

El valor del agua

Danilo Antón*

EL VALOR DE LOS RECURSOS

Atribuir valor a los recursos naturales es una tarea difícil. En primer lugar, porque la medida que se utiliza generalmente para su ponderación es de tipo monetaria y el dinero y la naturaleza se gobiernan por distintas leyes. Como decía muy bien Soddy, el dinero se rige por las leyes de las matemáticas, mientras que los recursos naturales se rigen por las leyes de la física. La matemática permite que las cantidades se incrementen de acuerdo a la regla del interés compuesto, y otras análogas, mientras que la física está regida por la segunda ley de la termodinámica: la degradación entrópica. Esta dicotomía fundamental explica la dificultad que existe para la valoración monetaria de los bienes y elementos naturales.

El agua es el principal recurso natural. De ella dependen todos los procesos biológicos, e incluso el ADN, la molécula de la vida, está constituida estructuralmente por varias capas polares de moléculas de agua.

El cuerpo de las personas está formado en un 70 % de agua y de una manera u otra, todas las actividades humanas requieren de la presencia del vital líquido.

La cantidad de agua que existe en la Tierra se mantiene relativamente estable. Tanto las pérdidas al espacio como la llegada de moléculas de agua (o de sus átomos constituyentes: hidrógeno y oxígeno) son insignificantes. El volumen de agua del planeta es enorme: 1.500 millones de kilómetros cúbicos, o sea $1,5 \times 10^{18} \text{ m}^3$. Aun si se deja de lado el agua salada y se

considera solamente el agua «dulce», el volumen total sería cien billones (10^{13}) de metros cúbicos. Si esta cantidad fuera distribuida entre todos los habitantes del planeta, a cada uno le corresponderían 18.000 metros cúbicos, o sea, ¡18 millones de litros por persona!

A ello hay que agregar los acuíferos de agua dulce, que son 30 veces más abundantes que los anteriores. Si incluyéramos las aguas subterráneas en la distribución antedicha, el total per cápita ascendería a 600.000 m^3 (600 millones de litros).

En términos abstractos, este volumen parece ser más que suficiente para satisfacer todas las necesidades humanas actuales y del futuro cercano.

En los hechos, las cantidades disponibles son mucho menores, pues en ellas no se puede tener en cuenta toda el agua almacenada, dado que su utilización actual indiscriminada limitaría su uso futuro. Desde el punto de vista ambiental, el agua disponible es tan sólo el agua renovable. Por otra parte, hay que considerar que gran parte del agua renovable no es fácilmente accesible. Y finalmente, debido a que, aún las aguas dulces, renovables y accesibles, no suelen estar situadas en los lugares en donde más se las necesita.

En las zonas áridas la disponibilidad de agua es limitada, y ello es natural, pues estas áreas están definidas por la carencia de agua.

Pero la paradoja contemporánea es que incluso en las zonas húmedas hay escasez del vital líquido: áreas rodeadas de agua, como la ciudad de Buenos Aires, o zonas de altísima pluviosidad como Sao Paulo, en Brasil, están teniendo serios problemas de abastecimiento de agua potable.

En los hechos, el problema principal que los seres humanos están experimentando con el agua es sobre todo de *calidad* y en mucho menor grado de *cantidad*. La degradación entrópica causada por el consumo humano afecta intensamente la calidad del agua, y en menor grado los volúmenes.

* Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, julio del 2000.

La cuestión consiste en que el reciclado natural producido por la energía solar (evaporación, fotosíntesis) no alcanza para purificar todas las aguas residuales que se producen continuamente en todo el planeta.

Las sociedades contemporáneas están convirtiendo el mundo de aguas naturales en un mundo de aguas residuales.

Estamos asistiendo a un enorme proceso entrópico acelerado que conduce, en el corto plazo, a la disminución de las aguas de buena calidad, aptas para diferentes usos, que son substituidas por aguas de baja calidad, que requieren insumos energéticos para ser utilizadas.

Como la energía solar que cae sobre la superficie de la Tierra es limitada e insuficiente para lograr el reciclado general de las aguas residuales, se utilizan los combustibles fósiles para elevarlas a niveles aceptables (tratamiento). Sabemos que los combustibles fósiles son energía solar del pasado, acumulada en volúmenes finitos. Cuando se acaben el petróleo, el gas y el carbón, nos volveremos a quedar con la única fuente realista de energía renovable: la radiación solar.

Esto nos conduce directa y lógicamente al tema que nos ocupa: el del valor del agua. En general, lo que le da valor al agua no es tanto la cantidad, sino sobre todo la calidad. Las aguas de ciertas calidades (por ejemplo tóxicas) pueden tener valor negativo, pues exigen grandes cantidades de energía para ser eliminadas o tratadas para su ulterior utilización, mientras que otras aguas que no requieren ningún tratamiento pueden tener gran valor. En otras palabras, lo que le da valor al agua es sobre todo la «calidad en cantidad», y más precisamente, los volúmenes de una cierta calidad.

Por esa razón, hemos procurado desarrollar una metodología que permitiera analizar a la vez la disponibilidad y la aptitud de uso de las aguas, con el fin de proporcionar un índice rápido para la toma de decisiones en el campo de la gestión hídrica.

El tema de la calidad es un elemento calificador imprescindible para dar sentido a los caudales almacenados y circulantes.

Como la calidad del agua no es un parámetro invariable, sino que, por el contrario, cambia constantemente a lo largo del ciclo hídrico y como resultado del uso, se requiere un instrumento de análisis que pueda considerar estas variaciones, y permita tenerlas en cuenta en los cálculos de valor.

POR QUÉ SE REQUIERE UN INSTRUMENTO DE ANÁLISIS ENTRÓPICO DEL AGUA

Cuando llega el momento de la toma de decisión en materia hídrica, los decisores administrativos y políticos deben hacer frente a una amplia gama de datos y elementos de la realidad, que incluyen aspectos geográficos, geológicos, ecológicos, hidrológicos, socioculturales y tecnológicos. Estos datos e interpretaciones técnicas proporcionan la base para la toma de decisiones y para la formulación e implementación de estrategias. Sin embargo, la decisión final en esta materia es siempre política, y en la mayor parte de los casos su elemento definitorio es de orden económico.

Ahora bien, en los análisis económicos que llevan a la adopción de políticas de aguas, la evaluación del «valor» del recurso toma en cuenta solamente los aspectos crematísticos, y en muchos casos, considera que el agua es un recurso inagotable, bastando construir suficientes bienes de capital, tales como presas o baterías de pozos, para obtenerla.

En los hechos, se desconoce la pérdida de valor resultante de su utilización, y la energía (y, por ende, costo) requerida para volverla a un valor que permita su reutilización.

A medida que podamos asignar un valor «natural» al agua, expresado en un índice único que exprese el grado de degradación entrópica, más fácil ha de ser realizar ese análisis sobre bases ciertas y firmes.

