

Lección Inaugural del Curso Académico 2009-2010

# **LAS HUELLAS DEL AGUA**

**Fernando Fdez.-Polanco Fdez. de Moreda**

Catedrático de Ingeniería Química

Valladolid, 2009



---

**Universidad de Valladolid**

Lección Inaugural del Curso Académico 2009-2010

# **LAS HUELLAS DEL AGUA**

Lección Inaugural del Curso Académico 2009-2010

Y/U 628.1  
FEK  
huc  
UVA

# LAS HUELLAS DEL AGUA

**Fernando Fdez.-Polanco Fdez. de Moreda**

Catedrático de Ingeniería Química

Valladolid, 2009

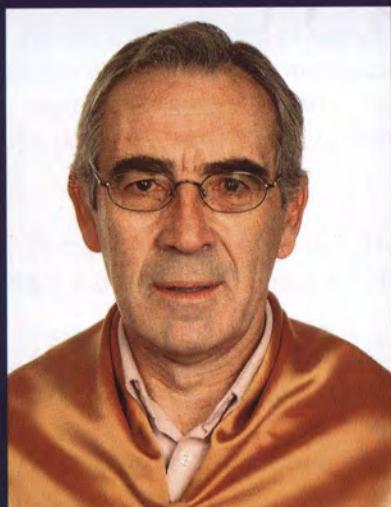


---

**Universidad de Valladolid**



**Prof. FERNANDO FDEZ.-POLANCO**  
**FDEZ. DE MOREDA**



# LAS HUELLAS DEL AGUA

En la era de la alta tecnología electrónica, los gestos de abrir un grifo y ver salir agua potable, o de «tirar de la cadena» y que nuestros excrementos desaparezcan, son tan rutinarios que han perdido su significado vital. Sólo cuando una avería en el suministro inutiliza el servicio, comprobamos lo difícil que es vivir sin agua de calidad fácilmente accesible.

En los últimos años el agua ha cobrado un papel relevante y aparece como uno de los factores socioeconómicos que limita el desarrollo de algunas zonas de la tierra, incluso, algunos agoreros señalan que la lucha por el control del agua desencadenará la próxima guerra mundial.

Tomando la acepción de «Huella» como rastro, seña o vestigio, podemos considerar diferentes «Huellas del agua».

## LA HUELLA BIO. (Agua = vida)

Para centrar la importancia capital del agua como sustancia que controla la vida en la tierra, empecemos recordando que ningún organismo puede desarrollarse sin agua. Las primeras formas de vida se corresponden con microorganismos anaerobios que se desarrollaron en el agua; aún hoy, la biodiversidad y cantidad de biomasa presente en los mares es comparable a la de las formas de vida terrestre. Se estima que la biomasa presente en los mares supera las 145.000 millones de toneladas, formadas por no menos de 230.000 especies conocidas.

En nuestra escala humana resulta evidente que podemos sobrevivir unos minutos sin aire, unos días sin agua, unas semanas sin alimento y unos años sin ordenador o televisión. Otro aspecto aún más importante se revela al considerar (tabla 1) que el 80% de nuestro

cuerpo es agua y que el componente mayoritario de los alimentos es, también, agua. No es de extrañar, que consciente o inconscientemente toda la actividad humana haya girado en torno al agua.

	<b>% Agua</b>
<b>Cuerpo humano</b>	
Cerebro	83
Corazón	83
Hígado	79
Sangre	90
Huesos	22
<b>Alimentos</b>	
Carne	55
Merluza	75
Arroz hervido	65
Pan	35
Manzana	85

Tabla 1. **Porcentaje de agua en el cuerpo humano y en diferentes alimentos.**

Además, no puede olvidarse que a pesar del desarrollo tecnológico, el agua continúa siendo el principal vector de transmisión de enfermedades mortales. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud más del 40% de las defunciones por malaria y cerca del 94% de las provocadas por enfermedades diarreicas, dos de las principales causas de mortalidad infantil, podrían evitarse mejorando la gestión del agua. Recordemos que la mayor parte del agua que bebemos se elimina del cuerpo humano en forma de orina y heces, que constituyen uno de los principales focos de contaminación de las aguas naturales. No es de extrañar que la gestión de las aguas residuales haya constituido, a lo largo de la historia, un importante problema social, que en la actualidad sigue sin resolverse en los países en vías de desarrollo.

