

# LOS REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DEL SECTOR ELÉCTRICO Y EL PROBLEMA DEL AGUA EN MÉXICO

NORA LINA MONTES\*

## RESUMEN

La crisis del agua es un tema que ha venido captando cada vez más la atención de los tomadores de decisión y de los expertos y académicos, lo cual se debe, por un lado, a la relación directa con el cambio climático (alteración del ciclo hídrico), y por el otro, a razones demográficas (crecimiento de la población mundial) con distribución muy inequitativa del fluido, y por tanto crecientes contiendas por el recurso.

Entre estas competencias se encuentran los sectores energético e hidráulico, íntimamente relacionados, en virtud de su mutua interdependencia: sin agua la producción de cualquier tipo de energía no es posible y sin ésta tampoco la extracción, transporte, tratamiento y distribución del fluido.

En este tenor, la revisión de los estudios y conclusiones a las que se han llegado a la fecha por diferentes grupos de trabajo resulta de interés, tanto a nivel mundial como nacional, pues se trata de una problemática ya bien diagnosticada, pero aún lejos de su solución en el marco de los acuerdos globales.

Dado lo vasto de esta temática, en este capítulo exponemos esencialmente los aspectos que consideramos básicos en la interrelación entre los sectores hídrico y energético, más específicamente en la industria eléctrica, como son los usos del agua, los volúmenes por etapa de este tipo de generación y las alternativas tecnológicas identificadas a la fecha para su mejor empleo; de igual manera se abordan los requerimientos de energía en el sector hídrico. Y siendo de gran importancia este tema para México, se presenta también una sección sobre cómo se atiende a la fecha este vínculo entre la energía y el agua.

\* Facultad de Economía de la Universidad Nacional Autónoma de México.

## INTRODUCCIÓN

La disponibilidad del agua en el planeta para consumo humano es muy baja, en comparación con el volumen global existente (2.53%), y si sólo se considera el de mayor factibilidad de aprovechamiento —agua dulce—, el porcentaje es aún menor, de tan sólo 0.77% del total, e incluso en esta categoría, su proporción apenas llega al 30.3% (tabla 1).

TABLA 1  
DISTRIBUCIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS MUNDIALES

<i>Rubro</i>	<i>Volumen total</i>	<i>Distribución (%)</i>	
	<i>(E-m3)</i>	<i>Global</i>	<i>Agua dulce</i>
Agua total	1 386.00	100.00	
Agua dulce	35.00	2.53	100.00
Glaciares y capas polares	24.40	1.76	69.70
Agua subterránea	10.50	0.76	30.00
Lagos, ríos y atmósfera	0.10	0.01	0.30
Agua salina	1 351.00	97.47	

E-m3 = Exa metros cúbicos =  $10^{18}$  m<sup>3</sup> [millones ( $10^6$ ) de billones ( $10^{12}$ )]

FUENTE: FAO. AquaData. disponible en <<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html>>.

El crecimiento de la población y el desarrollo de sus actividades sociales y productivas han venido agotando progresivamente este recurso, básicamente por sobreexplotación<sup>1</sup> y contaminación, lo que se ha acelerado en el último medio siglo. Si esto se analiza a nivel local, su creciente déficit adquiere una gran importancia, pues el agua dulce presenta las siguientes características, en adición a las dos antes mencionadas:

- a) Una distribución muy heterogénea en el mundo, razones geográficas;
- b) una extracción acelerada de todos los recursos disponibles: renovables, no renovables (como el agua fósil que se explica más adelante), no convencionales (aguas negras y marinas);
- c) una competencia entre sectores, creciente a un ritmo acelerado, como el caso municipal, derivado del crecimiento de la población;

<sup>1</sup> A nivel mundial, la extracción del agua en el pasado siglo aumentó 1.7 veces más rápido que la población.

- d) un destino fuertemente inequitativo: agropecuario-pecuario (acuícola) intensivo,<sup>2</sup> industria (incluida la de energía y minera), municipal (véase tabla 2);
- e) una importante alteración mundial, regional y local del ciclo de evaporación-precipitación, debido al cambio climático (CC) que se manifiesta como sequías y precipitaciones más severas y frecuentes.

TABLA 2  
DISTRIBUCIÓN SECTORIAL DE LA EXTRACCIÓN DE AGUA (%)

<i>Región</i>	<i>Agricultura</i>	<i>Municipal</i>	<i>Industria<sup>a</sup></i>
Mundo <sup>b</sup>	69	12	19
Mundo <sup>c</sup>	59	23	18
Europa	24	21	55
México	77	14	9
Variación <sup>d</sup>	21 - 82	9 / 26	5 - 65

<sup>a</sup> Incluye el sector energético y minero.

<sup>b</sup> Estimación global considerando sólo unos cuantos países que tienen una tasa de extracción elevada.

<sup>c</sup> Es el promedio a partir de las estimaciones de cada país.

<sup>d</sup> Los porcentajes varían por región y país, así como por la posición del sector en la economía.

FUENTE: <<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html>>.

Todos los sectores consumidores se han visto afectados por esta situación, aunque naturalmente en grado distinto. Se puede decir que la demanda de agua potable para uso humano es la que está enfrentando los mayores retos, dado que ya se tiene un importante déficit en un alto porcentaje de la población mundial —más de mil millones de personas no tienen acceso al agua (13.5%) y otras 2 600 (35.1%) no satisface el volumen recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS): de 50 litros/persona-día,<sup>3</sup> totalizando cerca del 50%—, lo que se agravará en el futuro.

<sup>2</sup> Los volúmenes descargados por este sector dependen principalmente del clima y de su participación en la economía —en general alta por ser agricultura intensiva, no artesanal—, la que puede variar de 21% (Europa) hasta 85% (África), y se ha estimado que a nivel mundial, sus requerimientos totales para irrigación ascienden a 1.5 T-m<sup>3</sup> (10<sup>12</sup> = billones), para lo cual se sacan 2.7 T-m<sup>3</sup>, es decir, hay una relación de casi 2/1 entre extracción y consumo, cuya fuente es diversa: recursos renovables, no renovables (agua fósil) y no convencionales (aguas negras y marinas). FAO, Water, Aquastat.

<sup>3</sup> Genéricamente, la OMS establecen tres niveles de acceso al agua en función de la distancia a la que está la fuente de abasto o el tiempo utilizado para llegar a ella, y se expresa en litros/habitante-día (l/hab-d): *básico*: 20 (7.3 m<sup>3</sup>/hab-a), a menos de 1.0 km o 20 minutos, suple básicamente necesidades de alimentación; *intermedio*: 50 (18.25), menor a 100 m o cinco minutos,

## LA RELACIÓN SECTOR HÍDRICO – SECTOR ENERGÉTICO

Dado el escenario poco prometedor descrito anteriormente, la relación *sector hídrico-sector energético* viene cobrando cada vez mayor importancia en la agenda internacional; progresivamente ha pasado de casi una total desatención, a un fuerte interés en todos los ámbitos del quehacer humano: político, académico, social y económico; así, ahora se cuenta con diversos reportes elaborados por distintas instituciones globales, internacionales y nacionales: Naciones Unidas (PNUMA, PNUD, FAO),<sup>4</sup> Banco Mundial, Fondo Monetario Internacional, Foro Económico Mundial, Agencia Internacional de Energía (AIE), ministerios, universidades y organizaciones.<sup>5</sup>

La razón de este creciente interés proviene del hecho de que la producción, transformación y transporte de los recursos energéticos dependen en gran medida del agua, y el aprovechamiento de ésta a su vez de la energía (más precisamente de la electricidad para su extracción, transporte y tratamiento); es un vínculo bidireccional muy estrecho.

Otro elemento que ha favorecido el estudio de esta temática es la creciente población que sigue estando sin acceso al agua, sea en su nivel básico o el asociado a las necesidades sanitarias esenciales, muchas de las cuales se traducen en muertes de infantes por infecciones asociadas a tales carencias. Estas situaciones también han derivado en conflictos bélicos (Siria el caso más fuerte) y hasta en crimen organizado (ya presente en África), así que a futuro la competencia por el agua parece seguirá en aumento.

Puede decirse que fue en la década de los noventa que iniciaron los análisis de esta temática,<sup>6</sup> pero tal vez hasta que EU lo incorporó en la agenda política de su Congreso, a inicios del presente siglo, fue que el tema tomó impulso, al ser incluido en su Acta de Política Energética de 2005, para lo

---

se asegura además de los consumos básicos, los de lavandería y aseo personal; y *óptimo*, 100 (36.5), abastecimiento continuo con el que se atienden prácticamente sin restricciones todas las necesidades de consumo e higiene.

<sup>4</sup> Programa de las Naciones Unidas para el Medio ambiente (PNUMA), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

<sup>5</sup> Un ejemplo es la iniciativa del Banco Mundial: Thirsty Energy, cuyo objetivo es apoyar a las naciones, sobre todo las que están en desarrollo, a enfrentar los retos que ya presenta y más aún lo harán en el futuro, la relación energía-agua en un contexto de cambio climático. Igualmente se tiene el esfuerzo de colaboración entre la Asociación de Científicos Comprometidos (UCS: Union of Concerned Scientists) y un grupo de más de una docena de expertos independientes abocados a desarrollar investigación sobre el mismo tema, denominado Energy and Water in a Warming World (EW3), dirigido más al papel del agua en la producción de energía, como análisis transversal del cambio climático.