TEORÍA DE LA GESTIÓN DE AGUAS: LA GESTIÓN ENTRÓPICA

Con el fin de mejor elaborar estos conceptos hemos acudido al enfoque de flujo entrópico, desarrollado ya hace más de 30 años por Nicholas Georgescu-Roegen.¹

Siguiendo las visiones revisionistas de los principales economistas ecológicos como S. A. Podolsky,² Frederick Soddy,³

¹ Georgescu-Roegen, Nicholas, 1971; *The entropy law and the economic process*; Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.

² Referencia de Martínez Alier, J., *Curso de Economía Ecológica*, 1995b, p.16.

³ La primera parte de este capítulo, referente a los enfoques de Soddy y Georgescu, está basado sobre todo en el libro *Beyond growth* de Herman E. Daly (1996).

Herman Daly, Joan Martínez Alier y el propio Nicholas Georgescu-Roegen, entre otros, hemos procurado aplicar algunos de éstas al tema hídrico.

El agua no ha sido objeto de preocupación central para la mayor parte de los autores, tal vez por su presencia generalizada. De todos modos, no hay dudas de que se trata de un recurso cuya disponibilidad es determinante para el funcionamiento de los sistemas económicos y sociales. Desde el punto de vista biológico el agua es indudablemente el recurso más valioso. Este valor rara vez se refleja en los puntos de vista de la economía ortodoxa.

Un enfoque económico holístico y sostenible del tema requiere la consideración especial y principal de los recursos y sistemas hídricos, y en la mayor parte de los casos, con precedencia a los demás recursos naturales.

Para lograr una valoración apropiada del agua proponemos aplicar los criterios de degradación/agradación entrópica a su evolución y utilización humana en el marco del ciclo hídrico terrestre. Pensamos que el concepto de entropía, que fue tomado como base del discurso ideológico de algunos de los autores antes mencionados, y más especialmente de N. Georgescu, también puede resultar una herramienta analítica importante al considerar el tema del valor del agua

EL CONCEPTO DE ENTROPIA

La entropía es una noción compleja, que busca describir la dirección natural de los procesos físicos en el universo. Éstos tienden a darse desde lo ordenado a lo desordenado y de lo heterogéneo a lo homogéneo. La energía concentrada en un lugar del espacio busca difundirse en todas direcciones. Localmente dicha difusión puede verse obstaculizada por otras fuerzas físicas, como la atracción gravitacional.⁴ Estas barreras a la

difusión global de la energía producen sistemas casi cerrados que constituyen ámbitos circunscriptos donde actúa la ley de la entropía. Si los cuerpos celestes no emitieran ni recibieran energía (o su versión concentrada: la materia) se podrían considerar como sistemas cerrados y para estos casos se podría aplicar la Segunda Ley de la Termodinámica cuyo enunciado sostiene: *«La entropía de un sistema cerrado nunca disminuye y cada vez que es posible aumenta»*.⁵

El único sistema totalmente cerrado es el universo entero, y es a él al que se aplica el concepto antes mencionado.

El concepto de entropía también se aplica a los sistemas abiertos (o semiabiertos). Del mismo modo, éstos tienden a desordenarse y uniformizar su materia y niveles de energía. Debido a su carácter abierto, pueden experimentar procesos locales de disminución de la entropía que se explican por un aumento de la entropía en otro lugar. El balance general es un incremento de la entropía.

El planeta Tierra está sometido a los procesos entrópicos del sistema solar, de la galaxia y del universo. Las radiaciones electromagnéticas recibidas de estrellas y galaxias son el resultado de la uniformización entrópica de la energía a nivel interestelar e intergaláctico. Por su parte, y con mucha más relevancia en la dinámica terrestre, la radiación solar es el resultado exterior de los procesos entrópicos de generación de energía que tienen lugar en el interior del Sol. Se trata de una estrella que «consume» su «combustible» nuclear y evoluciona entrópicamente a una situación de madurez estelar que terminará en su apagamiento total en el futuro lejano.

A su vez, la Tierra está experimentando su propia evolución entrópica a través del agotamiento de su combustible interior (energía generada por las sustancias radioactivas de las rocas, p.ej.: K^{40} , isótopos radioactivos de U y Th, etc).

En definitiva, la evolución geológica de la Tierra es el resultado de la interferencia de estas dos tendencias entrópicas, la del Sol que en su maduración difunde y por ende «comparte» su energía, y la de la propia Tierra que, en forma similar, aunque menos intensa, está irradiando continua, y a veces insensiblemente, su caudal energético. Esta radiación se manifiesta claramente a través de los volcanes, lavas y otros fenómenos efusivos, o en forma menos visible a través del flujo de energía desde el interior del planeta en dirección al espacio.

⁴ Es el caso de los «agujeros negros» (black holes).

⁵ La Primera Ley de la Termodinámica es la ley de la conservación de la energía y la Tercera Ley, también conocida como el teorema de Nernst, afirma que si uno pudiera alcanzar el cero absoluto todos los cuerpos tendrían la misma entropía.

A escalas más reducidas son frecuentes los fenómenos en que parecería que la entropía disminuye en vez de aumentar. Sin embargo, en todos los casos se trata de procesos parciales que son compensados con creces por incrementos entrópicos en otras partes.

Desde el punto de vista práctico, la entropía se manifiesta en un conjunto de fenómenos físicos que, dadas las condiciones apropiadas, tienen lugar en una única dirección. Hay numerosos procesos que son ilustrativos del funcionamiento entrópico. Por ejemplo, el agua líquida en contacto con un gas tiende a evaporarse, y ello ocurre porque las moléculas del vapor de agua están más uniformemente distribuidas que las del agua, en otras palabras, «tienen un grado más de libertad». Del mismo modo, dadas las condiciones apropiadas de temperatura y presión, el hielo tiende a fundirse o a sublimarse. Igualmente, cuando dos objetos se encuentran en contacto el calor se escapa de los cuerpos calientes a los fríos, y cuando un recipiente con gases o líquidos a alta presión se comunica con otro a presión más baja, estos gases y líquidos tienden a fluir de los recipientes de alta a los de baja igualando las presiones respectivas en los recipientes.

EL VALOR ENTRÓPICO DEL AGUA

El volumen de agua del planeta es finito pero su potencial teórico para el uso es ilimitado. Lo que en verdad está acotado es la rapidez del flujo. Ésta depende sobre todo de la energía, y la energía disponible en la superficie de la Tierra es limitada, casi enteramente suministrada por la radiación solar. La energía geotérmica (de origen radioactivo) es tan sólo una ínfima parte del balance energético global. Otro factor limitante a largo plazo es la irreversibilidad final de su degradación entrópica, que si bien se expresa sobre todo a escalas temporales muy grandes, puede ser acelerada a través de la intervención humana.

El *valor entrópico* del agua es en realidad su valor evaluado en el marco de la evolución entrópica de la vida en el planeta. Se trata de un valor que disminuye a medida que aumenta la entropía, y que por ende podría denominarse con más rigor: valor antientrópico. Como los seres humanos consideramos que la entropía es en los hechos una desvalorización de los recur-

sos, utilizaremos la expresión valor entrópico para definir la ausencia de desvalorización, o dicho de otro modo, la ausencia de entropía.

