Orr, S. y Williams, C. (2009) *Investigating Shared Risk in Water: Corporate Engagement with the Public Policy Process*, WWF, Godalming.
- Perry, C. (2007) “Efficient irrigation; Inefficient communication; Flawed recommendations”, *Irrigation and Drainage*, vol. 56, n.º 4, pp. 367-378.
- Pfister, S. y Hellweg, S. (2009) “The water “shoesize” vs. footprint of bioenergy”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106, n.º 35, pp. E93-E94.
- Pfister, S., Koehler, A. y Hellweg, S. (2009) “Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA”, *Environmental Science and Technology*, vol. 43, pp. 4098-4104.
- Poff, N. L., Richter, B. D., Arthington, A. H., Bunn, S. E., Naiman, R. J., Kendy, E., Acreman, M., Apse, C., Bledsoe, B. P., Freeman, M. C., Henriksen, J., Jacobson, R. B., Kennen, J. G., Merritt, D. M., O’Keeffe, J. H., Olden, J. D., Rogers, K., Tharme, R. E. y Warner, A. (2010) “The ecological limits of hydrologic alter-

- ation (ELOHA): A new framework for developing regional environmental flow standards”, *Freshwater Biology*, vol. 55, n.º 1, pp. 147-170.
- Portmann, F., Siebert, S., Bauer, C. y Döll, P. (2008) “Global data set of monthly growing areas of 26 irrigated crops”, *Frankfurt Hydrology Paper*, n.º 06, Institute of Physical Geography, University of Frankfurt, Frankfurt am Main, [www.geo.uni-frankfurt.de/ipg/ag/dl/forschung/MIRCA/index.html](http://www.geo.uni-frankfurt.de/ipg/ag/dl/forschung/MIRCA/index.html).
- Portmann, F. T., Siebert, S. y Döll P. (2010) “MIRCA2000 – Global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000: A new high-resolution data set for agricultural and hydrological modeling”, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 24, GB1011.
- Postel, S. L., Daily, G. C. y Ehrlich, P. R. (1996) “Human appropriation of renewable fresh water”, *Science*, vol. 271, pp. 785-788.
- Raskin, P. D., Hansen, E. y Margolis, R. M. (1996) “Water and sustainability: global patterns and long-range problems”, *Natural Resources Forum*, vol. 20, n.º 1, pp. 1-5.
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W. P., Suh, S., Weidema, B. P. y Pennington, D. W. (2004) “Life cycle assessment Part I: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications”, *Environment International*, vol. 30, pp. 701-720.
- Rees, W. E. (1992) “Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out”, *Environment and Urbanization*, vol. 4, n.º 2, pp. 121-130.
- Rees, W. E. (1996) “Revisiting carrying capacity: Area-based indicators of sustainability”, *Population and Environment*, vol. 17, n.º 3, pp. 195-215.
- Rees, W. E. y Wackernagel, M. (1994) “Ecological footprints and appropriated carrying capacity: Measuring the natural capital requirements of the human economy”, en A. M. Jansson, M. Hammer, C. Folke y R. Costanza (eds.) *Investing in Natural Capital: The Ecological Economics Approach to Sustainability*, Island Press, Washington, DC, pp. 362-390.
- Richter, B. D. (2010) “Re-thinking environmental flows: From allocations and reserves to sustainability boundaries”, *River Research and Applications*, vol. 26, n.º 8, pp. 1052-1063.
- Ridoutt, B. G. y Pfister, S. (2010) “A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity”, *Global Environmental Change*, vol. 20, n.º 1, pp. 113-120.
- Ridoutt, B. G., Eady, S. J., Sellahewa, J. Simons, L. y Bektash, R. (2009) “Water footprinting at the product brand level: case study y future challenges”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, n.º 13, pp. 1228-1235.

- Ridoutt, B. G., Juliano, P., Sanguansri, P. y Sellahewa, J. (2010) “The water footprint of food waste: Case study of fresh mango in Australia”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 18, n.º 16-17, pp. 1714-1721.
- Rockström, J. (2001) “Green water security for the food makers of tomorrow: Windows of opportunity in drought-prone savannahs”, *Water Science and Technology*, vol. 43, n.º 4, pp. 71-78.
- Romaguera, M., Hoekstra, A. Y., Su, Z., Krol, M. S. y Salama, M. S. (2010) “Potential of using remote sensing techniques for global assessment of water footprint of crops”, *Remote Sensing*, vol. 2, n.º 4, pp. 1177-1196.
- SABMiller y WWF-UK (2009) *Water Footprinting: Identifying and Addressing Water Risks in the Value Chain*, SABMiller, Woking and WWF-UK, Goldalming.
- SABMiller, GTZ y WWF (2010) *Water Futures: Working Together for a Secure Water Future*, SABMiller, Woking and WWF-UK, Goldalming.
- Safire, W. (2008) “On language: Footprint”, *New York Times*, 17 de febrero de 2008.
- Savenije, H. H. G. (2000) “Water scarcity indicators: The deception of the numbers”, *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 25, n.º 3, pp. 199-204.
- Siebert, S. y Döll, P. (2010) “Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation”, *Journal of Hydrology*, vol. 384, n.º 3-4, pp. 198-207.
- Siebert, S., Döll, P., Feick, S., Hoogeveen, J. y Frenken, K. (2007) “Global map of irrigation areas, version 4.0.1”, Johann Wolfgang Goethe University, Frankfurt am Main, y FAO, Roma, [www.fao.org/nr/water/aquastat/irrigationmap/index10.stm](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/irrigationmap/index10.stm).
- Smakhtin, V., Revenga, C. y Döll, P. (2004) “A pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity”, *Water International*, vol. 29, n.º 3, pp. 307-317.
- Smith, M. (1992) “CROPWAT – A computer program for irrigation planning and management”, *Irrigation and Drainage Paper*, n.º 46, FAO, Roma.
- Smith, R. A., Alexander, R. y Schwarz, G. E. (2003) “Natural background concentrations of nutrients in streams and rivers of the conterminous United States”, *Environmental Science and Technology*, vol. 37, n.º 14, pp. 3039-3047.
- Sonnenberg, A., Chapagain, A., Geiger, M. y August, D. (2009) *Der Wasser- Fußabdruck Deutschlands: Woher stammt das Wasser, das in unseren Lebensmitteln steckt?*, WWF Deutschland, Frankfurt.
- Svancara, L. K., Brannon, R., Scott, J. M., Groves, C. R., Noss, R. F. y Pressey, R. L. (2005) “Policy-driven versus evidence-based conservation: A review of political targets and biological needs”, *BioScience*, vol. 55, n.º 11, pp. 989-995.