<sup>6</sup> Consideramos puede catalogarse como pionero a Peter H. Gleick, científico estadounidense que trabaja temas ambientales, de desarrollo económico, seguridad internacional, ética cientí-

cual se ordenó desarrollar la Hoja de Ruta de la relación energía-agua, cuya primera versión (publicada en 2006), se centró en la evaluación de la extracción y el consumo agua en la generación eléctrica. En el presente se cuenta con un gran acervo bibliográfico sobre esta temática, entre los que destacan, consideramos, los de la Agencia Internacional de Energía (AIE), en particular los capítulos contenidos en su publicación anual *World Energy Outlook* de 2012 y 2016, en los que presentan los análisis realizados a diversos estudios.

Estimaciones de esta agencia señalan que en 2010 el sector energético extrajo del orden de 583 miles de millones de metros cúbicos ( $\text{mM}\cdot\text{m}^3$ ) y consumió  $66 \text{ mM}\cdot\text{m}^3$ , y de acuerdo con sus proyecciones, la primera crecerá en torno al 20% entre el 2010 y el 2035 (alcanzando  $\approx 700 \text{ mM}\cdot\text{m}^3$ ), en tanto que las segunda un espectacular 85% (a  $122 \text{ mM}\cdot\text{m}^3$ ),<sup>7,8,9</sup> lo que implica que la demanda pasará de 11% a 17% respecto de la extracción. En específico y a nivel mundial, de los dos grandes segmentos de energías secundarias, la electricidad y los combustibles, la primera será la que presente el crecimiento más acelerado en las próximas dos décadas, por lo tanto la que más demandará en el futuro.

Los términos de extracción y consumo son indicadores importantes para la gestión del agua en cuanto a su disponibilidad y calidad, factores determinantes en los procesos energéticos, entre otras razones por el aumento del costo de tal insumo en la estructura de gastos (antes poco significativo), además de la fuerte baja en su disponibilidad (en el pasado casi sin restricciones), y con ello la creciente necesidad de aprovechar las aguas fósiles<sup>10</sup>

---

fica e integridad, con énfasis en la problemática del agua a nivel mundial. Su interés por la energía data de 1970 y entre sus múltiples logros destaca ser cofundador del Instituto del Pacífico, ubicado en Oakland, California, en 1987, que cuenta con un alto prestigio en investigaciones del sector hídrico.

<sup>7</sup> International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook* (WEO) 2012 y 2016, París, 2012 y 2016, cap. 17 y 9.

<sup>8</sup> La extracción se refiere al volumen de fluido tomado de un cuerpo de agua (río, lago, acuífero, océano), en tanto que el consumo es la cantidad *absorbida* o pérdida en los procesos (evaporada, transpirada, incorporada a los cultivos —caso de los biocombustibles: BC— o a los productos); la diferencia entre ambos es el flujo remanente que se regresa al lugar de substracción, de aquí que la extracción será siempre mayor al consumo.

<sup>9</sup> Recordando que a nivel del planeta, el sistema hídrico es cerrado, es decir, no hay intercambio con el espacio, e internamente el agua se comporta cíclicamente entre evaporación y precipitación. De aquí que el volumen estimado de extracción en 2035 representará tan sólo 0.000 000 051% del volumen total ( $1\ 386 \text{ E}\cdot\text{m}^3$ ), debido a que a futuro —desafortunadamente— todas las fuentes de agua serán explotadas.

<sup>10</sup> El agua fósil es una reserva natural que se encuentra atrapada en un acuífero desde hace miles o hasta millones de años. En tal condición no tiene posibilidad de recarga vía filtración —al menos en cientos o miles de años—, de ahí su clasificación como recurso no renovable, que al igual que otros en tal categoría, están en vías de agotamiento. Además, conforme se extrae

y salinas, así como los efluentes (aguas negras); estas dos últimas con el requerimiento de ser tratadas, proceso con elevada inversión y costos operación (energía en particular).

En la industria energética, el agua tiene diferentes usos y con ello también diversos impactos ambientales, lo que se muestra en la tabla 3 en forma muy abreviada; en ésta se reduce a dos grandes etapas lo que denominamos aquí como *ciclo de combustible*, extrapolando este término a *huella hídrica (hH)*, lo cual no es del todo correcto, dado que este concepto, basado en un ACV: *Análisis de Ciclo de Vida: de la cuna a la tumba* (anexo 1), se define, en *stricto sensu*, como el volumen de agua fresca utilizada a lo largo de la cadena de fabricación de un producto o servicio, señalando el consumo por fuente y el volumen de contaminantes por tipo.

TABLA 3  
USOS DEL AGUA EN LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE LOS ENERGÉTICOS  
EMPLEADOS EN CADA CICLO DE COMBUSTIBLES Y SUS IMPACTOS AMBIENTALES

Recurso	Minería (M)	Tratamiento (T)	Contaminación			
			Agua	Suelo	Aire	Biota
Carbón	extracción	lavado	ma: M, T	ma: M, T	ma: M, T	ma: M, T
Hidrocarburos		refinación	ma: M, T	ma: M, T	ma: M, T	ma: M, T
Nuclear		fabricación del combustible	ma: M, T	ma: M r: T	ma: M r: T	ma: M, T
Vapor geotérmico		no aplica	a: M	ma: M	b: M, T	ma: M b: T
Agua	no aplica	acumulación en reservorio	r: T	ma: T	b: T	mma: T
Biocombustible	cultivo	producción	ma: M	ma: M	r: M, T	ma: M
			r: T	r: T		b: T

Simbología: *mma*: muy muy alta, *ma*: muy alta, *a*: alta, *r*: media, *b*: baja.

Los términos *minería* y *tratamiento* se aplican en forma genérica, dado que no necesariamente corresponden al proceso real, como es el caso del ciclo hidráulico que no puede hablarse de extracción del recurso, dado que éste sólo se confina, lo que tampoco se trata de un proceso de transformación.

<sup>1</sup> Procesos de perforación de pozos, recuperación secundaria, mantenimiento de la presión.

se genera una depresión en la superficie, directamente proporcional al descenso del nivel del acuífero, y más importante aún, aumenta la cantidad total de agua en la hidrosfera, haciendo a esta fuente responsable de hasta 25% de la elevación del nivel del mar desde el inicio del siglo pasado.

ANEXO I  
ETAPAS DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL SECTOR ENERGÉTICO

Subsector	Exploración-explotación	Transporte	Transformación	Transporte-distribución	Consumo	Remediación
<b>Hidrocarburos</b>	Minería: ubicación, evaluación y extracción de reservas	Ductos, pipas, ferrocarril	Refinerías: petrolíferos, petroquímicos	Ductos, pipas, ferrocarril	Sectores:	Del ecosistema (suelo, agua, biota) y socio-económico
<b>Eléctrico</b>	Minería: ubicación, evaluación (ER) y extracción (HC, C, U, Geo)	Ductos, pipas, ferrocarril	Acondicionamiento y uso en generación eléctrica*	Líneas de alta, media y baja tensión	Residencial Transporte Industrial Comercial-Público Agropecuario	
Insumos	B&S requeridos en cada etapa					

HC: hidrocarburos (\*crudo: refinación, \*gas natural: *secado*), C: carbón (\*lavado), U: uranio (\*enriquecimiento), ER: renovables (sol, viento, agua, biomasa).

En este contexto se tiene:

- *hH-azul*: consumo de agua superficial y subterránea, sea por evaporación, incorporación a un producto o devolución a la misma o a una zona distinta a la de captación, en conjunto, el volumen de agua disponible que ha sido consumida durante la producción de un bien o servicio o genéricamente derivado de las actividades humanas;
- *hH-verde*: agua de lluvia que no se infiltra ni escurre, sino que permanece en el suelo o en la vegetación, es decir, la parte de la precipitación que se evaporará o que transpirarán las plantas;
- *hH-gris*: grado de contaminación del agua dulce que puede estar asociada con los procesos de fabricación de un producto y con su cadena de suministro, o sea, es el volumen de líquido requerido para asimilar la carga de contaminantes en comparación con las concentraciones normales y las normas de calidad del fluido.

A partir de lo anterior se da el concepto de *cero hH*, nula descarga, siendo la *azul* en el caso agrícola, mediante sistemas de riego altamente eficientes, y la *gris* en el sector industrial, vía utilización de un circuito cerrado y mejor aún acoplado a tratamiento antes de su descarga. Y no está de más mencionar el concepto de *agua virtual*, entendida como el fluido contenido en los alimentos y en los productos empleados en su fabricación, también identi-

ficada como consumo indirecto, en contra parte al que se emplea en los procesos tipo directo.

Como parte de este concepto de huella<sup>11</sup> (Farrel *et al.*, 2013), a la fecha se han definido cuatro, la ya mencionada *hH*, la bien conocida *hC*: carbono, más la *hN*: nitrógeno y la *hE*: ecológica; la tabla 4 muestran estas huellas, señalando entre paréntesis las vías de reducción y compensación (sólo en la de carbono y ecológica).

La extensión de estos conceptos al campo eléctrico define la *hH* como el agua utilizada en la cadena de extracción-procesamiento del combustible y en la construcción y operación de la central, y su relevancia se debe a que todos los análisis realizados a la fecha confirman que el modelo actual de los ciclos de combustible es insostenible, lo cual aplica igual a la industria petrolera; en conjunto son fuertes depredadores de los recursos naturales y altamente contaminadores de los ecosistemas.