El valor entrópico del agua se relaciona con la energía consumida-utilizada para llevar al líquido a un estado de menor entropía que se busca establecer.

En ese sentido, el valor entrópico está dado por la energía requerida para obtener una determinada calidad de agua⁶ a partir de un nivel de referencia.

En los sistemas naturales el mayor valor entrópico se logra a partir de la condensación del vapor de agua de la atmósfera en las nubes y su precipitación a través de las lluvias, de la nieve o del granizo. La caída del agua, tanto como su escurrimiento posterior rumbo a niveles menores de energía potencial, implica un aumento de la entropía y por ende una pérdida del valor entrópico del recurso.

Luego de precipitada, el agua de lluvia se escurre y/o infiltra, y en su flujo disuelve e incorpora sustancias dando lugar a pérdidas adicionales de valor entrópico. Al mismo tiempo que fluye, el agua se transforma, cada vez más, en un medio adecuado para el desarrollo de organismos vivos, cuya presencia tiende a provocar aún una mayor disminución de este valor.

El uso humano del agua es un factor que acelera el deterioro creciente de su valor entrópico y que se agrega a la degradación debida a procesos naturales.

La agricultura de irrigación, tipo de uso hídrico mayor, cuando se la considera en términos de volumen, utiliza aguas de una cierta calidad y las regresa al medio natural con una calidad menor. La pérdida de valor debido a la agricultura depende de las prácticas y sistemas de irrigación utilizados. En algunos casos, se utiliza agua de alta calidad (mayor valor entrópico) y se vierte muy contaminada por agroquímicos o sales (menor valor entrópico). En ese caso, la pérdida de valor es muy grande. En otros, se usa agua de menor calidad, y se vierte al medio sin sustancias químicas ni sales (p.ej. en el caso de la agricultura orgánica). En esta situación la degradación puede ser muy escasa.

Las ciudades, en cambio, a pesar de consumir menos agua que la agricultura, tienden a ser grandes degradadoras del agua

⁶ «Calidad» en el sentido de «apto para ser utilizado socialmente».

consumida. En su mayor parte, toman el agua de la naturaleza, la someten a ciertos tratamientos de potabilización (que consumen energía), elevando su valor entrópico, y luego la arrojan al medio cargada de numerosos contaminantes. El reuso de las aguas residuales urbanas, que significa elevar nuevamente el valor entrópico, requiere grandes cantidades de energía, que muchas veces están fuera del alcance de las sociedades en cuestión.

Por su parte, las actividades industriales tienen en general, aunque no siempre, intensos efectos nocivos sobre los recursos hídricos. Éstos son variables de acuerdo al tipo de actividad y tecnologías de producción utilizadas. Algunas industrias requieren aguas de gran valor entrópico (p.ej. agua destilada) y las arrojan cargadas de químicos que disminuyen su calidad en forma notable. En otros casos, la calidad del agua residual no es muy inferior a la del agua original (p.ej. cuando el agua se usa solamente para procesos de enfriamiento). De todas maneras, como regla general, el potencial de degradación del agua de la actividad industrial es muy grande.

A pesar de que el efecto final de la utilización humana del agua es la reducción del valor entrópico, en muchos casos, en las etapas previas a su utilización, se pueden realizar «tratamientos» que, si bien consumen energía, dan lugar a un aumento temporario del valor entrópico que la hacen apta para ser utilizada con el fin propuesto.

El agua potabilizada tiene un valor entrópico mayor que el agua natural no potable. La diferencia estriba, sobre todo, en la cantidad de energía requerida para obtener la primera a partir de la segunda. Del mismo modo el agua residual tratada tiene un valor entrópico superior al del agua residual cruda.

En los hechos se han aplicado diversas metodologías para calcular el valor de la calidad del agua. Como señalan Kneese y Bower (1968),⁷ las pautas de calidad requeridas no pueden ser establecidas meramente en términos económicos, pues los beneficios directos o indirectos de una determinada calidad de agua son difíciles de calcular en forma precisa.

⁷ Señalan Kneese y Bower, 1968: «El nivel de calidad de agua a ser alcanzado en cada uno de los cursos de agua de la nación no puede ser establecido directamente en términos económicos —porque todos los beneficios relevantes de la mejora de la calidad no pueden ser calculados...».

Si bien el valor entrópico tampoco puede ser fácilmente expresable en términos cuantitativos ofrece un instrumento para definir, aunque sea cualitativamente, las escalas de valor requeridas para la formulación de estrategias apropiadas para optimizar la utilización de los recursos hídricos disponibles.

Los sistemas naturales de reciclado

Todas las aguas residuales que no son recicladas artificialmente se integran al ciclo hídrico y quedan sometidas a los sistemas naturales de reciclado. Éstos se basan fundamentalmente en la acción solar, ya sea directamente a través de la evaporación y posterior condensación (que constituyen, en cierto modo, una «destilación» natural), o indirectamente, a través del filtrado que ocurre en ciertas formaciones geológicas debido a la acción de la gravedad, o de las modificaciones producidas por la vegetación (que absorbe ciertas sustancias y libera otras, con un efecto purificador y el consecuente aumento del valor del agua).

La capacidad planetaria de reciclado natural del agua es limitada, tanto local como globalmente. A nivel local, las aguas suelen permanecer durante un cierto tiempo con sus condiciones de calidad deteriorada, hasta ser evacuadas al mar o evaporadas, reintegrándose, más tarde, en ambos casos, al sistema natural bajo la forma lluvias, nieves y granizos.

A nivel global, las aguas residuales no tratadas tienden a diluirse en océanos, mares y lagos, incorporándose a éstos y disminuyendo su calidad. Este proceso es claramente visible en la cercanía de las costas en donde las características de las aguas marinas se ven sensiblemente deterioradas por los aportes de ciudades e industrias.

Las aguas del mar son aguas superficiales de gran entropía (y por lo tanto con bajo valor entrópico). Este valor natural, ya reducido, se ve disminuido aún más por la acción humana.

También el agua atmosférica (vapor de agua, nubes, lluvias, nieve, granizo) sufre el impacto antrópico. La lluvia ácida, provocada por la formación de ácido sulfúrico a partir de la emisión de compuestos de azufre y otros en ciertas industrias, es un caso típico de disminución de valor entrópico en la porción cuspidal del ciclo hídrico. En otras palabras, en las zonas afectadas por este fenómeno, incluso la lluvia ha visto reducido su valor.

A medida que los mares y atmósfera tienen mayores dificultades para «digerir» los caudales crecientes de aguas residuales humanas, la calidad general del agua planetaria disminuye, se hace más difícil la eliminación de la carga de contaminantes y la vida marina se ve crecientemente afectada.

De a poco, a medida que la población y las actividades humanas se incrementan, los grandes cuerpos de agua, lagos, océanos y mares pasan a ser grandes cubetas de almacenamiento de aguas residuales.

Como señalábamos antes, irreversible e irresponsablemente, los seres humanos están transformando el mundo de las aguas naturales en un mundo de aguas residuales.