## LA HUELLA DE LAS ANTIGUAS CULTURAS.

(Agua = civilización)

Uno de los grandes hitos de la evolución humana es el paso de la vida nómada a la sedentaria. En cualquier época y lugar del planeta los asentamientos estables se han realizado junto a fuentes de agua de calidad y en múltiples ocasiones el crecimiento de los núcleos urbanos ha estado limitado por la cantidad y calidad del agua disponible, tanto para uso directo, como para la producción de alimentos. No en vano las primeras grandes civilizaciones se asocian al nombre de los grandes ríos, Amarillo, Éufrates, Tigris y Nilo, junto a los que se asentaron.

## LA HUELLA TECNOLÓGICA EN LA ANTIGÜEDAD.

(Agua = ingeniería hidráulica)

Tomando Babilonia como primera referencia histórica de nuestro paseo, los restos arqueológicos indican que el agua se transportaba manualmente desde el río en cántaros de arcilla y se acumulaba en grandes vasijas del mismo material. Aunque ya existía una especie de jabón hecho a base de cenizas (álcali) y plantas aceitosas, parece evidente que Nabucodonosor no podía ducharse, sino que sus esclavos le «regaban» con cántaros de agua para eliminar el «jabón».

El referente mejor documentado de la civilización cretense es el Palacio de Knósos, en el que ya se encuentran conductos cerámicos cuya misión es transportar el agua de lluvia que se recoge en los tejados hasta cisternas de almacenamiento. También aquí se encuentran los restos de la primera letrina con asiento de madera y depósito de agua, en la que las deyecciones humanas se evacúan con agua corriente y se conducen hasta el río.

Paseando ahora por el antiguo Egipto, encontraremos algunos aspectos de notable interés, en primer lugar y para el agua de bebida se comprueba la pericia de los egipcios perforando pozos profundos que proveen de agua de excelente calidad. Así, el llamado «Pozo de José» construido junto a la pirámide de Gizeh, tiene una profundidad de casi 100 m, excavados en la roca. Otro aspecto significativo es el empleo de los primeros ingenios mecánicos para facilitar la subida del

agua hasta las zonas de consumo. La noria o «rueda egipcia», formada por potes cerámicos solidarios a una cadena que gira movida por tracción animal, supuso un importante avance tecnológico.

En los palacios y viviendas ricas se encuentran «cuartos de baño» formados por una esquina con suelo de piedra, en la que el dueño era «duchado» a cántaros por sus esclavos, mientras el agua corría por un canal cavado en el suelo hasta una poceta que era vaciada manualmente. El rito del baño estaba tan presente en la vida diaria de las clases dominantes que en algunas tumbas de reyes, junto a los elementos cotidianos que permitirían el nuevo estado de vida: alimento, bebida, prendas de abrigo y armas de caza, se han descubierto «cuartos de baño». En estas tumbas de más de 4.500 años de antigüedad, se han descubierto nichos de piedra con orificios de salida del agua cerrados con tapones de plomo y conectados a tubos de cobre que permitían su desagüe.

Aunque, como en muchas otras áreas, la cultura romana es heredera de la tradición helénica, la ingeniería del agua se asocia al desarrollo de la sociedad romana. Dos hitos históricos han quedado en la memoria colectiva, los acueductos y las cloacas. El acueducto «conducción de agua» es conocido desde antiguo como sistema para llevar el agua desde lugares elevados hasta otros situados a cotas inferiores. En función del carácter de plaza fuerte, periódicamente sitiada, algunas ciudades de la antigüedad utilizan, como en la actualidad, conducciones enterradas fuera de la vista del enemigo. Los romanos capaces de mantener épocas de paz más dilatadas, recurren a los acueductos para salvar las depresiones del terreno y conducir el agua hasta las fuentes de las ciudades. El acueducto de Segovia es un espléndido ejemplo de conjunción de ingeniería civil utilitaria y diseño artístico, con belleza plástica mantenida a lo largo de los siglos. La cloaca como gran avance de la ingeniería sanitaria romana mantiene su vigencia, de forma que los actuales sistemas de alcantarillado son conceptualmente idénticos a las cloacas romanas.

## LA HUELLA RELIGIOSA (agua = purificación)

El agua juega un papel primordial en numerosas ceremonias y cultos de diferentes religiones y creencias del mundo, alcanzando un reconocimiento simbólico que llega a convertirse en sagrado.

En el Zoroastrismo se considera que en el momento de la creación del mundo, el espíritu del mal atacó la tierra y transformó una parte del agua pura en agua salada, considerando así, que la polución es el mal y el agua pura es sagrada. Escupir, orinar o lavarse las manos en un río está prohibido para no quitar al agua su carácter sagrado.