TABLA 4  
DIFERENTES TIPOS DE HUELLA

<b>CARBONO</b>	<b>HÍDRICA</b>
GEI que contribuyen al cambio climático	consumo y contaminación del agua dulce
(mitigar y capturar estas emisiones)	(usarla racionalmente, aún sin parámetro de compensación)
<b>ECOLÓGICA</b>	<b>NITRÓGENO</b>
uso y deterioro del espacio bioproductivo	liberación al ambiente del exceso no capturado por la flora
(minimizar y restaurar)	(minimizar la agricultura intensiva)

En el sector energético se presentan las cuatro huellas: la *hC* por las emisiones de GEI; la *hH* por los consumos de agua y contaminación de ésta en sus procesos de extracción de recursos, de generación eléctrica y de fa-

<sup>11</sup> El término *huella* refiere las actividades, productos y patrones de consumo que afectan —directa e indirectamente— los recursos naturales del planeta y alteran su capacidad de restauración, y a ella se aplican los conceptos de *reducción* y *compensación*: en el caso de la *hC*: minimización de las emisiones de los gases efecto invernadero (GEI) y captura de éstos; *hH*, reducción del consumo y de su contaminación, y sin definición aún los criterios de compensación. El concepto *huella* nace en la década de 1990 como derivación de la huella ecológica y a principios de este siglo, Water Footprint Network propone la metodología para su evaluación, con base en el ACV, siguiendo los criterios de ISO serie 14044-2006.

bricación de combustibles; la *hE* al reducir y/o alterar la biota planetaria; y la *hN* en las prácticas agrícolas intensivas, como es el caso de los BC.

Se estima que el consumo de agua en el sector de hidrocarburos (HC) convencional, y más aún en el no-convencional (recursos de esquisto, *shale*), es mucho mayor al del eléctrico, además de que el análisis en cada uno presenta diferentes grados de complejidad. En el primero, no se cuenta con suficiente información como para extrapolar al conjunto de sus procesos —la mayoría de los análisis son estudios de caso—, en adición a que esta información está bajo la categoría de confidencial, por tanto protegida como datos reservados. Lo que sí se conoce son sus usos en: fluidos de perforación y mantenimiento de la presión en los pozos; sistemas de enfriamiento de equipos —como compresores y otros—; pruebas hidráulicas; inyección para calentamiento del recurso y la recuperación secundaria; fractura hidráulica; construcción de infraestructura de explotación.

Para dar tan sólo una idea, en EU se estima que la demanda de agua en la tecnología de fractura hidráulica, la más intensiva, está entre 7-38 millones de litros (M-l) por pozo, que habría que multiplicar por 487 mil —cifra que arrojó el censo de 2013—, totalizando entre 3.41-18.51 mM-m<sup>3</sup> (miles de millones) en dicho año, y hay que decir que todo este flujo queda inutilizable, dado que las petroleras, al pagar la extracción y no tener obligación de dar tratamiento al volumen contaminado, en el mejor de los casos la reinyectan. Este flujo por sí solo es marginal respecto al agua renovable total del país ( $\approx 0.11-0.60\%$ ), pero es muy significativo a nivel local, no sólo por el acaparamiento del recurso, sino más importante aún, por su gran contaminación que queda expuesta a la población.

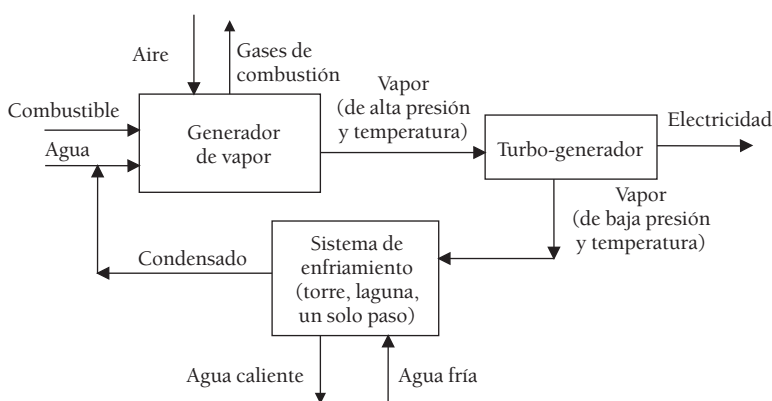
Aunque ciertamente no todos son HC de esquisto, el valor menor bien puede aplicarse a la extracción convencional. Y a lo anterior hay que agregar la demanda asociada al gas grisú (el generado en las minas de carbón), que en esa nación se ha calculado, para el periodo 1997-2006, un consumo del orden de 650 mM-l, es decir, 65 mM-l/a (65 M-m<sup>3</sup>/año), equivalente al consumo intermedio anual recomendado por la OMS de  $\approx 3.6$  millones de personas.

En el caso eléctrico, la evaluación del consumo de agua es relativamente más sencilla y por tanto, a la fecha ya se cuenta con suficientes datos; de hecho, la AIE ha presentado en dos de sus anuarios (2012 y 2016) diagramas que muestran el rango de valores para diferentes ciclos de combustible y tecnologías, indicando que sólo contempla la etapa de generación de la electricidad.

Cabe señalar aquí que, en realidad, estos análisis corresponden a un *índice hídrico*, más que a una *huella hídrica*, dado que se restringe sólo a la fase de producción de electricidad, es decir, dentro de los límites de una central.

De esta manera, en esta industria, el agua se utiliza básicamente en la generación de vapor (fluido de trabajo) y en su enfriamiento (diagrama 1). En el primer caso se trata de un circuito cerrado, por lo que sólo se recuperan las pérdidas; el segundo puede ser tanto abierto como cerrado, y es el factor determinante en la confiabilidad de operación de una central, pues un eventual desabasto de agua ocasiona una baja en la generación o hasta su cierre, o una inversión muy fuerte para el cambio a otros sistemas ahorradores de este fluido.

DIAGRAMA 1  
ESQUEMA SIMPLIFICADO DEL PROCESO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA



Existen tres tipos básicos de sistemas de enfriamiento: torre (*T*), laguna (*L*) y de un solo paso (*USP*), y dos alternativas (seco e híbrido). Tal como lo indican sus respectivos nombres, en la primera se recircula el agua que se enfría con aire; en la segunda se dispone por un determinado tiempo en un estanque del que se vuelve a utilizar, y en la tercera sólo se toma del cuerpo de agua y se retorna al mismo una vez usada. En cada caso las pérdidas son diferentes; en *T* están asociadas a la evaporación y suelen ser altas; en la segunda, *L*, tienen el mismo origen, pero son sensiblemente menores que la anterior; y en la tercera, *USP*, se consideran mínimas, dado que la evaporación es del mismo orden que tiene la fuente de agua (río o lago). La tabla 5 muestra el estatus cualitativo de diversos parámetros en cada una de las tecnologías de enfriamiento, y en la tabla 6 los rangos de extracción y consumo para diversos arreglos de ciclos de combustible y sistemas de enfriamiento, valores extraídos del anuario de 2016 de la AIE, la que integró los datos de diversos estudios, mismos que sintetizamos en dicha tabla.

Con base en lo anterior es claro que, el arreglo *ciclo-combustible/tecnología-enfriamiento* a elegir depende, primero que nada, de la disponibilidad, al

TABLA 5  
ESTATUS DE DIVERSOS PARÁMETROS DE LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO

<i>Tipo de sistema</i>	<i>Inversión</i>	<i>Tecnología</i>	<i>Extracción</i>	<i>Consumo</i>	<i>Superficie</i>	<i>Contaminación</i>
Torre	alta	madura	baja	alto	baja	baja
Laguna	media	madura	media	medio	muy alta	media
Un solo paso	baja	madura	alta	bajo	media	alta
Seco	muy alta	en desarrollo	marginal	marginal	alta	muy baja
Híbrido	muy alta	en desarrollo	DI	DI	alta	baja

DI: datos insuficientes.

FUENTE: elaboración propia.

TABLA 6  
RANGO DE VALORES DE LOS VOLÚMENES DE EXTRACCIÓN  
Y CONSUMO POR TIPO DE SISTEMA DE ENFRIAMIENTO (M<sup>3</sup> / MWh)

<i>Sistema de enfriamiento</i>	<i>Tecnología de generación</i>	<i>Extracción</i>	<i>Consumo</i>
		<i>m<sup>3</sup>/MWh</i>	
Torre	Carbón convencional, subcrítico, supercrítico, con y sin CAC	0.6 – 18.0	0.5 – 7.5
	Gas natural - ciclo combinado, con y sin CAC		
	Nuclear		
	Solar de concentración		
Laguna	Carbón, subcrítico, supercrítico	1.0 - 230	0.4 – 7.0
	Nuclear		
Un solo paso	Carbón, subcrítico, supercrítico	30 – 700	0.1 – 4.6
	Gas natural - ciclo combinado		
	Nuclear		
Seco	Factible en todas las rutas	0	0
Híbrido		NE	NE

En el caso del sistema seco, la extracción y el consumo no son realmente cero, dado que se utiliza cierto volumen para enfriamiento de equipo.

NE: No se cuenta con datos suficientes para establecer rangos.

FUENTE: elaboración propia con base en: (a) IEA 2012 y 2016; (b) EU-Congreso-2006.

menor costo, del recurso primario (renovable y no renovable), del arreglo tecnológico (caldera, tipo de turbina, gasificación, con o sin captura y almacenamiento de carbono: CAC), de las condiciones del agua (acervo, calidad y competencia) y del clima (en particular el perfil de la temperatura diaria y anual), lo que indicará las alternativas a adoptar, mismas que deben correlacionarse con los impactos (adversos y favorables) ecológicos y socioeconómicos, para la toma de la decisión final (*water-smart energy choice*).