LA CONMENSURABILIDAD DE LOS DISTINTOS TIPOS DE AGUA

Es más fácil definir el valor de las aguas en forma relativa u ordinal que crear una medida basada en una única escala de valores que sirva para clasificar todas las variedades existentes. La primera, también llamada conmensurabilidad débil, permite simplemente ordenar los tipos de agua, por ejemplo, de la más contaminada a la menos contaminada o a la inversa. La conmensurabilidad fuerte o cardinal, por el contrario, va más allá, pues no sólo permitiría ordenar las aguas sino además conocer las diferencias de valor que las separan.⁸

En este intento de valorizar el agua intentaremos comenzar con enfoques de tipo comparativo (conmensurabilidad débil) utilizando sobre todo elementos cualitativos, y luego procuraremos desarrollar procedimientos de conmensurabilidad fuerte introduciendo elementos cuantitativos.

CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN

Para clasificar el agua de acuerdo a su valor entrópico hemos usado un cierto número de criterios, que se relacionan a la vez con procesos de tipo entrópico y con los requerimientos de energía necesarios para llevar las aguas desde los niveles inferiores (de menor valor entrópico) a otros superiores. En algunos casos, cuando los procesos son irreversibles, está «elevación» de nivel entrópico puede no ser factible.

Los principales criterios utilizados son los siguientes:

- El valor entrópico tiende a declinar a medida que el agua desciende. El agua de las nubes o de las montañas es más valiosa que la de los ríos, del mar o de los acuíferos de llanura.
- También disminuye al incrementarse la concentración de sustancias disueltas, por ejemplo sólidos. El agua «dulce» con pocas sales⁹ tiene mayor valor entrópico que las aguas salobres,¹⁰ y éstas a su vez mayor valor que las aguas del mar¹¹ y las salmueras.
- El valor entrópico baja al aumentar los organismos vivos no fotosintéticos (los fotosintéticos tienen el efecto inverso) y la concentración de la materia orgánica derivada de ellos. Luego de un cierto umbral, el aumento de la entropía (con su consecuente disminución del valor entrópico), puede llevar a la reducción e incluso desaparición de los procesos vitales y materia orgánica.
- El valor entrópico desciende al crecer la contaminación (toxicidad para las diferentes formas de vida) de las aguas.

En base a los criterios antes mencionados proponemos un cuadro clasificatorio de las aguas terrestres de acuerdo a su valor entrópico. Para facilitar el análisis las dividimos en doce categorías, en donde el 10 es el mayor valor entrópico, y el 0 es el valor entrópico nulo (máxima entropía). Las causas que pueden disminuir la calidad del agua son variadas, algunas son naturales y otras se derivan del tipo de utilización. Por esa razón, puede haber aguas con características muy diferentes que estén clasificadas al mismo nivel. La razón es que todas ellas requieren cantidades comparables de energía para ser elevadas a los niveles máximos de valor entrópico. En el cuadro incluimos además algunos rasgos de los diferentes tipos de valores de aguas: la utilización posible, la posición geológica y la presencia de vida.

⁸ Martínez Alier, J. , *Curso de Economía Ecológica*, p.84 y sig.

⁹ Por ej. 100 a 1000 ppm de sólidos disueltos.

¹⁰ Por ej. 1000 a 10.000 ppm de sólidos disueltos

¹¹ Las aguas de mar contienen unos 35.000 ppm de sólidos disueltos, las salmueras más de 200.000 ppm.

Cuadro I
Valor Entrópico de las Aguas Terrestres

Valor entrópico	Aguas naturales		Utilización del agua natural	Aguas residuales o contaminadas	Posición geológica	Presencia de vida
	Aguas superficiales	Aguas subterráneas				
10	Nubes		Agua destilada		Atmosférica, elevada	Organismos muy escasos por falta de nutrientes
9	Lluvia, nieve, granizo, rocío		Agua potable		Atmosférica, baja	Organismos escasos por falta de nutrientes
8	Manantiales, torrentes de montaña		Aguas termales		Cimas, cabeceras de valles	Organismos de abundancia escasa a intermedia
7	Cursos altos de ríos, lagos de montaña	Napas hipodérmicas de agua dulce	Aguas para riego	Lluvia moderadamente ácida	Zonas de montañas, sierras, colinas elevadas, mesetas	Organismos de abundancia intermedia
6	Cursos medios de ríos, lagos medios, emisarios de ciertos humedales	Napas hipodérmicas, acuíferos poco profundos no contaminados	Aguas para riego	Lluvia muy ácida	Zonas de colinas, sierras bajas, subsuelo de poca profundidad	Organismos abundantes
5	Cursos bajos de río, lagos de llanura, humedales oxigenados	Agua subterránea profunda dulce. Poco profunda ligeramente salobre	Aguas para riego	Drenajes de riego, agua residual tratada	Llanuras, colinas bajas subsuelo mediantemente a muy profundo	Organismos muy abundantes en ríos y lagos, localmente exceso de nutrientes. Vertidos de aguas de riego pueden provocar procesos de eutroficación

Cuadro I
 Valor Entrópico de las Aguas Terrestres (*Continuación*)

4	Lagos y humedales eutrofizados Lagos salobres	Agua subterránea profunda ligeramente salobre; aguas poco profundas salobres	Aguas para lavado	Drenajes de riego, agua residual parcialmente tratada	Zonas bajas, áridas, subsuelo de profundidad variable	Organismos muy abundantes en los lagos salobres. Los vertidos de aguas de riego pueden provocar procesos de eutroficación.
3	Mares y lagos salados	Agua subterránea salada	Aguas balnearias	Vertidos urbanos e industriales medios	Nivel del mar, zonas continentales deprimidas, subsuelo de profundidad variable	Organismos muy abundantes en mares y lagos, escasos en vertidos urbanos. Los vertidos urbanos provocan frecuentes procesos de eutroficación.
2	Salmueras	Salmueras subterráneas	Producción de sal	Vertidos urbanos e industriales altamente contaminados	Salmueras subterráneas	Escasos organismos debido a la toxicidad, procesos de eutroficación posibles localmente
1	Salinas	Yacimientos de sal	Producción de sal industrial	Vertidos industriales de alta toxicidad	Yacimiento de sal	Ausencia de organismos

PARÁMETROS PARA DEFINIR LOS NIVELES DE VALOR ENTRÓPICO

La disminución del valor entrópico, que señalábamos anteriormente, es un fenómeno natural que ocurre a partir del momento en que el vapor de agua se condensa formando nubes, y especialmente cuando se precipita al suelo. En ese momento las aguas comienzan a fluir perdiendo energía potencial, aumenta la salinidad, y se carga de organismos y materia orgánica. El proceso suele ser revertido local y temporalmente, por ejemplo, debido a la acción fotosintética de las algas u otras plantas, por el filtrado del agua en ciertas formaciones apropiadas, o a la interacción de éstos u otros factores. Esto último ocurre en los casos en que la salinidad es demasiado elevada, o alguna otra condición físico-química como el pH o la temperatura, general condiciones limitantes para la vida.