En el hinduismo el agua posee poderes de purificación espiritual; lavarse con agua cada mañana y las abluciones antes de entrar en los templos son normas obligadas. Existen siete ríos sagrados y los lugares donde convergen varios ríos son especialmente venerados. En los ritos fúnebres el hijo del difunto debe verter agua en la hoguera funeraria para impedir que el alma se escape y vuelva a la tierra en forma de fantasma, mientras que las cenizas se aventan sobre un río sagrado.

Para los judíos el Diluvio, contado en el Génesis, representa el castigo y la destrucción de los pecados del mundo para que pueda renacer un nuevo mundo libre de impurezas. En la limpieza ritual el agua permite restaurar o conservar un estado de pureza. Los hombres van al *Mikveh* (baño ritual) los viernes y antes de las grandes fiestas; las mujeres, antes de su matrimonio, después de los partos y al final de sus menstruaciones. También es obligatorio lavarse las manos antes y después de las comidas.

Para las iglesias cristianas el agua es indisociable del Bautismo, formulado como puerta de entrada en la comunidad de creyentes. A la persona bautizada se le sumerge completa o parcialmente en agua, o su cabeza se rocía con un chorro de agua, en este rito el agua representa la purificación, el rechazo del pecado original. En la misa sólo el sacerdote lava las yemas de sus dedos, mientras que los creyentes van perdiendo el uso del agua bendita.

Para el musulmán, el agua tiene ante todo una función purificadora. Existen tres clases de ablución: 1) la de cuerpo entero, recomendada antes de la oración del viernes y de tocar el Corán, 2) la previa a las cinco oraciones diarias, enjuagándose cabeza, manos, antebrazos y pies, 3) con arena, cuando no se dispone de agua.

## LA HUELLA SANITARIA (agua = salud)

Desde la óptica del suministro y evacuación del agua, tras más de cuarenta siglos de historia, la situación en las postrimerías de la edad moderna es desoladora, el agua es directamente captada en pozos o conducida hasta las fuentes públicas y desde allí transportada manualmente a las viviendas, desde las que el agua residual, sin ningún tipo de tratamiento, se vierte a los cauces naturales, con los consiguientes problemas sanitarios.

En este sentido la problemática del agua no se relaciona únicamente con la cantidad disponible, sino con su calidad, en particular cuando hablamos de agua de boca. Así, el deseo de disponer de agua «inodora, incolora e insípida» es tan antiguo como el hombre y en todos los periodos históricos existen evidencias de que se tomaban medidas para disponer de agua agradable y segura. En el *Sus'ruta Samhita* (2000 a. de C.) se indica que «*el agua tiene que ser hervida al fuego o calentada al sol o sumergiendo un hierro caliente o purificada por filtración a través de grava y arena*». En grabados encontrados en las tumbas de Amenophis II y Ramsés II se representa un equipo de clarificación del agua contenida en vasijas elevadas, donde los sólidos sedimentaban y el agua clarificada era vertida mediante un sifón a un recipiente colocado en el suelo. En diferentes épocas y lugares se han utilizado diversos materiales filtrantes y adsorbentes para eliminar partículas sólidas y sustancias que confieren olor y sabor al agua.

Aproximándonos a la revolución industrial, en 1703 el científico francés La Hire presentó su plan a la Academia de Ciencias Francesa, proponiendo que cada casa tuviese un filtro de arena y una cisterna cerrada para recoger el agua de lluvia, pero deben pasar casi cien años hasta que en Escocia se instale la primera planta de tratamiento mediante filtros concéntricos de grava y arena, aunque el agua se seguía transportando en carro de caballos. En 1804 Glasgow es una de las primeras ciudades en conducir el agua tratada hasta los domicilios mediante tuberías. Comienza, en los países industrializados, la era del agua corriente, que no se generaliza hasta bien mediado el siglo XIX y que pone fin a una de las rutinas domésticas más penosas: «ir por agua a la fuente»; ahora, basta abrir un grifo para tener agua abundante y segura.

Volviendo a las aguas fecales, la evolución durante siglos fue prácticamente nula; en nuestro Siglo de Oro los vecinos al grito de «agua va» vacían sus bacinillas directamente a la calle, que en el mejor de los casos tiene un albañal central que facilita la evacuación hasta el arroyo más próximo. El redescubrimiento y reimplantación de la cloaca romana esconde el problema, la superficie de las calles queda limpia, pero por sus entrañas circulan heces y orines que siguen vertiéndose a los ríos y arroyos. No es hasta 1860 que el francés Mouras propone la construcción de las primeras fosas sépticas, capaces de retener gran parte de la materia en suspensión, eliminando del agua parte de la carga contaminante, pero manteniendo la materia no sedimentable y la soluble.