Para que ésta sea óptima, deben evaluarse todos los factores citados, lo que hace determinante contar con una base de datos vasta y confiable, así como con un sistema de procesamiento digital avanzado; dados los problemas conocidos que enfrenta actualmente el sector eléctrico, es claro que en la mayoría de los casos se ha carecido de estos elementos y en su lugar la decisión se ha basado en aspectos financieros, de inversión y costo de operación, es decir, sólo en la rentabilidad de la central eléctrica. Y tal insuficiencia obedece a que no ha habido en el pasado, e incluso en el presente, un interés por integrarlos con otros aspectos como los socioeconómicos y ecológicos.

De todo lo anterior nos parece clara la necesidad de abundar más en el análisis de la relación energía-agua, dado que los escenarios de cambio climático pronostican, entre otras crisis, la del recrudecimiento de los conflictos internos y entre países, en una de sus manifestaciones más perniciosas: los enfrentamientos bélicos.

## REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS EN EL SECTOR HÍDRICO

Hasta aquí se ha repasado el papel del agua en el sector energético, por lo que ahora hay que revisar cuánta energía requiere el sector hídrico. Para consumo humano y para sus actividades productivas, el fluido tiene que extraerse, transportarse, tratarse, distribuirse y descargarse tras su uso, procesos todos ellos demandantes de energía, principalmente eléctrica y en mucho menor medida química (combustible). La cantidad de energía en cada etapa depende de diversas variables como son:

- Tipo de fuente: superficial, subterránea, marina;
- calidad: dulce, salina, negras;
- transporte y distribución: distancia de la fuente al sistema de tratamiento y al consumidor;
- uso final: municipal potable, industrial, agrícola, energético, otro;
- infraestructura: equipo, ductos, plantas de tratamiento;
- mantenimiento y control: preventivo más que correctivo y control de fugas.

Es claro que es necesaria más energía si el agua debe sacarse de un acuífero que de un río o lago, también, conforme la distancia al consumidor crece, y más aún si se destina a consumo humano, requiriendo entonces hasta un tratamiento terciario. La electricidad demandada en cada etapa es para la acción de motores acoplados a bombas (extracción, transporte, distribución) y a ventiladores (tratamiento), y para otros equipos utilizados en la fase de destilación o desalación. El diagrama 2 muestra el arreglo típico de los procesos del sector hídrico, y el diagrama 3 los rangos de requerimientos energéticos para cada uno (IEA-WEO, 2016).

De acuerdo con la AIE, el sector hídrico global utilizó, en 2014, del orden de 120 millones de toneladas de crudo equivalente (M-tep) de energía, de las cuales 60% fue en forma de electricidad, o sea 840 TWh, 3.5% de la generación mundial, y el porcentaje restante como combustible, la mitad principalmente diesel en motobombas usadas en pozos y el otro medio en las plantas de desalación, que suelen quemar gas natural y que se ubican casi en exclusiva en el Medio Oriente y norte de África.

A nivel de naciones, la misma AIE considera que la demanda de electricidad en el sector agua se encuentra entre 4-13% de su generación total, rango amplio por razones obvias, pues depende, en cada caso, de la fuente disponible: superficial, subterránea, otras, siendo la primera la que predomina a nivel mundial, con 2/3 y el otro 1/3 proviene de acuíferos, y se estima que poco menos de 1% es de origen no-tradicional: aguas tratadas y desalinizadas.

Por grupo de países, los desarrollados (PI) consumen más en tratamiento que en la extracción y transporte-distribución, como sucede en las naciones en vías de crecimiento (PED), diferencia que está íntimamente asociada a la existencia (PI) o no (PED) de políticas de explotación racional del agua.

DIAGRAMA 2  
ESQUEMA SIMPLIFICADO DE LOS PROCESOS DEL SECTOR HÍDRICO

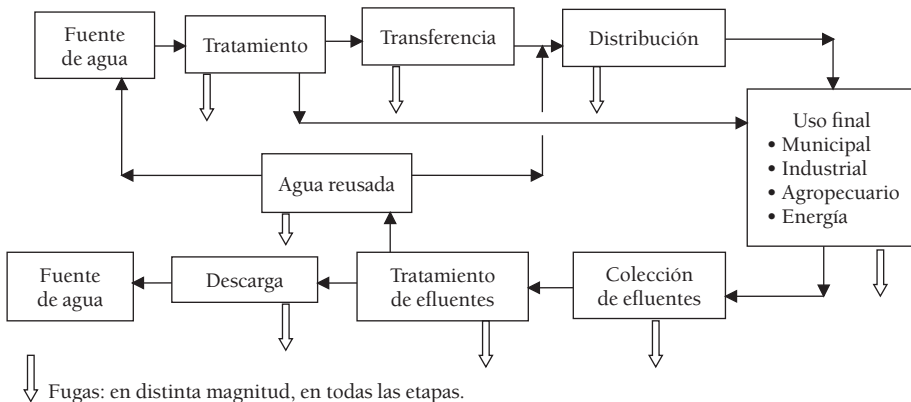
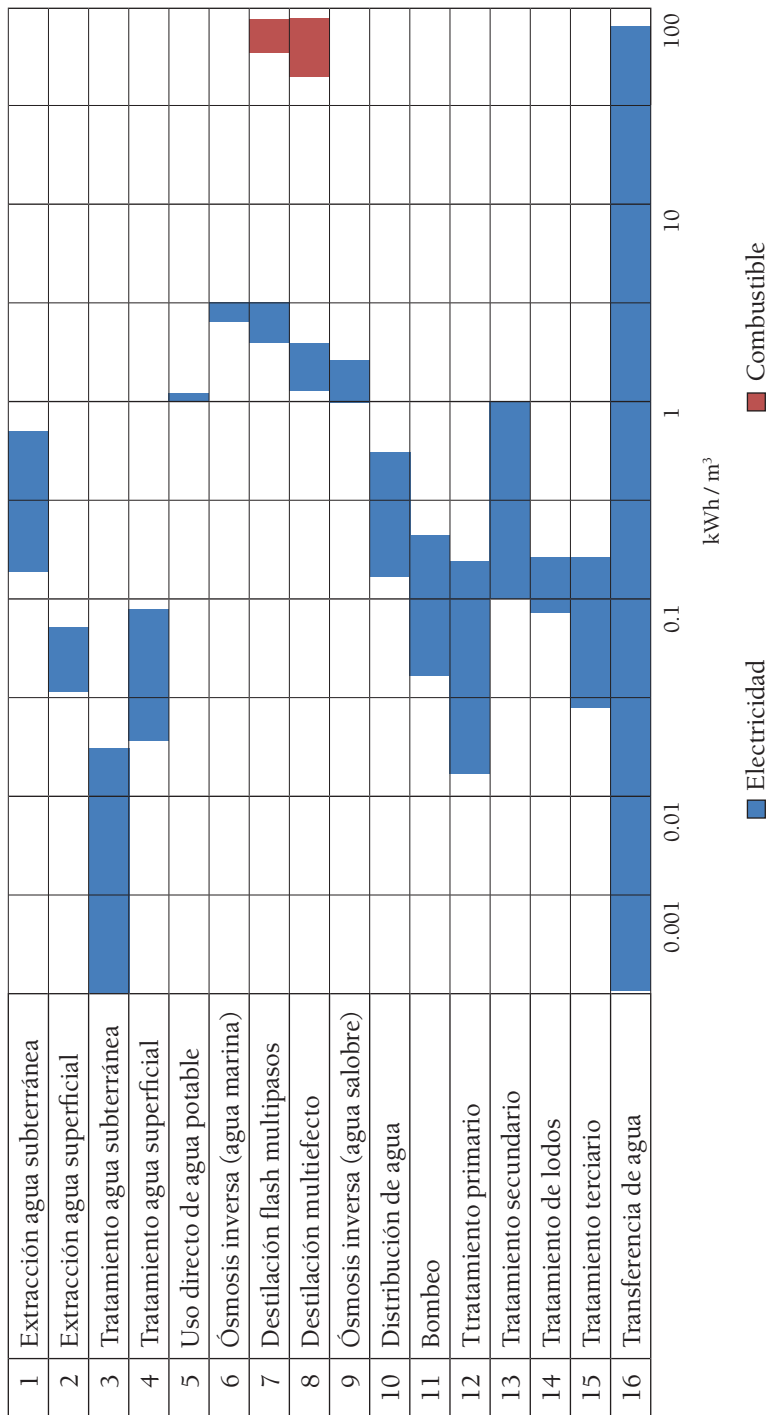


DIAGRAMA 3  
REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA EN DIVERSOS PROCESOS DEL SECTOR HÍDRICO



FUENTE: International Energy Agency. World Energy Outlook, 2016. Chap. 9, p. 368.

Aunque en ambos conjuntos el mantenimiento de la infraestructura y sobre todo el control de fugas suelen estar en las estrategias del sector, en los PED se tiene una gran diferencia entre lo plasmado en sus programas y la realidad, pues se estima que en estas naciones, las fugas —dentro de las cuales también está el robo—, puede alcanzar hasta 50% del volumen extraído (AIE, 2016).

Cabe aquí señalar que son en esencia los países de la Unión Europea los que vienen actuando en este sentido de uso sostenible del agua, en tanto que EU sigue teniendo un alto desperdicio, salvo en las ocasiones que enfrenta desabasto por sequía, como ha sido el caso de California en los últimos cinco años.