- TCCC y TNC (The Coca-Cola Company™ y The Nature Conservancy) (2010) *Product Water Footprint Assessments: Practical Application in Corporate Water Stewardship*, TCCC, Atlanta, and TNC, Arlington.
- UKTAG (Grupo Técnico Asesor del Reino Unido) (2008) “UK environmental standards and conditions (Phase 1)”, UK Technical Advisory Group on the Water Framework Directive, [https://www.wfduk.org/sites/default/files/Media/Environmental%20standards/Environmental%20standards%20phase%201\\_Finalv2\\_010408.pdf](https://www.wfduk.org/sites/default/files/Media/Environmental%20standards/Environmental%20standards%20phase%201_Finalv2_010408.pdf).
- UN (Naciones Unidas) (1948) *Universal Declaration of Human Rights*, UN General Assembly, Resolution 217 A (III) of 10 December 1948, París.
- UN (2010a) *Trends in Sustainable Development: Towards Sustainable Consumption and Production*, UN, New York, NY, [https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/15Trends\\_in\\_sustainable\\_consumption\\_and\\_production.pdf](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/15Trends_in_sustainable_consumption_and_production.pdf).
- UN (2010b) “The human right to water and sanitation”, UN General Assembly, 64th session, Agenda item 48, UN, Nueva York, NY.
- UNEP (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) (2009) “GEMSTAT: Global water quality data and statistics”, Global Environment Monitoring System, UNEP, Nairobi, Kenya, [www.gemstat.org](http://www.gemstat.org).
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) (2009) *IWRM Guidelines at River Basin Level, Part I: Principles*, UNESCO, París.
- USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos) (1994) “The major world crop areas and climatic profiles”, *Agricultural Handbook*, n.º 664, World Agricultural Outlook Board, USDA, <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT88895275/PDF>.
- van der Leeden, F., Troise, F. L. y Todd, D. K. (1990) *The Water Encyclopedia*, 2.ª ed., CRC Press, Boca Raton, FL.
- van Lienden, A. R., Gerbens-Leenes, P. W., Hoekstra, A. Y. y van der Meer, T. H. (2010) “Biofuel scenarios in a water perspective: The global blue and green water footprint of road transport in 2030”, *Value of Water Research Report Series*, n.º 43, UNESCO-IHE, Delft, Netherlands, [www.waterfootprint.org/Reports/Report43-WaterFootprint-BiofuelScenarios.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report43-WaterFootprint-BiofuelScenarios.pdf).
- van Oel, P. R. y Hoekstra, A. Y. (2010) “The green and blue water footprint of paper products: Methodological considerations and quantification”, *Value of Water Research Report Series*, n.º 46, UNESCO-IHE, Delft, Holanda, [www.waterfootprint.org/Reports/Report46-WaterFootprintPaper](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report46-WaterFootprintPaper).

- van Oel, P. R., Mekonnen M. M. y Hoekstra, A. Y. (2008) “The external water footprint of the Netherlands: Quantification and impact assessment”, *Value of Water Research Report Series*, n.º 33, UNESCO-IHE, Delft, Holanda, [www.waterfootprint.org/Reports/Report33-ExternalWaterFootprintNetherlands.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report33-ExternalWaterFootprintNetherlands.pdf).
- van Oel, P. R., Mekonnen M. M. y Hoekstra, A. Y. (2009) “The external water footprint of the Netherlands: Geographically-explicit quantification and impact assessment”, *Ecological Economics*, vol. 69, n.º 1, pp. 82-92.
- Verkerk, M. P., Hoekstra, A. Y. y Gerbens-Leenes, P. W. (2008) “Global water governance: Conceptual design of global institutional arrangements”, *Value of Water Research Report Series*, n.º 26, UNESCO-IHE, Delft, Holanda, [www.waterfootprint.org/Reports/Report26-Verkerk-et-al-2008GlobalWaterGovernance.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report26-Verkerk-et-al-2008GlobalWaterGovernance.pdf).
- Verma, S., Kampman, D. A., van der Zaag, P. y Hoekstra, A. Y. (2009) “Going against the flow: A critical analysis of inter-state virtual water trade in the context of India’s National River Linking Programme”, *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 34, pp. 261-269.
- Wackernagel, M. y Rees, W. (1996) *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*, New Society Publishers, Gabriola Island, BC, Canadá.
- Wang, H. R. y Wang, Y. (2009) “An input-output analysis of virtual water uses of the three economic sectors in Beijing”, *Water International*, vol. 34, n.º 4, pp. 451-467.
- Water Neutral (2002) “Get water neutral!”, folleto distribuido entre los delegados del 2002 World Summit on Sustainable Development in Johannesburgo, The Water Neutral Foundation, Johannesburgo, Sudáfrica.
- WCED (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo) (1987) *Our Common Future*, WCED, Oxford University Press, Oxford.
- Williams, J. R. (1995) “The EPIC model”, en V. P. Singh (ed.) *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publisher, CO, pp. 909-1000.
- Williams, J. R., Jones, C.A., Kiniry, J. R. y Spanel, D. A. (1989) “The EPIC crop growth-model”, *Transactions of the ASAE*, vol. 32, n.º 2, pp. 497-511.
- WRI y WBCSD (World Resources Institute y World Business Council for Sustainable Development) (2004) *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*, edición revisada, WRI, Washington, DC and WBCSD, Conches- Ginebra, <https://ghgprotocol.org/corporate-standard>.
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos) (2009) *The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World*, WWAP, UNESCO Publishing, París, y Earthscan, Londres.
- WWF (2008) *Living Planet Report 2008*, WWF International, Gland, Switzerland.