El mayor avance para tratar estas fracciones remanentes, es la aplicación de sistemas biológicos, cuyo origen es la intensificación de los procesos de autodepuración natural que ocurren en los ríos. Para los observadores avispados existía la evidencia de que a suficiente distancia de un vertido urbano el río volvía a recuperar unas condiciones razonables; en consecuencia, algún mecanismo natural se encargaba de destruir la contaminación. Con el desarrollo empírico de la microbiología se llega a determinar que muchos microorganismos presentes en los cursos de agua son capaces de «alimentarse» metabolizando la materia orgánica, transformándola en dióxido de carbono y en nuevos microorganismos. El secreto de la transformación radica en la necesidad de disponer de suficiente oxígeno para mantener ese metabolismo; si el agua residual se airea en un depósito los microorganismos crecen «comiendo» la contaminación. La nueva era de los procesos biológicos de tratamiento está servida.

## LA HUELLA HÍDRICA (Agua = recurso económico)

El agua es componente fundamental de todos los bienes y servicios que consumimos en nuestra vida diaria. Para cuantificar la influencia del factor agua, en los últimos años se han desarrollado y aplicado algunas herramientas que pueden ayudar a planificar y gestionar los recursos hídricos. El grupo del profesor Hoekstra de la Universidad de Twente (Países Bajos) ha introducido algunos conceptos, que a pesar de sus limitaciones conceptuales se aplican como herramientas de cuantificación. Estos conceptos básicos se resumen en:

## Huella hídrica (water footprint)

La huella hídrica de una persona, comunidad o empresa se define como el volumen total de agua fresca consumida. El uso del agua se mide en términos de agua directamente consumida (evaporada) y del agua que se contamina.

### Agua virtual

El contenido de agua virtual de un producto es el volumen de agua fresca utilizada en las diferentes etapas de su producción. Para el cálculo del agua virtual se consideran tres tipos de agua:

- *agua verde*, agua de lluvia que se evapora durante el proceso de producción y está fundamentalmente ligada a los procesos agrícolas.
- *agua azul*, agua superficial o subterránea que se aplica al proceso y desaparece.
- *agua gris*, volumen de agua necesario para diluir hasta límites legales el agua que se contamina durante la producción.

### Flujo de agua virtual

Cada producto lleva asociada una cantidad de agua virtual, en consecuencia el comercio lleva implícito un flujo de agua virtual. En este sentido pueden establecerse criterios de *exportación e importación de agua virtual*, *balances de agua virtual* y *ahorro de agua a través del comercio*.

### Huella hídrica externa e interna

Para calcular la *huella hídrica de una nación* es preciso computar el agua consumida dentro de las fronteras y la imputable a fuentes externas.

## Autosuficiencia o dependencia hídrica

La suficiencia en usos del agua se establece en función de la relación *Huella hídrica interna/ Huella hídrica total*. Valor próximo a 1 indica autosuficiencia, mientras que valores que se acercan a 0 indican países con gran dependencia.

Aplicando estas variables pueden obtenerse algunos datos que resultan de interés. En la tabla 2 se recogen las cantidades de agua virtual asociadas a diferentes productos de uso cotidiano. Igualmente, para determinadas producciones agrícolas se indica el % del agua virtual que corresponde a ese producto, respecto al total imputable a la agricultura.

Producto	Agua virtual (L/kg)	% total agricultura
Naranja	500	
Manzana	700	
Cebada	1.300	3
Trigo	1.300	6
Maíz	900	8
Arroz	3.400	21
Soja	1.800	4,5
Patata	900	
Azúcar caña	1.500	3,5
Pan	300	
Queso	5.000	
Huevos	200 * (L/unid)	
Café	140 * (L/taza)	
Carne vaca	15.500	
Carne pollo	3.900	
Carne cerdo	4.800	
Vino	960	
Cerveza	300	
Bebidas de cola	260	
Leche	1.000	
Productos industriales	80* ( L/US\$)	* 10% agric
Cuero vaca	16.600	
Papel	10* (L/DIN A4)	
Algodón**	2.700* (L/Camiseta)	3,5
Algodón	11.000* (L/kg jean)	

Tabla 2. Agua virtual de productos de consumo.