En este punto, el uso eficiente del agua y de la energía convergen, lo mismo que una política de transición energética de combustibles fósiles (carbón e HC) y radioactivos (uranio y torio), a renovables en su estricta definición, con excepción de la hidráulica, salvo en aprovechamientos de micro a mediana capacidad.

Y a dicho tránsito no se debe considerar lo que se ha dado por llamar *energías limpias*, en la que se incluyen al gas natural y la nuclear, pues se ha demostrado plenamente que estas rutas tecnológicas conllevan importantes efectos ambientales adversos; el metano con un poder de calentamiento 21 veces mayor al bióxido de carbono, y el más importante, creemos, el relativo a los desechos radioactivos. Esto último, por no tenerse a la fecha una solución que al menos minimice dicho impacto, pues en contraparte, persiste en algunas naciones, como EU, un manejo muy irresponsable de estos productos de la fisión; en este caso, tras haber agotado o colapsado los sitios subterráneos —por mal mantenimiento o por falta de inversión en reprocesamiento— y cancelado los marinos, ambos de disposición final, una parte considerable de dichos compuestos, tanto civiles como militares, se almacenan, *temporalmente*, en áreas vecinas a los reactores en tiendas de campaña; y para agravar esta situación, muchos de ellos sin ser enfriados, al menos durante el tiempo de decaimiento de la radioactividad, que aunque en mínima medida, reduce su peligrosidad (Ludovic Dupin, 2017; Fannie Rasclé, 2014).

## EL AGUA EN EL SECTOR ELÉCTRICO MEXICANO

En el país hay muy poca información respecto al desempeño de la relación energía-agua, lo que complica su estudio, en adición a que las dependencias

públicas de estos dos sectores, hídrico y energético, no han prestado atención a esta temática.<sup>12</sup>

Un primer acercamiento puede hacerse a partir de las estadísticas que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) reporta en algunas de sus publicaciones periódicas, como son las relativas a las presas y al agua concesionada a las termoeléctricas. Esta información está muy agregada, por lo que en este último caso, al ser el único valor disponible, se presupone corresponde a la extracción, lo que se sustenta en el hecho de que todo lo relativo al consumo, y con ello al sistema de enfriamiento de las centrales, no son datos abiertos, más aún, están clasificados como confidenciales por el actual gobierno.<sup>13</sup>

Así, sólo es posible estimar *grosso modo* un índice hidráulico (consumo/generación:  $\text{m}^3/\text{MWh}$ ), tal como se muestra en la tabla 7, en la que se aprecia que el volumen concesionado es prácticamente igual en el periodo 2007-2015, lo que resulta en que tal cociente varía en la misma medida que lo hace la generación (conforme ésta aumenta aquel baja). Igual se deduce que las tecnologías consideradas por la CONAGUA, como *termoeléctricas*, es igual a las definidas por el SIE (Sistema de Información Energética): vapor (carbón y combustóleo), ciclo combinado y turbo-gas (gas natural), combustión interna (diesel), excluyendo por tanto las dual (generalmente combustóleo y gas natural), las geotérmicas y la nuclear, que por cierto usa agua marina, al igual que las termoeléctricas ubicadas en costas.

Si se comparan estas cifras con las mostradas en la tabla 6, las plantas mexicanas se encuentran básicamente en el rango *extracción-laguna*, lo cual sólo indica que están dentro de los valores conocidos, que sobra decir, son muy amplios.

Además de permitir la estimación anterior, con la información disponible se puede ubicar en cuál entidad federativa se encuentran las centrales, lo que permite, igualmente y *grosso modo*, identificar que el 89% de las termoeléctricas se sitúan en las regiones con grados de presión hídrica *moderada*, *fuerte* y *muy fuerte*,<sup>14</sup> o dicho en otros términos, se hallan en territorios

<sup>12</sup> Salvo una marginal mención en algunos documentos que edita la Secretaría de Energía (SENER) y en los reportes anuales de la Comisión Nacional del Agua. De hecho, las propuestas de proyecto sobre este tema presentadas por la Facultad de Economía de la UNAM a algunos organismos públicos federales (de política sectorial y académica) fueron rechazadas por considerarlas sólo como un *simple ejercicio en hoja de cálculo, sin relevancia* para los sectores involucrados: hídrico y energético.

<sup>13</sup> Al igual que otros rubros como la ubicación precisa, tecnología, operador (CFE, IP), sistema de enfriamiento, fuente de abasto hídrico (superficial, subterránea, tratada), entre los principales, muy necesarios para una estimación mínimamente aproximada.

<sup>14</sup> De acuerdo a las 13 regiones hidrológico administrativas de CONAGUA, *Atlas del agua en México, 2009 al 2013*.

TABLA 7  
MÉXICO, DESEMPEÑO HIDRÁULICO DE LAS CENTRALES TERMOELÉCTRICAS

Rubro	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Volumen concesionado total (M-m3)	78.949	79.752	80.587	80.300	80.3	82.734	81.651	84.929	85.664
Volumen concesionado a termoeléctrica (M-m3)	4.086	4.075	4.078	4.078	4.078	4.078	4.529	4.150	4.149
Participación termoeléctrica al total concesionado (%)	5.2	5.1	5.1	5.1	5.1	4.9	4.9	4.9	4.9
Generación térmica (TWh)	154.3	153.4	160.4	160.0	171.6	178.9	179.1	168.7	177.1
Índice hidráulico (m3/MWh)	26.5	26.6	25.4	25.5	23.8	22.8	25.3	24.6	23.4

M-m3: millones de metros cúbicos. TWh: Tera-watt-hora. MWh: Mega-watt-hora.  
FUENTE: CONAGUA, *Atlas del agua en México, 2009 al 2013*, México, SIE-SENER.

con disponibilidad de agua *baja* y *muy-baja*, como son Baja California y Baja California Sur, así como en todos los estados fronterizos con EU. Con este país se tiene ya una importante competencia por dicho recurso en diversos puntos, y para empeorar esta situación, existe en estas demarcaciones importante infraestructura energética —eléctrica (33.5% del total nacional) y de hidrocarburos, ésta más intensiva en agua y en emisiones de contaminantes—, que de acuerdo con los planes gubernamentales es la que tendrá la mayor expansión.

En contraparte, en el sureste, donde las precipitaciones —regulares y más aún las provocadas por eventos meteorológicos, son cada vez de mayor intensidad— van de *altas* a *muy-altas*, han resultando en una reserva de agua elevada, aunque parece haberse iniciado ya una disminución del recurso hídrico superficial, que sumado a los escenarios de cambio climático en esta zona,<sup>15</sup> la hidroelectricidad se verá seriamente afectada; de hecho, entre 2002-2016 esta ruta tuvo, a nivel nacional, un desempeño muy variable (igual

<sup>15</sup> Aunque se tienen pronósticos tanto a la alza como a la baja, de acuerdo al Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018, publicado en el *Diario Oficial de la Federación* el 28 de abril de 2014, “la precipitación ha disminuido en el sureste del país desde hace medio siglo”, lo que es una clara señal de que la abundancia hídrica de dicha zona está ya en riesgo. Esta predicción es congruente con *Escenarios de cambio climático de futuro cercano (2015-2039)* y *lejano*

que el clima), manteniéndose en este periodo con una participación promedio de alrededor de 12.6% en la generación bruta (vs. 31% en 1990 y 26% en 2000), contra el aumento creciente del gas natural (pasó de 25% a 54% en el mismo lapso). Pero más importante aún serán los muy adversos impactos en la biodiversidad de esa región, que es la que más aporta a la calificación del país como megadiverso, ubicándose entre los cinco primeros puestos del planeta.<sup>16</sup>

La energía igualmente jugará un papel relevante en los casos de inundación y con ello en la gestión de sobrecarga en las presas; aquí el bombeo y sobre todo la infraestructura de desvío del agua excedentaria de los reservorios y de control de desbordamientos es esencial, no obstante los requerimientos energéticos superiores.

Otro aspecto a destacar es la normatividad en materia hídrica, misma que está dirigida esencialmente al control de su contaminación y aunque hay límites a su extracción, la falta de supervisión y hasta la complicidad de los funcionarios públicos, federales y sobre todo locales, es bastante común que ciertos usuarios, grandes terratenientes y sobre todo empresas mineras los sobrepasan.

Igualmente, las tarifas son causa de una gran demanda y con ello también de desperdicio, pues tan sólo el mayor consumidor del país, el agropecuario, e independiente de la zona de disponibilidad de agua de que se trate (1: máxima, 4: mínima), en 2015 el precio por metro cúbico fue de cero, para aquellos que no rebasen el volumen concesionado, lo que ya se mencionó, frecuentemente sucede, aunque en este caso el sobre costo no es significativo, tan sólo 16 centavos por cada metro cúbico en exceso en cualesquiera de las áreas de reserva. No está de más señalar aquí que los pequeños agricultores y las comunidades indígenas no cuentan con riego en sus cultivos, así que no se ven favorecidos por tales subsidios (CONAGUA, 2015).

Para dar cifras comparativas, el rango del importe para el régimen general está entre 19.4-1.9 \$/m<sup>3</sup>, el de agua potable con consumo >300 l/hab-día: 0.89-0.11 \$/m<sup>3</sup> (equivalente a 0.089-0.011 ¢/l, insignificante para un sobreconsumo mínimo de 6 veces el valor *intermedio* recomendado por la OMS de 50 l/hab-d y de 3 veces el *óptimo*: 100 l/hab-d), y la generación hidroeléctrica y geotérmica, constante en las 4 zonas de 0.005 \$/m<sup>3</sup>, y no se cuenta con el dato para el caso de las termoeléctricas (CONAGUA, 2015).