- WWF (2010) *Living Planet Report 2010*, WWF International, Gland, Switzerland.
- Yang, H., Zhou, Y. y Liu, J. G. (2009) “Land and water requirements of biofuel and implications for food supply and the environment in China”, *Energy Policy*, vol. 37, n.º 5, pp. 1876-1885.
- Yu, Y., Hubacek, K., Feng, K. S. y Guan, D. (2010) “Assessing regional and global water footprints for the UK”, *Ecological Economics*, vol. 69, n.º 5, pp. 1140-1147.
- Zarate, E. (ed.) (2010a) “WFN grey water footprint working group final report: A joint study developed by WFN partners”, Water Footprint Network, Enschede, Holanda.
- Zarate, E. (ed.) (2010b) “WFN water footprint sustainability assessment working group final report: A joint study developed by WFN partners”, Water Footprint Network, Enschede, Holanda.
- Zeitoun, M., Allan, J. A. y Mohieldeen, Y. (2010) “Virtual water “flows” of the Nile Basin, 1998-2004: A first approximation and implications for water security”, *Global Environmental Change*, vol. 20, n.º 2, pp. 229-242.
- Zhao, X., Chen, B. y Yang, Z. F. (2009) “National water footprint in an input-output framework: A case study of China 2002”, *Ecological Modelling*, vol. 220, n.º 2, pp. 245-253.
- Zwart, S. J., Bastiaanssen, W. G. M., De Fraiture, C. y Molden, D. J. (2010) “A global benchmark map of water productivity for rainfed and irrigated wheat”, *Agricultural Water Management*, vol. 97, n.º 10, pp. 1617-1627.



## Lista de símbolos

Símbolo	Unidad <sup>a</sup>	Explicación
$\alpha$	—	Fracción de lixiviación-escorrentía, es decir, la fracción de sustancias químicas que alcanzan masas de agua dulce
$Extr$	volumen/tiempo	Volumen de extracción de agua
$Apl$	masa/tiempo	Aplicación de una sustancia química (fertilizante o pesticida) por unidad de tiempo
$TA$	masa/área	Tasa de aplicación de una sustancia química (fertilizante o pesticida) por unidad de terreno
$C$	masa/tiempo	Consumo de un producto
$C_{real}$	masa/volumen	Concentración real de una sustancia química en una masa de agua de la que se extrae el agua
$c_{efl}$	masa/volumen	Concentración de una sustancia química en un efluente
$c_{máx}$	masa/volumen	Concentración máxima permitida de una sustancia química en una masa de agua receptora
$c_{nat}$	masa/volumen	Concentración natural de una sustancia química en la masa de agua receptora
$NAC$	longitud/tiempo	Necesidades de agua del cultivo
$UAC_{azul}$	volumen/área	Uso de agua azul del cultivo
$UAC_{verde}$	volumen/área	Uso de agua verde del cultivo
$E$	dinero/tiempo	Valor económico total de un producto elaborado en una unidad de negocio

Símbolo	Unidad <sup>a</sup>	Explicación
$E_{fl}$	volumen/tiempo	Volumen del efluente (flujo de aguas residuales)
$CME$	volumen/tiempo	Caudal mínimo ecológico
$ET_a$	longitud/tiempo	Evapotranspiración ajustada del cultivo (en condiciones óptimas)
$ET_{azul}$	longitud/tiempo	Evapotranspiración de agua azul
$ET_c$	longitud/tiempo	Evapotranspiración de un cultivo (en condiciones óptimas)
$ET_{amb}$	volumen/tiempo	Evapotranspiración del suelo reservado para la vegetación natural
$ET_{verde}$	longitud/tiempo	Evapotranspiración de agua verde
$ET_o$	longitud/tiempo	Evapotranspiración del cultivo de referencia
$ET_{improd}$	volumen/tiempo	Evapotranspiración del terreno que no puede volverse productiva en la producción de un cultivo
$f_p[p, i]$	—	Fración del valor del producto final $p$ producido a partir del producto de entrada $i$
$f_v[p]$	—	Fración del valor del producto final $p$
$NR$	longitud/tiempo	Necesidades de riego
$K_c$	—	Coefficiente del cultivo
$K_{cb}$	—	Coefficiente basal del cultivo
$K_e$	—	Coefficiente de evaporación del suelo
$K_s$	—	Coefficiente de estrés hídrico
$L$	masa/tiempo	Carga de un contaminante
$L_{crit}$	masa/tiempo	Carga crítica de un contaminante
$P$	masa/tiempo <sup>b</sup>	Cantidad de producción de un producto
$P_{efec}$	longitud/tiempo	Precipitación efectiva
$precio$	dinero/masa	Precio de un producto
$E_{act}$	volumen/tiempo	Escorrentía real de una zona de captación
$E_{nat}$	volumen/tiempo	Escorrentía natural de una zona de captación (sin huella hídrica azul en la zona de captación)

Símbolo	Unidad <sup>a</sup>	Explicación
$A_g$	volumen/tiempo	Ahorro global de agua gracias al comercio de un producto
$A_n$	volumen/tiempo	Ahorro nacional de agua gracias al comercio de un producto
$T$	masa/tiempo <sup>b</sup>	Volumen de comercio de un productob
$T_e$	masa/tiempo <sup>b</sup>	Volumen de exportaciones de un producto
$T_i$	masa/tiempo <sup>b</sup>	Volumen de importaciones de un producto
$T_{eft}$	temperatura	Temperatura de un efluente
$T_{m\acute{a}x}$	temperatura	Temperatura máxima permitida de una masa de agua receptora
$T_{nat}$	temperatura	Temperatura natural de una masa de agua receptora
$V_b$	volumen/tiempo	Balance de agua virtual de un área delimitada (una nación)
$V_e$	volumen/tiempo	Exportaciones brutas de agua virtual desde un área delimitada (una nación)
$V_{e,d}$	volumen/tiempo	Exportaciones brutas de agua virtual en cuanto a la exportación de productos elaborados en el país
$V_{e,r}$	volumen/tiempo	Exportaciones brutas de agua virtual en cuanto la re-exportación de productos importados
$V_i$	volumen/tiempo	Importaciones brutas de agua virtual a un área delimitada (una nación)
$V_{i,net}$	volumen/tiempo	Importaciones netas de agua virtual a un área delimitada (una nación)
$w[i]$	masa	Cantidad de producto de entrada $i$
$w[p]$	masa	Cantidad de producto final $p$
$DA_{azul}$	volumen/tiempo	Disponibilidad de agua azul
$DA_{verde}$	volumen/tiempo	Disponibilidad de agua verde
$DA$	%	Dependencia nacional de las importaciones de agua virtual
$HH_{\acute{a}rea}$	volumen/tiempo	Huella hídrica dentro de un área geográficamente delimitada
$HH_{\acute{a}rea, nac}$	volumen/tiempo	Huella hídrica dentro de una nación
$HH_{emp}$	volumen/tiempo	Huella hídrica de una empresa