A primera vista los datos son espectaculares y ponen de manifiesto las ingentes cantidades de agua implicadas en nuestro día a día. Algunas enseñanzas prácticas fácilmente extrapolables son:

- La huella hídrica de los vegetarianos llega a ser un 30% inferior a la de los carnívoros.
- Los cambios en la alimentación en países emergentes (China, India) con tendencia a dietas más ricas en proteína animal, trastocarán el actual mapa hídrico.
- El algodón tiene una huella hídrica extremadamente elevada. La desecación de la mar Aral provocada por el cultivo intensivo de algodón puede repetirse en otras zonas.
- La agricultura tiene una huella hídrica 9 veces mayor que las actividades industriales.
- El caso de la cerveza es muy significativo. A priori un litro de cerveza contiene un litro de agua; considerando el proceso de fabricación industrial se concluye que son necesarios 4 L de agua para producir 1 L de cerveza, es decir, de 4 L utilizados 1 L se embotella en forma de cerveza y 3 L se convierten en agua residual. Respecto a los 300 L que aparecen en la tabla como agua virtual, la componente industrial es irrelevante, prácticamente todo el agua virtual procede de la cebada, principal materia prima de la cerveza.

Otros datos de gran actualidad se obtienen al analizar la huella hídrica de las fuentes primarias de energía. De acuerdo con los datos de la tabla 3, el impacto hídrico de las energías renovables, excepto la eólica, es muy superior al de los combustibles tradicionales. (Gerbens et ál.)

Tipo de energía	Huella hídrica (m <sup>3</sup> /GJ)
<b>No renovable</b> Gas natural Carbón Petróleo Uranio	0,11 0,16 1,06 0,10
<b>Renovable</b> Eólica Solar Hidráulica Biomasa	0 0,27 22 70

Tabla 3. Huella hídrica de energías primarias.

Por lo que respecta a España puede señalarse que ha sido el primer país que ha incluido la huella hídrica en su política ambiental al trasladar a su normativa nacional la «EU Water Framework Directive». Esta sensibilidad se justifica al considerar que nuestro país produce una de las huellas hídricas más grandes a nivel mundial, con unas componentes particulares que se presentan a continuación. De acuerdo con los datos globales de la tabla 4 la agricultura aparece como el gran consumidor de agua, a pesar del bajo valor añadido de su producción y la moderada generación de puestos de trabajo, en comparación con la actividad industrial.

Uso del agua	% HH	Producción (10 <sup>9</sup> €)	Puestos de Trabajo (10 <sup>6</sup> )
Urbana	5	4,2	
Industrial	15	123,0	3,1
Agrícola	80	26,0	1,0

Tabla 4. **Huella hídrica global y productividad de los sectores agrícola e industrial en España.**

Continuando con la agricultura española, de acuerdo con los datos de la figura 1, resulta esclarecedor que el 4% del agua azul produzca el 66% del valor añadido, mientras que el 60% del agua sólo produce un 5% del valor total del sector. Además, buena parte de los productos de baja huella hídrica y alto valor añadido (frutas, verduras, aceite de oliva) se exportan, mientras que existe importación relevante de cereales que generan bajo valor añadido y consumen agua. España es importador neto de agua virtual.

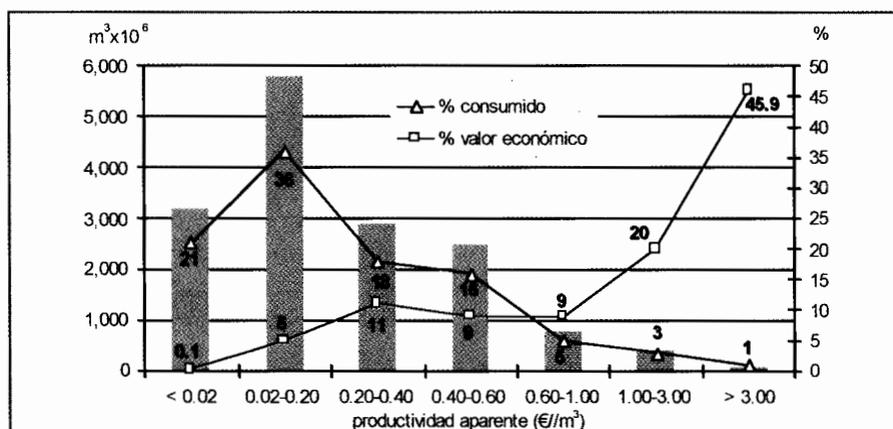


Figura 1. **Productividad aparente del agua agrícola en España.**

En la figura 2 aparece la huella hídrica de los diferentes países, la huella per cápita anual varía entre los 2.500 m<sup>3</sup> de los estados Unidos de Norteamérica y los 700 m<sup>3</sup> de China, con un promedio mundial 1.240 m<sup>3</sup>. La huella hídrica del español medio supera los 2.000 m<sup>3</sup>/año, lo que para una familia media representa un camión cisterna diario.