Una vez más, estas cifras generales no corresponden a los hechos, pues la desigualdad en el suministro también se presenta en las tarifas, o en los ca-

---

(2075-2099), que para dicha región estiman un descenso que puede ir de 5% hasta más de 15 por ciento.

<sup>16</sup> En cuanto a riqueza de especies, México ocupa el primer lugar en reptiles, el segundo en mamíferos y el cuarto en anfibios y plantas.

sos en los que hay que *auto abastecerse*, vía compra (e.g. pipas), los costos pueden llegar a cuadruplicarse.

Aquí cabe señalar la insistente *recomendación* del BM y del FMI en cuanto a considerar que el déficit en la provisión de agua puede solucionarse a través de los *servicios hídricos*, entendidos éstos como privatización de toda la cadena de este sector. Sobra decir que las experiencias internacionales y *en carne propia* las liberalizaciones de servicios en el país, sólo han profundizado las desigualdades entre consumidores, regionales, sectoriales y domésticos, siendo estos últimos los más afectados cuando se encuentran en los estratos sociales inferiores.

En este mismo tenor, pero en el ámbito internacional, cabe citar el desarrollo de una certificación sobre gestión del agua realizada por ISO (International Organization for Standardization), con énfasis en los sectores energéticos e hidráulicos, “ISO 14046, Environmental management – Water footprint – Principles, requirements and guidelines”,<sup>17</sup> misma que ya se adoptó en México, pero con muy baja participación, no sólo por su carácter voluntario, sino por la falta del marco institucional que lo promueva y aplique. La razón de tal situación se tiene en lo siguiente: el país ocupa el 11° lugar en el mundo con mayor *hH* en el sector de producción y el 8° en el de demanda; tiene el lugar 94 en la disponibilidad promedio per cápita anual (3 700 m<sup>3</sup>/hab-año), muy por encima de la media global (1 406 m<sup>3</sup>/hab-año);<sup>18</sup> los productos agropecuarios son los que mayormente aportan a la *hH*, tanto interna como externa, y tanto directa como indirecta; lo anterior, derivado de los bajos rendimientos de los cultivos, inferiores al promedio general, y con ello una huella por tonelada superior; así, entre 1996-2005 México fue un destacado importador de agua virtual, con el 2° puesto mundial; en conjunto, todo lo anterior está causando que el aprovechamiento del agua no sea sostenible y para el futuro cercano se vislumbra pasará el umbral hacia una crisis, que no sólo acentuará las contiendas entre consumidores, sino además se incrementará el riesgo de desequilibrar, sin retorno, los ecosistemas (CONAGUA Estadísticas, 2016; CADIS, 2016).

En cuanto a la competencia interestatal e intersectorial por el agua, hay que considerar también el factor socioeconómico, es decir, el crecimiento poblacional y de las actividades económicas, siendo más fuerte la relativa al abasto municipal-doméstico, pero igualmente al agropecuario. La satisfacción de estas demandas exigirá, en las zonas con un bajo acervo del fluido

<sup>17</sup> <[http://www.iso.org/iso/home/news\\_index/iso-in-action/water.htm](http://www.iso.org/iso/home/news_index/iso-in-action/water.htm)>.

<sup>18</sup> Tomando los datos de agua disponible subterránea y superficial mundial, tabla 1, y una población en 2017 de 7 536 millones de habitantes, se tiene un valor promedio de 1 406 m<sup>3</sup>/hab-año. En el caso de México, para 2015, el volumen de agua renovable ascendió a 446 777 M-m<sup>3</sup>, divididos entre la población de ese año, 121 M-hab, resulta en 3 692 m<sup>3</sup>/pc-a.

y más aún en aquellas con pronósticos de sequías recurrentes y prolongadas, ir cada vez a mayores profundidades para su extracción y con ello más electricidad para bombeo, al tiempo que se acelerará la sobreexplotación, así como el uso creciente de aguas tratadas, con un significativo aumento en su costo.

Para dimensionar estas demandas en aumento vs. la situación de disponibilidad del recurso, baste mencionar algunas cifras (CONAGUA, INEGI, 2015): 2/3 del territorio nacional es árido y semiárido (región norte-centro-noreste) y en él viven alrededor de 77% de la población, con tan sólo 33% de la disponibilidad natural media, lo que equivale a 1 583 m<sup>3</sup>/hab-año; en contraparte, el sureste tiene 67% de disponibilidad y 23% de la población, dando 10 734 m<sup>3</sup>/hab-año. En ambos casos, en principio, podrían satisfacer sus requerimientos intermedios de agua (OMS, 18.25 m<sup>3</sup>/pc-a), 87 veces el primero y hasta 588 veces el segundo. Entonces, ¿por qué existe en el país una población sin acceso al agua? Primero, porque *disponibilidad* está lejos de significar que puede utilizarse para consumo humano, ya que una parte del líquido es necesaria para mantener los ecosistemas acuáticos (ríos y lagos), pero más aún, porque la infraestructura que explota y distribuye el fluido es, como ya hemos insistido, altamente desigual entre regiones y estratos sociales.

En cuanto a la competencia en zonas fronterizas, la más fuerte a enfrentar será la del norte, con EU. Con este país, las principales cuencas compartidas son las de los ríos Colorado y Bravo, ambos casos regidos por acuerdos bilaterales. En el primer caso, cabe citar que en septiembre de este año se suscribió la renovación, por 9 años más, de un amplio pacto de conservación ambiental entre México y nuestro vecino del norte, sobre la gestión de la cuenca del río Colorado —una de las zonas más secas de América del Norte, donde sólo llueve 30 milímetros al año—, documento que amplía las principales disposiciones del acta 319, suscrita en 2012.<sup>19</sup>

Al respecto y aun cuando las autoridades consideran beneficioso para México este acuerdo, el hecho es que, al basarse EU en la superficie de la cuenca que se encuentra en el lado mexicano, nuestro derecho de extracción es de tan sólo 1.85 mM-m<sup>3</sup>/a; este volumen es del orden de 10% del flujo promedio anual estimado en 22.4 mM-m<sup>3</sup>/a, mismo que se almacena y administra principalmente en las presas Hoover (capacidad total de 35.2 mM-m<sup>3</sup>) y Glenn Canyon (33 mM-m<sup>3</sup>), y para completar este adverso escenario están los altos niveles de contaminantes que tiene la mermada corriente que llega al

<sup>19</sup> El acta 323 del Tratado de Aguas Internacionales de 1944, titulado “Extensión de las Medidas de Cooperación y Adopción de un Plan Binacional de Contingencia por Escasez de Agua en la Cuenca del Río Colorado”.

país y que las mineras ubicadas en nuestro territorio terminan por empeorar<sup>20</sup> (Llano, 2016).

En el caso de la cuenca del Bravo, los desacuerdos datan de más de medio siglo, igualmente debido a las limitaciones al aprovechamiento de sus aguas por México, siendo uno de los principales argumentos los bajos volúmenes de captación en los afluentes mexicanos alimentadores del río, hecho cierto, pero determinado por la situación geográfica de la cuenca, razón por la cual no está considerado en los criterios de aprovechamiento del flujo del río por las partes, lo que en la práctica no sucede.

Esta situación tan desigual ha sido motivo de frecuentes fricciones entre ambos países, en particular en tiempos de sequía, que no obstante los acuerdos sobre restricciones a la extracción, ninguna de las partes las ha respetado, pero la mayor capacidad técnica de EU, así como su postura imperial y la subordinación de nuestros gobernante, resulta en constantes perjuicios para los consumidores mexicanos, en particular las actividades agropecuarias, pero en creciente medida las industriales ubicadas en esa región del territorio nacional, destacando las mineras y en ascenso las eléctricas y petroleras.

En este contexto, no es difícil imaginar las graves repercusiones del cambio climático en la región norte del país, que pondrá frente a frente a los sectores de energía e hídrico, reiterando que sin agua no puede producirse electricidad, ni extraer y procesar los hidrocarburos, y viceversa, y si se agrega el aumento de la población por la demanda de mano de obra de estas industrias, la competencia por el recurso augura una escalada de los conflictos.

En la frontera sur el panorama pareciera más halagüeño, dado que las cuencas compartidas con Guatemala —las del Grijalva-Usumacinta, Suchiate, Coatán y Candelaria—, y con éste y Belice —la de Río Hondo— tiene un superávit de agua; ha sido entonces la razón de que los desacuerdos con estas últimas naciones prácticamente han sido mínimos, pero a futuro, más que conflictos fronterizos se vislumbran entre consumidores, pues igualmente en esta región, las actividades energéticas y mineras están haciendo estragos en el recurso agua; y esto sin considerar lo ya mencionado, que las precipitaciones ahí han venido disminuyendo, lo que en conjunto augura un incremento de la protesta social, que cabe decir, han sido estas comunidades unas de las más perjudicadas por las políticas económicas neoliberales.

Cierto es que las autoridades mexicanas han venido planteando estrategias para el uso racional, sostenible del agua, lo que sexenalmente plasman en el Programa Nacional Hídrico (PNH), el último, para el periodo 2014-

<sup>20</sup> Del volumen total de agua destinado a la minería, los seis estados del norte del país consumen el 47.5 por ciento.