Símbolo	Unidad <sup>a</sup>	Explicación
$HH_{emp, oper}$	volumen/tiempo	Huella hídrica operacional de una empresa
$HH_{emp, sum}$	volumen/tiempo	Huella hídrica de la cadena de suministro de una empresa
$HH_{cons}$	volumen/tiempo	Huella hídrica de un consumidor
$HH_{cons, dir}$	volumen/tiempo	Huella hídrica directa de un consumidor
$HH_{cons, indir}$	volumen/tiempo	Huella hídrica indirecta de un consumidor
$HH_{cons, nac}$	volumen/tiempo	Huella hídrica del consumo nacional
$HH_{cons, nac, dir}$	volumen/tiempo	Huella hídrica directa de los consumidores de una nación
$HH_{cons, nac, indir}$	volumen/tiempo	Huella hídrica indirecta de los consumidores de una nación
$HH_{cons, nac, ext}$	volumen/tiempo	Huella hídrica externa de los consumidores de una nación
$HH_{cons, nac, int}$	volumen/tiempo	Huella hídrica interna de los consumidores en una nación
$HH_{proc}$	volumen/tiempo <sup>c</sup>	Huella hídrica de un proceso
$HH_{proc, azul}$	volumen/tiempo <sup>c</sup>	Huella hídrica azul de un proceso
$HH_{proc, verde}$	volumen/tiempo <sup>c</sup>	Huella hídrica verde de un proceso
$HH_{proc, gris}$	volumen/tiempo <sup>c</sup>	Huella hídrica gris de un proceso
$HH_{prod}$	volumen/masa <sup>b</sup>	Huella hídrica de un producto
$HH^*_{prod}$	volumen/masa <sup>b</sup>	Huella hídrica media de un producto en su estado de venta al consumidor o de exportación
$IIHH_{azul}$	—	Índice de impacto de la huella hídrica azul
$IIHH_{verde}$	—	Índice de impacto de la huella hídrica verde
$IIHH_{gris}$	—	Índice de impacto de la huella hídrica gris
$NCA$	—	Nivel de contaminación en una zona de captación en un período específico del año
$EA_{azul}$	—	Escasez de agua azul en una zona de captación en un período determinado del año
$EA_{verde}$	—	Escasez de agua verde en una zona de captación en un período determinado del año
$ASN$	%	Autosuficiencia hídrica nacional
$R$	masa/área	Rendimiento del cultivo

Dimensión	Explicación
<i>i</i>	Producto de entrada
<i>n</i>	Nación
<i>n<sub>e</sub></i>	Nación exportadora
<i>n<sub>i</sub></i>	Nación importadora
<i>p</i>	Producto final
<i>q</i>	Proceso
<i>s</i>	Proceso
<i>t</i>	Tiempo
<i>u</i>	Unidad de negocio
<i>x</i>	Lugar/lugar de origen

<sup>a</sup> La unidad de cada variable se expresa en términos generales (masa, longitud, superficie, volumen, tiempo). En la contabilidad de la huella hídrica, en la práctica, la masa se expresa normalmente en kg o t, el volumen en litros o m<sup>3</sup> y el tiempo en día, mes o año. Las variables como la lluvia, la evapotranspiración y la demanda de agua del cultivo, suelen expresarse como mm diarios, mensuales o anuales. El rendimiento y el uso de agua del cultivo suelen expresarse como t/ha y m<sup>3</sup>/ha respectivamente. Las cantidades de agua suelen expresarse como volumen, asumiendo que 1 litro de agua equivale a 1 kg. Partiendo de esa base, los balances de masa se traducen en balances de volumen. Obviamente, a la hora de presentar los números, es esencial especificar la unidad utilizada.

<sup>b</sup> La huella hídrica de un producto suele expresarse en términos de volumen de agua por unidad de masa; en este caso, es necesario expresar la producción, el consumo y el comercio de los productos en términos de masa/tiempo. Sin embargo, la huella hídrica de un producto también puede expresarse en términos de volumen de agua por unidad monetaria; en este caso es necesario expresar la producción, el consumo y el comercio de los productos en términos de unidad monetaria/tiempo. Otras alternativas para expresar la huella hídrica de un producto son, por ejemplo, volumen de agua/unidad (para productos que se contabilizan por unidad en vez de por peso), volumen de agua/kcal (para productos alimentarios) o volumen de agua/julios (para la electricidad o los combustibles).

<sup>c</sup> La huella hídrica de un proceso suele expresarse en términos de volumen de agua por unidad de tiempo. Sin embargo, dividiéndolo entre la cantidad de producto que resulta del proceso (unidades de producto/tiempo), una huella hídrica de proceso también se expresará en términos de volumen de agua por unidad de producto.



# Glosario

**Agua azul.** Agua dulce superficial y subterránea, es decir, el agua dulce de los lagos, ríos y acuíferos de agua dulce.

**Agua verde.** Agua que procede de la precipitación sobre el terreno y se almacena en el suelo o se queda temporalmente en la parte superior del suelo o la vegetación, y que no forma parte de la escorrentía superficial ni recarga los acuíferos. Finalmente, esta parte de la precipitación se evapora o transpira a través de las plantas. El agua verde puede volverse productiva para el crecimiento de los cultivos (aunque no toda puede ser utilizada por los cultivos, ya que siempre existirá la evaporación desde el suelo y porque no todos los períodos del año o lugares son apropiados para el crecimiento del cultivo).

**Ahorro global gracias al comercio.** El comercio internacional puede ahorrar agua dulce a nivel global si se comercia con un producto que requiere mucha agua en su elaboración de un área con alta productividad del agua (huella hídrica pequeña) a otra área con menor productividad del agua (huella hídrica elevada).

**Ahorro nacional de agua gracias al comercio.** Una nación puede preservar sus recursos propios de agua dulce a través de la importación de productos que requieran un uso intensivo de agua en vez de producirlos en la propia nación.

**Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica.** La fase de la evaluación de la huella hídrica que pretende comprobar si una huella hídrica específica es sostenible desde un punto de vista medioambiental, social y económico.