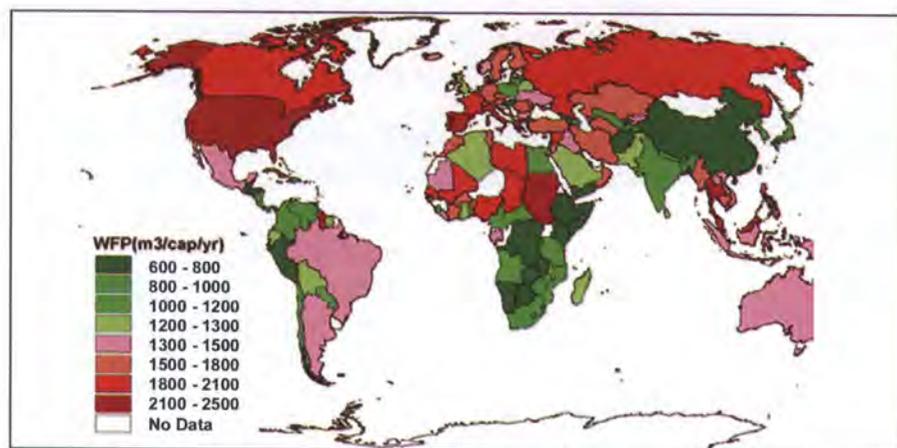


Figura 2. La huella hídrica de las naciones.

El comercio de bienes y especialmente el de productos agrícolas lleva implícito un importante movimiento de agua virtual, en consecuencia, como se muestra en la figura 3, existen países importadores y exportadores de agua.

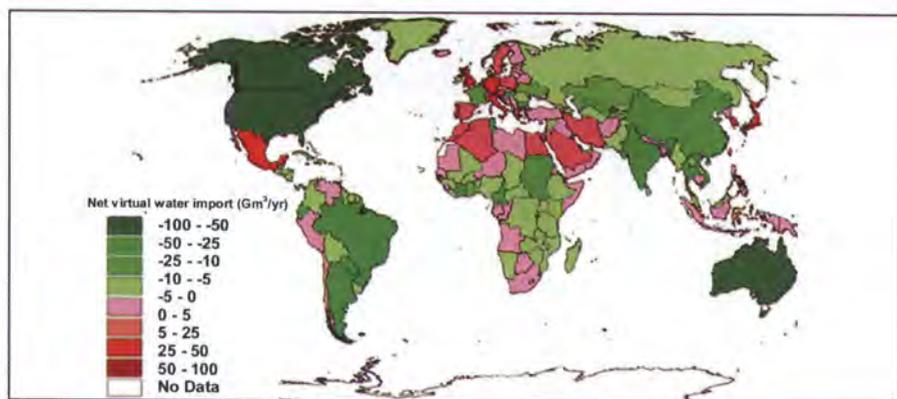


Figura 3. Importaciones y exportaciones de agua virtual.

## LA HUELLA HIDRO-ENERGÉTICA (¿agua o energía?)

Aunque el agua se asocia a la producción de energía hidroeléctrica, la discusión que se presenta pretende poner de manifiesto algunas limitaciones del concepto huella hídrica y determinadas conclusiones, cuando menos equívocas, que pueden derivarse de su aplicación.

Partiendo de la definición de agua virtual asociada a un determinado producto se observan algunos puntos débiles:

- En todo análisis de procesos productivos es preciso analizar conjuntamente los flujos de materia y energía.
- No se pueden realizar análisis que sólo contemplen la materia, sin tener en cuenta su «calidad».
- Considerando este criterio de «calidad», no pueden sumarse cantidades de agua verde y agua azul.
- Para el agua gris se aplica el criterio poco real de dilución y no de tratamiento.