2018. Éste dice sustentarse en seis grandes objetivos a saber: 1) fortalecer la gestión integrada y sustentable del agua; 2) incrementar la seguridad hídrica ante sequías e inundaciones; 3) fortalecer el abastecimiento de agua y el acceso a los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento; 4) incrementar las capacidades técnicas, científicas y tecnológicas del sector; 5) asegurar el agua para el riego agrícola, energía, industria, turismo y otras actividades económicas y financieras de manera sustentable; 6) consolidar la participación de México en el contexto internacional en materia de agua. Aunque a la fecha se han publicado ya tres documentos de logros anuales (2014, 2015, 2016), la realidad es que tales son *avances* de las metas, sin especificar cuánto, salvo el caso de las tarifas, que entre 2000-2012 tuvieron un incremento en términos reales de 42%, además de reiterar progresos estimados con criterios muy cuestionables, como es el caso del nivel de cobertura del servicio: 92% a nivel nacional, 95.5% medio urbano, 80.3% medio rural.

Cabe decir que en el último documento (Intended Nationally Determined Contribution) sobre compromisos de México en materia de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030, presentado al IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático) en marzo de 2015, muchas de las medidas están vinculadas al uso racional de los recursos hídricos, lo que lleva a pensar que es factible que la temática energía-agua adquiera una real importancia en el ámbito de la toma de decisiones nacional.

Como corolario podemos decir que México aún tiene un largo camino que recorrer para efectivamente poner en práctica todas las promisiones que tan sólo el gobierno actual ha plasmado en planes y programas nacionales, así como en acuerdos internacionales.

## CONCLUSIONES

No obstante que 70% del planeta es agua, la disponible para uso humano es muy baja, y debido a su sobreexplotación y sobre todo a su contaminación, cada vez es más costoso su aprovechamiento, a lo que se añade la alteración del ciclo hídrico debido al cambio climático. De aquí que la crisis del agua ya ha sido *declarada* a nivel mundial, por lo que diversas organizaciones internacionales han estado trabajando en el análisis y elaboración de propuestas para frenar y revertir tal situación.

Conforme la población crece, también lo hace la demanda de agua de los diversos sectores consumidores, de ahí que la competencia entre éstos por el recurso se agudice, lo que ha hecho necesario el estudio de la interrela-

ción energía y agua, en virtud de su estrecha interdependencia. A la fecha se cuenta con un buen conocimiento cualitativo y cuantitativo del comportamiento de ese vínculo, aunque más en la industria eléctrica que en la de hidrocarburos, en parte por ser la primera el tipo de energía más empleada en los procesos de explotación del fluido.

En este sentido, la información ahora disponible es una guía útil para los tomadores de decisión, en particular la relativa a qué tipo de *arreglo* “combustible-tecnología de enfriamiento” es el más adecuado a las condiciones locales, es decir, qué clase de centrales eléctricas deben considerarse en los programas nacionales de este sector, mismos que deben sustentarse en una vasta, confiable y estandarizada base de datos —hidrológicos, energéticos, climáticos, socioeconómicos, tecnológicos, etc.— a fin de garantizar una selección óptima.

En México, al parecer y desafortunadamente, no se cuenta con toda esta información, lo que explica en parte la falta de atención a esta temática, situación que frente a los conflictos ya presentes en el país en cuanto a la competencia por el agua, hace muy necesario no sólo concretar los planteamientos plasmados en los programas nacionales energéticos e hidráulicos en cuanto al uso eficiente de ambos recursos, sino igualmente analizar su intrínseca interrelación y ésta con los escenarios de cambio climático ampliamente desarrollados para el territorio mexicano. Cabe recordar aquí que los planes de crecimiento del sector energético para los próximos años contemplan un importante incremento de esta infraestructura en zonas ya en crisis hídrica o cerca de alcanzar tal estatus, hecho que refuerza la urgencia de trabajar en el tema de energía y agua.

## BIBLIOGRAFÍA

- Barlow Maude (2010), “Sobre explotación del agua y cambio climático”, en *América Latina en Movimiento*, núm. 456, junio 2010, 3 pp.
- Bizikova Livia, Dimple Roy, Darren Swanson, Henry David Venema, Matthew McCandless (2013), *The Water–Energy–Food Security Nexus, Towards a Practical Planning and Decision-Support Framework for Landscape Investment and Risk Management*, International Institute for Sustainable Development, February.
- Brune Nancy E. (2011), “Water-Energy-Security Nexus”, en *SIWI Water Week Conference*, August, 36 pp.
- CEC.org, *La mosaïque nord-américaine, Aperçu des principaux enjeux environnementaux*, S/fecha.

- Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable CADIS, Embajada de Suiza en Colombia, Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo COSUDE, A. Martínez, J. Chargoy, M. Puerto, N. Suppen, D. Rojas, Autores contribuyentes, S. Alfaro, D. Ayes, L. Barrantes, L. Carrasco, J. Castro, V. Charlón, B. Civit, A. Conza, C. Díaz, L. Díaz, C. Farell, I. Francke, A. García, S. Gmünder, M. González, C. Grisales, R. Laura, P. Lloret, R. Monteiro, C. Naranjo, S. Papi, C. Peña, N. Petrocelli, V. Revilla, L. Rodríguez, E. Rosa, E. Sacayón, C. Toro, A. Vera, J. Victoria, J. Villarraga (2016), *Huella de Agua (ISO 14046)*, en *América Latina, análisis y recomendaciones para una coherencia regional*, 90 p.
- CERES (2014), *Hydraulic Fracturing & Water Stress, Water Demand by the Numbers*, 85 pp.
- Cervantes Carretero, Eduardo Alexis *et.al.* (2017), “Cálculo de la huella hídrica azul directa para uso doméstico y agrícola”, en *Huella Hídrica en México, análisis y perspectivas*, pp. 133-154.
- Comisión Nacional del Agua, *Atlas del Agua en México*, ediciones del 2009-2014.
- Comisión Nacional del Agua, *Estadísticas del agua en México*, ediciones, del 2009-2015.
- CONAGUA-IMTA-ANEAS-WWC (2014), *Water Week Latinoamerica*, 23-27 de junio, México.
- Ertug, A. y Arjen Y. Hoekstra (2012), *Carbon and Water Footprints, Concepts, Methodologies and Policy Response*, UNESCO, World Water Assessment Programme.
- Farell Baril, Carole, Sylvie Turpin Marion y Nydia Suppen Reynaga (2013), “Huella de agua de uso público-urbano en México”, *Revista Internacional de Estadística y Geografía, Realidad, Datos y Espacio*, vol. 4, núm. 1, enero-abril.
- Fundación Solón (2010), “El reto ahora es cumplir con el derecho al agua. Bolivia, A diez años de la “Guerra del Agua”, en *América Latina en Movimiento*, núm. 456, junio, 5 pp.
- Grubert, Emily A., Fred C. Beach y Michael E. Webber (2012), “Can Switching Fuels Save Water? A Life Cycle Quantification of Freshwater Consumption for Texas Coal-and Natural Gas-fired electricity”, en *Environmental Research Letters*, Environ, doi:10.1088/1748-9326/7/4/045801, 11 pp.
- Hightower, Mike (2010), “Energy and Water, Overview of Emerging Issues and Challenges”, en *Sandia National Laboratories*, DOE/EIA Energy Conference.
- Hightower, Mike (2010), “Energy and Water, Energy Security, Water, Land, and Climate Issues”, Ground Water Protection Council, *Sandia National Laboratories*, September, 15 pp.

- Hightower, Mike (2011), “Water Impacts on Energy Security, The Global Water Crisis, Addressing an Urgent Security Issue”, *InterAction Council, High-Level Expert Group Meeting*, March 21-23, Toronto, Canada.
- Hightower, Mike (2011), “Water Impacts on Energy Security”, en *Sandia National Laboratories*, New Mexico, SNL.
- Hightower, Mike (2011), “Water and Energy, Emerging Issues and Challenges, Energy-Water Nexus Landscape & Opportunities for Engineers”, en *SNL*, August 2.
- Hightower, Mike (2012), “Energy and Water Interdependencies Issues and Trends in the Eastern U.S.”, en *Sandia National Laboratories, Energy, Water, and the Environment in the Delaware River Basin*, Rutgers EcoComplex, November 7, 26 pp.
- Hoekstra, A.Y. y A.K. Chapagain (2004), “Water Footprints of Nations”, en *Volume 1 Main Report UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands, Research Report Series #16*, disponible en <[www.waterfootprint.org/?page=files/Publications](http://www.waterfootprint.org/?page=files/Publications)>.
- International Energy Agency (2012), “Water for Energy, Is Energy Becoming a Thirstier Resource?”, en *World Energy Outlook*, Chapter 17, 33 pp.
- International Energy Agency (2016, 2012), *Chap. 9, Water-Energy Nexus*, 47 pp., *Cap. 17, Water for Energy*, 29 pp., *World Energy Outlook (WEO)*.
- ISO 14044 (2006), International Standard, *Environmental Management-Life Cycle Assessment, Requirements and Guidelines*, Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization.
- ISO/DIS 14046 (2012), International Standard under Development, *Life Cycle Assessment-Water Footprint-Requirements and Guidelines*, consulta-do en <[www.iso.org/iso/iso\\_catalogue/](http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/)>.
- Johnson, Hope, Nigel South y Reece Walters (2017), “Eco-Crime and Fresh Water”, en Matthew Hall, Tanya Wyatt, Nigel South, Angus Nurse, Gary Potter y Jennifer Maher (eds.), *Greening Criminology in the 21st Century, Contemporary Debates and Future Directions in the Study of Environmental Harm*, Londres, Taylor & Francis Group, pp. 133-146.
- Klise, Geoffrey T., Vincent C. Tidwell, Marissa D. Reno, Barbara D. Moreland, Katie M. Zemlick y Jordan Macknick (2013), “Water Use and Supply Concerns for Utility-Scale Solar Projects in the Southwestern United States”, en *SANDIA Report*, SAND2013-5238, July, 62 pp.
- Kobos, Peter H. et al. (s/f), “Storing Carbon Dioxide in Saline Formations, Analyzing Extracted Water Treatment and Use for Power Plant Cooling”, en *Sandia National Laboratories*, 25 pp.
- Lambarri Beléndez, Javier y Rita Vázquez del Mercado Arribas (2017), “Huel-la hídrica, definición y contexto global”, en Rita Vázquez del Mercado