**Apropiación de agua.** Este es un término que se emplea en el contexto de la evaluación de la huella hídrica para referirse tanto al consumo de agua dulce para actividades humanas (huella hídrica verde y azul) como a la contaminación de agua dulce debida a la actividad humana (huella hídrica gris).

**Árbol de productos.** Véase “sistema de producción”.

**Autosuficiencia hídrica frente a la dependencia de agua de una nación.** Se define como la relación entre la huella hídrica interna del consumo nacional y huella hídrica total del consumo nacional. Denota el grado en el que una nación suministra agua necesaria para la producción de la demanda nacional para bienes y servicios. La autosuficiencia es del 100% si toda el agua necesaria está disponible y es extraída del territorio nacional. La autosuficiencia hídrica se aproxima a cero cuando la demanda de bienes y servicios de una nación se suple en gran parte con las importaciones de agua virtual. Las naciones con importaciones de agua virtual dependen, de hecho, de los recursos hídricos disponibles en otras partes del mundo. La “dependencia de importación de agua virtual” de una nación se define como la relación entre la huella hídrica externa del consumo nacional y la huella hídrica total del consumo nacional.

**Balance de agua virtual.** El balance de agua virtual de un área geográficamente delimitada (por ejemplo, una nación o una zona de captación) en un cierto período de tiempo se define como la importación neta de agua virtual en dicho período, que equivale a las importaciones brutas de agua virtual menos las exportaciones brutas. Un balance de agua virtual positivo implica una entrada neta de agua virtual de otras naciones a la nación en cuestión. Un balance negativo supone una salida de agua virtual.

**Carga crítica de contaminantes.** Carga de contaminantes que consume la capacidad de asimilación de la masa de agua receptora por completo.

**Compensación de la huella hídrica.** Compensar los impactos negativos de la huella hídrica es parte de la neutralidad en agua. La compensación es un último paso tras haber hecho un esfuerzo inicial de reducir la huella hídrica en la medida de lo posible. La compensación se puede hacer contribuyendo con (por ejemplo, invirtiendo) un uso del agua más sostenible e igualitario en las unidades hidrológicas en las que se sitúan los impactos de las huellas hídricas restantes.

**Concentración máxima permitida.** Véase “*normas de calidad ambiental del agua*”.

**Concentración natural.** Concentración natural o de fondo en una masa de agua receptora es la concentración que tendría dicha masa sin la intervención humana en la zona de captación. (Corresponde a las condiciones “de muy buen estado” tal y como se definen en la Directiva Marco del Agua de la UE.)

**Consumo de agua.** Volumen de agua dulce utilizada que luego se evapora o se incorpora a un producto. También incluye el agua extraída de aguas superficiales o subterráneas en una cuenca que pasa a otra cuenca hidrográfica o al mar. Es importante distinguir entre “consumo de agua” y “extracción de agua”.

**Contabilidad de la huella hídrica.** Es la etapa de la evaluación de la huella hídrica que se refiere a la recopilación de información objetiva y empírica de la huella hídrica con un alcance y profundidad definidos anteriormente.

**Contenido de agua virtual.** El contenido de agua virtual de un producto es el agua dulce incorporada en dicho producto, no en sentido real, sino virtual. Se refiere al volumen de agua consumida o contaminada para la elaboración de un producto, medido a lo largo de la cadena de producción. Si una nación exporta/importa dicho producto, estará exportando/importando agua de forma virtual. El contenido de agua virtual de un producto es igual a la huella hídrica de un producto, pero el primero se refiere al volumen de agua incorporado al producto en sí, mientras que la última se refiere a ese volumen, pero también indica qué tipo de agua se está utilizando y para qué momento y en qué lugar. Por tanto, la huella hídrica de un producto es un indicador multidimensional, mientras que el contenido de agua virtual se refiere sólo al volumen.

**Criterios de sostenibilidad.** Los criterios de sostenibilidad se clasifican, por lo general, en tres temas principales: las sostenibilidad medioambiental, social y económica.

**Disponibilidad de agua azul.** Es la escorrentía natural (a través de aguas subterráneas y ríos) menos el caudal mínimo ecológico. La disponibilidad de agua azul normalmente varía dentro de un año, así como de un año a otro.

**Disponibilidad de agua verde.** La evapotranspiración de la precipitación del terreno menos la evapotranspiración del suelo reservada para la vegetación natural y menos la evapotranspiración del suelo que no es productiva.

**Escasez de agua azul.** La relación entre huella hídrica azul y la disponibilidad de agua azul. La escasez de agua azul varía dentro de un año y de un año para otro.

**Escasez de agua verde.** La relación entre huella hídrica verde y la disponibilidad de agua verde. La escasez de agua verde varía dentro de un año y de un año para otro.

**Escasez hídrica.** Véanse “*escasez de agua azul*” y “*escasez de agua verde*”.

**Evaluación de la huella hídrica.** Se refiere a todas las actividades sobre como:

1. cuantificar y localizar la huella hídrica de un proceso, producto, productor o consumidor, o cuantificar la huella hídrica de un área geográfica de manera espaciotemporal;
2. analizar la sostenibilidad medioambiental, social y económica de esta huella hídrica; y
3. formular estrategias de respuesta.

**Evapotranspiración.** Evaporación del suelo y de la superficie del suelo de donde crecen los cultivos, incluyendo la transpiración del agua que realmente pasa a los cultivos.

**Exportación de agua virtual.** La exportación de agua virtual desde un área geográficamente delimitada (por ejemplo, una nación o una zona de captación) es el volumen de agua virtual asociado a la exportación de bienes o servicios desde esa

área. Es el volumen total de agua dulce consumido o contaminado para producir los productos destinados a la exportación.

**Extracción de agua.** El volumen de extracción de agua dulce superficial o subterránea. Parte de la extracción de agua dulce se evaporará, otra parte regresará a la zona de captación de la que fue extraída y otra parte podría regresar a otra zona de captación o al mar.

**Factor de dilución.** Número de veces que un volumen de efluente contaminado tiene que ser diluido en agua ambiente para conseguir el nivel máximo de concentración permitido.

**Flujo de agua virtual.** El flujo de agua virtual entre dos áreas geográficamente delimitadas (dos países, por ejemplo) es el volumen de agua virtual que se transfiere de un área a otra como resultado del comercio.