Estas limitaciones pueden aclararse al considerar un caso concreto. Aceptemos que, de acuerdo con la tabla 2, la huella hídrica de la cebada es 1.300 L/kg y la de la cerveza 300 L/L. Para una pluviometría anual de 400 mm y una productividad de 3.000 kg/Ha, típicas de nuestras zonas de secano, se concluye que todo el agua utilizada en el crecimiento de la cebada es verde. Si en lugar de cebada, en ese campo se desarrollase vegetación natural, el uso del agua sería prácticamente idéntico, (evapotranspiración + percolación). Por el contrario, si para incrementar la producción hasta 5.000 kg/Ha se emplean sistemas de riego, es preciso introducir un mínimo de 2.600 m<sup>3</sup>/Ha de agua azul. El agua azul se detrae de su medio natural, tanto si es agua superficial como subterránea, modificando las condiciones iniciales del medio natural. Por otra parte, en función de la fuente del agua de riego, es preciso introducir un cierto componente de energía. El agua verde tiene consumo energético cero, mientras que el agua azul, en función de su origen, puede tener un consumo energético importante.

La «calidad» del agua azul depende, en consecuencia, de su «contenido energético». Consideremos que el punto de aplicación del agua azul se encuentra a cota cero y que disponemos de agua superficial a cota +200 m y agua subterránea a cota -200 m. Mientras que en el primer caso la energía potencial positiva del agua es de  $2.000 \text{ kJ/m}^3$ , lo que le permite correr libremente por los canales de riego, en el segundo caso la energía potencial negativa implica que es preciso aplicar  $2.000 \text{ kJ/m}^3$ , únicamente para poner el agua en superficie. En todos los casos la cebada tiene idéntica huella hídrica pero muy diferente huella hidro-energética.

La evidente limitación conceptual del criterio agua gris se pone en evidencia cuando consideramos el agua residual doméstica. La media española corresponde a un consumo de 250 L/hab.d, que se devuelve a la red de alcantarillado con una carga contaminante de 500 mg DQO/L. Aplicando la metodología de la huella hídrica sería preciso diluir 10 veces, hasta alcanzar un valor de la carga orgánica adecuado, esto significa que el agua virtual asociada a los usos domésticos de este ciudadano supera los  $900 \text{ m}^3/\text{año}$ . En realidad el agua residual se depura en plantas de tratamiento que consumen energía para convertir el agua bruta en agua tratada que puede verterse directamente a los cauces públicos; en lugar de una huella hídrica de  $900 \text{ m}^3$ , estaríamos hablando de una huella hidro-energética de  $90 \text{ m}^3/\text{año}$  y  $50 \text{ kwh/año}$ . Desde el punto de vista hídrico el impacto es irrelevante, el agua inicialmente captada en el medio es devuelta, tras su paso por la depuradora, en condiciones de pureza razonables, pero habiendo consumido una notable cantidad de energía en este proceso.

Profundizando en los usos domésticos y tomando como punto de partida una ciudad española de medio millón de habitantes puede establecerse que el consumo de agua doméstica es de  $45 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ ; aceptando que las pérdidas medias en las tuberías son del 20% y que se detrae por riegos y otros usos un 10%, el volumen de agua residual a tratar es de  $35 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ . Considerando que no existe sistema separativo de aguas pluviales y residuales, puede establecerse que los 10 millones de metros cúbicos perdidos se reponen por el agua de lluvia, con lo que globalmente todo el agua que se potabiliza se convierte en agua residual. En la planta de tratamiento de aguas residuales el

único agua que no se devuelve al cauce receptor es la que abandona la planta acompañando a los lodos residuales. Esta cantidad es en todos los casos inferior al 1% del total.

Puede, entonces, asegurarse que la huella hídrica real de la ciudad es prácticamente nula, al captarse para potabilización y uso una cantidad de agua semejante a la que se devuelve depurada; incluso en un sistema moderno bien gestionado, con pérdidas de agua en red que tienden a cero, la ciudad devuelve, incluyendo las aguas pluviales, más agua de la que retira.

Considerando los criterios energéticos de calidad del agua, la situación es radicalmente diferente. Para potabilizar y distribuir el agua de consumo de una ciudad tipo de 500.000 habitantes, se precisan 8 Gwh/año, mientras que para tratar hasta cumplimiento de normativa las aguas residuales se precisan 26 Gwh/año. Mientras la huella hídrica real es prácticamente cero, la huella hidro-energética supera los 30 Gwh/año, lo que implica una huella energética per cápita de 68 kwh/hab.año. Una nueva componente aparece al considerar que una parte del agua se consume a temperatura superior a la ambiente, lo que implica un notable consumo energético adicional. Aceptando que nuestro ciudadano tipo se ducha a diario con 40 L de agua a 40 °C, un sencillo balance de energía indica que la energía necesaria para aumentar 20 °C la temperatura de los 14,6 m<sup>3</sup>/año de agua empleados, es de 338 kwh/hab.año. En realidad, si se utiliza un calentador eléctrico, la energía primaria utilizada supera los 1.000 kwh/hab.año.