- y Javier Lambarri (eds.), *Huella Hídrica en México, análisis y perspectivas*, México, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Llano, Manuel (2016), “Concesiones de agua para las mineras”, 26 de enero, disponible en <<http://www.cartocritica.org.mx/2016/concesiones-de-agua-para-las-mineras/>>.
- Luna B., Leopold, Frank E. Clarke, Bruce B. Hanshaw, y James R. Balsley (1971), *A Procedure for Evaluating Environmental Impact*, Geological Survey Circular 645, United States Department of the Interior, 15 pp.
- Macknick, J., R. Newmark, G. Heath y K.C. Hallett (2011), “A Review of Operational Water Consumption and Withdrawal Factors for Electricity Generating Technologies”, en *National Laboratory of the U.S*, Department of Energy, March, 29 pp.
- Macknick, J., R. Newmark, G. Heath y K.C. Hallett (2012), “Operational Water Consumption and Withdrawal Factors for Electricity Generating Technologies, a Review of Existing Literature”, en *National Renewable Energy Laboratory*, Environmental Research Letters, Environ, Res, Lett. 7, 045802 (10 pp.) doi: <10.1088/1748-9326/7/4/045802>, 20 December 2012.
- Madden, N., A. Lewis y M. Davis (2013), “Thermal Effluent from the Power Sector, an Analysis of Once-Through Cooling System Impacts on Surface Water Temperature”, en *Environmental Research Letters*, doi: <10.1088/1748-9326/8/3/035006>, July, 8 pp.
- Martínez Austria, Polioptro y Carlos Patiño Gómez (2007), “Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México”, en *Instituto Mexicano de tecnología del Agua*, *Gaceta IMTA*, núm. 7, noviembre.
- Martínez Austria, Polioptro y Carlos Patiño Gómez (2009), “Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México”, en *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*, agosto, 50 pp.
- Martínez Austria, Polioptro y Carlos Patiño Gómez (2010), “Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México”, en *Vol. III Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el Cambio Climático*, 163 pp.
- Martínez Austria, Polioptro y Carlos Patiño Gómez (2012), “Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México”, en *Vol. IV, Adaptación al cambio climático*, 123 pp.
- Martínez Austria, Polioptro y Carlos Patiño Gómez (2012), “Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México”, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, *Revista IMTA, Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. III, núm. 1, enero-marzo, pp. 5-20.
- Mekonnen, Mesfin M.,† P. W. Gerbens-Leenes y Arjen Y. Hoekstra (2015), “The Consumptive Water Footprint of Electricity and Heat, a Global

- Assessment”, Water Management Group, Twente Water Centre, University of Twente, The Netherlands, DOI, <10.1039/C5EW00026B> (Paper) *Environ, Sci, Water Res. Technol*, 1, pp. 285-297.
- Meldrum, J., S. Nettles-Anderson, G. Heath y J. Macknick (2013), “Life Cycle Water Use for Electricity Generation, a Review and Harmonization of Literature Estimates”, en *Environmental Research Letters*, 18 pp., DOI: <10.1088/1748-9326/8/1/015031>.
- Mendonça, Maria Luisa (2010), “Agrocombustibles y monopolio sobre bienes comunes”, en *América Latina en Movimiento*, núm. 456, junio, 4 pp.
- Monast, Jonas (2014), *Nexus Perspectives, Water, Energy, and Climate*, Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions, March, 11 pp.
- National Energy Technology Laboratory (NETL) (2009), *Estimating Freshwater Needs to Meet Future Thermoelectric Generation Requirements*, Update, September 30, p. 94.
- National Energy Technology Laboratory (NETL) (2010), *Estimating Freshwater Needs to Meet Future Thermoelectric Generation Requirements*, 2010 Update, September 30, DOE/NETL-400/2010/1339, 109 pp.
- Office of the Director of National Intelligence (2012), *Global Water Security, Intelligence Community Assessment*, ICA 2012-08, 2 February, 30 pp.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), AquaData.
- Oyarzún Muñoz, Jorge (2008), *Evaluación de impactos ambientales*, Diplomado en Sustentabilidad Ambiental Minera, Chile, Universidad de La Serena, 114 pp.
- Passell, Howard (s/f), *Energy – Water - Food- Ecosystems, Global Interdependencies and Trends*, Sandia National Labs, 47 pp.
- Pate, Ron, Mike Hightower, Wayne Einfeld (2007), *Overview of Energy-Water Interdependencies and the Emerging Energy Demands on Water Resources*, April, SAND 2007-1349C, 21 pp.
- Paulino Becerra, Iury Charles (2010), “Energía para que y para quién, una reflexión necesaria”, en *América Latina en Movimiento*, núm. 456, junio, pp. 18-20
- Peredo Beltrán, Elizabeth (2010), “Cambio climático y crisis del agua. Dos luchas convergentes para defender la vida”, en *América Latina en Movimiento*, núm. 456, junio, pp 1-2.
- Ponce, Víctor M., “La matriz de Leopold para la evaluación del impacto ambiental”, disponible en <[http://ponce.sdsu.edu/la\\_matriz\\_de\\_leopold.html](http://ponce.sdsu.edu/la_matriz_de_leopold.html)>, consultado el 23 de agosto de 2016.
- Posadas, Alejandro y Regina M. Buono (2016), *The Ruel of Law and Mexico’s Energy Reform, Looming Conflicts? Energy Reform Priorities and the Hu-*

- man Right of Access to Water in Mexico*, Mexico Center/University of Houston/Tecnológico de Monterrey/Universidad Autónoma de Nuevo León/Centro de Investigación para el Desarrollo A.C., 30 pp.
- Postel, Sandra (2006), “Uso y aprovechamiento del agua para generación de energía eléctrica”, en IV Foro Mundial del Agua, México, 17 de marzo, 39 pp.
- Tidwell, Vincent y Barbie Moreland (2016), “Mapping the Energy-Water Nexus around the Pacific Rim”, *Sandia National Laboratories*, SAND, 2016, 0412R, 21 pp.
- Union of Concerned Scientist of United State (UCSUS) (2007), “Got Water?”, en *Citizens and Scientist*, Issue Brief, october, 4 pp.
- Union of Concerned Scientist of United State (UCSUS) (2011), *Power Plants, Electricity’s Thirst for a Precious Resource*, disponible en <[http://www.ucusa.org/clean\\_energy/our-energy-choices/energy-and-water-use/fresh-water-use-by-us-power-plants.html](http://www.ucusa.org/clean_energy/our-energy-choices/energy-and-water-use/fresh-water-use-by-us-power-plants.html)>.
- Union of Concerned Scientist of United State (UCSUS) (2011), *Freshwater Use by U.S. Power Plants, Electricity’s Thirst for a Precious Resource*, disponible en <[http://www.ucusa.org/clean\\_energy/our-energy-choices/energy-and-water-use/freshwater-use-by-us-power-plants.html](http://www.ucusa.org/clean_energy/our-energy-choices/energy-and-water-use/freshwater-use-by-us-power-plants.html)>.
- Union of Concerned Scientist of United State (UCSUS) (2013), “Water-Smart Power Strengthening the U.S. Electricity System in a Warming World”, A Report of the Energy and Water in a Warming World Initiative, July, 58 pp.
- Union of Concerned Scientist of United State (UCSUS) (s/f), *Power and Water at Risk, The Energy-Water Collision*, disponible en <[http://www.ucusa.org/clean\\_energy/our-energy-choices/energy-and-water-use/power-and-water-at-risk.html](http://www.ucusa.org/clean_energy/our-energy-choices/energy-and-water-use/power-and-water-at-risk.html)>.
- Union of Concerned Scientist of United State (UCSUS), *How it Works, Water for Electricity*, disponible en <<http://www.ucusa.org/clean-energy/energy-water-use/water-energy-electricity-overview>>.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) (2012), “Managing Water under Uncertainty and Risk”, en *The United Nations World Water Development Report 4*, vol. 1, p. 70.
- U.S, Department of Energy (2006), “Energy Demands on Water Resources”, Report to Congress On The Interdependency of Energy and Water, December.
- U.S, Department of Energy (2014) *The Water-Energy Nexus: Challenges and Opportunities*, June, 258 pp.
- Vliet, Michelle T.H. van, Stefan Vögele y Dirk Rübhelke (2013), “Water Constraints on European Power Supply under Climate Change: Impacts

on Electricity Prices”, July, en *Environmental Research Letters*, Environ, Res, Lett, 8 035010 (10pp) doi: <10.1088/1748-9326/8/3/035010>, 11 pp.

Wu, X.D. G.Q. Chen (2017), “Energy and Water Nexus in Power Generation: The Surprisingly High amount of Industrial Water Use Induced by Solar Power Infrastructure in China”, en *Applied Energy*, vol. 195, pp. 125-136.