**Flujo de retorno.** La parte del agua extraída para fines agrícolas, industriales o domésticos que regresa a las aguas subterráneas o superficiales en la misma cuenca de la que fue extraída. Esta agua puede potencialmente extraerse y ser usada nuevamente.

**Huella hídrica.** Es un indicador del uso de agua dulce que tiene en cuenta tanto el uso directo como el indirecto de un consumidor o productor. La huella hídrica de un individuo, comunidad o empresa se define como el volumen total de agua dulce usado para producir los bienes y servicios consumidos por esa persona o comunidad o producidos por la empresa. El uso del agua se mide en términos de volumen de agua consumida (evaporada o incorporada a un producto) o contaminada por unidad de tiempo. La huella hídrica puede ser calculada para un producto particular o para cualquier grupo bien definido de consumidores (por ejemplo, un individuo, una familia, un pueblo, una ciudad, una provincia, un estado o una nación) o productores (por ejemplo, una organización pública, una empresa privada o un sector económico). La huella hídrica es un indicador geográficamente explícito que muestra no sólo los volúmenes de agua utilizados y contaminados, sino también su localización.

**Huella hídrica azul.** Volumen de agua superficial y subterránea consumida en la producción de un bien o servicio. El consumo se refiere al volumen de agua dulce utilizado y posteriormente evaporado o incorporado al producto. También incluye el agua superficial o subterránea extraída de una zona de captación y devuelta a otra zona de captación o al mar. Se refiere a la cantidad de agua subterránea o superficial extraída que no regresa a la zona de captación de la que fue extraída.

**Huella hídrica corporativa.** Véase *“huella hídrica de una empresa”*.

**Huella hídrica de la cadena de suministro de una empresa.** La huella hídrica de la cadena de suministro (o indirecta) de una empresa es el volumen de agua dulce

consumida o contaminada para elaborar todos los bienes y servicios que forman los insumos de producción de una empresa.

**Huella hídrica de la fase de utilización de un producto.** Cuando los consumidores utilizan un producto, puede existir una huella hídrica en su fase de utilización. Pensemos en la contaminación del agua derivada del uso de jabones de uso doméstico. En dicho caso, podemos hablar de la huella hídrica de la fase de utilización del producto. En sentido estricto, esta huella no forma parte de la huella hídrica de producto, sino de la huella hídrica del consumidor.

**Huella hídrica de la producción nacional.** Otro término para referirse a la “huella hídrica dentro de una nación”.

**Huella hídrica de las actividades generales.** La huella hídrica de un producto está formada por dos elementos: el uso de agua dulce que puede relacionarse inmediatamente con el producto y el uso de agua dulce en actividades generales. El último elemento se denomina huella hídrica de las actividades generales y se refiere al uso de agua dulce que en primera instancia no puede relacionarse del todo con la elaboración del producto específico considerado, pero sí con las actividades y materiales de apoyo utilizados en la empresa, que elaboran no sólo este producto, sino otros también. La huella hídrica de las actividades generales de una empresa debe distribuirse entre los diversos productos, lo que se realiza en función del valor relativo por producto. La huella hídrica de las actividades generales de una empresa incluye, por ejemplo, el uso de agua dulce de los baños y la cocina de una fábrica, así como la empleada para elaborar cemento y acero utilizados en la fábrica y en la maquinaria.

**Huella hídrica dentro de un área geográficamente delimitada.** Se define como el consumo y contaminación total de agua dulce dentro de los límites de esa área, que puede ser una unidad hidrológica (como, por ejemplo, una zona de captación o una cuenca hidrográfica) o una unidad administrativa (como, por ejemplo, un municipio, una provincia, un estado o una nación).

**Huella hídrica de un consumidor.** Se define como el volumen de agua dulce total consumido y contaminado para la elaboración de bienes y servicios consumidos por el consumidor. Se calcula sumando el uso directo de agua al uso indirecto. Este último se puede calcular multiplicando todos los bienes y servicios consumidos por su respectiva huella hídrica.

**Huella hídrica de un producto.** La huella hídrica de un producto (una materia prima, un bien o un servicio) es el volumen total de agua dulce utilizada para la elaboración del producto, sumado a lo largo de las diversas etapas de la cadena de producción. Se refiere no solo al volumen total de agua utilizada, sino también a dónde y cuándo se ha usado esa agua.

**Huella hídrica de una compañía.** Véase *“huella hídrica de una empresa”*.

**Huella hídrica de una empresa.** Este término, que también puede denominarse huella hídrica corporativa u organizacional, se define como el volumen total de agua dulce utilizado de forma directa e indirecta para el desarrollo de la empresa. La huella hídrica de una empresa está formada por dos componentes: el uso directo del agua por parte del productor (para producir/fabricar o para actividades de apoyo) y el uso indirecto del agua (el agua usada en la cadena de suministro del productor). La huella hídrica de una empresa es igual a la totalidad de la huella hídrica de los productos finales de la empresa.

**Huella hídrica dentro de una nación.** Se define como el volumen total de agua dulce consumido o contaminado dentro del territorio nacional.

**Huella hídrica del consumo nacional.** Se define como la cantidad total de agua dulce utilizada para producir bienes y servicios que serán consumidos por los habitantes de la nación. La huella hídrica del consumo nacional puede evaluarse de dos maneras. La primera, el enfoque de abajo arriba, tiene en cuenta la suma de todos los productos consumidos multiplicados por sus respectivas huellas hídricas. La segunda, el enfoque de arriba abajo, se calcula como el uso total de los recursos hídricos internos más la importación bruta de agua virtual, menos la exportación bruta de agua virtual.

**Huella hídrica directa.** La huella hídrica directa de un consumidor o productor (o de un grupo de consumidores o productores) hace referencia al consumo y a la contaminación de agua dulce que se asocia al uso del agua por parte de ese consumidor o productor. Es diferente a la huella hídrica indirecta, que hace referencia al consumo y a la contaminación del agua que pueden asociarse con la producción de bienes y servicios consumidos por el consumidor o los productos de entrada utilizados por el productor.

**Huella hídrica externa del consumo nacional.** La parte de la huella hídrica del consumo nacional que queda fuera de la nación en cuestión. Se refiere a la apropiación de los recursos hídricos de otras naciones para la producción de bienes y servicios que se importan y se consumen en dicha nación.