De todos modos, la tendencia general en las condiciones habituales de los paisajes terrestres es hacia el aumento de la salinidad y del contenido en materia orgánica.

Por esa razón se puede medir la calidad entrópica a través de una escala mixta basada en una lista de parámetros que incluye, entre otros, los Sólidos Disueltos Totales (SDT) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

Normalmente, el uso antrópico del agua produce una aceleración de estos procesos y por ende es posible utilizar el mismo método para evaluar la calidad de los residuos líquidos. La mayor parte de las aguas residuales humanas están cargadas de materia orgánica y organismos descomponedores (p.ej. bacterias y protozoarios), y normalmente poseen tasas de sólidos disueltos (salinidad) mayores que las aguas originales. En esos casos, los niveles de SDT y DBO pueden suministrar una buena medida del cambio de la calidad.

Los niveles de DBO admitidos en las Normas Oficiales Mexicanas para aguas vertidas a los cuerpos de aguas naturales han de ser inferiores a 150 en el agua fluvial destinada a irrigación, 75 en la de uso urbano, 30 en los ríos destinados a pro-

tección de la vida acuática, 75 en las aguas costeras dedicadas a la recreación y nulos en las aguas potables.¹²

Sin embargo, hay ciertas aguas residuales, particularmente, las aguas de desecho industriales, cuya toxicidad puede impedir la vida de los organismos. En esos casos la DBO no es una medida adecuada para medir la materia orgánica (hidrocarburos, amoníaco, grasas) y puede ser substituido por la Demanda Química de Oxígeno (la DQO). A ello se agregan los residuos en suspensión o disueltos de metales y de otros contaminantes potencialmente tóxicos, que tampoco aparecen en la DBO, y generalmente tampoco en la DQO. En esos casos corresponde agregar un parámetro adicional compuesto (metales y otros contaminantes: MOC).¹³ En él están incluidas las concentraciones de metales (p.ej. zn, cu, pb, hg, cd, cr, ni, fe y al) y de otras sustancias tóxicas (arsénico, cianuro, fenoles, etc). En los cuadros II, III, IV y V se presentan las concentraciones correspondientes a cada uno de los niveles entrópicos propuestos.

En el cuadro II se detallan las concentraciones máximas permisibles de metales y otros contaminantes para ser descargados en los sistemas de alcantarillado urbano o municipal de acuerdo a las normas mexicanas.¹⁴ En el cuadro III se presentan los máximos permitidos para ser vertidos en los cuerpos de agua naturales y en el cuadro IV se incluyen las concentraciones permisibles en el agua potable.

En el Cuadro V se presentan los niveles de TSD, DBO, DQO y MOC aproximados propuestos para cada tipo de calidad entrópica del agua.

A ellos hay que agregar las condiciones de energía potencial, relacionadas con la posición gravitacional del agua considerada. Expresamos ésta en altura en metros sobre el nivel de base local de la cuenca. Ésta puede ser positiva en el caso de las aguas superficiales y las aguas subterráneas más elevadas, o negativa en las aguas subterráneas más profundas.

A medida que el agua desciende en su nivel de valor entrópico resulta más oneroso, desde el punto de vista de la energía requerida, regresarla a las condiciones óptimas de uso. El agua salada puede ser desalinizada (ya sea naturalmente por medio de la evaporación solar) o artificialmente (en una planta desalinizadora). En ambos casos se requiere energía.

Las aguas con mayor DBO o DQO pueden «purificarse» como resultado de procesos naturales (basados en la energía

¹² Normas Oficiales Mexicanas; NOM-001-ECOL-1996

¹³ Para el cual utilizaremos las Normas Oficiales Mexicanas.

¹⁴ Normas Oficiales Mexicanas; NOM-002-ECOL-1996; NOM-003-ECOL-1997 y NOM-001-ECOL-1996.

El valor del agua

solar) o tratarse artificialmente en plantas apropiadas, cuya operación también requiere energía. La «purificación» biológica o química de las aguas que contienen metales u otras sustancias tóxicas análogas (ver Cuadros II a IV), en cambio, puede dar lugar a acumulaciones tóxicas en la biota, en los suelos o en los sedimentos. Esta agua pueden ser tratadas y las concentraciones de metales o sustancias tóxicas pueden ser reducidas. De todos modos, los procesos requeridos para lograr una descontaminación significativa pueden entrañar un costo energético prohibitivo.

Finalmente, como resultado del flujo gravitacional (pérdida de energía potencial) el agua también se «eleva» energéticamente, pues para su utilización hay que «elevar» el agua a los sitios de consumo con el consiguiente aumento del costo.

Por esa razón es posible evaluar el valor del agua basándose en los cinco parámetros indicados anteriormente (EP, TSD, DBO, DQO y MyOC).

A la vez hemos estimado la cantidad de energía requerida para pasar el agua de los niveles más bajos a los más altos, medida en kCal (Cuadro VI), y su costo aproximado en U\$S dólares con las tecnologías disponibles.

Cuadro II

Límites permisibles de metales en suspensión o disueltos y otros contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal (MOC, promedio diario, en mg/l)

Metales	Máximo tenor permitido
Zinc	9,0
Cobre	15,0
Cadmio	0,75
Cromo hexavalente	0,75
Plomo	1,5
Níquel total	6
Mercurio	0,015
Otros contaminantes	
Arsénico total	0,75
Cianuro total	1,5
Grasas y aceites	75

Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996.

Cuadro III

Límites permisibles de metales en suspensión o disueltos y otros contaminantes en las aguas residuales tratadas que se descarguen en ríos, para protección de la vida acuática (MOC, promedio diario, en mg/l);

Metales	Máximo tenor permitido
Zinc	20
Cobre	6
Cadmio	0,2
Cromo	1
Plomo	0,4
Níquel total	4
Mercurio	0,01
Otros contaminantes	
Arsénico total	0,2
Cianuro total	2

Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997.

Cuadro IV

Límites permisibles de metales en suspensión o disueltos y otros contaminantes en el agua potable (MOC; promedio diario, en mg/l);

Metal	Máximo tenor permitido
Zinc	5,0
Cobre	2,0
Hierro	0,3
Aluminio	0,2
Manganeso	0,15
Cromo	0,05
Plomo	0,025
Mercurio	0,001
Otros contaminantes	
Arsénico	0,05
Cianuros	0,07
Nitratos (como N)	10,0
Nitritos (como N)	0,05
Fenoles o compuestos fenólicos	0,001

Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996.