Con estos datos puede asegurarse que la energía asociada al proceso de calentar el agua de ducha es netamente superior a la energía implicada en la potabilización, transporte y depuración del agua doméstica.

Esta panorámica global, pone de manifiesto que la gestión del agua no puede desligarse de la gestión de su calidad energética; los planes de ahorro de agua tienen poca incidencia global, en el caso de las aguas urbanas la componente energética supera ampliamente a la componente hidráulica. Además, la huella energética de los usos internos (domésticos) es muy superior a la asociada a factores externos (industria del agua).

En este mismo sentido debe plantearse la polémica trasvases frente a ósmosis inversa. Los trasvases llevan asociados enormes consumos energéticos durante la fase de obra civil, mientras que el consumo en operación es relativamente moderado; por el contrario, las tecnologías de ósmosis inversa tienen un bajo consumo en su fase de implementación y elevados consumos de energía eléctrica en operación. Balances hidro-energéticos globales permiten comparar ambas alternativas con criterios racionales, eliminando dosis de visceralidad de la discusión. En realidad ambas técnicas son complementarias y no excluyentes.

Basten estos ejemplos para poner de manifiesto que no existe un problema global de agua, en la naturaleza existe agua suficiente para cubrir todas las necesidades del desarrollo humano. El problema aparece cuando por sobreexplotación o contaminación, en un lugar determinado deja de haber la cantidad de agua adecuada para los requerimientos socioeconómicos. Retornar a la situación inicial implica transportar o descontaminar agua; ambas alternativas son técnicamente viables, su limitación práctica es el elevado consumo de energía al que obliga su aplicación.

Recurriendo a los principios básicos de reversibilidad e irreversibilidad y de ciclos abiertos y cerrados, es preciso tener en cuenta que para el sistema biosfera-atmósfera, el ciclo del agua se aproxima cerrado y reversible, el agua cambia de localización o de calidad, pero la masa hídrica global, se mantiene sensiblemente constante. No ocurre lo mismo con los combustibles fósiles, cuyo ciclo es totalmente abierto e irreversible. El agua no se consume, se utiliza sin que desaparezca, volviendo al ciclo, mientras que el petróleo que se consume desaparece, perdiendo su uso energético, transformándose en  $\text{CO}_2$ .

## CONCLUSIONES

El agua ha provocado y provoca numerosas huellas ambientales, las más significativas aparecen reseñadas en los epígrafes de esta presentación y en una visión de conjunto, indican las equivalencias del agua:

Agua = VIDA  
CIVILIZACIÓN  
INGENIERÍA HIDRAULICA  
PURIFICACIÓN  
SALUD  
RECURSO ECONÓMICO

En el apartado socioeconómico los recientes conceptos de agua virtual y huella hídrica permiten cuantificar la incidencia del agua en las actividades humanas, sin embargo son conceptos excesivamente simplistas, al ignorar la componente energética asociada a los usos del agua. En este sentido es más realista hablar de huella hidro-energética del agua.

Aplicando el criterio de huella hidro-energética del agua, se comprueba que:

- No existe déficit global de agua. Aplicando energía el agua de baja calidad puede transformarse en agua de calidad adecuada y transportarse a los lugares de consumo.
- El déficit real procede de la implicación energética de la gestión del agua, que se relaciona con la calidad y ubicación del agua disponible.

## BIBLIOGRAFÍA

[http://www.unesco.org/water/wwd2006/world\\_views/](http://www.unesco.org/water/wwd2006/world_views/)

<http://www.waterhistory.org>

<http://www.waterfootprint.org>

CECH T.V. (2006): «Principles of Water Resources: History, Development, Management, and Policy». Wiley.

GERBENS-LEENES P. W., HOEKSTRA A. Y., VAN DER MEER Th. H. (2008): «Water footprint of bio-energy and other primary energy carriers». Unesco-IHE. Research Report Series No 29. March 2008

ALDAYA M. M., GARRIDO, A., LLAMAS M. R., VARELA-ORTEGA C., NOVO P., RODRÍGUEZ CASADO, R. (2008): «The water footprint of Spain». Journal on Sustainable Water Management, 2008-3: 15-20.

HOEKSTRA A. Y. AND CHAPAGAIN A. K. (2008): «Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources» Wiley-Blackwell. ISBN 978-1-4051-6335-4.