**Huella hídrica gris.** La huella hídrica gris de un producto es un indicador de la contaminación de agua dulce que puede asociarse con la elaboración de un producto a lo largo de toda su cadena de suministro. Se define como el volumen de agua dulce requerido para asimilar la carga de contaminantes basada en las concentraciones naturales de fondo y en las normas de calidad ambiental del agua existentes. Se calcula como el volumen de agua requerido para diluir los contaminantes hasta el punto que la calidad del agua se mantenga por encima de las normas de calidad acordadas.

**Huella hídrica indirecta.** La huella hídrica indirecta de un consumidor o productor se refiere al consumo y contaminación de agua dulce “por detrás” de los productos consumidos o elaborados. Equivale a la suma de las huellas hídricas de todos los productos consumidos por el consumidor o de todos los insumos (excluyendo el agua) utilizados por el productor.

**Huella hídrica interna del consumo nacional.** La parte de la huella hídrica del consumo nacional dentro del país en cuestión, es decir, la apropiación de recursos hídricos nacionales para producir bienes y servicios que se consumirán en el mismo país.

**Huella hídrica nacional.** Es lo mismo que lo que se denomina huella hídrica del consumo nacional y se define como la cantidad total de agua dulce utilizada para producir los bienes y servicios que serán consumidos por los habitantes de la nación. Parte de esta huella hídrica se encuentra fuera del territorio nacional. Este término no debe confundirse con la huella hídrica dentro de una nación, que se refiere al volumen total de agua dulce consumido o contaminado dentro del territorio nacional.

**Huella hídrica organizacional.** Véase “*huella hídrica de una empresa*”.

**Huella hídrica operacional de una empresa.** También denominada huella hídrica directa de una empresa, es el volumen de agua dulce consumido o contaminado a raíz de las operaciones de dicha empresa.

**Huella hídrica verde.** El volumen de agua de lluvia consumida durante el proceso de producción. Es especialmente relevante en el caso de productos agrícolas y forestales (productos basados en cultivos o madera), donde se refiere a la evapotranspiración de la precipitación total (desde campos y plantaciones) más el agua incorporada a los cultivos y madera recolectados.

**Impactos primarios.** Este término se usa en el contexto del análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica en un área geográfica. Se refiere a los efectos de la huella hídrica en una zona de captación sobre los flujos hídricos y la calidad del agua.

**Impactos secundarios.** Este término se expresa, junto con los “impactos primarios”, en el contexto del análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica en un área geográfica. Se refiere a los impactos de la huella hídrica sobre valores ecológicos, sociales y económicos como la biodiversidad, la salud, el bienestar y la seguridad.

**Importación de agua virtual.** La importación de agua virtual en un área geográficamente delimitada (por ejemplo, una nación o una zona de captación) es el volumen de agua virtual relacionado con las importaciones de bienes y servicios a esa área. Es el volumen total de agua dulce utilizada (en áreas exportadoras) para elaborar los productos. Desde el punto de vista del área importadora, esta

agua puede considerarse una fuente adicional que se añade a los recursos hídricos disponibles dentro de la misma área.

**Índice de impacto de la huella hídrica azul.** Es una medida agregada y ponderada del impacto de la huella hídrica azul a nivel de zona de captación. Tiene como base:

1. La huella hídrica azul de un producto, consumidor o productor especificado por zona de captación y por mes.
2. La escasez de agua azul por zona de captación y mes.

El índice se obtiene multiplicando ambas matrices y sumando los elementos de la matriz resultante. El resultado puede interpretarse como una huella hídrica azul ponderada según la escasez de agua azul en los lugares y períodos donde tienen lugar los diferentes componentes de la huella.

**Índice de impacto de la huella hídrica gris.** Es una medida agregada y ponderada del impacto de la huella hídrica gris a nivel de zona de captación. Tiene como base:

1. La huella hídrica gris de un producto, consumidor o productor especificado por zona de captación y por mes.
2. El nivel de contaminación por zona de captación y mes.

El índice se obtiene multiplicando ambas matrices y sumando los elementos de la matriz resultante. El resultado puede interpretarse como una huella hídrica gris ponderada según el nivel de contaminación del agua en los lugares y períodos donde tienen lugar los diferentes componentes de la huella.

**Índice de impacto de la huella hídrica verde.** Es una medida agregada y ponderada del impacto de la huella hídrica verde a nivel de zona de captación. Tiene como base:

1. La huella hídrica verde de un producto, consumidor o productor especificado por zona de captación y por mes.
2. La escasez de agua verde por zona de captación y mes.

El índice se obtiene multiplicando ambas matrices y sumando los elementos de la matriz resultante. El resultado puede interpretarse como una huella hídrica verde ponderada según la escasez de agua verde en los lugares y períodos donde tienen lugar los diferentes componentes de la huella.

**Índices de impacto de la huella hídrica.** Véase *“índice de impacto de la huella hídrica azul/gris/verde”*.

**Necesidad de agua del cultivo.** Cantidad total de agua necesaria para la evapotranspiración, desde la plantación hasta la recolecta de un determinado cultivo en un régimen climático específico, cuando se mantenga la cantidad adecuada de agua en

el suelo gracias a la precipitación o el riego para que el crecimiento de las plantas y el rendimiento del cultivo no se vean limitados.

**Necesidades de agua verde de los ecosistemas.** La cantidad de agua verde de los terrenos que tiene que reservarse para la preservación de la naturaleza y la biodiversidad y para medios de vida que dependan de los ecosistemas en áreas naturales.

**Necesidades de riego.** La cantidad de agua proveniente exclusivamente de la precipitación, es decir, la cantidad de agua de riego necesaria para la producción normal de un cultivo. Incluye la evaporación del suelo y algunas pérdidas inevitables en las condiciones dadas. Normalmente se expresa en unidades de profundidad del agua (milímetros) y puede realizarse de manera mensual, estacional o anual o por el período de cosecha.

**Neutralidad en agua.** Un proceso, producto, consumidor, comunidad o empresa tiene neutralidad en agua cuando:

1. Su huella hídrica se ha reducido lo posible, especialmente en lugares con un alto grado de escasez o contaminación de agua.
2. Las externalidades negativas medioambientales, sociales y económicas de la huella hídrica restante han sido compensadas.