Cuadro V
 Valor Entrópico de las Aguas Terrestres medido en DBO, DQO, TSD y MOC

Valor entrópico	Aguas naturales superficiales		Aguas residuales o contaminadas ¹⁵				Aguas subterráneas	Salinidad TSD, ppm
	Tipo de agua superficial	DBO	Tipo agua residual	DBO*	DQO*	MOC Metales y otr.contam.		
10	Nubes	0						0-40
9	Lluvia, nieve, granizo, rocío	0						40-80
8	Manantiales, torrentes de montaña	Hasta 10 mg/l				Por debajo de los límites establecidos en el nivel 7		80-150
7	Cursos altos de ríos, lagos de montaña	10-20 mg/l	Lluvia moderadamente ácida	0		Límites máximos para el agua potable (Ver Cuadro III)	Napas hipodérmicas, manantiales de agua dulce	150-300
6	Cursos medios de ríos, lagos medios, emisarios de ciertos humedales	20-40 mg/l	Lluvia muy ácida	0		Concentraciones intermedias entre niveles 4 y 7	Agua subterránea poco profunda, dulce	300-600
5	Cursos bajos de río, lagos de llanura, humedales oxigenados	40-60 mg/l	Drenajes de riego, agua residual tratada	0-60 mg/l	0-120 mg/l	Concentraciones intermedias entre niveles 4 y 7	Agua subterránea poco profunda, ligeramente salobre; agua subterránea profunda dulce	600-1000

¹⁵ Datos de Metcalf & Eddy, Inc, 1991; Wastewater Engineering, McGraw Hill Publishing Company, p. 109.

Cuadro V
 Valor Entrópico de las Aguas Terrestres medido en DBO, DQO, TSD y MOC

4	Lagos y humedales eutrofizados Lagos débilmente salobres	60-80 mg/l	Drenajes de riego, agua residual partialm. Tratada	60-120 mg/l	120-250 mg/l	Límites máximos para descargas en río (ver Cuadro IV) ¹⁶ profundas salobres	Agua subterránea profunda ligeramente salobre; aguas poco	1000-5000
3	Lagos salobres y mares	Menos de 60 mg/l	Vertidos urbanos e industriales medios	120-250 mg/l	250-500 mg/l	Concentraciones intermedias intermedias entre niveles 2 y 4	Agua subterránea salada	500-35000
2	Salmueras		Vertidos urbanos e industriales altamente contaminados	Más de 250 mg/l	Más de 500 mg/l	Límites máximos descargas alcantarillas, (ver Cuadro V)	Salmueras subterráneas	35000-300000
1	Salinas		Vertidos industriales de alta toxicidad			Por encima del límite establecido en nivel 2	Yacimientos de sal	Más de 300000

* A los efectos meramente estimativos se estableció que DBO/ DQO = 0.5

¹⁶ Límite máximo de descarga en ríos para la preservación de la vida acuática.

COSTO ENERGÉTICO

El costo energético de elevar la calidad del agua de un nivel a otro varía de acuerdo al tipo de degradación entrópica que han sufrido las aguas y a la tecnología utilizada.

En los ambientes naturales el reciclado se produce naturalmente y el gasto energético es la energía solar radiante requerida para evapotranspirar u oxigenar las aguas degradadas llevándolas al nivel de referencia.

En los sistemas artificiales el reciclado o potabilización tiene lugar mediante el tratamiento de las aguas residuales o saladas utilizando varios métodos.

El gasto energético para evaporar agua de los cuerpos de agua naturales es de 600,000 kcal por m³ de agua a una temperatura ambiente de 20°C (ver Cuadro VI).

Cuadro VI

Costo energético para evaporar agua
(en kcal a una temperatura ambiente de 20°C)

Para evaporar	1 gramo de agua	Se requieren aproximadamente	0,6 kcal
	1 m ³ de agua		600,000 kcal
	1000 mm anuales de agua en 1 ha		6.000 M. kcal
	El 50% del agua llovida en una cuenca de 1000 km ² , donde llueven 1000 mm.		3 x 10 ¹⁴ kcal (300 billones de kcal)

¹⁷ Datos obtenidos de diversas fuentes: website de la Communauté Urbaine de Montreal, 1999, <http://www.cum.qc.ca/cum-an/station/couxstaa.htm>; datos de Tripower Systems, L.L.C., Houston, Texas, presentados en la American Power Conference 1997 Annual Meeting, Chicago, Illinois, www.tripowersystems.com; Planetary Engineering Group Earth; www.pege.org

¹⁸ Costo del tratamiento en la Communauté Urbaine de Montréal.

¹⁹ Una planta de 500 MW puede producir unos 10 millones de litros por día de agua dulce, o sea 10,000 m³.

LOS COSTOS DEL RECICLADO ARTIFICIAL¹⁷

Las aguas degradadas o salinizadas (con nivel entrópico bajo) pueden ser recicladas o potabilizadas por medio de procedimientos artificiales.

Las tecnologías utilizadas para ello son diversas. Los métodos más económicos son los biológicos, que implican utilizar la energía de la fotosíntesis (p.ej. lagunas de estabilización). En general se trata de sistemas apropiados para pequeños caudales (como por ejemplo, para tratar las aguas cloacales de las ciudades chicas y medianas). Para caudales mayores, provenientes de grandes zonas urbanas e industriales, se utilizan normalmente plantas de tratamiento más complejas que incluyen métodos de filtrado, floculación, biodigestión y oxigenación, y descarte y/o incineración de lodos. En ambos casos (métodos biológicos e industriales) el producto obtenido no posee calidad potable. Para lograrla se requiere utilizar métodos evaporativos (p.ej. destilación).

La diferencia entre estos métodos es el costo. Los métodos biológicos son los más económicos, y, en general, requieren gastos de operación mínimos, variables de acuerdo a las condiciones geográficas del lugar, pero normalmente inferiores a 0.01 U\$S por m³.

Los métodos de tratamiento a escala industrial exigen inversiones considerables, del orden de 2,000 M. de dólares para un caudal de aguas residuales de 5 a 10 m³ por segundo. Los gastos operativos son mucho menores, estimados en un 0.03 U\$S por m³ de agua tratada.¹⁸ Si se agrega el costo de depreciación del capital, el costo sería algo mayor, cercano a 0.05 U\$S por m³.

Los sistemas evaporativos son aún más onerosos. La desalinización de 1 m³ de agua de mar cuesta unos 3 U\$S dólares utilizando energía solar, mientras que usando combustibles fósiles o energía eléctrica el costo sería aún varias veces mayor (U\$S 10 a 50 dólares por m³ dependiendo del costo del petróleo o de la energía eléctrica en cada lugar).¹⁹

Es de hacer notar que si bien el costo de los métodos evaporativos es de 100 a 500 veces más caro que en las macroplantas industriales, el producto final es de mucho mayor calidad.

En términos de niveles entrópicos, el agua urbana e industrial tratada no excede el nivel entrópico 5 o 6, mientras

que el agua evaporada/ destilada alcanza un valor 8 o 9. Ello muestra las limitaciones de la tecnología, aún extremadamente dependiente en el ciclo natural.

Los costos aumentan en forma logarítmica a medida que se eleva el nivel entrópico. Con la tecnología disponible, llevar el agua del nivel 2 o 3 al nivel 5, cuesta aproximadamente unos 0.03-0.05 por m³, mientras que llevarla hasta el nivel 8, cuesta 100 a 300 veces más caro (3 a 10 U\$S dólares).