En algunos casos, cuando la interferencia con el ciclo del agua puede evitarse por completo (por ejemplo, reciclando toda el agua y sin residuos) neutralidad en agua significa que la huella hídrica se anula; en otros casos como el de los cultivos, la huella hídrica no puede anularse. Por tanto, neutralidad en agua no significa necesariamente que la huella hídrica se vaya a reducir a cero, sino que se reduce lo máximo posible y que las externalidades negativas económicas, sociales y medioambientales de la huella hídrica restante se compensan por completo.

**Nivel de contaminación del agua.** Grado de contaminación del flujo de escorrentía, medido como la fracción de la capacidad de asimilación de contaminantes de la escorrentía consumida. Un nivel de contaminación del 100% significa que la capacidad de asimilación de contaminantes del flujo de escorrentía se ha consumido por completo.

**Normas de calidad ambiental del agua.** Cantidad máxima permitida de una sustancia en ríos, lagos o aguas subterráneas en forma de concentración. Las normas de calidad ambiental del agua también pueden hacer referencia a otras propiedades del agua, como pueden ser la temperatura o el pH. Las normas se establecen con el fin de evitar posibles efectos dañinos sobre la salud o bienestar de los humanos, la fauna o el funcionamiento de los ecosistemas.

**Precipitación efectiva.** Parte de la precipitación total que retiene el suelo y queda disponible para la producción del cultivo.

**Productividad del agua.** Unidades de producto elaboradas por unidad de consumo o contaminación de agua. La productividad del agua (unidades de producto/m<sup>3</sup>) es la inversa de la huella hídrica (m<sup>3</sup>/unidad de producto). La productividad del agua azul se refiere a las unidades de producto obtenidas por metro cúbico del agua azul consumida. La productividad de agua verde se refiere a las unidades de producto obtenidas por metro cúbico del agua verde consumida. La productividad del agua gris se refiere a las unidades de producto obtenidas por metro cúbico de agua gris producida. El término productividad del agua es similar a productividad laboral o productividad de la tierra, pero en este caso la producción se divide entre la entrada de agua. Cuando la productividad de agua se mide en resultados monetarios en vez de en resultados físicos por unidad de agua, podemos hablar de productividad económica del agua.

**Punto crítico.** Es un período específico del año (como la estación seca) en una (sub) zona de captación específica en la que la huella hídrica es insostenible debido a que, por ejemplo, se ponen en peligro las necesidades medioambientales del agua o las normas de la calidad de esta o porque la asignación y uso del agua en la zona de captación se considera injusta o ineficiente desde el punto de vista económico.

**Rendimiento de un cultivo.** Cantidad de cultivo recolectado por unidad de área recolectada.

**Requerimiento del caudal ambiental.** También denominado “caudal ecológico”. Cantidad, calidad y temporalidad de los caudales de agua necesaria para mantener los ecosistemas de agua dulce y de los estuarios y los medios de vida y bienestar humanos que dependen de estos ecosistemas.

**Sistema de producción.** El sistema de producción de un producto consiste en todas las etapas secuenciales del proceso aplicadas para su elaboración. Un sistema de producción puede consistir en una cadena lineal de procesos, puede tomar la forma de un árbol de producto (muchos productos de entrada que acaban formando un solo producto final) o puede tomar la forma de una compleja red de procesos interrelacionados que finalmente llevan a uno o más productos.

**Sostenibilidad geográfica.** La sostenibilidad geográfica de las huellas hídricas verde, azul y gris en una zona de captación o cuenca hidrográfica, se puede evaluar basándonos en una serie de criterios de sostenibilidad medioambiental, social y económica.

## Sobre los autores

**Arjen Y. Hoekstra** es catedrático en gestión del agua en la Universidad de Twente, Holanda; creador del concepto de la huella hídrica y Director Científico de la Water Footprint Network.

**Ashok K. Chapagain** ha sido ingeniero de riego en Nepal durante más de una década, ha trabajado como investigador en la Universidad de Twente y actualmente trabaja para WWF en Reino Unido.

**Maite M. Aldaya** trabaja como consultora del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) y es investigadora de la Water Footprint Network.

**Mesfin M. Mekonnen** ha sido experto en energía para el Ministerio de Minas y Energía de Etiopía, y actualmente es estudiante de doctorado en la Universidad de Twente.





Usamos mucha agua para beber, cocinar y lavar, pero bastante más para la producción de alimentos, papel y prendas de algodón. La huella hídrica es un indicador del uso de agua que tiene en cuenta tanto el uso directo como el indirecto de un consumidor o productor. El uso indirecto se refiere al “agua virtual” incorporada en bienes y materias primas para el comercio, tales como cereales, azúcar o algodón. La huella hídrica de un individuo, comunidad o empresa se define como el volumen total de agua dulce que se usa para producir bienes y servicios consumidos por el individuo o la comunidad, o producidos por la empresa.

Este libro ofrece una descripción actualizada y completa sobre la norma de evaluación de la huella hídrica tal y como ha sido desarrollada por la Red de la Huella Hídrica (Water Footprint Network). Más específicamente:

- Ofrece una serie de métodos integrales para la evaluación de la huella hídrica.
- Muestra cómo las huellas hídricas pueden calcularse para procesos y productos individuales, así como para consumidores, naciones y empresas.
- Contiene ejemplos desarrollados detallados sobre cómo calcular las huellas hídricas verde, azul y gris.
- Describe cómo analizar la sostenibilidad de la huella hídrica agregada en una cuenca hidrológica o la huella hídrica de un producto específico.
- Incluye una extensa gama de posibles medidas que pueden contribuir a la reducción de la huella hídrica.

### Sobre los autores

**Arjen Y. Hoekstra** es catedrático en gestión del agua en la Universidad de Twente, Holanda; creador del concepto de la huella hídrica y Director Científico de la Water Footprint Network.

**Ashok K. Chapagain** ha sido ingeniero de riego en Nepal durante más de una década, ha trabajado como investigador en la Universidad de Twente y actualmente trabaja para WWF en Reino Unido.

**Maite M. Aldaya** trabaja como consultora del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) y es investigadora de la Water Footprint Network.

**Mesfin M. Mekonnen** ha sido experto en energía para el Ministerio de Minas y Energía de Etiopía, y actualmente es estudiante de doctorado en la Universidad de Twente.