CONCLUSIÓN

Teniendo en cuenta la calificación entrópica de las aguas naturales y residuales y el mínimo valor entrópico requerido para su utilización, es posible lograr una optimización de uso del recurso. Dicha calificación permite tener una noción de la magnitud de la degradación, al proporcionar una idea de la energía y/o costo necesarios para elevar el agua de un nivel inferior a uno superior. En particular se puede aquilatar claramente el costo del tratamiento de aguas contaminadas innecesariamente (en la realidad todas lo son), y en particular el altísimo costo de la potabilización (que resulta «gratis» cuando ocurre naturalmente).

En gran medida el método propuesto tiene como fin suministrar un instrumento que es a la vez analítico e interpretativo para la toma de decisiones en la gestión hídrica.

Las políticas de aguas deben tender a reducir el deterioro de los sistemas hídricos naturales producido por las actividades humanas. Ello se logra utilizando los menores volúmenes de agua posible, y a la vez, destinando para cada propósito específico aquellas aguas que posean el menor valor ambiental posible, sin afectar su función.

Para ello corresponde definir cual es el mínimo valor entrópico para cada uso dado. Así, por ejemplo, el agua destinada para ser bebida debe tener un valor entrópico elevado, mientras que el agua para el lavado o el riego puede poseer un valor bastante menor. En base a ello hay que diseñar los procesos de utilización hídrica de manera de disminuir a un mínimo la desvalorización entrópica.

En forma prioritaria deben ser revisados cuidadosamente aquellos usos que dan lugar a un deterioro muy pronunciado

de la calidad, sobre todo cuando se consumen grandes volúmenes.

De ese modo será posible administrar los recursos hídricos de la forma más apropiada y sostenible como para satisfacer las necesidades a corto y largo plazo de las comunidades y naciones.

En resumen: el valor entrópico puede ser utilizado como factor de ponderación general al analizar los costos y ventajas de las diversas alternativas de tratamiento y/o explotación de los diferentes tipos de aguas, tanto naturales, como residuales.

BIBLIOGRAFÍA

- ANTÓN, Danilo, 1997; Ciudades Sedientas, Nordan, Ottawa-Montevideo.
- 1999; Diversidad, Globalización y la Sabiduría de la Naturaleza; Piriguazú Ediciones, San José, Costa Rica.
- y DÍAZ DELGADO, C., Editores, 2000; Sequía en un Mundo de agua, Piriguazú Ediciones y Centro Interamericano de Recursos del Agua, Toluca y México, San José de Costa Rica.
- ARREGUÍN-CORTÉS, Felipe I., 1994; Efficient use of water in cities and industry; en Efficient Water Use, pp.61-92, ed. por Unesco, Montevideo, Uruguay.
- AVILA PÉREZ, P. 1995. Evaluación de los metales pesados cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb y Hg en agua, sedimento y lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) de la presa José Antonio Alzate, Estado de México. Tesis M. E. Universidad Autónoma del Estado de México.
- BARCELO Q.I., SOLIS C.H. y GONZÁLEZ C. C., 1998, Evolución estacional de parámetros fisicoquímicos en la presa «A. Alzate»; México, XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, AIDIS, México.
- BETHEMONT, J., 1980; Geografía de la utilización de las aguas continentales. Oikos Tau, Barcelona, España, pp. 436.
- BISWAS A. K. y KINDLER J. (para UNEP), 1989; Sustainable water development and management: a synthesis; United Nations Environment Program, Nairobi, Kenya, pp. 27.
- CASTAÑÓN, V.M.; MORALES, A. y PÉREZ-Hernandez, H. (1995). Efectos del reuso de aguas residuales sobre los recursos de agua subterránea para uso urbano en el Valle de León,

- Guanajuato. Reporte técnico GSA/95/2. Comisión Nacional del Agua, British Geological Survey y Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León.
- CASTILLO, I.; SÁNCHEZ VÁZQUEZ, C., CASTILLO VILLAVICENCIO, G. y ROSALES, F. (1997). Situación de la depuración de las aguas residuales municipales en México. Memorias XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Zacatecas Tomo I: 456-462.
- CIFUENTES, E.; BLUMENTHAL, M.J., RUIZ PALACIOS, G. y BENETH, S. (1992). Health impact evaluation of wastewater in Mexico. *Public. Health Revue* 19:243-250.
- CIFUENTES, E.; RUIZ PALACIOS, G.; BLUNMENTHAL, U. y BENNET, S., 1995; Infecciones gastrointestinales asociadas al riego agrícola con aguas residuales; perspectivas de control. Informe Final. Análisis de la calidad del agua en el Gran Canal y en el Emisor Central. Anexo I. 50 pp.
- Communauté Urbaine de Montreal, 1999; Wastewater Treatment Plant; website: <http://www.cum.qc.ca/cum-an/station/couxstaa.htm>
- CORTÉS, M.J.E., 1993; Metales pesados en agricultores expuestos a aguas residuales en el Distrito 03 - Tula. Tesis de Maestría en Ciencias en Salud Ambiental. Instituto Nacional de Salud Pública. México.
- CHILTON, P.J.; MORRIS, B.L. y FOSTER, S., 1996; Los recursos hídricos subterráneos y la disposición de aguas residuales urbanas, interacciones positivas y negativas. VII Curso Internacional OMS-PNUMA-GEMS/OPS-CEPIS/ODA-BGS. pp. 42.
- DALY, Herman E., 1996; *Beyond growth*, Beacon Press, Boston, pp. 253.
- DEKOV V. M., KOMY Z., ARAÚJO E, VAN PUT A. and Van Grieken R. (1997). Chemical composition of sediments, suspended matter, river water and ground water of the Nile (Aswan-Sohag traverse). *The Science of the Total Environment*, 201: 195-210.
- Dirección General de Salud Ambiental, Subsecretaría de Regulación y Fomento Sanitario, 1996; Normas Oficiales Mexicanas Aguas para uso y consumo humano NOM-127-SSA1-1994, México.
- DOF Diario Oficial de la Federación, (1997). Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996 que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Publicada el 6 de enero de 1997.
- DOF Diario Oficial de la Federación, (1998). Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996 que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Publicada el 3 de junio de 1998.
- DOMÍNGUEZ MARIANI, E. y ORTEGA GUERRERO, M.A. (1998). Interacción de aguas residuales con un acuífero regional. Memorias de la Primera Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra. México. pp:176.
- EPA de 1975. Regulations governing discharge of dredged or filled material in navigable waters. *Federal Register*, 40, 173, 41, 282-98.
- FALKENMARK, M., 1997; Society's interaction with the water cycle: a conceptual framework for a more holistic approach; *Hydrological Sciences- Journal des Sciences hydrologiques*, 42 (4) Agosto de 1997, p. 451- 466.
- FARAH, Jumanah, 1994; Pesticide policies in developing countries; *The World Bank Discussion Paper* 238, Washington, DC.
- FIELD, Barry C. y AZQUETA OYARZÚN, Diego, 1996; *Economía y medio ambiente*; Mc Graw Hill, tres tomos, pp.874.
- GARDUÑO, Héctor, 1994; Efficient water use: a multi-dimensional approach; en *Efficient Water Use*, pp.15-26, ed. por Unesco, Montevideo, Uruguay.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1971; *The entropy law and the economic process*; Harvard University Press, Cambridge, Massachusets.
- Greenpeace, 1992; *The Greenpeace book of water*; Cameron Books.
- HERRERA REVILLA, Ismael et al, 1995; *El Agua y la Ciudad de México*; publicado por el Consejo Nacional de Investigación, pp.353, México.
- HIRATA, Ricardo, 1997; Poluição dos recursos hídricos subterraneos e o conceito de vulnerabilidade, Seminario: Agua: fonte de vida, ABES, Alagoas.
- HUIZAR, R. (1997). Hydrogeochemistry of the aquifers in the rio Las Avenidas Basin, Pachuca, Hidalgo, México. *Water, Air and Soil Pollution* 96: pp 185-201.

- JIMÉNEZ, B y CHÁVEZ A. (1998). Posibilidades de reuso en el Distrito Federal y el Valle de Mezquital. 1er Simposio Latinoamericano de Tratamiento y Reuso del Agua y Residuos Industriales. Memorias Tomo II: 58. pp 1-58.13.
- KASHEF, Abdel-Aziz I., 1981; Technical and ecological impacts of the High Aswan Dam; *Journal of Hydrology*, 53 (1981) pp.73-84; Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam²¹
- KITE, G.W., (1985), Frequency and risk analyses in hydrology, Water Resources Publications.
- KNEESE, Allen V. y BOWER, Blair T., 1970; Standards, Charges and Equity; en *Economics of the environment. Selected readings*, editados por Dorfman, Robert y Dorfman, Nancy S.; W.W. Norton and Company. Inc.; Nueva York.
- KUNTZ, K.W. 1988. Contaminants in bottom sediments of the St. Lawrence River in June 1975. Environment Canada report. Inland waters directorate, Water Quality branch-Ontario region. Tech. Bull. 147.
- LAZARUS, Jay y DRAKE, Paul G. y SHOENFELD, Peter B., 1994; Water reuse- water quality and water rights considerations; en *Efficient Water Use*, UNESCO- ROSTLAC; pp.145-152.
- LEFF, Enrique, 2000; Pensar la complejidad ambiental; en «La complejidad ambiental», p.7-53; Siglo XXI, PNUMA, Centro de Investigaciones Interdisciplinarias, México.
- LLAMAS, J., (1993), *Hydrologie générale: Principes et applications*. Gaëtan Morin éditeur.
- LLURIA, Mario R., 1996; Recuperación de aguas residuales por recarga artificial; en *Agua: Desafíos y Oportunidades para el Siglo XXI*; pp.243-248 Gobierno del Estado de Aguascalientes.
- MARTÍNEZ ALIER, J., 1995; Curso de Economía Ecológica, p. 15; Serie Textos Básicos para la Formación Ambiental N°1; Red de Formación Ambiental, PNUMA, México.
- 1995; De la economía ecológica al ecologismo popular; Nordan, Montevideo (primera edición en Barcelona, 1992, Icaria Editorial).
- McMAHON, George F. y MROZEK, JANUSZ R., Economics, entropy and sustainability; *Hydrological Sciences- Journal-des Sciences Hydrologiques*, 42 (4), agosto de 1997, pp. 501- 512.
- METCALF & EDDY, Inc, 1991; *Wastewater Engineering*, McGraw Hill Publishing Company.
- PALACIOS-VÉLEZ, Enrique, 1994; Water use efficiency in irrigation districts; en *Efficient Water Use*, pp.223-234, ed. por Unesco, Montevideo, Uruguay.
- PANIZZA, M. (Editor), 1996; *Environmental Geomorphology (Development in Earth Surface Processes, N°4)*, Elsevier Science Ltd.
- Planetary Engineering Group Earth, 2000; website; www.pege.org
- POSTEL, Sandra; 1992; *The Last Oasis*, W.W. Norton and Co.
- RIOJA, Enrique y HERRERA S., Teófilo, 1851; *Ensayo Ecológico Sobre el Limnobia de Lerma y sus Alrededores*, *Anales del Instituto de Biología, México*. XXII. 2. 1951: 564 -590.
- RODRÍGUEZ A. S., and AVILA-PÉREZ P., 1997; Stock of immobilized metals in Jose Antonio Alzate dam mud sediment samples in the State of México, México. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 221, Nos. 1-2: 231-234.
- RUDOLPH, D.L., HERRERA, I. Y YATES, R., 1989; Groundwater flow and solute transport of the Texcoco saline aquifer system near Mexico City; *Geofísica Internacional*, Vol 28-2, 1989, pp.363-408.
- SALINAS, G., 1998; Impacto del riego con aguas residuales en las aguas subterráneas del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Memorias de la Primera Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra*. México. pp:172.
- SANTOS, E.; SIEBE, C.; CIFUENTES, C. y SALGADO I. (1998) Coeficientes de transferencia de metales pesados de los suelos a los principales cultivos del Distrito de Riego 03, Tula, Hidalgo. *Memorias de la Primera Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra*. México. pp:174.
- SAVIC, D.A. y WALTERS, G.A., 1997; Evolving sustainable water networks, *Hydrological Sciences- Journal des Sciences Hydrologiques*, 42 (4), Agosto de 1997, pp. 547-564.
- Secretaría de Salud, Subsecretaría de Regulación y Fomento Sanitario, Dirección General de Salud Ambiental, 1994; Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994; Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano- límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Publicación de 1996.
- SEMARNAP Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, (1995). «Programa Hidráulico 1995-2000». Gobierno de la Federación. México.
- SIEBE, C. y CIFUENTES, E., 1993. Environmental impact of

- wastewater irrigation in Central Mexico, an overview. *Inter. J. of Environmental Health Research*, 3(4): pp 28 pp.
- SODDY, Frederick, 1926; *Wealth, virtual wealth and debt*; reimpresso por Omni Publications, Hawthorne, California, 1961.
- SOLÍS MORELOS, C., 1990; *Plantas compactas potabilizadoras accionadas con cargas hidráulicas*. Reporte Técnico final, UAEM, CONACYT, México.
- TATE, Donald M., 1994; *Principles of water use efficiency*; en *Efficient Water Use*, pp.41-60, ed. por Unesco, Montevideo, Uruguay.
- THIBIDEAUX, Y.J., 1996; *Environmental chemodynamics*. Second edition, Wiley Interscience, New York. pp. 200-216.
- TRIPower SYSTEMS, L.L.C., 1997; *Advanced power and desalination of sea water with conventional power plant technology*; trabajo presentado en la American Power Conference en Houston, Texas, 1997 Annual Meeting, Chicago, Illinois, www.tripowersystems.com
- UNESCO- ROSTLAC, 1986; *Agua, vida y desarrollo*; ed. UNESCO- ROSTLAC, tres tomos, Montevideo, Uruguay.

